

**Мельников В.Э.**

# **Современная пиротехника**

**Москва**

**2014**

УДК 662.1  
ББК 35.63  
М48

**Мельников В.Э.**  
М48 Современная пиротехника. – М.: 2014, 480 с.

ISBN 978-5-905999-25-3

*Рецензенты:* д-р техн. наук В.Н. Лашков;  
канд. хим. наук В.Б. Забродин.

**Мельников Владислав Эдуардович**  
**СОВРЕМЕННАЯ ПИРОТЕХНИКА**

Издано в авторской редакции при финансовой поддержке  
Кузнецова Андрея Владимировича.  
Научный редактор Свидинский А.В.  
Иллюстрации и верстка Мельников В.Э.  
Дизайн обложки Мельников В.Э., Измайлов А.Н.  
Корректор Киселева Л.Н.

Монография посвящена вопросам создания и использования пиротехнических составов и изделий. В систематизированном виде и доступной форме изложены основные понятия, касающиеся пиротехники. Рассмотрены основные аспекты развития и современного состояния этой области научных знаний. Представлен обзор с описанием около 2000 пиротехнических составов. Приведен краткий справочник химических веществ, используемых в пиротехнике. Даны общие рекомендации по подбору компонентов и расчету пиротехнических составов.

Для специалистов в области пиротехники, студентов, аспирантов, работников пиротехнических фирм и правоохранительных структур, а также тех, кому интересна эта область знаний. Книга может быть использована в качестве учебного пособия.

Табл. 207. Ил. 60. Библиогр.: 945 назв.

ISBN 978-5-905999-25-3

© Мельников В.Э., 2014

<b>Предисловие .....</b>	<b>6</b>
<b>Глава 1. Базовые сведения о пиротехнике и пиротехнических составах .....</b>	<b>8</b>
1.1. Пиротехника и пиротехнические составы. Основные положения .....	8
1.2. Горение и воспламенение пиротехнических составов .....	14
1.3. Краткая история эволюции пиротехнических составов .....	20
1.4. Техника безопасности при работе с пиротехническими составами и изделиями .....	26
1.5. Проблемы в правовой сфере, связанные с изготовлением и применением пиротехники .....	34
<b>Глава 2. Компоненты пиротехнических составов .....</b>	<b>44</b>
2.1. Окислители .....	44
2.2. Горючие .....	59
2.3. Связующие (цементаторы) .....	75
2.4. Пластификаторы .....	83
2.5. Соединения, окрашивающие пламя .....	84
2.6. Хлорсодержащие соединения .....	88
2.7. Красители .....	92
2.8. Прочие компоненты .....	97
<b>Глава 3. Свойства и технология пиротехнических составов .....</b>	<b>104</b>
3.1. Механизмы воспламенения и горения пиротехнических составов .....	104
3.2. Основные характеристики пиротехнических составов .....	113
3.3. Совместимость компонентов пиротехнических составов .....	121
3.4. Принципы построения и расчет пиротехнических составов .....	124
3.5. Предварительная подготовка компонентов. Технология изготовления пиротехнических составов .....	138
<b>Глава 4. Составы первичного воспламенения .....</b>	<b>145</b>
4.1. Ударные и накольные составы .....	145
4.2. Терочные составы .....	158
4.3. Электровоспламенительные составы .....	166
<b>Глава 5. Воспламенительные составы .....</b>	<b>174</b>
5.1. ВС для малогазовых составов .....	175
5.2. ВС для термитных составов .....	176
5.3. ВС для газогенерирующих составов .....	177
5.4. ВС для сигнальных и осветительных составов .....	178
5.5. ВС для трассирующих составов .....	179
5.6. ВС для фейерверочных составов .....	181
5.7. ВС для порохов и твердых ракетных топлив .....	183
5.8. Универсальные ВС .....	184

<b>Глава 6. Замедлительные составы</b> .....	189
6.1. Замедлительные составы, выделяющие при сгорании газы .....	195
6.2. Малогазовые составы, обеспечивающие миллисекундную задержку.....	197
6.3. Малогазовые составы, обеспечивающие задержку в единицы секунд.....	198
6.4. Малогазовые составы, обеспечивающие задержку в десятки секунд .....	204
<b>Глава 7. Зажигательные составы</b> .....	210
7.1. Термиты и термитно-зажигательные смеси.....	220
7.2. Композиции для снаряжения зажигательных пуль и снарядов малого калибра .....	222
7.3. Жидкие загущенные огнесмеси.....	226
7.4. Пирогели .....	227
7.5. Самовоспламеняющиеся вещества и окислители, инициирующие самовоспламенение .....	228
<b>Глава 8. Реакционные материалы</b> .....	232
<b>Глава 9. Теплогенерирующие составы</b> .....	238
9.1. Составы для сварки и пайки металлов в полевых условиях.....	238
9.2. Составы для резки металлов.....	243
9.3. Составы для разогревания пищи в полевых условиях .....	245
9.4. Составы для разогревания электролита в электрических батареях .....	245
9.5. Теплогенерирующие составы для снаряжения элементов пироматериалов .....	248
9.6. Прочие теплогенерирующие составы .....	248
<b>Глава 10. Системы самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС)</b> .....	251
<b>Глава 11. Газогенерирующие составы</b> .....	257
11.1. Дымный (черный) порох.....	257
11.2. Составы для вышибных зарядов и разрывных изделий в гражданской пиротехнике .....	266
11.3. Составы для снаряжения элементов импульсной пироматериалов и пиропатронов.....	267
11.4. Газогенерирующие составы для наддува подушек безопасности и топливных баков .....	271
11.5. Составы для генерирования чистых газов .....	277
11.6. Пиротехнические ракетные топлива .....	279
11.7. Топлива специального назначения .....	281
<b>Глава 12. Составы маскирующих дымов</b> .....	292
12.1. Малотоксичные дымовые составы термовозгонного типа .....	297
12.2. Дымовые составы металлохлоридные .....	300
12.3. Дымовые составы для маскировки в инфракрасном диапазоне .....	306
12.4. Дымовые составы на основе фосфора .....	308
12.5. Жидкие дымообразующие вещества.....	311

<b>Глава 13. Составы сигнальных дымов .....</b>	<b>315</b>
13.1. Составы цветного дыма на основе органических красителей .....	320
13.2. Составы цветного дыма на основе неорганических пигментов .....	331
13.3. Составы цветного дыма мгновенной возгонки для целеуказания .....	332
<b>Глава 14. Аэрозольгенерирующие составы .....</b>	<b>335</b>
14.1. Составы раздражающих и отравляющих дымов .....	335
14.2. Составы для борьбы с вредными насекомыми и микроорганизмами .....	341
14.3. Составы для воздействия на погодные условия .....	343
14.4. Аэрозольгенерирующие составы для тушения пожаров .....	346
<b>Глава 15. Осветительные составы .....</b>	<b>351</b>
15.1. Пламенные осветительные составы .....	351
15.2. Составы для высотного фотографирования (фотоосветительные смеси) .....	361
<b>Глава 16. Составы инфракрасного излучения .....</b>	<b>366</b>
16.1. Составы для снаряжения инфракрасных мишеней-ловушек .....	366
16.2. Составы для инфракрасной подсветки местности .....	372
<b>Глава 17. Сигнальные составы огневые .....</b>	<b>374</b>
17.1. Составы красного огня .....	383
17.2. Составы зеленого огня .....	387
17.3. Составы синего (голубого) огня .....	390
17.4. Составы желтого огня .....	392
17.5. Составы белого огня .....	394
17.6. Составы на термопластичной, пластизольной и нитроцеллюлозной основе .....	395
<b>Глава 18. Трассирующие составы .....</b>	<b>402</b>
18.1. Огневые трассирующие составы .....	402
18.2. Инфракрасные трассирующие составы .....	410
18.3. Дымовые трассирующие составы .....	411
<b>Глава 19. Фейерверочные составы .....</b>	<b>413</b>
19.1. Цветопламенные составы непрерывного излучения .....	421
19.2. Составы периодического излучения .....	432
19.3. Искристо-пламенные и искристо-форсовые составы .....	437
19.4. Прочие пиротехнические эффекты развлекательного характера .....	453
19.5. Смеси для проведения огненных шоу и изготовления декоративных свечей .....	455
<b>Глава 20. Звуковые, светозвуковые и имитационные составы .....</b>	<b>459</b>
20.1. Светозвуковые составы .....	461
20.2. Свистящие составы .....	467
20.3. Имитационные композиции, применяемые для киносъемок и обучения персонала .....	468
<b>Предметный указатель .....</b>	<b>473</b>

## Предисловие

Решение написать эту книгу пришло автору после общения с «широко известными в узких кругах» профессиональными пиротехниками. Дело в том, что на данный момент не существует русскоязычной книги, обобщающей все практические аспекты современной пиротехнической науки.

Существует некоторое количество узкоспециализированных изданий, описывающих какие-то отдельные направления пиротехники, но не предназначенных для охвата ситуации в целом. Поэтому пиротехникам приходится иметь большую библиотеку статей, книг, журналов и по крупицам добывать из них необходимую информацию.

Известная книга А.А. Шидловского «Основы пиротехники», изданная 40 лет назад, до сих пор является эталоном в русскоязычной пиротехнической литературе. Однако техника движется вперед, создаются новые составы и изделия, появляются недоступные ранее химикаты. К сожалению, прикладные вопросы и перечисленные рецептуры из 4-го издания уже на момент выхода «Основ пиротехники» утратили свою актуальность, и книга, подобная этой, была бы очень даже кстати.

Теория пиротехники была в полной мере рассмотрена ранее, например, в том же «Шидловском». Элементы теории, безусловно, присутствуют и в этой книге, но им уделено ровно столько внимания, сколько понадобилось для понимания чисто прикладных задач.

Слово «современная» в названии этой книги отнюдь не означает, что в ней рассказано только о новейших достижениях и разработках в пиротехнической области, а лишь подчеркивает связь нового с достижениями прошлого.

Следует подчеркнуть, что вся информация в этой книге взята только из открытой литературы с использованием комплексного ее анализа, и никакая режимная информация в данном издании не раскрывается.

При анализе патентной литературы автор старался учитывать перспективность изобретений и отсекал не практичные и трудно реализуемые идеи.

К большому сожалению, в связи с последними проявлениями экстремизма в мире, профессия или увлечение пиротехникой зачастую ассоциируется с терроризмом, взрывами, болью, страданиями ни в чем не повинных людей и т.д.

Данная книга также ставит целью развеять эти и многие другие устоявшиеся негативные стереотипы. Строго говоря, пиротехника не имеет прямого отношения к взрывчатым веществам и взрывным устройствам. Более полутора столетий назад пиротехника выделилась в самостоятельную научную область знаний, к настоящему времени имеющую совсем немного общего с взрывчатыми веществами и взрывными устройствами. Поэтому называть человека, изготавливающего взрывчатые вещества, пиротехником совершенно неправильно.

С помощью подавляющего большинства пиротехнических составов и устройств невозможно или, по крайней мере, бессмысленно изготавливать взрывные устройства для поражения живой силы. Конечно, пиротехнические изделия

могут стать причиной несчастных случаев и увечий, и статистика это подтверждает. Но, как правило, в этих несчастных случаях виноваты сами незадачливые граждане – пользователи пиротехники, легкомысленно пренебрегающие техникой безопасности. Нет сомнений, что российским гражданам необходимо прививать культуру обращения с пиротехническими изделиями, а ограничение доступа к качественной информации будет приводить только к увеличению количества несчастных случаев.

Распространено и другое мнение, когда под пиротехникой подразумевают лишь изготовление фейерверочных изделий, проведение салютов и всего, что с ними связано. Пиротехника на самом деле является наукой более широкого плана и включает в себя не только создание гражданских пиротехнических изделий, но и военных, а также затрагивает такие области, как создание новых материалов, средств пожаротушения, средств борьбы с вредителями сельскохозяйственных культур и т.д.

Настоящая книга условно разделена на 2 части:

- в главах 1-3 даются базовые понятия, касающиеся пиротехники, представлен справочник по основным компонентам пиротехнических составов и отражены наиболее важные элементы теории;
- главы 4-20 носят прикладной справочный характер, описывают и классифицируют конкретные пиротехнические составы. В них приведено около 2000 пиротехнических композиций.

Автор выражает глубокую признательность Артему Свидинскому (старший научный сотрудник РФЯЦ ВНИИЭФ) и Александру Запара (праздничное агентство «Праздник с огнем») за плодотворную и конструктивную критику черновика этой книги, в результате чего первая рукопись была заново переработана.

Автор благодарит Кузнецова Андрея Владимировича за финансовую и организационную поддержку издания этой книги, администрацию Интернет-ресурса [www.pirrotehnika-ruhelp.com](http://www.pirrotehnika-ruhelp.com) за информационную поддержку, а также ряд других пиротехников и специалистов правоохранительных структур за их вклад в создание этой книги.

# **Глава 1. Базовые сведения о пиротехнике и пиротехнических составах**

## **1.1. Пиротехника и пиротехнические составы. Основные положения**

Слово «пиротехника» произошло от греческого «пирос» – огонь и «техне» – искусство. Пиротехника – это наука о свойствах пиротехнических составов, изделий из них, способах их изготовления и применения. При первом знакомстве с этой наукой создается впечатление, что пиротехника играет некоторую вспомогательную роль, обеспечивающую нормальное функционирование боеприпасов, ракет и т.п. изделий. Тем не менее она имеет и самостоятельное значение, например, в создании новых материалов, средств пожаротушения, фейерверков и т.д.

В общепризнанной литературе, где авторы специализируются на исследовании взрывчатых веществ (ВВ), пороха, твердые ракетные топлива и пиротехнические составы рассматриваются как особая разновидность взрывчатых веществ. Различие между ними строится по способности перехода горения в детонацию [1, 2], тогда как в литературе по военной пиротехнике пиротехнические составы выделены в самостоятельный класс смесей, к которым причисляются и твердые ракетные топлива [3]. Такая путаница связана с тем, что все указанные смеси могут как устойчиво сгорать, так и взрываться, в зависимости от отдельно взятых композиций, а также приведенных к ним воздействий.

Например, уже более 30 лет в странах НАТО используются так называемые «малочувствительные взрывчатые вещества», горение которых так же трудно переходит в детонацию, как и горение порохов. Большинство же пиротехнических составов вообще не способно к взрывному разложению в том виде, в котором они используются в изделиях.

Это обстоятельство привело к возникновению в 70-х годах новой классификации, где различие между указанными типами веществ лежит в областях применения, а не в способности перехода горения во взрыв.

Старая классификация все же сохранилась в некоторых сферах деятельности, например в криминалистике и в классификации опасных грузов, т.е. там, где определяющим фактором является способность вещества взрываться.

Итак, в современной специализированной литературе [4, 5] для большей ясности пиротехнические составы относят к так называемым энергонасыщенным материалам (ЭМ, энергетическим конденсированным системам) – индивидуальным веществам или смесям, способным разлагаться в самостоятельно поддерживаемом режиме с выделением значительного количества тепла.

**Все энергонасыщенные материалы разделяют на 5 основных типов:**

- **инициирующие взрывчатые вещества;**
- **бризантные взрывчатые вещества;**
- **пороха и твердые ракетные топлива;**
- **пиротехнические составы;**
- **специальные топлива.**

**Иницирующими взрывчатыми веществами (ИВВ)** называют вещества, которые легко детонируют или воспламеняются при ударе, трении или действии луча огня. Соответственно ИВВ применяются для инициирования детонации в зарядах более стабильных бризантных взрывчатых веществ либо в смесях для первичного воспламенения порохов, твердого ракетного топлива и пиротехнических составов.

**Примечание.**

*Детонация – это взрывчатое превращение, распространяющееся со скоростями 1,5-9,5 км/сек. В отличие от горения, механизм ее передачи не тепловой, а ударно-волновой.*

**Бризантными взрывчатыми веществами (БВВ)** называют индивидуальные вещества или смеси, в которых сравнительно трудно возбудить детонацию простейшими воздействиями типа удара или луча огня. Однако при действии детонационной волны, вызванном взрывом ИВВ, они устойчиво детонируют. При расширении сжатых продуктов детонации происходит взрыв. БВВ применяются в боеприпасах и при взрывных работах.

**Порохами и твердыми ракетными топливами** называют смеси веществ, способные к устойчивому горению в самом широком диапазоне давлений и условий, в которых обычные иницирующие и бризантные взрывчатые вещества будут сгорать неустойчиво или взрываться. Горение порохов в определенных условиях может переходить во взрыв, однако этот режим является совершенно недопустимым для их обычного применения. Поэтому составы порохов и конструкцию пороховых зарядов подбирают так, чтобы вероятность перехода горения во взрыв была сведена к минимуму. При сгорании порохов выделяются разогретые газы, которые совершают работу, т.е. сообщают боеприпасам (снарядам и ракетам) необходимую скорость полета к цели, поэтому их иногда называют метательными взрывчатыми веществами.

**Пиротехническими составами** называют смеси, сжигание которых направлено на достижение тепловых, световых, дымовых, реактивных и звуковых пиротехнических эффектов [3]. Успех создания требуемого эффекта зависит не только от пиротехнического состава, но и от конструкции изделия, в котором этот состав применяется. Однако если конструкции пиротехнических изделий принципиально не меняются на протяжении нескольких десятков лет, то пиротехнические составы претерпевают постоянную эволюцию. Пиротехнические составы представляют собой механическую смесь окислителя и горючего, а также небольшого количества вспомогательных компонентов. Об этих составах в данной книге и пойдет речь, хотя по мере необходимости будут затрагиваться некоторые аспекты, связанные с взрывчатыми веществами и порохами. Некоторые разновидности порохов широко используются в пиротехнике, как в самостоятельном виде, так и в модифицированном. Как и пороха, пиротехнические составы ориентированы на стабильное горение с минимальной вероятностью перехода горения во взрыв.

Тем не менее для имитации разрывов боеприпасов существуют специальные пиротехнические средства, в которых взрыв является штатным режимом горения. Взрывы таких пиротехнических средств предназначены только для визуальной и акустической имитации действия штатных боеприпасов и сопровождаются пониженным разрушительным действием (если они не содержат штатных ВВ) [10]. Свойства пиротехнических составов и других типов энергонасыщенных материалов могут быть охарактеризованы при помощи таблицы 1.1 [6, 7].

**Специальные топлива** – твердые или жидкие вещества, способные сгорать за счет внешнего подвода окислителя. Следует сразу оговориться, что в данном случае под топливом подразумеваются искусственно изготовленные смеси и материалы, используемые для снаряжения жидкостных ракет, прямоточных воздушно-реактивных двигателей (ПВРД), изготовления топливных брикетов и т.п. объектов. Термин «специальные» показывает некоторое смысловое отличие от «традиционных» видов топлив типа мазута, керосина или дизельного топлива. В силу специфики разработки, производства и схожести процессов горения с горением пиротехнических смесей, многие специальные топлива часто рассматриваются как пиротехнические составы, что нашло отражение в данной книге.

**Табл. 1.1. Свойства энергонасыщенных материалов**

Типы энергонасыщенных материалов	Теплота сгорания, Дж/г	Газообразные продукты, мл/г	Дробящий эффект, г*	Температура вспышки, °С	Восприимч. к удару, см. (груз 2 кг)
<b>Пиротехнические составы:</b>					
замедлительный состав 1	2010	13	0	650	-
замедлительный состав 2	2080	12	0	485	56
осветительный состав	6100	74	8	640	60
дымовой состав	2580	62	8	475	23
фотоосветительный состав	8990	15	7	700	100
<b>Иницирующие ВВ (ИВВ):</b>					
гремучая ртуть	1790	315	24	180	5
азид свинца	1550	308	15	300	10
<b>Бризантные ВВ (БВВ):</b>					
тротил	4190	730	48	475	100
гексоген	5450	908	60	260	32
<b>Пороха (Металельные ВВ):</b>					
дымный порох	2900	272	8	288	50
пироксилиновый порох	3350	900	-	180-200	60-80
баллистичный порох	5100	850	-	180-200	70-90
смесевое ракетное топливо	6700	600	-	до 300	40-90
<b>Специальные топлива:</b>					
гидрореагирующее топливо	12000**	2000**	-	-	-
топливо для ПВРД	33000**	-	-	-	-

\* – бризантность по песочной пробе;

\*\* – пусть читателя не вводят в заблуждение более высокие цифры, по сравнению с предыдущими типами ЭМ. Для сгорания специальных видов топлива необходим внешний подвод окислителя, тогда как другие типы ЭМ содержат окислительные элементы в своем составе.

Классифицировать разновидности пиротехнических составов можно следующим образом [8, 9]:

**Табл. 1.2. Классификация пиротехнических составов**

Эффект	Тип составов
тепловой	составы первичного воспламенения (ударные, наконьные, терочные, электровоспламенительные), воспламенительные составы, замедлительные и зажигательные составы, реакционные материалы, теплогенерирующие смеси, составы для резки и сварки металлов
образование газов и синтез материалов	системы самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС), газогенерирующие составы
образование дыма (аэрозоля)	дымовые маскирующие, дымовые сигнальные, аэрозольгенерирующие составы
световой	осветительные, инфракрасные, сигнальные, трассирующие, фейерверочные
звуковой	звуковые, светозвуковые, свистящие и имитационные составы

Безусловно, такая классификация носит формальный характер, указывающий лишь на основную область применения данного состава, потому что сгорание любой пиротехнической смеси сопровождается сразу несколькими эффектами, из которых выделяется один или два доминирующих.

Для начального представления о многообразии пиротехнических смесей следует привести их краткое описание.

#### **Составы для создания теплового эффекта**

- *Ударные, наконьные, терочные и электровоспламенительные составы* – служат для первичного воспламенения пиротехнических смесей, порохов, ВВ, инициируемого механическим воздействием (ударом или трением) либо первичным нагревом, вызванным подачей электрического тока. Ударные и наконьные композиции обычно содержат инициирующие взрывчатые вещества и очень чувствительны к удару. Иногда их даже называют смесевыми инициирующими взрывчатыми веществами. Терочные композиции близки к составам намазок для спичечных головок, воспламеняются за счет трения между специальной теркой и самим составом. Электровоспламенительные составы являются разновидностью самых теплочувствительных воспламенительных смесей.
- *Воспламенительные составы* – служат для воспламенения всех остальных пиротехнических составов. Их необходимость существования связана с тем, что многие пиротехнические составы не способны надежно воспламениться от таких первичных источников огня, как капсюль-воспламенитель, огнепроводный шнур, спички и т.д.
- *Замедлительные составы* – смеси для снаряжения пиротехнических устройств, обеспечивающих заданную временную задержку взрыва, срабатывания пиропатронов, ракетных двигателей и т.п. Простейшими такими устройствами можно считать огнепроводный шнур и запалы для гранат. Их

особенностью является способность сохранять постоянную скорость горения независимо от внешних условий.

- *Зажигательные* – составы, служащие для создания очагов пожаров как поражающего фактора. Интересно отметить, что по статистике Второй мировой войны, их массовая эффективность как средства поражения материальных объектов превосходила эффективность обычных боеприпасов, снаряженных взрывчатыми веществами, приблизительно в 5 раз. К примеру, расход зажигательных боеприпасов, примененных союзниками во время войны против Германии, был эквивалентен расходу обычных боеприпасов, а 99% всех авиабомб, сброшенных США на японские города, были зажигательными [6].
- *Реакционные материалы* – конструкционные материалы, обладающие свойствами пиротехнических смесей. Из них изготавливают конструктивные элементы боеприпасов с целью усиления их поражающего действия, выражающегося в повышении заброневого эффекта. Этот эффект, как правило, носит зажигательный, реже – фугасный или термобарический характер.
- *Теплогенерирующие составы* – смеси, сгорание которых направлено на выделение строго дозированного количества тепла. Применяются в термических активаторах специальных электрических батарей, приводимых в действие повышением температуры, для полевого разогрева пищи и т.д. К ним также относят термитные составы для резки и сварки металлов – композиции, сгорающие с выделением большого количества тепла и применяемые для сварки и резки материалов в сложных условиях, например при ремонте рельсов и электрических проводов.

### **Составы для образования газов и синтеза материалов**

- *Системы самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС)* – специальные пиротехнические смеси для получения особо твердых и тугоплавких материалов (например, карбида титана), образующихся в процессе сгорания. Метод СВС характеризуется очень простой технологией, малым временем синтеза и не требует сложного и дорогостоящего оборудования, используемого при традиционном получении таких материалов путем спекания.
- *Газогенерирующие составы (ГГС)* – смеси с регламентированным газовыделением, предназначенные для наддува различных средств типа автомобильных подушек безопасности, спасательных жилетов и т.п., выталкивания пиротехнических элементов (вышибные составы), для снаряжения различных пиромеханических устройств, в качестве твердого ракетного топлива для пиротехнических и модельных ракет. Ряд газогенерирующих составов используют в качестве специальных топлив для раскрутки турбин, образования активной среды для лазеров, низкотемпературной плазмы и т.д. Газогенерирующие составы имеют много общего с порохами и ракетными топливами, более того, для этих целей часто используют штатные или модифицированные бездымные, а также дымные пороха.

К газогенерирующим составам также относят смеси, при сгорании которых выделяется какой-то определенный газ для технических нужд, например кислород, используемый для дыхания на подводных лодках, космических кораблях и т.д.

### **Дымовые и аэрозольгенерирующие составы**

- *Дымовые маскирующие* – составы для создания дымовых завес с целью сокрытия действий войск в боевой обстановке, для противодействия управляемому и высокоточному оружию, для ослепления войск противника.
  - *Дымовые сигнальные* – составы цветного дыма для подачи сигналов днем, указания местоположения боевых точек противника, проведения дневных пиротехнических шоу и т.д.
  - *Аэрозольгенерирующие* – составы, предназначенные для приведения в аэрозольное состояние ядохимикатов в целях борьбы с вредными насекомыми и грибами. Раздражающие составы переводят в аэрозоль раздражающие и слезоточивые вещества для разгона демонстраций или затруднения действий войск противника. Пиротехнические смеси для воздействия на погодные условия выделяют при своем сгорании аэрозоль, активно взаимодействующий с верхними слоями атмосферы и вызывающий выпадение осадков.
- Аэрозольгенерирующие составы для тушения пожаров – смеси, выделяющие при своем сгорании негорючие газы и аэрозоль, способный подавлять очаги пожара за счет блокировки цепных реакций в пламени. Используются в автоматических средствах пожаротушения.

### **Составы для создания световых эффектов**

- *Осветительные* – составы для более или менее кратковременного освещения участков местности в тех условиях, когда освещение обычными средствами не представляется возможным, например, в условиях ночных боевых действий.
- *Инфракрасного (ИК) излучения* – составы, основное излучение которых приходится на ИК-область спектра при сравнительно низкой интенсивности излучения в видимом спектре. Используются совместно с ИК средствами наблюдения при ведении ночных боевых действий, а также для создания ложных тепловых целей при противодействии управляемому и высокоточному оружию с ИК-системами наведения.
- *Сигнальные* – составы, сгорающие ярким окрашенным пламенем и используемые для подачи визуальных сигналов в военном деле, на транспорте и при спасательных операциях.
- *Трассирующие* – составы, сгорающие ярким окрашенным пламенем, предназначенные для визуального наблюдения и корректировки траектории полета снарядов, пуль и ракет. Их запрессовывают в донную часть боеприпаса, и при сгорании они образуют яркую трассу. Существуют также ИК трассирующие составы, предназначенные для использования совместно с ИК средствами наблюдения.

- *Фейерверочные* – составы, предназначенные для создания красочных визуальных и акустических эффектов при проведении салютов и фейерверков.

### **Составы для создания звуковых эффектов**

- *Звуковые, светозвуковые и имитационные составы* – пиротехнические смеси, сгорающие с очень высокой скоростью, но в отличие от взрывчатых веществ их взрывчатое превращение происходит в режиме быстрого горения, а не детонации, поэтому разрушительный эффект у подобных смесей значительно ниже. Разрыв пиротехнического изделия, начиненного таким составом, сопровождается вспышкой, громким звуком и образованием дыма. Имитируют разрывы боеприпасов на военных учениях и используются для создания светозвуковых эффектов. Кроме того, подобные смеси также используются в гражданских пиротехнических изделиях для создания эффектов треска и разрыва (петарды), а также для создания пиротехнических эффектов в кино.
- *Свистящие составы* – смеси, горение которых в трубчатых корпусах сопровождается громким свистом. Используются как для имитации полета снарядов и психологического воздействия на противника, так и в фейерверочных шоу.

## **1.2. Горение и воспламенение пиротехнических составов**

Все пиротехнические эффекты являются следствием процесса горения.

Эффекты, создаваемые при помощи пиротехнических изделий можно получить другими техническими и химическими способами. Так, например, освещение местности можно осуществить при помощи мощных прожекторов, создание аэрозолей возможно при помощи специальных распылительных машин, акустические эффекты треска легко создаются пневматическими устройствами. Однако все эти способы, как правило, лишены одновременного сочетания таких свойств, как автономность, простота в эксплуатации, надежность и сравнительно небольшие габариты, присущие пиротехническим изделиям.

Как было сказано ранее, пиротехнические смеси состоят из окислителя и горючего. Вообще, у людей, мало знакомых с химией, бытует мнение, что без кислорода горение невозможно. Кислород является одним из самых сильных окислителей и поэтому поддерживает горение. Но в действительности окислителями могут быть и другие элементы, как-то: фтор, сера, селен, их соединения и др. Например, известен такой факт, что струя воды в атмосфере фтора способна сгорать пламенем синего цвета с выделением кислорода. И если реакция горения – это не что иное, как окислительно-восстановительная реакция, то ее можно записать как обычное химическое уравнение:



Фтор является более активным окислителем, чем кислород, и по отношению к нему вода уже является горючим (восстановителем).

Аналогичный пример – горение серы в кислороде:



Кислород является более активным окислителем, чем сера, и по отношению к кислороду сера является восстановителем (горючим). В пиротехнике сера обычно применяется в качестве горючего компонента.

Однако активные металлы, например алюминий, способны энергично сгорать в смеси с серой:



По отношению к алюминию сера является окислителем.

В нормальном состоянии кислород – это газ. Обычно в пиротехнике используются твердые окислители, содержащие кислород в связанном состоянии и высвобождающие его при нагревании. Такими окислителями могут быть соли азотной и хлорной кислот, оксиды малоактивных металлов, неорганические пероксиды и т.д. Например, при нагревании типичного окислителя – бертолетовой соли – кислород выделяется по схеме:



Горючие в пиротехнике отличаются от горючих, с которыми мы привыкли иметь дело в быту. Например, на воздухе порошок железа можно только лишь раскалить, тогда как в смеси с окислителем типа перхлората калия порошок железа активно сгорает. Свойства многих горючих компонентов могут кардинально изменяться в зависимости от того, насколько сильно они измельчены и насколько тесен их контакт с окислителем. Например, компактный цирконий чрезвычайно устойчив к окислению, из него даже изготавливают электроды для плазмотронов, устойчивые к окислительной среде. Однако тонкие порошки циркония могут самовоспламеняться на воздухе, поэтому их хранят в воде. Мелкодисперсные порошки металлов, склонные к самопроизвольному воспламенению на воздухе называют пирофорными. Пирофорность характерна даже для таких малоактивных в обычном состоянии металлов, как свинец.

В некоторых веществах горючие и окислительные элементы находятся в одной молекуле (нитроцеллюлоза, нитрат гуанидина и т.д.). Как правило, такие вещества в определенных условиях обладают взрывчатыми свойствами.

Горение типичного представителя пиротехнических горючих – сажи – в кислороде можно записать как:



Чтобы запустить реакцию между окислителем и горючим, нужно создать определенные условия для поддержания устойчивого горения. Очевидно, что соотношение между окислителем и горючим и их степень измельчения будут одними из основных факторов, определяющих способность смеси к горению. Если окислителя или горючего будет слишком много, то выделяющееся тепло будет тратиться на его разложение и смесь станет не способной к горению. С точки зрения максимального энерговыделения обычно оптимальным является соотношение компонентов, в котором горючие компоненты будут полностью окислены кислородом

окислителя. Это соотношение называется стехиометрическим. Например, для пиротехнической смеси бертолетовой соли и сажки стехиометрическое уравнение сгорания можно записать, комбинируя реакцию 4 и 5:



Соответственно, из простейших расчетов школьного уровня химии можно определить требуемое соотношение компонентов:  $2 \cdot 122,5 : 3 \cdot 12$  ( $M(\text{KClO}_3) \approx 122,5$  г/моль,  $M(\text{C}) = 12$  г/моль). Из чего оптимальное соотношение с точки зрения максимального энерговыделения будет соответствовать 87,2% хлората калия и 12,8% сажки.

#### **Примечание.**

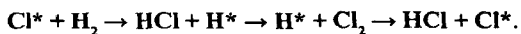
*Не всегда достижению максимальной температуры соответствует максимальное энерговыделение и стехиометрическое соотношение компонентов. Например, для газовой резки тугоплавких материалов иногда используют смесь дициана  $\text{C}_2\text{N}_2$  с кислородом. Температура горения дициана с кислородом, взятых в стехиометрическом соотношении, равна  $3500^\circ\text{C}$ . Если же баланс рассчитан на недостаток кислорода (вместо  $\text{CO}_2$  образуется  $\text{CO}$ ), то температура горения достигает  $4800^\circ\text{C}$ . Такая разница объясняется тем фактом, что при высоких температурах (на практике выше  $3000^\circ\text{C}$ ) резко увеличиваются потери на диссоциацию молекул  $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$ .*

Для устойчивого режима горения необходимо поддержание в зоне реакции определенной температуры, в противном случае время реакции резко увеличивается, а интенсивный теплообмен зоны реакции с окружающей средой ведет к дальнейшему охлаждению и затуханию. Конкуренция между теплоотводом и химическим энерговыделением приводит к существованию минимального количества состава, которое нужно «подогреть», чтобы процесс стал самоподдерживающимся, и, соответственно, минимальной энергии, необходимой для этого разогрева. Эту энергию можно обозначить как «энергия инициирования». Величина энергии инициирования зависит от состава пиротехнической смеси, она является неким «потенциальным барьером», ниже которого горение затухает. «Борьба» с тепловыми потерями приводит к тому, что для устойчивого горения энергосодержание состава должно в несколько раз превосходить тепло, требуемое для нагрева до температуры воспламенения.

Поглощение энергии окружающей средой определяется масштабным фактором, т.е. зависит от линейных размеров горящей зоны. Существованию масштабного фактора пиротехнические составы обязаны, например, прекращению горения смеси, если диаметр заряда сгорающей композиции становится меньше определенной величины. В этом случае доля энергии, поглощаемой окружающей средой (воздухом или стенками трубки, куда запрессован состав), становится настолько большой, что выделяющегося тепла уже недостаточно для поддержания самораспространяющегося процесса. Противоположным эффектом является свободный переход горения в тепловой взрыв, когда при больших диаметрах заряда концен-

трация энергии становится настолько значительной, что спокойное горение переходит в более быстрый, конвективный процесс, а при дальнейшем увеличении диаметра – даже во взрыв. Безусловно, все эти процессы имеют ту или иную зависимость от размеров частиц в смеси, ее плотности, начальной температуры и т.п. условий.

Начальный процесс, когда при подводе энергии извне пиротехническая смесь начинает сгорать в самоподдерживающемся режиме, называют воспламенением. Эта энергия не обязательно должна подводиться в виде тепла, хотя при классическом воспламенении пиротехники это, как правило, тепло или луч огня. Так, например, смесь газа хлора с водородом при смешивании в темноте может храниться в неизменном виде довольно долго. Но стоит на эту смесь воздействовать вспышкой от обычного фотоаппарата, как незамедлительно происходит взрыв. Это объясняется переходом отдельных молекул хлора под воздействием кванта света в активное атомарное состояние:  $\text{Cl}_2 + h\nu \rightarrow 2\text{Cl}^*$ , которое инициирует химические превращения по цепному механизму:



Процесс воспламенения некоторых конденсированных веществ по цепному механизму тоже представляет собой запуск промежуточных реакций, только на порядок более сложных и короткоживущих. Схожесть его с вышеописанным взрывом хлороводородной смеси заключается в возникновении активных частиц, возбужденных атомов и радикалов, инициирующих дальнейшую цепь химических превращений. На появление этих активных частиц в количестве, достаточном для возникновения самоподдерживающегося процесса, как раз и уходит энергия инициирования.

Сильная зависимость скорости реакции от температуры и значительный тепловой эффект горения многих пиротехнических составов приводит к прогрессивному накоплению тепла в случае нагревания всего объема навески материала. Если тепловыделение больше теплоотвода, то температура навески состава быстро повышается и происходит самовоспламенение (вспышка или тепловой взрыв). Такой механизм воспламенения наиболее изучен и носит название «теплого воспламенения». В первом приближении тепловое воспламенение при равномерном распределении температуры в объеме навески описывается теорией Н.Н. Семенова. Если теплообмен осуществляется лишь посредством теплопроводности, критическое условие самовоспламенения описывается критерием Франк-Каменецкого. Краткое описание выдержек из теории воспламенения приведено в [35] (статья В.В. Барзыкина «Воспламенение»).

Некоторые вещества способны воспламеняться уже при смешивании, например, достаточно поместить каплю глицерина на небольшую навеску перманганата калия, как через несколько секунд произойдет самовоспламенение. Если же вместо глицерина взять диметилсульфоксид (ДМСО), то вспышка происходит почти мгновенно. Склонность к самовоспламенению объясняется тем, что энергия инициирования смеси настолько мала, что обычной температуры уже достаточно для самопроизвольного воспламенения этой композиции. Способность к самовоспла-

менению некоторых веществ или смесей иногда используется на практике. Например, для инициирования воспламенения состава в американском светодымящем бое применяют композицию из 51,2% перекиси натрия, 32,3% ферросилиция и 16,1% алюминия, самовоспламеняющуюся при контакте с водой [6]. Раньше были широко распространены химические воспламенители и замедлительные устройства, основанные на реакции между серной кислотой и смесью сахара с бертолевой солью.

В реальных изделиях воспламенение осуществляют не прогревом всей массы заряда пиротехнического состава (т.к. это неизбежно привело бы к тепловому взрыву), а воздействием высокотемпературного источника на какую-либо поверхность заряда. В результате чего происходит сначала прогрев этой поверхности на определенную толщину, а затем «срыв температуры», т.е. прогрессивный саморазогрев прогретого слоя. Этот процесс называется «зажиганием», а распространение горящего фронта перпендикулярно поверхности воспламенения – послойным горением.

В широком смысле **горение** – это физико-химический процесс, сопровождающийся интенсивным выделением энергии, а также тепло- и массообменом с окружающей средой. И чтобы запустить этот процесс, нужно определенное сочетание факторов.

Под это определение подпадают и другие процессы – **детонация** и **дефлаграция** (взрывное горение). Различия между ними видны из таблицы 1.3 [34].

**Табл. 1.3. Различия между процессами горения, дефлаграции и детонации энергонасыщенных материалов**

Параметры	Горение	Дефлаграция	Детонация
скорость распространения, м/сек	$10^3 - 10$	10 - 2000	1500 - 9500
скорость относительно скорости звука в веществе	значительно ниже	ниже или выше	выше
время реакции, сек.	$1 - 10^{-3}$	$10^{-2} - 10^{-4}$	$10^{-6} - 10^{-9}$
температура реакции, °C	300 - 3500	1500 - 4000	2000 - 4000
давление при реакции, атм.	$0 - 5 \cdot 10^3$	$1(10) - 10^4$	$10^4 - 5 \cdot 10^5$
механизм распространения	теплопередача, диффузия	теплопередача, диффузия, конвекция	ударно-волновой

- **Горение** – процесс теплового превращения, в котором передача тепла и распространение реакции осуществляется послойно, от слоя прореагировавшего вещества к непрореагировавшему. Примером послойного горения является сгорание малопористых зарядов твердых ракетных топлив, спрессованных таблеток пиротехнических составов, горение спичечной головки и т.д. Послойно гореть могут и бризантные взрывчатые вещества. Верхний предел температур в процессах горения определяется энерговыделением состава и свойствами продуктов реакций. При 2000-3000°C идет разложение и испарение конденсированных и диссоциация газообразных продуктов, на что затрачивается значительная доля энергии реакции, поэтому наиболее высо-

кие температуры получаются для составов, при горении которых образуются термостабильные продукты. Рост давления подавляет испарение и диссоциацию, что приводит к повышению температуры. Нижний предел температур при горении обусловлен скоростью процесса и потерями на теплопроводность. Для устойчивости процесса температура горения должна превышать температуру воспламенения (обычно не менее чем в 1,5-2 раза). На практике порог воспламенения, при котором состав может храниться, составляет  $\sim 120^\circ\text{C}$ ; отсюда получается, что температура горения не может быть ниже  $\sim 300^\circ\text{C}$ . Существуют самораспространяющиеся реакции с температурой воспламенения порядка  $50\text{-}100^\circ\text{C}$  и развивающие температуру  $\sim 200^\circ\text{C}$ , однако такие составы не могут храниться долго и склонны к самовоспламенению. Пример – некогда популярная у школьников смесь анальгина с гидроперитом. Для некоторых составов может существовать нижний порог давления, ниже которого они не горят, другие стабильно горят в условиях вакуума. Верхний порог  $10000\text{ атм}$  – величина условная, связанная с невозможностью обеспечить на практике более прочную оболочку ( $5000\text{-}10000\text{ атм}$  – предел текучести большинства марок стали). Для многих составов послойное горение уже при значительно меньших давлениях переходит в дефлаграцию.

- *Детонация* – штатный режим взрывного превращения бризантных взрывчатых веществ, протекающий со скоростями выше скорости звука в данном веществе. В установившемся режиме детонации вещество инициируется ударной волной, а высокая скорость реакции с выделением газов и энергии эту волну подпитывает. Скорость ударной волны выше скорости звука, что обеспечивает независимость параметров детонации от окружающей среды (возмущения попросту не успевают ее «догнать»). Для поддержания детонации требуется высокий уровень давления, который можно оценить как  $P = \rho \cdot D^2 / (\gamma + 1)$ , где  $\rho$  – плотность,  $D$  – скорость детонации,  $\gamma$  – показатель адиабаты, равный для конденсированных веществ  $\sim 3$ .

Поскольку за фронтом детонационной волны давление быстро падает, для ее поддержания требуется чрезвычайно высокая скорость реакции, а это, в свою очередь, выдвигает требование к температуре – ниже  $1500\text{-}2000^\circ\text{C}$  время реакции становится слишком велико. Например, при времени  $10\text{ мкс}$  диаметр заряда должен составлять уже сотни мм. В то же время высокое давление подавляет процессы испарения и диссоциации продуктов взрыва, поэтому развиваемая при детонации температура заметно выше, чем при горении и дефлаграции тех же составов. Для большинства промышленных и многих ВВ военного назначения реакция может идти в несколько стадий, в этом случае параметры детонации определяются самой быстрой, а более медленные стадии слабо на нее влияют. Такой режим называют «неидеальной» детонацией, а для смесевых ВВ, когда быстро реагирует только один из компонентов, – «селективной». При высокой доле медленных реакций детонация приобретает черты дефлаграции.

- *Дефлаграция* – процесс распространения взрывного превращения за счет конвективного горения. При этом нагретые продукты сгорания проникают в негоревшее вещество, обеспечивая высокую скорость фронта горения. Величина давления газообразных продуктов реакции, необходимого для такого режима, определяется прочностью и структурой состава – чем ниже пористость и больше прочность, тем труднее создать условия для дефлаграции. После возникновения таких условиях реакция идет с разгоном и для некоторых составов может перейти в детонацию. Максимальное давление обычно определяется прочностью оболочки, и в отличие от детонации, дефлаграция не способна передаваться через слой вещества, разделенный тонкой прочной перегородкой. Время реакции ограничено оттоком газов из оболочки и может быть значительно выше, чем при детонации. Примером дефлаграции является горение пористых и дисперсных систем в закрытом объеме – например, пороховой мякоти в картонной гильзе, светозвукового пиротехнического состава, взрывы в шпурах некоторых промышленных ВВ, переход горения в детонацию в капсулах-детонаторах. В некоторых случаях дефлаграция после стадии разгона выходит на высокую, но постоянную скорость, при этом трудно провести границу между дефлаграцией и быстрым горением. Иногда процесс является одновременно и дефлаграцией, и послойным горением, например, сгорание пороха при выстреле. Распространение продуктов сгорания между гранул пороха является дефлаграцией, а горение самих гранул носит послойный характер.

Таким образом, в зависимости от условий (оболочки, плотности, дисперсности), горение некоторых энергонасыщенных материалов может переходить в дефлаграцию, а при благоприятных условиях – в детонацию. Для одних типов материалов этот переход осуществляется легче, для других – труднее, для некоторых он невозможен в принципе.

Большинство пиротехнических составов в штатном режиме детонировать не способны, но для некоторых композиций, при изменении условий, детонация возможна. Например, газогенерирующий состав на основе нитрата аммония в виде монолитного заряда не чувствителен к детонации, однако в тонко измельченном и слабоуплотненном состоянии превращается в ВВ. Дымный порох в виде сильно спрессованной шашки спокойно сгорает в модельных ракетных двигателях, тогда как в виде порошка (пороховой мякоти) дефлагрирует с громким звуком и разрывом корпуса.

### **1.3. Краткая история эволюции пиротехнических составов**

Когда даны основные понятия и читатель оказывается в курсе, о чем идет речь, следует ввести небольшой экскурс в историю пиротехники, потому что хотя бы поверхностное знание истории этой прикладной науки позволяет понять, почему одни компоненты используются и поныне, а другие заслуженно (или незаслуженно) забыты, а также куда следует двигаться в разработке новых, более эффективных смесей.

Итак, история пиротехники, как впрочем и история всех энергонасыщенных материалов, тесно связана с историей дымного пороха (смеси калийной селитры, серы и угля), ведь на протяжении веков пиротехнические составы представляли собой всего лишь разные вариации составов на основе пороха [6, 10, 12, 13].

Первые смеси, имеющие непосредственное отношение к пиротехнике, появились еще до нашей эры в Китае или Индии. В индийских сказаниях, датированных около 2000 лет до н.э., упомянуто использование дымовых и зажигательных композиций для военных и религиозных целей. В рукописях, сохранившихся после похода Александра Македонского (365-323 г. до н.э.), описываются зажигательные стрелы, извергающиеся со стен осажденного города Лахор (находился на территории современного Пакистана), возможно, это было первым документированным упоминанием о военной пиротехнике. Использование огненных шоу в увеселительных целях датировано эпохой императора Августа (27 г. до н.э. – 14 г. н.э.). А первой по-настоящему успешной пиротехнической смесью следует признать «греческий огонь», состоящий из смеси серы, смол, нефти, а также других горючих веществ и использовавшийся как зажигательное средство в морских сражениях. Впервые «греческий огонь» был применен греками в 7 веке н.э. в специальных зажигательных снарядах из скрученных в шар сухих растительных волокон, пропитанных жидкой огнесмесью на основе нефти. В 901 г. н.э. сарацины научились пускать огнесмесь по трубам, несколько позже в состав была введена селитра, а в 1453 г. при осаде Константинополя «греческим огнем» было уничтожено большое количество кораблей.

Летопись китайской пиротехники началась приблизительно в 10 веке н.э., когда было описано изготовление римских свечей и первых прообразов ракет – огненных стрел. Причем предпосылками к ее появлению явилось изобретение дымного пороха, предположительно в 9 веке. К 11 веку китайцы уже довольно широко использовали дым для сигнальных целей, огненные стрелы и примитивные зажигательные ракеты, а также первые прообразы бомб и гранат, метаемых при помощи катапульта. Кроме того, на основе черного пороха и природных соединений мышьяка были созданы первые отравляющие смеси, которые при сгорании давали ядовитый дым.

Вскоре рецепт дымного пороха был завезен в Европу арабами, и в 1269 г. английский монах Роджер Бэкон дал ему подробное описание. Порох времен Бэкона содержал 40% селитры, 30% угля и 30% серы. В конце 14 – начале 15 веков калийная селитра производилась в ограниченном количестве и была достаточно дорогим продуктом. Поэтому в целях экономии селитры составы тех времен содержали гораздо большее количество серы и угля, чем современный дымный порох.

Праздничные фейерверки в Европе и России получили распространение лишь с начала 17 века, когда производство селитры достигло значительного уровня. В те же времена стал использоваться дымный порох в привычном нам соотношении: 75% селитры, 15% угля и 10% серы.

Несколько позже в некоторых армиях в обиход вошли примитивные сигнальные и осветительные средства. В России по приказу Петра I была принята сигнальная ракета образца 1717 г., простоявшая на вооружении 150 лет.

До начала 19 века в пиротехнике использовался лишь ограниченный ассортимент компонентов: калийная селитра, сера, древесный уголь, антимоний (сульфид сурьмы), реалгар (сульфид мышьяка) и железные опилки, не считая различных смол и масел, использующихся в качестве связующих и замедлителей горения.

В 1786 г. Бертолле получил очищенный хлорат калия (т.н. бертолетову соль), который поначалу пытались использовать в качестве компонента пороха, что послужило причиной многочисленных несчастных случаев. В результате на некоторое время он был незаслуженно забыт. В 30-х годах 19 века хлорат калия в смеси с окрашивающими пламя солями был испробован для создания составов цветных огней. Таким образом, к середине 19 века на вооружение некоторых развитых стран в опытным порядке начали поступать сигнальные средства. Стоит отметить, что примерно в то же время были получены первые бризантные взрывчатые вещества: пироксилин – в 1836 г., нитроглицерин – в 1846 г., динамит – в 1866 г. В 1884 г. во Франции появился первый бездымный порох, и ко второй половине 19 века – началу 20 века дымный порох, тысячелетиями господствовавший как единственное метательное, пиротехническое и одновременно взрывчатое средство, был почти полностью вытеснен гораздо более мощными взрывчатыми веществами и порохами.

До этого времени пиротехника изучала все композиции, которые могли сгорать и взрываться, но различия между взрывчатыми веществами, порохами и пиротехническими составами стали слишком значительными, и уже с середины 19 века пиротехника начала выделяться в самостоятельную отрасль науки.

В 1863-1865 гг. русским ученым, профессором Н.Н. Бекетовым были описаны способы получения алюминия и заложены основы алюминотермии, в том же году в фотовспышках был испробован магний, а в 1894 г. немец Гольдшмит открыл реакцию между оксидом железа и алюминием, впоследствии названной «термитной».

В начале 20 века промышленность начала выпускать магний и алюминий электролитическими методами в значительных масштабах, что резко снизило цену на эти металлы и способствовало их широкому внедрению в различные пиротехнические составы.

В 1906 г. немцы впервые использовали химические составы для постановки дымовых завес на море. Тогда же в связи со стремительным развитием автоматического стрелкового оружия была поставлена задача корректировки огня, которая была решена при помощи трассеров и трассирующих составов.

К началу Первой мировой войны на вооружении всех развитых стран уже находился полный спектр термитно-зажигательных, осветительных, дымовых, «сигнальных и трассирующих средств. В царской России военной пиротехнике уделяли мало внимания и считали эту отрасль второстепенной. Пиротехническая промышленность была представлена лишь несколькими мастерскими при круп-

ных военных заводов. Эти мастерские специализировались гл. обр. на выпуске осветительных и зажигательных изделий. На некоторых заводах осуществлялся выпуск сигнальных и осветительных патронов и ракет. Стоит отметить работы инженера Небученова по созданию осветительных снарядов, начатые в 1912 г. В 1915 г. полковник Погребняков создал свой осветительный снаряд, оставшийся на вооружении армии до середины 30-х годов [32].

После Первой мировой войны произошел новый скачок в развитии военной пиротехники, вызванный первым опытом крупномасштабного применения пиротехнических изделий в военных операциях. В употреблении появились новые материалы, были разработаны более удобные конденсированные дымовые составы на основе тексахлоридов, а хлорат калия начал вытесняться менее опасными в обращении перхлоратами и нитратами. В начале 30-х годов 20 века в США и ведущих странах Западной Европы появились первые малогазовые замедлительные составы.

Становление советской пиротехнической школы фактически началось в 1931-1932 годах. Были созданы пиротехнические отделы в Артиллерийском научно-исследовательском институте (АНИИ), Артиллерийской академии и в ВХИИИ. Развитие пиротехнической отрасли в 1937 г. было включено в пятилетний план развития страны, в результате к 1940-1941 г. советская пиротехническая наука уже окончательно сформировалась и во многом не уступала лучшим западным школам. Интересно отметить, что наиболее известные учебники по пиротехнике, написанные Быстрым, Солодовниковым, Жировым и Фрейманом, появились как раз в этот период времени.

Начало Второй мировой войны резко подхлестнуло развитие военной пиротехнической мысли.

Ввиду острой нехватки кумулятивных и бронебойных снарядов в первые годы войны в качестве одного из основных средств борьбы с танками использовались бутылки, снаряженные загущенными зажигательными смесями, прозванными на Западе «коктейлем Молотова».

В первые самые тяжелые годы войны отечественная пиротехническая промышленность в связи с перегруженностью транспортных магистралей, недостатком компонентов, вызванным выходом из строя химических заводов, находилась в постоянном поиске и переходах от одного типа сырья к другому. Так, например, во время эвакуации завода, производящего идитол, этот компонент был временно заменен на шеллак, запасы которого скопились на заводах мирной отрасли. Олифа, вырабатываемая из пищевых растительных масел, с успехом была заменена на смесь канифоли с индустриальным маслом. В ряде трассирующих составов вместо дефицитного нитрата стронция начали применять более доступные нитраты бария и натрия. А в сигнальных составах нитрат стронция был заменен природным стронциевым минералом – целестином в паре с хлоратом калия.

На пиротехнических предприятиях ощущалась нехватка магния, необходимого для создания осветительных и трассирующих составов, и его количество начали частично компенсировать добавкой алюминия, который производился в

достаточном количестве. Нехватка магния, в свою очередь, была вызвана дефицитом централита, применяемого в качестве стабилизатора бездымных порохов. Для временной замены централита использовалась окись магния, получаемая сжиганием этого металла. Однако с 1943 года в связи с запуском эвакуированных и вновь созданных химических заводов в Сибири обеспечение сырьем пиротехнической промышленности стабилизировалось, а ассортимент пиротехнических изделий был расширен в разы. Таким образом, к середине Второй мировой войны отечественная военная пиротехническая промышленность окончательно сформировалась. В целях поднятия боевого духа возникла новая отрасль пиротехники, связанная с проведением салютов в честь празднования освобождения городов от немецких войск. Для оперативного восстановления разрушенной войной инфраструктуры понадобились пиротехнические средства для сварки рельсов и электрических проводов.

К концу войны шире начали использовать металлы типа магния и хлорорганические интенсификаторы свечения. Крупномасштабное промышленное производство гексахлорбензола в СССР было налажено уже в 1943 г. [11, 32]. Была доказана большая эффективность малогазовых замедлительных составов по сравнению с трубочными порохами, а хлоратные сигнальные составы окончательно уступили место составам на основе неорганических нитратов, магния и хлорорганических соединений.

Вскоре после окончания войны появились замедлительные составы на основе новых материалов – бора, циркония и никеля. Хотя, в целом, можно сказать, что каких-то коренных изменений в обычных пиротехнических композициях для военного применения так и не произошло. В основном наблюдалась оптимизация уже существующих смесей. Более того, многие смеси, близкие по составу к тем, что применялись на полях Второй мировой, используются в некоторых изделиях и до сих пор. В послевоенные годы в пиротехнических составах определенное распространение получили дефицитные ранее металлы типа титана и циркония (смеси с цирконием довольно активно использовались немцами во Второй мировой войне). Достижения военной пиротехники начали распространяться на мирные отрасли. Появились инсектицидные и фунгицидные дымовые составы, составы для резки и сварки металлов, расширился ассортимент фейерверочных изделий и т.д.

В 70-80-е годы 20 века все больше внимания начали уделять удобству и безопасности солдат при обращении с пиротехническими изделиями, в некоторых композициях были заменены токсичные компоненты и соединения тяжелых металлов на менее вредные. Примерно в это же время началась широкая разработка инфракрасных (ИК) составов, направленных на использование вместе с приборами ночного видения. Были созданы аэрозольгенирующие составы для пожаротушения и газогенирующие смеси для автомобильных подушек безопасности.

В начале 90-х годов в связи с окончанием «холодной войны», с одной стороны, появились новые источники сырья для гражданской пиротехники – утилизируе-

мые бездымные пороха, позволившие вывести на новый уровень технологию и зрелищность фейерверочных составов [4]. С другой стороны, в связи с сокращением военных расходов как в России, так и в США прекратилось производство некоторых ключевых компонентов пиротехнических составов, соответственно проводились работы по замене их более доступными компонентами [14, 16, 33].

В настоящее время, судя по обзору современной литературы, значительное внимание уделяется составам, направленным на противодействие ИК, оптическим средствам наведения управляемого и высокоточного оружия, а также составам, предназначенным для совместного использования с ИК средствами наблюдения (ИК-трассеры и составы ИК-подсветки местности) [17]. Остается актуальной задача разработки доступных и одновременно эффективных малогазовых замедлительных составов. Большое внимание в мировой практике уделяется газогенерирующим составам для подушек безопасности автомобилей [18, 19]. Среди других новых направлений следует отметить использование в качестве цветообразующих компонентов энергонасыщенных солей триазолов и тетразолов, а в качестве связующих – энергонасыщенных полимеров [20]. Проводятся работы по замене токсичных и канцерогенных компонентов [21, 22, 23]. Среди горючих компонентов появились новые сплавы металлов. С начала 21 века внедряются новые типы составов – т.н. «реакционные материалы», способные в разы повысить эффективность действия некоторых боеприпасов. Однако практическое внедрение многих современных разработок затруднено в связи с тем, что стоимость новых химических соединений все еще остается высокой, а положительный эффект незначительно превосходит эффекты составов на традиционных компонентах. Сказывается тот факт, что уже достигнут некий «предел» развития традиционных пиротехнических изделий и составов, ограниченный возможностями самой химии. Поэтому качественных изменений можно ожидать лишь в областях «нетрадиционного» применения пиротехнической науки, где пиротехника граничит с другими областями знаний, например в области разработки реакционных материалов и специальных топлив. Этим и объясняется некоторый консерватизм современной военной пиротехнической науки в отношении обычных сигнальных, осветительных, дымовых и прочих средств. Этот консерватизм еще в большей степени характерен для мирной пиротехники, где наряду со сравнительно новыми составами до сих пор используются смеси, разработанные более века назад. Особенно это касается составов, производимых на небольших пиротехнических предприятиях и в мастерских. В последние 20-30 лет производители гражданской пиротехники из Китая практически полностью вытеснили традиционных американских, европейских и других поставщиков. Таким образом, к 21 веку Китай стал монополистом в области производства пиротехнических изделий и полуфабрикатов гражданского назначения [9]. Из-за низкой цены китайских изделий и сырья, многие европейские и российские фирмы вынуждены закупать полуфабрикаты из Китая, дорабатывать их до готовых изделий, проходить сертификацию и выпускать под своими торговыми марками.

## **1.4. Техника безопасности при работе с пиротехническими составами и изделиями**

По логике, любую книгу о пиротехнике следует начинать с главы о технике безопасности. Однако термин «техника безопасности» у рядового читателя обычно вызывает скуку, а у рядового производителя пиротехники – головную боль, и он начинает нехорошими словами вспоминать все контролирующие инстанции, «мешающие» ему работать. Но, после вводной части, автор решил, что заинтересовавшись темой, читатель не пропустит эту главу и прочитает ее с начала и до конца.

Эта глава ни в коей мере не заменяет ознакомление с нормативными документами по ТБ и правилами обращения с пиротехническими изделиями, она лишь дает основные положения и позволяет сформировать правильный подход к этой проблеме.

### **Следует всегда помнить 3 основных положения:**

1. Сколько бы подробно ни расписывались пункты техники безопасности, несчастные случаи были, есть и будут, потому что всегда найдется ситуация, не предусмотренная существующими нормами и предписаниями. Опытный пиротехник всегда старается предугадать подобную ситуацию, но, к сожалению, это не всегда удается. Различными мероприятиями и ответственным отношением к своей работе можно свести количество и тяжесть несчастных случаев к минимуму, но полностью их устранить не представляется возможным, т.к. существуют факторы случайного характера, которые невозможно заранее учесть.
2. Многие начинающие пиротехники полагают, что некоторые требования техники безопасности пишутся «на всякий случай», и относятся к ним пренебрежительно. В действительности, все меры техники безопасности в установленных нормативах написаны буквально «кровью». За каждым пунктом стоит множество конкретных несчастных случаев.
3. Следует признать, что статистически количество несчастных случаев на промышленном производстве пиротехники и ВВ все-таки меньше, чем на любых других химических производствах [24]. Основными причинами меньшего количества несчастных случаев и аварий является то, что сами рабочие понимают, что их жизни зависят от соблюдения техники безопасности, а также тем, что конструкция зданий, инструменты и методы работы на подобных опасных производствах организованы так, чтобы свести к минимуму вероятность аварии. А на случай аварии меры предосторожности и рациональное расположение объектов позволяет уменьшить ее последствия. Например, на производстве ВВ и пиротехники принято использовать небольшие здания, построенные из легких материалов, окруженные обвалкой из земли. При аварии или взрывах в одном здании другие здания остаются целыми, и производственный процесс не нарушается. Такие аварии еще называют запланированными.

В 2012 г. на территории России и Казахстана вступил в силу технический регламент Таможенного союза «О безопасности пиротехнических изделий» [26], который фактически является единственным на данный момент систематизированным документом, хоть как-то регулирующим отечественный рынок пиротехнической продукции.

**Пиротехнические изделия разделяются по классам опасности:**

- *I класс* – пиротехнические изделия, у которых значение кинетической энергии движения составляет не более 0,5 Дж, отсутствуют ударная волна и разлетающиеся за пределы опасной зоны осколки, акустическое излучение на расстоянии 0,25 м от пиротехнических изделий не превышает 125 дБ и радиус опасной зоны по остальным факторам составляет не более 0,5 м. К изделиям 1-го класса относят бенгальские огни и хлопушки с конфетти.
- *II класс* – пиротехнические изделия, у которых значение кинетической энергии движения составляет не более 5 Дж, отсутствуют ударная волна и разлетающиеся за пределы опасной зоны осколки, акустическое излучение на расстоянии 2,5 м от пиротехнических изделий не превышает 140 дБ и радиус опасной зоны по остальным факторам составляет не более 5 м. К изделиям 2-ого класса относят фонтаны, используемые внутри помещений.
- *III класс* – пиротехнические изделия, у которых значение кинетической энергии при направленном движении составляет более 5 Дж, при ненаправленном движении – не более 20 Дж, отсутствуют ударная волна и разлетающиеся за пределы опасной зоны осколки, акустическое излучение на расстоянии 5 м от пиротехнических изделий не превышает 140 дБ и радиус опасной зоны по остальным факторам составляет не более 30 м. К изделиям 3-го класса относят римские свечи, петарды и батареи салютов малых калибров.
- *IV класс* – пиротехнические изделия, у которых отсутствует ударная волна, и радиус опасной зоны хотя бы по одному из остальных факторов составляет более 30 м. К ним относят профессиональную гражданскую пиротехнику, например, уличные фонтаны и батареи салютов средних и крупных калибров (калибром более 60-63 мм), промышленные электровоспламенители и т.п.
- *V класс* – прочие пиротехнические изделия, не вошедшие в I - IV классы. Это, в первую очередь, пиротехнические изделия, опасные факторы и опасные зоны которых установлены в соответствующих ТУ. К ним относятся некоторые имитационные боеприпасы, взрывпакеты, светозвуковые гранаты и т.д.

Неподготовленному читателю мало что скажут указанные цифры, поэтому следует лишь указать, что с повышением класса возрастает опасность обращения с пиротехническими изделиями, а также, что изделия I-III классов разрешены для продажи частным лицам, тогда как изделия IV-V классов предназначены для реализации только юридическим лицам, т.е. пиротехническим фирмам.

**Примечание.**

*В Российской следственной практике незаконный оборот пиротехнических изделий IV-V классов может быть приравнен к незаконному обороту ВВ и ВУ, с привлечением к уголовной ответственности [37].*

## Основные меры безопасности при использовании пиротехники бытового назначения:

1. Всегда следует читать инструкцию применения, расположенную на изделии. Необходимый порядок обращения с изделием указан именно там. Если русскоязычной инструкции нет, то это первый признак контрафактного или недоброкачественного изделия.
2. Не стоит использовать поврежденные пиротехнические изделия с истекшим сроком годности. Пиротехнические средства гражданского назначения, в отличие от изделий военного назначения, обычно не подразумевают продления ресурса, поэтому свойства составов и поведение просроченных материалов могут существенно отличаться от эталона. Более того, если изделие хранилось в ненадлежащих условиях (например, в сыром помещении), его действие может в корне отличаться от запланированного. Из-за ослабления корпуса возможны разрывы, которые могут повлечь несчастные случаи.
3. Нельзя разбирать, а также вносить конструктивные изменения в промышленно изготовленные изделия с целью усиления или модификации пиротехнического эффекта. Дело в том, что толщина корпуса и компоновка любого пиротехнического средства и так нацелены на достижение максимального для этой конструкции эффекта, поэтому любые модификации могут негативно отразиться на прочности корпуса или каких-то других параметрах, что может вызвать нежелательные последствия.

Например, известен вопиющий случай: два приятеля, шутки ради, решили сделать «миномет». В заглушенную металлическую трубу был помещен взрывпакет промышленного производства, а сверху в качестве метаемого заряда – дымовая шашка типа «РДГ-2Б». Они, естественно, не знали, что дымовые составы на основе хлората калия не выдерживают испытания, связанные со взрывным инициированием. В результате приведения в действие данной «конструкции» шашка сработала нештатно и взорвалась. От осколков трубы люди получили увечья.

Известен случай, когда незадачливый гражданин разобрал 50-миллиметровый реактивный сигнальный патрон и попытался из ракетного двигателя этого патрона, а также рейки, скотча и гвоздя сделать «китайское колесо» (чтобы двигатель крутился на рейке вокруг вбитого в дерево гвоздя). Однако штатные двигатели к сигнальным патронам гораздо мощнее форсов, использующихся в «китайских колесах», и работают кратковременно. Поэтому, когда конструкция была приведена в действие, ракетный двигатель тут же оторвался от рейки, полетел по хаотической траектории и ударился в стену жилого дома. На этот раз обошлось без увечий.

Кроме того, переделка или разборка пиротехнических изделий зачастую противоречит закону. Например, обычная петарда на дымном порохе сама по себе – сертифицированное пиротехническое средство, оборот которого почти не ограничен. В то же время, если петарду разобрать и находящийся в ней дымный порох хранить отдельно, то за его хранение может наступить уголовная ответственность, т.к. порох относят к ВВ метательного действия.

4. При использовании римских свечей, батарей салюта и подобных им средств ни в коем случае нельзя заглядывать непосредственно в «дуло» картонного корпуса, а также склоняться над ними. Этого нельзя делать как при поджигании огнепроводного шнура, так и в случае отказа пиротехнического изделия. Даже если пиротехнические средства хранились в правильных условиях и срок годности не истек, следует всегда учитывать, что возможен брак в изготовлении, и внешне нормальное изделие сработает не так, как надо. К сожалению, в увеселительных пиротехнических средствах брак в изготовлении встречается слишком часто, т.к. производители экономят практически на всем, а качество пиротехники, произведенной в какой-нибудь глухой китайской деревушке, сложно контролировать. Причем даже наклейки на русском языке не могут гарантировать надлежащего качества изделий. Практически 100% пиротехнических средств гражданского назначения или полуфабрикатов на данный момент изготавливается в Китайской Народной Республике, и отследить их качество реально могут только отечественные закупщики. Как правило, недобросовестные поставщики в целях максимального извлечения прибыли закупают самые дешевые изделия, на которые наклеиваются отечественные наклейки, иногда подобная пиротехника даже умудряется пройти сертификацию в России и выпускается как изделие российского производства. Хотя обычно, если на пиротехническом изделии написано «сделано в России», означает всего лишь, что оно сертифицировано в России, но могло быть собрано из полуфабрикатов китайского производства.
5. При отказе огнепроводного шнура нельзя приближаться к изделию как минимум 15 минут (лучше 20 минут). Горение некоторых типов огнепроводных шнуров при производственном дефекте может переходить в еле заметное тление. Обычно 15 минут достаточно, чтобы шнур либо окончательно потух, либо разгорелся заново. Нештатное срабатывание огнепроводного шнура – одна из самых частых причин отказов и несчастных случаев, поэтому этот пункт ТБ должен соблюдаться неукоснительно. Также нельзя укорачивать огнепроводный шнур на петардах, например, с целью осуществления разрыва «в воздухе». Как показывает практика, в половине из подобных ситуаций петарда разрывается в руках еще во время осуществления самого броска.
6. Нельзя запускать ракеты с реечным стабилизатором с рук, равно как и туго вставлять стабилизаторами в какие-либо направляющие. Такие ракеты обладают достаточно малой тягой и срабатывают довольно быстро. Поэтому, если человек держит в руках ракету за стабилизатор, он просто может не успеть отпустить ракету, в результате головной заряд ракеты разрывается прямо перед лицом этого человека. Автор этой книги был свидетелем подобного случая. К тому же, если ракета находится в руках, возможны ожоги от действия раскаленной газовой струи.  
Ни в коем случае нельзя отрывать реечные стабилизаторы. При их отсутствии полет ракеты приобретает хаотический характер, ракета может улететь в самое непредсказуемое место и там взорваться.

7. Следует воздерживаться от запуска батарей салютов и римских свечей под окнами жилых домов или вблизи от них (на данный момент это запрещено законодательно). Иначе возможны отклонения ракет или миниатюрных салютных зарядов от траектории (вследствие брака в изготовлении или неправильной установки) и их попадание в стекла домов. Если рядом с окном находится человек, его может поранить осколками стекла. Известны несчастные случаи подобного рода со смертельным исходом.
8. Как бы это банально ни звучало, но недопустимо запускать фейерверки в нетрезвом состоянии. Для нашей страны этот пункт более чем актуален. При алкогольном опьянении замедляется реакция человека и возникает обманчивое чувство безопасности. Большинство лиц, попадающих в травмпункты в новогодние праздники с травмами, вызванными пиротехникой, злоупотребляли спиртным. Многие граждане в состоянии алкогольного опьянения склонны к неадекватному поведению, используют пиротехнику не по прямому назначению и совершают хулиганские поступки.
9. Нельзя запускать фейерверки типа римских свечей с окон и балконов. Во-первых, это запрещено законодательно, во-вторых, есть большой шанс получить увечья, если вдруг по какой-то причине горящая звездка рикошетом попадет в самого незадачливого «пиротехника». Также существует довольно высокая вероятность пожара на соседском балконе или даже попадание горящего пиротехнического заряда в квартиру.
10. И наконец, категорически нельзя использовать внутри помещений фейерверочные изделия, предназначенные для применения на открытом воздухе (бывает и такое, особенно после обильного принятия спиртного). Это чревато как возникновением пожара и увечьями, так и отравлением продуктами сгорания пиротехнических составов.

**Техника безопасности при производстве пиротехнических изделий (основные положения) [24, 25]:**

1. К производственным операциям можно допускать только тот персонал, который знаком со спецификой данной технологической операции, знает свойства и особенности применяющихся веществ и материалов.
2. Нельзя проводить производственные операции и осуществлять действия, в целесообразности которых рабочий не уверен. Это требует развитого чувства самоконтроля, но позволяет предупредить большинство несчастных случаев.
3. Количество присутствующих людей при производстве пиротехнических изделий должно быть наименьшим. С одной стороны, это требование связано с тем, чтобы посторонние люди не отвлекали рабочего от технологических операций, с другой стороны, при несчастном случае это позволит уменьшить число пострадавших.
4. Количество материалов и веществ, применяющихся при технологических операциях, должно быть наименьшим. Это требование позволяет уменьшить ущерб от инцидента. Наиболее частое нарушение этого правила – когда рабочий, чтобы «не ходить лишний раз», заготавливает и держит вблизи рабочего

- места слишком большое количество опасных материалов. Это совершенно недопустимо, т.к. в случае возгорания или взрыва, как правило, срабатывает вся масса вещества. По этой же причине нельзя хранить или складировать готовые изделия (полуфабрикаты) в том помещении, где их производят.
5. Время операций с пиротехническими материалами должно быть наименьшим из возможных. Существование этого правила объясняется тем, что чем меньше времени человек проводит с опасными материалами, тем меньше вероятность возникновения ошибки в его действиях.
  6. Рабочее место, оборудование и место хранения полуфабрикатов должны содержаться в чистоте, недопустимо замусоривание или захламление. Отходы должны удаляться своевременно. Несоблюдение этого требования может привести, например, к накоплению горючей пыли на рабочих поверхностях, мебели и т.д. От малейшей искры эта пыль может воспламениться. Также посторонние материалы могут попасть в пиротехническую смесь или изделие.
  7. В одном помещении должна проводиться только одна технологическая операция. Следует избегать нахождения в производственных помещениях предметов, не участвующих в процессе производства.
  8. Запрещается использование приспособлений и инструментов, в результате операций с которыми могут возникнуть случайные искры (инструменты из стали или твердых сплавов).
  9. Все приборы и устройства должны быть заземлены во избежание накопления статического электричества. Пол производственных помещений должен быть изготовлен из материалов, препятствующих электризации или возможности появления искр. Современное производственное помещение, как правило, снабжено системой кондиционирования воздуха, позволяющей поддерживать влажность в пределах 45-55%. При относительной влажности ниже 45% резко возрастает опасность накопления статического электричества, тогда как выше 55% гигроскопичные вещества начинают поглощать влагу из воздуха, что тоже недопустимо.
  10. Лимиты хранения пиротехнических изделий на складе ни в коем случае не должны превышать. Иначе, по статистике, резко увеличивается риск опасного происшествия.
  11. Служебные и технологические инструкции должны быть написаны коротко и ясно и не допускать двоякого толкования.
  12. И наконец, на пиротехнических предприятиях должна проходить регулярная переаттестация персонала по ТБ. Причем проверка знаний должна быть реальной, а не формальной.

Безусловно, на пиротехническом производстве нельзя курить и употреблять спиртные напитки. В промышленных условиях это положение жестко контролируется. Например, при входе в производственную зону рабочие обязаны сдать курительные принадлежности. Однако в небольших пиротехнических мастерских, к сожалению, этому пункту уделяется недостаточно внимания.

Кроме основных правил ТБ, существует еще множество пунктов ТБ, соответствующих каждой конкретной технологической операции. Например, при отработке пиротехнических составов запрещается пользоваться резиновыми перчатками, потому что в случае вспышки резина оплавляется и приклеивается к коже, передает ей избыточное тепло и усиливает ожог. Сита, предназначенные для просеивания хлората калия, не должны использоваться при просеивании других материалов, т.к. сочетание хлората калия с некоторыми веществами может приводить к воспламенению. Вообще, большинство несчастных случаев при производстве основных видов пиротехнических составов в прошлом было связано именно с использованием хлората калия. Поэтому в современных пиротехнических составах хлорат калия не применяется, за исключением тех областей, где его нельзя заменить каким-нибудь другим компонентом.

Интересно рассмотреть статистику несчастных случаев на военных пиротехнических производствах США, произошедших с 1950 по 1976 гг. [25]: из 577 зарегистрированных случаев и аварий на производстве 75% было связано с возгоранием, 18% сопровождались взрывом, 5% – горением, переходящим во взрыв, либо многочисленными взрывами. Около 10% случаев из 577 сопровождались ранениями рабочих либо приводили к смертельному исходу. Хотя с 1976 г. прошло достаточно много времени, основы пиротехнического производства мало изменились, и можно считать, что эта статистика не потеряла актуальности.

**Табл. 1.4. Виды пиротехнических изделий и составов, с которыми происходили несчастные случаи и аварии**

Первичного восп-ия	Сигнальные и осветительные	Сигнальные дымовые	ГГС	Светозвуковые	Тепловые и зажигат.	Замедлители	Прочие
12	21	385	35	7	59	2	56
2%	3,6%	66,8%	6%	1,3%	10,3%	0,3%	9,7%

Как видно из таблицы 1.4, наиболее опасным является производство составов сигнальных дымов. Это вызвано, в первую очередь, применением в этих составах хлората калия, образующего очень чувствительные смеси с горючими веществами. Указанное обстоятельство усугублялось тем фактом, что в отмеченный период в США производились сигнальные дымовые смеси с применением комбинации хлорат калия/сера. Напротив, процент аварий с составами первичного воспламенения (которые наиболее восприимчивы к удару и трению) довольно низок. Это связано с применением на таких производствах высочайших стандартов безопасности, а срабатывание отдельных капсулей при технологических операциях является обычным явлением, запланированным и на технологический процесс не влияющим.

Из таблицы 1.5 ясно видно, что больше всего несчастных случаев вызвано действием трения, а самой опасной производственной операцией является прессование. Другие технологические операции менее опасны.

Из таблицы 1.6 следует, что основной причиной несчастных случаев и аварий на пиротехническом производстве является человеческий фактор. В 15% случаев predisposing факторы так и не были установлены.

**Табл. 1.5. Технологические операции и воздействия, вызвавшие аварию и/или несчастный случай на пиротехническом производстве в США с 1950 по 1976 гг. [25]**

Операция	Х	Э	Т	Н	У	Д	СЭ	В	Итого	Итого, %
прессование	1	0	159	0	5	33	2	31	231	40
смешивание	1	0	25	0	3	0	1	23	53	9
развертка (удаление избытка состава)	0	0	44	0	0	1	0	0	45	8
наполнение изделий	0	0	20	0	5	0	15	3	43	7,5
внутризаводское перемещение	1	1	2	0	17	0	0	3	24	4,2
снаряжение/расснаряжение	1	0	1	0	10	0	10	0	22	4
просеивание/фракционирование/взвешивание	3	0	14	0	2	0	2	1	22	4
доработка	2	0	5	2	5	0	2	4	20	3,5
чистка/модификация	0	5	6	1	2	0	2	3	19	3,2
прочее	3	1	1	0	2	0	0	8	15	2,5
тестирование	0	3	0	4	3	1	0	3	14	2,4
опрессовка/опечатывание	0	0	13	0	0	0	0	1	14	2,4
резка/сушка	0	0	6	1	0	0	0	4	11	1,9
измерение/тех. контроль	0	0	8	0	1	0	2	0	11	1,9
сборка	0	0	3	0	4	1	0	0	8	1,3
упаковка/распаковка	0	0	0	1	2	0	3	1	7	1,2
уничтожение	0	1	0	2	1	0	2	0	6	1,0
перемалывание	0	0	2	1	2	0	0	0	5	0,8
хранение	1	0	1	0	1	0	0	1	4	0,7
гранулирование	0	0	2	0	0	0	0	1	3	0,5
итого	13	11	312	12	65	36	41	87	-	-
итого, %	2	2	54	2	11	6	8	15	-	-

Х – химический фактор, Э – электрическое воздействие, Т – трение, Н – воздействие тепла и/или открытого огня, У – удар, Д – давление, СЭ – статическое электричество, В – воздействие не удалось определить.

**Табл. 1.6. Предрасполагающие факторы аварий и/или несчастных случаев на пиротехническом производстве [25]**

Фактор	Количество	Общий, %
несогласованность действий персонала	270	47
опасное действие персонала	119	21
фактор не установлен	88	15
неисправный или не предназначенный для операции инструмент	51	9
отсутствие специального оборудования	43	7,5
низкое качество/низкая квалификация персонала	41	7,1
превышение давления прессования	37	6,4
выход из строя оборудования	27	4,7
несоблюдение ТБ/недостаточный контроль	19	3,3
примеси/коррозия	17	2,9
химический дисбаланс	15	2,6
недостаточная подготовка персонала	14	2,4
избыточное количество материала	11	1,9
плохая уборка помещения/небезопасное рабочее место	11	1,9
негодные средства обеспечения безопасности	9	1,6
плохое техническое обеспечение	6	1
отказ системы безопасности	6	1
перегрев	1	0,1

### **Примечание.**

*Стоит указать, что данные таблиц соответствуют статистике аварий и несчастных случаев на военных пиротехнических заводах США в 1950-1976 годах, где условия труда соответствуют уровню безопасности для пиротехнических промышленных предприятий, а персонал специально подготовлен. Для лабораторий, мелких пиротехнических мастерских и кустарей-пиротехников эта статистика, естественно, будет другой.*

## **1.5. Проблемы в правовой сфере, связанные с изготовлением и применением пиротехники**

Правовой вопрос в области пиротехнических составов и изделий в последние годы становится все более и более актуальным. В некоторых цивилизованных странах существуют многочисленные ассоциации не только пиротехников-профессионалов, но и пиротехников-любителей со своими регулярными изданиями, встречами и обменом опытом. В нашей стране любители-пиротехники, которых не так уж и мало, по сути, остаются вне закона. С одной стороны, это верная позиция, т.к. изготовление пиротехники в домашних условиях таит в себе определенные опасности как для самого пиротехника, так и для окружающих.

Но, с другой стороны, при недостатке качественной информации и тотальной доступности сети Интернет пиротехники-любители пытаются осуществлять на практике неизвестно кем придуманные и неизвестно откуда взявшиеся рецепты и рекомендации, что отражается в увеличении количества правонарушений и несчастных случаев.

Безусловно, одними запретами прекратить кустарное изготовление пиротехники невозможно, поэтому, чтобы предостеречь пиротехников-любителей от действий, нарушающих существующее законодательство, была написана эта небольшая глава. Также она будет полезна тем, кто собирается стать профессиональным пиротехником, но не совсем знаком с реальным положением дел в правовой сфере.

Изготовление и реализация пиротехнических изделий на территории Российской Федерации подлежит лицензированию. Т.е. в любом случае изготовление пиротехники дома, в гаражах и т.п. незаконно, за это наступает административная и/или уголовная ответственность. Конечно, в теории можно организовать частное предприятие по изготовлению пиротехники, однако практика показывает, что это практически нереально. В условиях жесточайшей ценовой конкуренции со стороны китайских производителей потребитель предпочтет использовать более дешевую, хотя и менее качественную, китайскую пиротехнику, и такое производство не окупится. Поэтому подавляющее большинство небольших пиротехнических фирм не рискует организовывать собственное производство, а предпочитает закупать уже готовые изделия у крупных отечественных или иностранных производителей, и вся их работа, по сути, заключается в организации и проведении фейерверков. Даже ярые энтузиасты пиротехники сначала пытаются официально открыть пиротехническое производство, но потом быстро отказываются от своей затеи, встретив на пути непреодолимую стену препятствий финансового и бюрократического характера.

Подобная ситуация характерна не только для России, но и для других стран, где дешевая китайская пиротехническая продукция вытеснила изделия местных производителей. Так, например, по данным Ланкастера, в Англии в 1960 г. насчитывалось 10 крупных производителей пиротехнической продукции, тогда как к 1998 г. действовала только одна крупная фирма-производитель и 2 фирмы, занимающиеся спецэффектами. Согласно [9], в США в 1960 г. 81% пиротехнических изделий было собственного производства, тогда как к 1999 году эта цифра уменьшилась до 4,4%. Чтобы хоть как-то сдерживать экспансию китайской пиротехники, в ряде стран предусмотрена финансовая поддержка собственных производителей пиротехнических изделий.

Пиротехнический рынок современной России перенасыщен. Лиц, увлекающихся пиротехникой, намного больше, чем требуется на современном рынке труда среди профессиональных пиротехников. В условиях экономического кризиса количество заказов постоянно уменьшается, и большинство фирм едва сводят концы с концами. Поэтому многие люди сознательно не идут в пиротехническую отрасль, предпочитая зарабатывать деньги за счет другой профессии, а пиротехникой заниматься в качестве хобби.

Сейчас в современной Российской Федерации, как и в большинстве других стран бывшего СССР, кустарное изготовление пиротехники может грозить серьезными неприятностями со стороны правоохранительных органов. Это обоснованная позиция: ведь от соседа, который изготавливает пиротехнические изделия на кухне многоквартирного жилого дома, можно ожидать чего угодно – от возгорания до взрыва. Но пиротехнические составы и изделия законом официально не запрещены и, на первый взгляд, их изготовление «допускается».

Еще раз следует напомнить, что под пиротехникой в данном случае подразумевается именно развлекательная пиротехника, а не изготовление взрывчатых веществ и устройств, которое однозначно запрещено практически во всех странах.

В СССР в 20-30-х годах прошлого века было выпущено немало книг по приемам изготовления пиротехнических изделий и составов в кустарных мастерских и дома. Тогда это не считалось чем-то опасным для общества, но сейчас ситуация коренным образом изменилась.

Еще больше ситуацию усугубляет тот факт, что дымный и бездымный порох (без которых немыслима развлекательная пиротехника) по российскому законодательству определены как взрывчатые вещества метательного действия. Однако в УК нет законодательно закрепленного разделения ответственности за хранение бризантных взрывчатых веществ и метательных взрывчатых веществ, более того, не оговорены минимальные количества, за хранение которых наступает уголовная ответственность. Хотя, если этот самый порох находится в составе сертифицированного пиротехнического изделия, хранение такого изделия уголовному преследованию не подлежит. Если же пиротехническое изделие не сертифицировано или кустарно изготовлено, то решающим фактором в его юридической квалификации будет наличие или отсутствие веществ, относящихся к взрывчатым (в т.ч. и порохов).

Относительно пиротехнических средств военного назначения эксперт-криминалист обычно устанавливает, является ли пиротехническое средство боеприпасом, предназначенным для поражения цели. Кроме того, выдается заключение о способности пиротехнического изделия к взрыву (по этой причине многие изделия типа взрывпакетов, имитационных патронов и светошумовых гранат квалифицируются как взрывные устройства) [38].

Практика показывает, что за незаконное изготовление и хранение порохов степень ответственности в реальных делах меньше, чем за хранение бризантных ВВ, тем не менее отсутствие разграничения ответственности создает возможности для злоупотреблений среди отдельных представителей правоохранительной системы.

Почему же до сих пор нет этого разграничения? Это связано с тем, что при помощи бездымного и дымного пороха все же возможно создать взрывное устройство, ведь на протяжении более 6 веков дымный порох служил единственным взрывчатым веществом. И в условиях прочного корпуса он может взрываться. В сознании обычного человека всё еще сохранился образ чугунной шарообразной «бомбы» с горящим фитилем, характерный для начала 19 века. Наконец, масла в огонь подливает активизация террористических и экстремистских движений в конце 20 века, способствующая формированию у обывателя неосознанной ассоциации пиротехников с террористами.

Однако приводящие такие доводы зачастую забывают, что изготовление пороха (как дымного, так и бездымного) в кустарных условиях весьма трудоемкий процесс. В условиях тотального доступа к сети Интернет и размещенной там информации, в кустарных условиях гораздо проще и дешевле изготовить другие типы «взрывчатки». Мощность пороха во много раз меньше мощности любого бризантного ВВ, и, чтобы создать «бомбу», обладающую реальным поражающим эффектом, нужно наработать довольно большое количество пороха (по крайней мере, больше 10 граммов).

Из комментариев к 222 ст. УК РФ следует, что пиротехнические изделия не являются боеприпасами. Однако тут необходимо учитывать некоторые юридические нюансы.

Если взять любое увеселительное изделие типа римской свечи, оно будет содержать как минимум 2 пиротехнических состава – состав для звезд цветного огня и вышибной состав, который обычно представляет не что иное, как дымный порох. А согласно комментариям к 222 ст. УК РФ, бездымный и дымный пороха рассматриваются как взрывчатые вещества, за хранение которых наступает уголовная ответственность. Из того же закона следует, что пороха, входящие в состав готовых пиротехнических изделий, не рассматриваются как взрывчатые вещества, тем не менее российская следственная практика показывает, что «при желании со стороны правоохранительных структур» самодельными взрывными устройствами признаются даже промышленно изготовленные петарды, обложенные горохом [27].

### **Примечание.**

*Обложённые горохом петарды используют страйкболисты для имитации действия ручных осколочных гранат. Пусть читателя не настораживает термин «имитация действия гранат». Скорость разлетевшейся при разрыве такого изделия горошины эквивалентна скорости горошины, брошенной в человека усиленным руками.*

Стоит отметить, что среди представителей отечественной правоохранительной системы распространено четкое убеждение, что переделка и модификация любого штатного пиротехнического изделия должно преследоваться по закону. Однако, по мнению автора, это убеждение не должно противоречить здравому смыслу, как это произошло с «гороховыми» петардами.

Поэтому на этот случай желательно иметь удостоверение пиротехника, которое может получить любой желающий после прохождения курса обучения в НИИПХ г. Сергиев Посад. Хотя это удостоверение формально не дает права хранить и покупать пороха, практика показывает, что представители правоохранительных органов относятся к владельцам подобных «корочек» более снисходительно. Вообще, это удостоверение никогда не будет лишним, если вы действительно себя не мыслите без увлечения пиротехникой. Лица, имеющие охотничий билет, вопреки устоявшемуся мнению, остаются вне закона. Хотя они имеют право приобретать и хранить пороха, но изготовление из этого пороха пиротехнических изделий будет расценено как «нецелевое использование», которое наказывается вплоть до реального срока заключения.

Некоторые пиротехники-любители пытаются применять модифицированный дымный порох, содержащий какие-либо добавки, например древесные опилки или декстрин, в количествах, достаточных для того, чтобы состав отличался по свойствам от эталона (подобный прием популярен среди профессиональных пиротехников). На пиротехнический эффект это влияет незначительно, но заметно ослабляет смесь и с бюрократической точки зрения позволяет трактовать композицию не как дымный порох, а как пиротехнический состав из-за наличия дополнительных компонентов. Однако, в таких случаях взрывотехническая экспертиза обычно выдает заключение с формулировкой об использовании черного пороха с добавками, при этом указанная формулировка на заключительную оценку эксперта не влияет и данная смесь приравнивается к ВВ. Поэтому дымные пороха целесообразнее заменять специальными вышибными составами, например смесью «Benzolift», хотя и в этом случае нет гарантии, что «Benzolift» не будет признан ВВ «пиротехнического» типа [28].

Бездымный порох, который часто используется пиротехниками в качестве связующего, можно хранить в виде раствора в ацетоне (нитроцеллюлозный лак). На связующие и горючие свойства бездымного пороха применительно к пиротехнике это не повлияет, зато такой лаковый состав уже становится не способным к взрыву и не классифицируется как ВВ.

И хотя эксперт все-таки может выдать нежелательное экспертное заключение по модифицированным материалам, на суде адвокату будет гораздо проще отстаи-

вать своего подзащитного. К сожалению, от личного мнения эксперта при разборе уголовных дел, связанных с пиротехникой, зависит слишком много. А отсутствие в отечественной судебной практике понятия «прецедента» усугубляет ситуацию. Это приводит к тому, что, например, если для одного эксперта намазка спичечных головок – пиротехнический состав, то для другого – хлоратное взрывчатое вещество.

В неофициальных беседах даже представители правоохранительной системы признают, что в современной России судьба человека, совершившего правонарушение, больше зависит не от законодательных актов, а от совокупности внешних факторов, зависящих от:

- личностных и профессиональных качеств оперативных работников, следователей, экспертов, судьи;
- наличия пресловутого «плана по раскрываемости» – человек может быть как «притянут за уши» к какой-либо более тяжелой статье УК (если план «горит»), так и попросту отпущен домой, если план по раскрываемости уже выполнен;
- проведения в данное время спецмероприятий, наподобие операции «Арсенал», когда в рамках этого мероприятия к ответственности могут привлечь попавшихся «под руку» пиротехников.

Приобретение и хранение в квартире материалов и химических компонентов, используемых в пиротехнике, с одной стороны, легально, с другой стороны, если этих материалов слишком много, может повлечь за собой административную ответственность за «ненадлежащее использование жилого помещения». Естественно, что значит «много», а что означает «мало» нигде не прописано, и это дает широкое поле для злоупотреблений.

Однако тут следует оговориться. Если в результате осмотра будут обнаружены незаконные предметы, например, тот же порох, то найденные вещества и компоненты (например, селитра) будут классифицированы как «материалы, служащие сырьем для изготовления взрывчатых веществ» и послужат отягчающим фактором при возбуждении уголовного дела. Вообще, хранение селитры (в первую очередь аммиачной), как показала практика, с правовой точки зрения тоже явление не однозначное. Аммиачная селитра в чистом виде обладает некоторыми взрывчатыми свойствами, однако эти свойства проявляются только в многокилограммовых количествах [3]. Учитывая дополнительную трудность с взрывным инициированием, селитра является довольно безопасным материалом и широко применяется в качестве удобрения. Однако ее смеси с горючими веществами классифицируются как аммиачноселитренные взрывчатые вещества (АСВВ) типа динамонов. Причем, где проходит правовая граница между АСВВ и пиротехническими составами на основе аммиачной селитры, тоже нигде не прописано. Например, смесь аммиачной селитры, порошка угля и порошка титана используется в самых зрелищных пиротехнических фонтанах [15]. Этот пиротехнический состав соответствует формальному определению для аммиачно-селитренных взрывчатых веществ (содержит окислитель – аммиачную селитру и горючее – угольный

порошок с титановыми опилками). Более того, по иронии, сам фонтан, начиненный таким составом, обладает признаками взрывного устройства с поражающими элементами. Ведь любой фонтан представляет собой бумажную гильзу (корпус), глиняные заглушки или термоизоляцию (поражающие элементы), искрообразующий состав (в данном случае формально причисленный к ВВ) с просверленным каналом (формально – гнездом под детонатор).

На волне борьбы с терроризмом производители удобрений начали выпуск «взрывобезопасной» аммиачной селитры, разбавленной другими удобрениями [29, 30]. Однако не учитывается тот факт, что практически не существует удобрения, из которого эту селитру нельзя выделить химически, путем смешивания с другими удобрениями или бытовой химией. Ярые «борцы с терроризмом» вообще предлагают запретить реализацию аммиачной селитры, причислив ее к ВВ. Целесообразность этой идеи вызывает сомнения, т.к. с экономической точки зрения селитра является удобрением с очень низкой себестоимостью и высокой эффективностью. Россия располагает огромными производственными мощностями по производству аммиачной селитры, и это производство придется значительно сокращать. С учетом того, что экспорт удобрений в России является одной из основных статей доходов химической промышленности, запрет аммиачной селитры был бы попросту вредным для экономики.

Особо нужно отметить использование самодельных петард, снаряженных т.н. «топливно-окислительными смесями» (ТОС-ами), имитационными смесями, «серой от спичек» либо порохом. Многие считают, что это вполне безобидное развлечение, но есть очень большой шанс, что эти «петарды», исходя из существующего законодательства, будут квалифицированы как самодельные взрывные устройства. Конечно, будет проведена экспертиза, но эксперт будет довольствоваться простейшей логикой: объект содержит корпус, средство замедления или подрыва (огнепроводный шнур) и состав, скорее всего заочно признанный экспертизой взрывчатым веществом. Т.е. признаки самодельного взрывного устройства будут налицо. А что там этого состава неполных 3 грамма и при разрыве в руке максимум эффекта – это удар по пальцам и незначительный ожог, волновать уже никого не будет, т.к. формальность будет соблюдена. Как показала практика, такие случаи имели место быть.

Даже хорошо известные игрушки тинейджеров эпохи «развитого социализма» – первая, состоящая из 2 болтов с гайкой и навески «спичечной серы», и вторая, состоящая из смеси сурика, серебрянки и камешков, завернутых в фольгу, – обладают формальными признаками СВУ, инициируемых ударом, причем снабженными готовыми поражающими элементами (камешками). Естественно, каждый понимает абсурдность такой квалификации, но ведь петарда, обложенная порохом, все же была же признана СВУ, причем неоднократно.

Конечно, представители правоохранительных структур могут проявить снисхождение и отпустить незадачливого пиротехника-любителя, не возбуждая уголовного дела. Раньше так и делали – отпускали после профилактической беседы с обещанием «хорошенько присматривать». Однако, в связи с тем что в

последнее десятилетие средства массовой информации нагоняют панику на все вопросы, касающиеся взрывчатки и пиротехники, правоохрнительным структурам выгодно находить «виновных» по делам, связанным в том числе и с пиротехникой, или по формальным признакам переквалифицировать пиротехнику в незаконный оборот взрывчатки. Впрочем, правоохрнительные органы тоже можно понять: им сверху спускается «план» по раскрытию дел, касающихся ВВ, и они вынуждены как-то «выкручиваться». Поэтому за самодельную петарду, которую, если положить рядом с покупной, сложно заметить разницу, можно «загреть по полной программе».

Вообще ситуацию относительно петард очень точно можно охарактеризовать цитатой из [9]: «Сегодня можно спокойно говорить о том, что петарды популярны практически среди всех слоев населения, за исключением политиков и бюрократов. В современных промышленно развитых странах существует как оправданная, так и ничем не обоснованная тенденция к запрету изделий, при использовании которых возможно нарушение общественного спокойствия. Даже некоторые представители фейерверочного бизнеса испытывают неприязнь к петардам, что сопровождается добровольной приостановкой производства этих изделий. Все это происходит из-за запутанных и зачастую неэффективных законов».

Например, в Канаде запрещены петарды, начиненные флэш-составами, но относительно либеральное отношение к петардам на черном порохе. В США в половине штатов для петард существует максимальный лимит на 50 мг любого пиротехнического состава, в оставшейся половине этот лимит вообще отсутствует. В европейских странах законодательство более снисходительно. В Германии разрешены довольно крупные петарды, а в ряде стран (Португалия, Италия, Испания, Мальта), церковные традиции которых предусматривают широкое использование фейерверков, закон весьма либерален. Например, итальянские петарды марки «Кобра» содержат 40 граммов дымного пороха, что эквивалентно кубическому взрывпакету. В современной России же взрывпакеты классифицируются как имитационные боеприпасы. И хотя эти боеприпасы не предназначены для поражения цели, их оборот строго регулируется.

### **Примечание.**

*В Италии петарды, снаряженные пиротехническим составом массой более нескольких граммов можно приобрести только при наличии лицензии на огнестрельное оружие. Хотя, как утверждают итальянские пиротехники, в магазинах почти не смотрят на наличие лицензии и реализуют мощные пиротехнические изделия всем желающим. Если же в руки полиции попадет юноша с петардой типа «Кобра», максимум что ему грозит – это конфискация фейерверочного изделия. Под жесткий запрет попадает лишь нелегально изготовленная особо мощная пиротехника наподобие «La bomba di Maradona».*

Ужесточение законов об обороте пиротехнических изделий затронуло и Россию. Не так давно был принят закон о запрещении использования пиротехники в общественных местах. Официально наказание за подобное правонарушение – административное, однако, как отмечают представители правоохрани-

ных структур, с легкостью может быть переквалифицировано в ст. 213 УК РФ, а именно – в хулиганство. Если же при использовании пиротехники кого-нибудь покалечит, то – в причинение вреда здоровью.

Однако, если в США, Канаде, странах Европы существуют многолетние традиции использования пиротехники, хоть как-то отраженные в законодательстве, то в современной России таких традиций попросту нет. В царской России потешные огни (фейерверки) служили, в первую очередь, для увеселения знати. В период становления Советской республики при парках культуры и киностудиях существовал ряд пиротехнических мастерских, изготавливавших фейерверки для развлечения трудящихся. Гражданская пиротехника носила полукустарный характер, была не слишком распространена и, в общем-то, не интересовала обывателя. Лишь 5-го августа 1943 г., по личному приказу Сталина, был проведен первый торжественный салют в честь взятия городов Орел и Белгород. Ирония ситуации состояла в том, что советская промышленность тех времен не выпускала салюты и фейерверки вообще. Поэтому военные пиротехники изготовили заряды для салютов из военных полуфабрикатов буквально за ночь [31].

В 1968 г. в связи с несчастным случаем при проведении фейерверка в г. Кирове, унесшим жизни 39 человек, был издан приказ министра культуры о запрещении изготовления фейерверочных средств в парковых мастерских и киностудиях [36].

Впоследствии проведение салютов стало праздничным торжеством, подчеркивающим военную мощь СССР. Будучи чисто государственной монополией, проведение салютов осуществлялось специальными армейскими подразделениями, а производство было унифицировано с изготовлением военных пиротехнических изделий. Парадоксально, но любительская пиротехника во времена СССР официально не была запрещена, т.к. считалось, что ее вроде как и не существует. В программах различных химических кружков даже было предусмотрено изготовление простейших фейерверков и ракет, а в магазинах свободно продавались наборы реактивов «Юный химик», где в качестве одного из опытов было описано изготовление фейерверка. В нескольких журналах и брошюрах по ракетному моделированию, изданных в 1960-70-х годах описывалась технология расснаряжения охотничьих патронов и использования дымного пороха в качестве ракетного топлива для моделей ракет. В нескольких журналах «Химия и жизнь» за 1994 год даже была приведена технология изготовления дымного пороха и описаны эксперименты с этим составом, хотя, в целом, литературы по пиротехнике издавалось мало, а ассортимент реактивов, который подлежал реализации населению, был скудным.

С развалом Союза на просторы страны вместе с прочим ширпотребом хлынул поток китайской пиротехники, многочисленные фирмы начали реализацию химических реактивов населению, а самое главное – исчез информационный вакуум.

В современной России по поводу пиротехники существует некоторая фобия, вызванная известными событиями. Это связано с тем, что в сознании у рядовых обывателей пиротехника и взрывчатые вещества представлены как единое целое. Лица, ответственные за нормативные акты в этой сфере, имеют точно такое же представление.

В случае обращения за разъяснениями, законодатели обычно получают в свое распоряжение «консультанта» от силовых структур, который вряд ли будет заинтересован в демократизации данной сферы.

Истоки такой неоднозначности отечественных правовых актов кроются в том, что все эти законы по сути «калька» с правовой практики СССР. В советское время проблем с пиротехниками-любителями не было, как и не было частных профессиональных пиротехников, соответственно, в нормативных актах эта позиция была отражена вскользь без детализации.

Решение проблемы напрашивается само собой, как в других странах, в создании ассоциаций и обществ по типу ОСВОД или охотников, с обязательной уплатой членских взносов и т.д., а также в либерализации и конкретизации законов относительно пиротехники. Или как альтернатива – создание углубленных курсов обучения, предусматривающих получение квалификации пиротехника с расширенными правами.

Конечно, ужесточению законов в отношении оборота пиротехнических изделий способствуют откровенно хулиганские выходки отдельных граждан, засовывающих петарды в почтовые ящики или сбрасывающие их из окон на головы прохожим. Тем не менее, по мнению автора, это не повод для лишения обычных людей удовольствия отметить праздник фейерверком или петардой.

В неофициальных беседах представители правоохранительной системы и эксперты-криминалисты зачастую соглашались с большинством приведенных выше доводов, и особенно с необходимостью введения лимитов на пороха и взрывчатые вещества, как это было сделано с наркотиками. Однако сотрудники правоохранительных органов подчеркивают тот факт, что сейчас Россия переживает всплеск террористической и экстремистской активности. Соответственно, демократизация законов позволит опасным преступникам и террористам избежать наказания, используя открывшиеся «лазейки» в законодательстве. Хотя при условии постепенной стабилизации криминогенной обстановки, либерализация законов относительно пиротехники может оказаться действительно актуальной.

## Литература

1. Физика взрыва /Под ред. Л.П. Орленко. Изд. 3-е переработанное: в 2 томах. - М.: Физматлит, 2002.
2. А.Г. Горст. Пороха и взрывчатые вещества. Изд. 3-е переработанное. - М.: Машиностроение, 1972.
3. Шидловский А.А. Основы пиротехники. - М.: Машиностроение, 1973.
4. Энергетические конденсированные системы. Краткий энциклопедический словарь. /Под ред. Б.П. Жукова. Изд. 2-е исправл. - М.: Янус К, 2000.
5. Jai Prakash Agrawal. High Energy Materials. Propellants, Explosives and Pyrotechnics. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. 2010.
6. Engineering Design Handbook. Military Pyrotechnics Series. Part One. Theory and Application. US Army Materiel Command. AMCP 706-185. 1967.
7. PATR 2700. Encyclopedia of Explosives and Related Items. /Basil T. Fedoroff & Oliver E. Sheffield. Vol 2 – Piccattiny Arsenal Dover, New Jersey, USA – 1962.
8. Ellern H. Military and Civilian Pyrotechnics. Chemical Publishing Company Inc. New York. 1968.
9. A.P. Hardt. Pyrotechnics. Pyrotechnica Publications. 2001.
10. Brassey's World Military Technology. Explosives, Propellants and Pyrotechnics. Series Editor: Colonel R.G. Lee. London/ 1989.

11. Вернидуб И.И. Боеприпасы – фронты. Очерки. - Москва – Сергиев Посад, 2003.
12. PATR 2700. Encyclopedia of Explosives and Related Items. /Basil T. Fedoroff & Oliver E. Sheffield. Vol 7 – Picatinny Arsenal Dover, New Jersey, USA – 1975.
13. Келли Дж. Порох. От алхимии до артиллерии: история вещества, которое изменило мир. - Пер. с англ. А. Турова. – М.: Колибри, 2005.
14. Russel N. Broad. Replacement of First Fire Composition in M127A1 Ground Illumination Signal. ARWEC-TR-97002. 1997.
15. Платов Г.А. Пиротехник. Искусство изготовления фейерверков. – М.; 2004.
16. G.R. Lakshminarayanan, Gregory S. Mannix etc. Evaluation of Alternate Fuel and Binder Materials in Hand Held Signals Illuminant Compositions. Tech. Report ARWEC-TR 99008. Picatinny Arsenal, New Jersey. 2000.
17. Ernst-Christian Koch. Experimental Advanced Infrared Flare Compositions. Proceedings of the Thirty-Third International Pyrotechnics Seminar. July 16-21. 2006.
18. Lionel Aufauvre. New Trends for Pyrotechnic Automotive Safety in the European Union. Proceedings of the Thirty-Third International Pyrotechnics Seminar. July 16-21. 2006.
19. Yasuyoshi Miyata, Masahiro Abe, Shingo Date, Makoto Kohga and Kazuo Hasue. Effects of CuO, Cu, and MnO2 on Combustion of Ammonium Nitrate/ Aminoguanidinium 5,5'-azobis-1H-tetrazolate Mixtures. Proceedings of the Thirty-Fifth International Pyrotechnics Seminar. July 13-18. 2008.
20. Georg Steinhauser and Thomas M. Klapötke. «Green» Pyrotechnics: A Chemist's Challenge. Angew. Chem. Int. Ed. 2008, 47, 3330 – 3347.
21. Gretel Raibeck, Gary Chen. Assessment of Organic Fuels for Use in Environmentally Benign Colored Smoke Formulations. Proceedings of the Thirty-Fifth International Pyrotechnics Seminar. July 13-18. 2008.
22. Joseph A. Domanico. Using a Standard Test Protocol to Qualify Candidate Low Toxicity Colored Smoke Dyes. Proceedings of the Thirty-Fifth International Pyrotechnics Seminar. July 13-18. 2008.
23. Giancarlo Diviacchi. Evaluation of Candidate Low Toxicity Colored Smoke Dyes. Proceedings of the Thirty-Fifth International Pyrotechnics Seminar. July 13-18. 2008.
24. Dr. N.V. Srinivasa Rao. Safety In Explosive And Pyrotechnic Manufacture. Proceedings of the Thirty-Fifth International Pyrotechnics Seminar. July 13-18. 2008.
25. F. L. McIntyre, R.M. Rindner. A Compilation of Hazard and Test Data for Pyrotechnic Compositions. ARLCD-CR-80047. 1980.
26. ТР ТС 006/2011. Технический регламент Таможенного союза «О безопасности пиротехнических изделий». Утвержден 16 августа 2011 г.
27. Ольга Тягнибеда. Горох – оружие сыктывкарских «террористов». Свободная пресса. 24 февраля 2010 г. <http://svpressa.ru/society/article/21580/>
28. <http://www.pyroguide.com/index.php?title=Benzolift>
29. [http://www.newchemistry.ru/item.php?n\\_id=146](http://www.newchemistry.ru/item.php?n_id=146)
30. Ирина Босенко. Бомба из... удобрений. Ставропольская правда. 2 сентября 2003 г. [http://www.stpravda.ru/20030902/Bomba\\_iz\\_udobrenij\\_27676.html](http://www.stpravda.ru/20030902/Bomba_iz_udobrenij_27676.html).
31. Ольга Мачнева. Китайцев не догнать, уверен дедушка отечественной пиротехники. - Вечерняя Казань, № 200 (2930), 9 декабря 2004 г.
32. Вернидуб И.И. На передовой линии тыла. - М.: ЦНИИИИТКПК. 1993.
33. Мадьян Ф.П., Тихонова Н.А., Колабинов Д.М., Антонова Т.Н. Исследование возможности замены гексахлорбензола в составах цветных огней на другие галогенсодержащие вещества: Материалы Всероссийской конференции «Энергетические конденсированные системы». - Черноголовка, 2002. – С. 208.
34. K.L. And B.J. Kosanke, and C. Jennings-White, Lecture Notes for Pyrotechnic Chemistry. Journal of Pyrotechnics, Inc. 2004.
35. Химическая энциклопедия: В 5 т. Т. 1. /Гл. ред. Кнунянц И.Л. – М.: Советская энциклопедия, 1988.
36. Взрывчатые вещества, пиротехника, средства инициирования в послевоенный период: Люди. Наука. Производство. Второе издание. /Коллектив авторов. – М.; СПб.: Издательство «Гуманистика». – 936 с., 2002.
37. Городской портал ЧитаRu. Забайкалец получил 3 года условно за попытку вывоза пиротехники из Китая. 12 ноября 2013 г. <http://news.chita.ru/55653/>
38. В.В. Мартынов, А.Д. Стецкевич, А.А. Проэров, В.П. Комиссаров, А.Ю. Семенов. Основы криминалистического исследования пиротехнических средств промышленного изготовления: Учебное пособие. Ч. I. - М.: ЭКЦ МВД России, 1996.

## Глава 2. Компоненты пиротехнических составов

Почти все пиротехнические композиции состоят как минимум из 2-х компонентов – окислителя и горючего. Кроме того, в пиротехническую смесь часто входят и другие вещества, способствующие созданию необходимого эффекта. Многие составляющие пиротехнических составов могут совмещать свои функции: так, например, нитрат стронция является одновременно и окислителем и цветообразующей добавкой, сообщающей пламени красный цвет, дициандиамид – обладает свойствами горючего и пламегасителя, а нитроцеллюлоза сочетает в себе функции окислителя, горючего и связующего одновременно.

### **Примечание.**

*Люди, мало знакомые с химией, обычно настороженно относятся к элементам типа стронция и цезия, ассоциируя их с радиацией. Следует уяснить, что используемые в пиротехнике соединения этих металлов состоят из стабильных изотопов, не являющихся радиоактивными. Тем не менее ряд экзотических пиротехнических материалов всё же могут базироваться на элементах типа обедненного урана и тория. Применение этих элементов ограничивается только специальными и экспериментальными изделиями военного назначения.*

По возможности компоненты пиротехнических составов должны быть доступными по цене, совместимыми между собой в смеси и не гигроскопичными (не впитывать влагу из воздуха). Аспекты термического разложения многих компонентов и их поведение в пиротехнических составах рассмотрены в монографии [34].

### **2.1. Окислители**

Окислители – это компоненты, служащие поставщиками кислорода или других окислительных элементов, выделяемых при своем термическом разложении, и позволяющие горючим компонентам сгорать без доступа кислорода воздуха.

На практике используются следующие окислители:

- азотнокислые соли (нитраты) калия, натрия, бария, стронция, аммония, реже – свинца и некоторых других металлов;
- хлорнокислые соли (перхлораты) калия, аммония, реже – натрия, стронция и бария;
- хлорноватокислые соли (хлораты) калия, бария, реже – натрия;
- пероксиды бария и стронция, реже – натрия;
- оксиды железа, марганца, свинца и др;
- сульфаты кальция и бария;
- хроматы и дихроматы калия, бария, свинца, висмута, кальция, стронция и т.д.;
- взрывчатые вещества типа тротила или гексогена;
- прочие окислители типа перманганата калия, периодатов.

### **Характерные особенности указанных типов окислителей:**

- *Нитраты* являются умеренно активными окислителями, составы на их основе, как правило, обладают невысокой чувствительностью к механическим воздействиям. Это твердые вещества, хорошо растворимые в воде. В некоторых композициях без активных металлов, например, в виде простой смеси с асфальтитом, из-за низкой температуры горения они разлагаются лишь частично, а процесс горения носит неустойчивый характер. Поэтому нитраты обычно используются с металлическими горючими, которые полностью раскрывают потенциал этих окислителей. Нитраты широко применяются в современной военной и гражданской пиротехнике. Нитраты бария и стронция являются также цветообразователями, а нитраты аммония и гуанидина – добавками, выделяющими большое количество газов при термическом разложении.
- *Перхлораты* – достаточно активные окислители, содержащие большое количество кислорода. Составы на их основе довольно чувствительны к механическим воздействиям. Однако чувствительность перхлоратных составов выражена в меньшей степени, чем, например, хлоратных композиций. Это твердые вещества, растворимые в воде. Перхлорат аммония содержит в своем составе хлор, который высвобождается при нагревании. Поэтому, кроме свойств окислителя, перхлорат аммония обладает свойствами интенсификатора свечения цветопламенных составов (донор хлора). Широко используются в военной и гражданской пиротехнике, а также в качестве окислителя твердых ракетных топлив.
- *Хлораты* – активные окислители с низкой температурой разложения, составы на их основе очень чувствительны к механическим воздействиям. К примеру, типичный и знакомый всем состав на основе хлоратов – намазку спичечных головок – практически невозможно растереть в фарфоровой ступке, не вызвав воспламенение или взрыв. Поэтому применение хлоратов в современной военной пиротехнике ограничено смесями маскирующих дымов и составами для терочных воспламенителей, где невозможно обойтись без окислителя с низкой температурой разложения. В современной гражданской пиротехнике тоже стараются избегать использования хлоратов и заменяют их перхлоратами. Тем не менее хлораты гораздо дешевле перхлоратов, и их иногда предпочитают исходя из экономических соображений. Хлораты плохо совместимы со многими компонентами по причине опасности обращения с такими составами или неустойчивости при хранении. К примеру, крайне опасно сочетание хлоратов с красным фосфором, солями аммония и серой.
- *Пероксиды* – тоже очень активные окислители, которые формируют составы с высокой чувствительностью к механическим воздействиям. Их активность в некоторой степени нивелируется низким содержанием кислорода, тем не менее смеси на основе пероксидов представляют определенную опасность. Применяются лишь в некоторых областях военной пиротехники типа воспламенительных и трассирующих составов. Из-за щелочных свойств и довольно

высокой химической активности неорганические пероксиды ограниченно совместимы с алюминием и некоторыми связующими. В качестве связующих для составов на их основе используют резины, шеллак или идитол.

- *Оксиды металлов* (железа, марганца) – окислители, содержащие довольно небольшой процент активного кислорода. Смеси на их основе обычно мало чувствительны к механическим воздействиям. Наряду с сульфатами и бихроматами в литературе их относят к так называемым окислителям «второго рода» – сравнительно малоактивным веществам, которые отдают кислород с большим трудом и требуют для нормального горения наличия активного металла типа магния или алюминия. Напротив, смеси с высоким содержанием оксидов малоактивных металлов типа свинца, ртути и висмута весьма опасны в обращении и могут взрываться от удара. Используются в воспламеняющих, термитных и термитно-зажигательных составах. Являются катализаторами разложения описанных выше хлоратов, перхлоратов и нитратов, могут использоваться в качестве модифицирующих добавок в пиротехнических и пороховых составах различного назначения.
- *Сульфаты* – малоактивные окислители, используются вместе с энергоемкими горючими типа магния и алюминия. В военное время в некоторых цветопламенных и осветительных составах нитраты могут частично заменяться сульфатами. Такие сульфаты, как стронция и бария, изредка применяются в гражданской пиротехнике в качестве цветообразующих добавок.
- *Хроматы и бихроматы* – тоже малоактивные окислители. Используются в малогазовых замедлительных и теплогенерирующих составах. Бихромат калия также применяется в качестве добавочного окислителя и катализатора в производстве спичечных составов. Являются эффективными катализаторами разложения солей-окислителей типа нитрата и перхлората аммония.
- *Взрывчатые вещества*. Пиротехнические составы военного назначения могут содержать взрывчатые вещества, которые начинают проявлять окислительные свойства в смеси с активными металлами. Применение ВВ в пиротехнических составах носит единичный характер и в целом для пиротехники не характерно.
- *Прочие окислители*. В пиротехнике находят ограниченное применение такие окислители, как перманганат калия, периодат свинца и др. Применение этих окислителей ограничено комплексом неблагоприятных свойств. Так, например, смеси с перманганатом калия высокочувствительны к механическим воздействиям и плохо хранятся, а периодат свинца дорог и токсичен. Однако в противораковых составах он является источником иодида свинца – вещества, способствующего кристаллизации переохлажденных капель воды в атмосфере. Почти единственным в своем роде окислителем, широко применяющимся в практической пиротехнике и не содержащим кислорода или хлора, является политетрафторэтилен. С магнием или алюминием он образует смеси, сгорающие достаточно активно с образованием сажи и фторидов соответствующих металлов.

**Нитрат калия, калий азотнокислый, калиевая селитра, saltpeter,  $\text{KNO}_3$**   
Мол. масса 101,11. Бесцветные кристаллы.

**Табл. 2.1. Растворимость в воде при соответствующей температуре [1]**

$t, ^\circ\text{C}$	0	10	20	30	40	50	60	80	100
растворимость, г / 100 г воды	13,3	21,0	31,6	45,8	63,9	85,5	110,0	169,0	246,0

Гигроскопическая точка при комнатной температуре 91,7%. При хранении постепенно слеживается. Практически не растворим в органических растворителях.

При нагревании выше  $128,8^\circ\text{C}$  из ромбической переходит в гексагональную систему. Теплота перехода  $5,04 \text{ кДж/моль}$ .  $t \text{ пл. } 334^\circ\text{C}$  с очень медленным разложением, при  $560^\circ\text{C}$  отщепляет кислород с заметной скоростью и превращается в нитрит калия  $2\text{KNO}_3 \rightarrow 2\text{KNO}_2 + \text{O}_2$ . При температурах порядка  $800\text{--}900^\circ\text{C}$  нитрит начинает разлагаться с выделением окислов азота и превращается в оксид калия:  $2\text{KNO}_2 \rightarrow \text{K}_2\text{O} + \text{NO}_2 + \text{NO}$  [2].

Теплота образования  $-495,0 \text{ кДж/моль}$ . Теплота плавления  $96,9 \text{ кДж/кг}$ . Теплоемкость при  $300\text{K}$   $950 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{K)}$ , теплопроводность  $0,72 \text{ Вт/(м}\cdot\text{K)}$ . Плотность  $2,109 \text{ г/см}^3$  [3].

Калиевая селитра с глубокой древности используется как окислитель в пиротехнике. Применяется для изготовления дымного пороха, а также пиротехнических составов, гл. обр. воспламенительных, зажигательных, некоторых сигнальных и фейерверочных. Составы на основе нитрата калия имеют относительно невысокую температуру воспламенения, пониженную гигроскопичность и низкую чувствительность к механическим воздействиям. Ценное комплексное удобрение, содержащее азот и калий.

В промышленности нитрат калия изготавливают сливанием растворов нитрата натрия и хлорида калия. Раствор выпаривают до максимального выпадения хлорида натрия в осадок. Осадок отфильтровывают в горячем виде, а затем раствор охлаждают – выпадает нитрат калия. После нескольких перекристаллизаций получается чистый продукт. Нитрат калия обладает средней степенью токсичности. В реальных условиях отравление возможно лишь при случайном проглатывании в количествах от нескольких граммов.

**Нитрат натрия, натрий азотнокислый, натриевая селитра,  $\text{NaNO}_3$**   
Мол. масса 84,99. Бесцветные кристаллы.

**Табл. 2.2. Растворимость в воде при соответствующей температуре [1]**

$t, ^\circ\text{C}$	0	10	20	30	40	50	60	80	100
растворимость, г / 100 г воды	73,0	82,3	87,5	96,0	104,0	114,0	125,0	148,0	180,0

Гигроскопичен, но не так сильно, как это принято считать. Гигроскопическая точка – 82,7%, для технического продукта – около 77%.

Температура перехода из альфа- в бета-модификацию  $276,1^\circ\text{C}$ , теплота перехода  $3,4 \text{ кДж/моль}$ .  $t \text{ пл. } 307^\circ\text{C}$ . Начинает разлагаться до нитрита натрия при  $380^\circ\text{C}$ :  $2\text{NaNO}_3 \rightarrow 2\text{NaNO}_2 + \text{O}_2$ . При температурах около  $900^\circ\text{C}$  нитрит выделяет окислы азота и превращается в оксид натрия:  $2\text{NaNO}_2 \rightarrow \text{Na}_2\text{O} + \text{NO}_2 + \text{NO}$  [2].

Теплота образования -468,1 кДж/моль. Теплота плавления 177,1 кДж/кг. Теплоемкость при 300К 1040 Дж/(кг·К), теплопроводность 1,36 Вт/(м·К). Плотность 2,257 г/см<sup>3</sup> [3].

Используется в качестве окислителя в осветительных и сигнальных составах желтого цвета пламени, а также в зажигательных смесях. Более широкому применению препятствует повышенная гигроскопичность смесей на основе нитрата натрия. Составы на нитрате натрия имеют низкую чувствительность к механическим воздействиям.

Встречается в природе в виде залежей (чилийская селитра). Производится в промышленности в больших количествах нейтрализацией нитрозных газов гидроксидом натрия. Находит применение в качестве азотного удобрения и сырья для производства нитрата калия. Обладает средней степенью токсичности. В реальных условиях отравление возможно лишь при проглатывании в количествах от нескольких граммов.

### **Нитрат бария, барий азотнокислый, Ba(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>**

Мол. масса 261,35. Бесцветные кристаллы.

**Табл. 2.3. Растворимость в воде при соответствующей температуре [1]**

<b>t, °C</b>	<b>0</b>	<b>10</b>	<b>20</b>	<b>30</b>	<b>40</b>	<b>50</b>	<b>60</b>	<b>80</b>	<b>100</b>
растворимость, г/100 г воды	4,95	7,0	9,2	11,6	14,2	17,1	20,3	27,0	84,9

Не гигроскопичен. Гигроскопическая точка соответствует 99% влажности. t пл. 592 °С. Начинает разлагаться выше t пл. [2].

Теплота плавления 203,5 кДж/кг. Теплота образования -992,7 кДж/моль. Теплоемкость при 300К 570 Дж/(кг·К), теплопроводность 0,63 Вт/(м·К). Плотность 3,24 г/см<sup>3</sup> [3].

Составы на нитрате бария горят медленнее, чем на нитрате калия и хуже воспламеняются. Используется гл. обр. в пиротехнических составах зеленого огня (вместе с донорами хлора), а также в осветительных, термитно-зажигательных и воспламенительных. Без доноров хлора, составы на основе нитрата бария горят белым пламенем с зеленовато-желтым оттенком.

Токсичен. ПДК в пересчете на барий 0,5 мг/м<sup>3</sup>. Нежелательно попадание пыли в глаза. Раздражает слизистые оболочки. В последние годы в США стремятся заменять нитрат бария менее токсичными окислителями, например, нитратом калия или нитратом стронция.

### **Нитрат стронция, стронций азотнокислый, Sr(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>**

Мол. масса 211,63. Бесцветные кристаллы.

**Табл. 2.4. Растворимость в воде при соответствующей температуре [1]**

<b>t, °C</b>	<b>0</b>	<b>10</b>	<b>20</b>	<b>30</b>	<b>40</b>	<b>50</b>	<b>60</b>	<b>80</b>	<b>100</b>
растворимость, г/100 г воды	39,3	52,9	69,5	88,7	90,1	91,9	93,8	98,0	102,8

Безводная чистая соль довольно гигроскопична: гигроскопическая точка соответствует 82,7% (20°С). Примеси в техническом продукте способствуют большему впитыванию влаги. При хранении слеживается в меньшей степени, чем

калия нитрат или хлорат. Из водных растворов при температуре ниже 29°C выпадает тетрагидрат, при более высокой – безводная соль. Тетрагидрат обезвоживается выше 100°C.

t пл. 570°C. Разлагаться начинает при 600°C на окись стронция и оксиды азота [2].

Теплота плавления 231,5 кДж/кг. Теплота образования -978,9 кДж/моль. Теплоемкость при 300K 710 Дж/(кг·K), теплопроводность 0,92 Вт/(м·K). Плотность 2,986 г/см<sup>3</sup> [3].

Используется в пиротехнических составах красного огня (трассирующих, сигнальных и фейерверочных). В связи с тем, что технический нитрат стронция склонен поглощать из воздуха влагу и образовывать кристаллогидрат, при использовании металлических горючих типа магния необходима предварительная пассивация металла, иначе срок хранения составов будет очень низким. Для изделий, подверженных воздействию влаги типа трассеров, используется нитрат стронция повышенной чистоты.

Обладает средней степенью токсичности. В организме оказывает влияние на костную ткань (замещение кальция на стронций).

### **Нитрат цезия, цезий азотнокислый, CsNO<sub>3</sub>**

Мол. масса 194,91. Бесцветные кристаллы. Образует 2 кристаллические формы.

Температура перехода из гексагональной модификации в кубическую (бета – альфа) 151,5-154°C. Теплота полиморфного перехода 3,6 кДж/моль [15, 34].

Растворимость в воде 23 г /100 г при 20°C, 134 г /100 г при 80°C, плохо растворим в спирте и ацетоне [15].

t пл. 414°C. Разложение начинается при 440-495°C. Теплота плавления 13,8 кДж/моль. В расплавленном состоянии разрушает кварц, платину и многие металлы. В вакууме возгоняется без разложения [3, 34].

Теплота образования -505 кДж/моль. Теплоемкость при 300K 492 Дж/(кг·K), теплопроводность 0,34 Вт/(м·K), плотность 3,685 г/см<sup>3</sup> [3].

Используется в пиротехнических составах инфракрасного излучения и в МГД топливах в качестве ионизирующей добавки [19].

### **Нитрат рубидия, рубидий азотнокислый, RbNO<sub>3</sub>**

Мол. масса 147,473. Бесцветные кристаллы. Образует 4 кристаллические формы.

Температура перехода из гексагональной модификации в кубическую (IV–III) 164°C, из кубической в гексагональную (III–II) 220°C, из гексагональной в кубическую (II–I) 283°C. Теплота полиморфных переходов IV–III 3,9 кДж/моль, III–II 3,2 кДж/моль, II–I 0,97 кДж/моль.

Гигроскопичен. Растворимость в воде 44,3 г /100 г при 20°C, 452 г /100 г – при 100°C, плохо растворим в спирте и ацетоне [14].

t пл. 310°C, по другим данным, 294°C [19]. Разложение начинается при 340°C, по другим данным, при 430°C. Теплота плавления 4,6 кДж/моль. В расплавленном

состоянии разрушает кварц, платину и многие металлы. В вакууме возгоняется без разложения [34].

Теплота образования -494,7 кДж/моль. Теплоемкость при 300К 664 Дж/(кг·К), теплопроводность 0,44 Вт/(м·К), плотность 3,110 г/см<sup>3</sup> [3].

Используется в пиротехнических составах инфракрасного излучения (ближний ИК-диапазон), возможно использование в МГД топливах в качестве ионизирующей добавки. Широкое распространение этого окислителя ограничено дефицитностью рубидия [19, 34].

### Нитрат аммония, аммоний азотнокислый, аммиачная селитра, $\text{NH}_4\text{NO}_3$

Мол. масса 80,05. Бесцветные кристаллы. Образует 5 кристаллических форм. Теплота полиморфных переходов: альфа-бета 0,47 кДж/моль, бета-гамма 1,7 кДж/моль, гамма-дельта 1,3 кДж/моль, дельта-эпсилон 4,43 кДж/моль.

**Табл. 2.5. Кристаллические формы аммиачной селитры**

Модификация	Альфа (Тетраг.)	Бета (Ромб.)	Гамма (Ромб.)	Дельта (Тетраг.)	Эпсилон (Куб.)
устойчивы при °С	ниже -16,9	-16,9 – +32,2	+32,2 – +84,2	+84,2 – +125,2	+125,2 до t пл.
плотность, г/см <sup>3</sup>	1,71 (-25°С)	1,725 (+25°С)	1,661 (+40°С)	1,666 (+93°С)	1,594 (+130°С)

**Табл. 2.6. Растворимость в воде при соответствующей температуре [1]**

t, °С	0	10	20	30	40	50	60	80	100
растворимость, г/100 г воды	118	153	178	242	297	344	410	625	1010

Очень гигроскопичен, склонен к слеживанию. Гигроскопическая точка – 67%. Устойчивая при обычной температуре бета-модификация не слеживается при увлажнении менее 0,5%. При нагревании выше +32,2°С кристаллы увеличиваются в объеме на 3% и легко крошатся в тонкий порошок, который при выдержке либо охлаждении схватывается в монолитную массу. Особенно сильно этот эффект наблюдается для влажной аммиачной селитры (АС). Поэтому в промышленную АС, предназначенную для использования в качестве ВВ или удобрений, вводят противослеживающие добавки, смещающие точку фазового перехода в область больших температур.

Растворим в метаноле (17,1 г на 100 мл при 20°С), хуже – в этаноле (3,8 г на 100 мл), пиридине [4].

t пл. 169,6°С. Плавлению предшествует стадия частичной возгонки, заметно охлаждающая поверхность горячей смеси, являющаяся причиной медленного горения смесей на основе  $\text{NH}_4\text{NO}_3$ . В интервале 200-260°С разлагается до закиси азота и воды, при дальнейшем нагревании разлагается до азота, кислорода, окислов азота и воды, иногда со взрывом. t всп. 465°С. В присутствии соединений свинца и цинка температура разложения падает до 100°С [2].

Теплота плавления 73,2 кДж/кг. Теплота образования -365 кДж/моль. Теплоемкость при 300К 1742 Дж/(кг·К), теплопроводность 0,595 Вт/(м·К) [3].

Практически не восприимчив к удару, трению, огню. Маловосприимчив к детонации. Реагирует с серой, сульфидами, цинком, магнием и др. Считается, что абсолютно чистый нитрат аммония не детонирует и имеет высокую термическую

стойкость. Поэтому в чистом виде как взрывчатое вещество не рассматривается. Влажный нитрат аммония корродирует медь, железо, сталь, латунь, свинец, кадмий и т.д. Катализаторы термического разложения: соединения хрома, напр. дихроматы, некоторые соединения меди, ферроцианиды и их комплексы, особенно «берлинская лазурь», а также оксиды переходных металлов. Скорость детонации чистой АС 1500 м/с при 1,0 г/см<sup>3</sup>. Фугасность 180-220 мл. Работоспособность в баллистической mortире 79% от тротила. Теплота взрыва 1441 кДж/кг. Объем продуктов взрыва 980 мл [5].

Впервые аммиачная селитра была описана Глаубером еще в 1659 г. С начала 19 века иногда использовалась для частичной замены нитрата калия в дымном порохе.

В настоящее время имеет широчайшее применение в качестве основного компонента ВВ промышленного и военного назначения (аммониты, амматолы, порзмиты и др.), а также как дешевый окислитель в ракетных топливах. В пиротехнике применяется в медленногорящих газогенерирующих составах. При изготовлении зарядов АСВВ и твердых ракетных топлив необходимо учитывать возможность фазовых переходов при изменении температуры. Добавка солей калия предотвращает эти переходы (например, около 10% нитрата калия или 3-5% калия динитрамида) [23]. В больших количествах применяется как удобрение. Обладает средней степенью токсичности.

### **Нитрат гуанидина, гуанидин азотнокислый, $(\text{NH}_2)_2\text{C}=\text{NH}\cdot\text{HNO}_3$**

Мол. масса 122,11. Бесцветные кристаллы.

Растворимость в воде 15 г /100 г при 20°C, 47 г /100 г при 55°C, 128 г /100 г при 90°C, растворим в горячем спирте и ацетоне [5].

t пл. 215°C. t разл. 315°C.

Энтальпия образования -389,4 кДж/моль. Скорость детонации 3760 м/с при 1,0 г/см<sup>3</sup>. Плотность 1,436 г/см<sup>3</sup>. Насыпная плотность 0,61-0,65 г/см<sup>3</sup>. Фугасность 140 мл (по др. данным, 240 мл). Объем продуктов взрыва 1083 л/кг. Теплота взрыва 1,87 МДж/кг [5, 22].

Практически не восприимчив к удару, маловосприимчив к детонации. Применяется как добавка к специальным порохам, промышленным ВВ в смеси с нитратом аммония, а также в пиротехнике как компонент газогенерирующих составов и составов цветного дыма. Вместе с катализатором используется как ракетное топливо для модельных ракетных двигателей. Сырье для получения нитрогуанидина. Катализаторы разложения:  $\text{V}_2\text{O}_5$ ,  $\text{CuCl}$ , бихромат калия и др. Обладает средней степенью токсичности. Раздражает слизистые оболочки.

Соли гуанидина обычно получают осторожным сплавлением 10% избытка соотв. аммониевых солей с мочевиной в присутствии силикагеля при 150-190°C, под атмосферой  $\text{NH}_3$ :  $\text{NH}_4\text{NO}_3 + 2(\text{NH}_2)_2\text{CO} \rightarrow (\text{NH}_2)_2\text{C}=\text{NH}\cdot\text{HNO}_3 + 2\text{NH}_3 + \text{CO}_2$  [26, 27].

Другой способ основан на сплавлении дициандиамида с аммиачной селитрой при 150-160°C. Эти процессы экзотермичны и взрывоопасны, поэтому разрабо-

тан способ получения нитрата гуанидина взаимодействием цианамид кальция с нитратом аммония при 95°C.

Обладает средней степенью токсичности. Раздражает кожу.

### **Перхлорат аммония, аммоний хлорнокислый, ПХА, $\text{NH}_4\text{ClO}_4$**

Мол. масса 117,5. Бесцветные кристаллы.

**Табл. 2.7. Растворимость в воде при соответствующей температуре [1]**

$t, ^\circ\text{C}$	0	10	20	30	40	50	60	80	100
растворимость, г/100 г воды	12,1	16,4	21,7	27,7	34,8	42,5	50,6	68,6	87,3

Гигроскопическая точка при 25°C – 87%. Умеренно растворим в горячем ацетоне, метаноле, этаноле, пиридине.  $t$  начала разл. ок. 150°C. Выше 240°C переходит из ромбической в тетрагональную модификацию. Теплота перехода 9 кДж/моль.  $t$  быстр. разл. 350-370°C (без плавления) [5].

Плотность 1,952 г/см<sup>3</sup>. Плотность тетрагональной модификации, существующей выше 240°C 1,76 г/см<sup>3</sup>. Скорость детонации 2500 м/с при 1,17 г/см<sup>3</sup>. Теплота взрыва ок. 1,97 МДж/кг (вода – жидкость). Энтальпия образования -295 кДж/моль. Теплоемкость при 300К 1025 Дж/(кг·К), теплопроводность 0,426 Вт/(м·К) [3]. Фугасность 195-220 мл. Работоспособность в баллистической мортире 100% от тротила. Объем продуктов взрыва 810 мл [5].

Восприимчивость к удару чистого ПХА находится на уровне тротила. В присутствии горючих веществ чувствительность к удару заметно повышается. Впервые перхлорат аммония был получен в 1831 г. (Serrulas) при растворении аммиака в хлорной кислоте. В настоящее время широко применяется как окислитель в смесевых ракетных топливах и некоторых ВВ. Находит применение в пиротехнике: в первую очередь – в фейерверочных и газогенерирующих составах. Катализаторы разложения: оксиды переходных металлов, гл. обр. марганца и железа, хромит меди, производные ферроцена, ацетилацетонат железа. Получают сливанием насыщенных растворов перхлората натрия и нитрата аммония или нейтрализацией разбавленной хлорной к-ты аммиаком.

Довольно токсичен, способен проникать через неповрежденную кожу. При термическом разложении выделяет токсичные хлор и хлороводород.

### **Перхлорат калия, калий хлорнокислый, ПХК, $\text{KClO}_4$**

Мол. масса 138,55. Бесцветные кристаллы.

**Табл. 2.8. Растворимость в воде при соответствующей температуре [1]**

$t, ^\circ\text{C}$	0	10	20	30	40	50	60	80	100
растворимость, г/100 г воды	0,7	1,1	1,7	2,5	3,7	5,2	7,2	13,3	23,0

Не гигроскопичен (гигроскопическая точка для очищенного материала >99%).

При нагревании выше 300°C переходит из ромбической в тетрагональную модификацию. Теплота перехода 13,77 кДж/моль.  $t$  пл. 610 °C с разложением [2].

Теплота образования -432,9 кДж/моль. Теплота плавления 139 кДж/кг. Теплоемкость при 300К 783 Дж/(кг·К), теплопроводность 0,516 Вт/(м·К). Плотность 2,524 г/см<sup>3</sup> [3].

Менее опасен, чем калия хлорат, составы на нем имеют более высокие температуры воспламенения и меньшую скорость горения, чем у хлората. Частично заменил собой хлорат калия в сигнальных и фейерверочных составах. Сам по себе практически не влияет на окраску пламени. Содержит очень большой процент активного кислорода – 46%. Используется гл. обр. в сигнальных, звуковых и воспламенительных составах. Катализаторы разложения – оксиды меди, марганца, хрома, бихромат калия. Получают электролизом раствора хлората натрия. Затем добавляют раствор хлорида калия, в результате чего выпадают кристаллы перхлората. Довольно токсичен, токсичность выражена в меньшей степени, чем для хлората калия [2].

**Хлорат калия, бертолетова соль, калий хлорноватокислый,  $\text{KClO}_3$**   
Мол. масса 122,55. Бесцветные кристаллы.

**Табл. 2.9. Растворимость в воде при соответствующей температуре [7]**

Т, °С	0	10	20	30	40	50	60	80	100
растворимость, г/100 г воды	3,3	5,0	7,4	10,2	14,5	19,7	26,0	39,0	56,0

Не гигроскопичен (гигроскопическая точка – 97,7%).

Температура перехода из моноклинной в ромбическую систему 255°C, t пл. 356°C (по др. данным, 368°C). Начинает разлагаться при 400°C до перхлората калия с выделением кислорода. Расплав взрывоопасен. Медленно разлагается под действием УФ-излучения до хлорита калия, хлорида калия и кислорода. Температура вспышки 467°C (с 5-сек. задержкой).

Теплота образования -398,2 кДж/моль. Теплоемкость при 300K 829 Дж/(кг·K), теплопроводность 0,62 Вт/(м·K). Плотность 2,33 г/см<sup>3</sup> [3].

Под действием кислот отщепляет взрывоопасный диоксид хлора, в присутствии которого многие орг. материалы самовоспламеняются. Один из самых активных окислителей в пиротехнике. Обладает низкой температурой разложения, составы на его основе имеют пониженные температуры воспламенения. В чистом виде может взрываться от очень сильного удара, однако не детонирует от капсюля-детонатора №6. С середины 19 века используется как окислитель сигнальных составов, в гражданской пиротехнике, в ударных составах. Многие составы на основе хлората калия чувствительны к трению и удару. Смеси, содержащие неочищенную серу или примеси кислот, склонны к самовоспламенению, поэтому составы с хлоратом калия часто содержат вещества, нейтрализующие кислоту, например мел. В настоящее время применение хлората калия ограничивается составами цветного дыма, спичками и терочными составами. Катализаторы разложения – диоксид марганца, бихромат калия, оксиды меди. Не совместим с солями аммония, т.к. в присутствии влаги образуется малостабильный хлорат аммония, склонный к самовоспламенению (в США подобные составы запрещены законодательно). В смеси с фосфором в сухом виде взрывается даже при минимальном сжатии. Не рекомендуется использование хлората калия вместе с металлами типа магния и алюминия из-за высокой чувствительности и активности таких смесей. Нельзя допускать растирания составов на его основе в сухом виде. Необходима

осторожность при смешивании с серосодержащими веществами. Впервые был получен Бертолле в 1786 г. [9].

Получают [2]: электролизом раствора хлорида калия на угольных электродах в присутствии бихромата калия; хлорированием нагретого водного раствора гашеной извести. Полученный хлорат кальция сливают с раствором хлорида калия, после чего выпадают кристаллы хлората калия.

Токсичен. Летальная доза для человека более 50 мг/кг.

### **Хлорат бария, барий хлорноватокислый, $\text{Ba}(\text{ClO}_3)_2$**

Мол. масса 304,27. Бесцветные кристаллы.

**Табл. 2.10. Растворимость в воде при соответствующей температуре [6]**

$t, ^\circ\text{C}$	0	10	20	30	40	50	60	80	100
растворимость, г / 100 г воды	20,3	27,0	31,0	41,7	49,6	58,0	66,8	84,8	104,8

Не гигроскопичен. Из воды кристаллизуется в виде устойчивого моногидрата, который и используется в пиротехнике.

$t$  пл.  $414^\circ\text{C}$ . Начинает отщеплять кислород выше  $300^\circ\text{C}$ .

Теплота образования  $-760,7$  кДж/моль. Плотность  $3,856$  г/см<sup>3</sup>.

Раньше использовался как окислитель в пламенных составах зеленого огня. Составы на его основе традиционно считаются лучшими источниками зеленого свечения. Вышел из употребления из-за ядовитости и высокой чувствительности к механическим воздействиям. По чувствительности к механическим воздействиям составы на его основе превосходят композиции с хлоратом калия и способны самовоспламениться на ультрафиолетовом свете. Не совместим с солями аммония [9].

Обладает повышенной токсичностью. Может вызывать отравления при продолжительном кожном контакте. ПДК в пересчете на барий  $0,5$  мг/м<sup>3</sup>.

### **Перекись стронция, $\text{SrO}_2$**

Мол. масса 119,63. Бесцветный или слегка серый порошок.

В холодной воде растворим очень плохо, в горячей – разлагается.

При нагревании до  $215^\circ\text{C}$  начинает разлагаться; по данным ТГА, заметное разложение происходит при  $410^\circ\text{C}$ .

Теплота образования  $-643,1$  кДж/моль. Плотность  $4,56$  г/см<sup>3</sup> [9].

Сильный окислитель, смеси с орг. веществами чувствительны к удару и трению. Используется гл. обр. в трассирующих составах красного цвета пламени и в воспламенительных композициях для этих составов в целях улучшения воспламеняемости и устойчивости горения.

Токсичность средняя, но раздражает кожу и слизистые оболочки. Получают действием перекиси водорода на гидроксид стронция в момент выделения [28].

### **Перекись бария, $\text{BaO}_2$**

Мол. масса 169,36. Белое или серое порошкообразное вещество.

В воде почти не растворим и не гигроскопичен. Медленно разлагается во влажном воздухе. Быстро разлагается горячей водой. При получении выделя-

ется в виде кристаллогидрата с 8-ю молекулами воды. После чего его подвергают сушке.

$t$  пл.  $450^{\circ}\text{C}$  [9].

Теплота образования  $-634,7$  кДж/моль. Плотность  $5,43$  г/см<sup>3</sup> (по другим данным,  $4,96$  г/см<sup>3</sup>). Теплоемкость при  $300\text{K}$   $415$  Дж/(кг·К), теплопроводность  $1,34$  Вт/(м·К) [3].

Сильный окислитель. С некоторыми органическими соединениями, серой и фосфором может самовоспламеняться в присутствии влаги. Смеси с орг. веществами весьма чувствительны к удару и трению и требуют аккуратности в обращении. Применяется в воспламенительных композициях, гл. обр. для воспламенения термитных и трассирующих составов. В качестве связующего для смесей на его основе обычно используется малоактивный резинат кальция или идитол, с другими связующими составы плохо хранятся.

Токсичен. ПДК в пересчете на барий  $0,5$  мг/м<sup>3</sup>. Вызывает раздражение кожи и дыхательных путей.

**Трехокись железа,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ . Технический продукт – железный сурик, железная окалина,  $\text{Fe}_2\text{O}_4$**

Мол. масса  $159,7$ . Порошкообразное вещество, в зависимости от технологии изготовления имеет красно-коричневый или черный цвет.

Существует в трех полиморфных модификациях. Температура перехода из альфа в гамма-модификацию  $677^{\circ}\text{C}$ , теплота перехода  $0,67$  кДж/кг. Переход из гамма-модификации в дельта происходит при  $777^{\circ}\text{C}$ .  $t$  пл.  $1565^{\circ}\text{C}$  с разложением до  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  [9].

Плотность  $5,24$  г/см<sup>3</sup>. Теплота образования  $-822,7$  кДж/моль. Теплоемкость при  $300\text{K}$   $652$  Дж/(кг·К) [3].

В пиротехнике используется как окислитель в термитно-зажигательных и воспламенительных составах. Катализатор разложения перхлората аммония. Мало-токсичен, пыль раздражает глаза.

**Двуокись марганца, перекись марганца, пиролюзит,  $\text{MnO}_2$**

Мол. масса  $86,93$ . Порошкообразное вещество темно-коричневого или черного цвета.

Известен в 5 модификациях. Наиболее устойчивая форма – бета (пиролюзит).

Не растворим в воде, азотной и конц. серной кислоте. Растворим в соляной кислоте с выделением хлора.

Температура разложения от  $200^{\circ}\text{C}$  до  $530^{\circ}\text{C}$ , в зависимости от технологии получения.

Плотность  $5,026$  г/см<sup>3</sup>. Теплота образования  $-521,3$  кДж/моль. Теплоемкость при  $300\text{K}$   $627$  Дж/(кг·К) [3].

Окислитель в термитных и некоторых других пиротехнических составах. Катализатор разложения хлоратов и перхлоратов. Значительно повышает чувствительность смесей на основе хлоратов.

Малотоксичен, но в высоких концентрациях может вызывать отравления. Пыль сильно раздражает глаза и слизистые оболочки. При попадании пыли в глаза следует промыть их слабым раствором уксуса.

ПДК 5 мг/м<sup>3</sup> (в пересчете на марганец) [9].

### **Диоксид свинца, свинца пероксид, PbO<sub>2</sub>**

Мол. масса 239,2. Темно-коричневые кристаллы.

Существует в двух модификациях – альфа и бета. Используется, как правило, альфа-форма. В воде не растворим. Растворим в кислотах.

t разл. 290 °C.

Теплота образования -277,6 кДж/моль. Плотность альфа-формы 9,38 г/см<sup>3</sup>, бета-формы 9,55 г/см<sup>3</sup>. Теплоемкость при 300К 262,9 Дж/(кг·К) [3].

Сильный окислитель. Следует соблюдать осторожность при смешивании с горючими материалами. Смеси с серой и фосфором самовоспламеняются при попытке растирания в фарфоровой ступке. Используется в терках для спичек, в ударных и воспламенительных составах [9].

Токсичен. Кумулятивный яд, действующий на нервную систему. ПДК 0,05 мг/м<sup>3</sup> (в пересчете на свинец).

### **Тетраоксид свинца, свинцовый сурик, minium, Pb<sub>3</sub>O<sub>4</sub>**

Мол. масса 685,63. Красное порошкообразное вещество.

Существует в двух модификациях – альфа и бета. Альфа существует при температурах ниже -90°C. В воде не растворим. Реагирует с кислотами.

t начала разл. 500°C (до PbO).

Плотность 9,07 (по другим данным, 8,92) г/см<sup>3</sup>. Теплота образования -718,9 кДж/моль. Теплоемкость при 300К 214,4 Дж/(кг·К) [3].

Применяется в некоторых малогазовых и воспламенительных составах.

Токсичен. Кумулятивный яд, действующий на нервную систему. ПДК 0,05 мг/м<sup>3</sup> (в пересчете на свинец).

### **Окись висмута, висмута сесквиоксид, Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub>**

Мол. масса 465,96. Желтое порошкообразное вещество.

Существует в двух стабильных модификациях (альфа и дельта) и двух метастабильных (бета и гамма).

В воде не растворим. Реагирует с кислотами.

При нагревании до 727°C альфа-форма частично отщепляет кислород и переходит в дельта-форму, которая плавится при 825°C. Теплота перехода 41 кДж/моль.

Плотность 8,9 г/см<sup>3</sup>. Теплота образования -578 кДж/моль. Теплоемкость при 300К 114 Дж/(моль·К), теплота плавления 16,3 кДж/моль, теплопроводность 0,8 Вт/(м·К) [11].

Применяется в некоторых малогазовых и воспламенительных составах вместо оксидов свинца.

По сравнению с оксидами свинца токсичность умеренная. Поэтому в последние годы, несмотря на большую цену, в ряде составов оксиды свинца были заменены на оксид висмута.

**Меди окись, оксид меди II,  $\text{CuO}$** 

Мол. масса 79,55. Порошкообразное вещество черного цвета.

В воде не растворим, растворим в кислотах, в растворах солей аммония.

t пл.  $1336^{\circ}\text{C}$  с разложением [9].

Теплота образования -155,6 кДж/моль. Теплоемкость при 300K 652 Дж/(кг·K).

Плотность 6,45 г/см<sup>3</sup>. Теплота плавления 468,5 кДж/кг [3].

Используется как окислитель в некоторых воспламенительных составах и как цветообразующая добавка, окрашивающая пламя в синий или зеленый цвет. Получают термическим разложением нитрата или гидроксокарбоната меди. Довольно токсичен. ПДК 0,2 мг/м<sup>3</sup> (в пересчете на медь).

**Меди закись, оксид меди I, красная окись меди, куприт,  $\text{Cu}_2\text{O}$** 

Мол. масса 143,08. Порошкообразное вещество красно-коричневого цвета.

В воде не растворим, растворим в кислотах, растворах солей аммония. В сухом воздухе устойчив, но во влажном – медленно окисляется до  $\text{CuO}$ .

t пл.  $1235^{\circ}\text{C}$ , разлагается при  $1800^{\circ}\text{C}$  [9].

Плотность 6,0 г/см<sup>3</sup>. Теплота образования -166,8 кДж/моль.

Применяется в некоторых воспламенительных составах как добавочный окислитель. Получают добавлением щелочей к растворам солей одновалентной меди либо взаимодействием гидроксида меди с восстановителями типа глюкозы при нагревании. Довольно токсичен. ПДК 0,2 мг/м<sup>3</sup> (в пересчете на медь).

**Хромат бария, лимонный хром, желтый ультрамарин,  $\text{BaCrO}_4$** 

Мол. масса 253,37. Лимонно-желтые кристаллы.

В воде не растворим и не гигроскопичен. Растворяется в кислотах.

При нагревании начинает терять массу выше  $60^{\circ}\text{C}$ , очень медленно разлагается вплоть до  $1000^{\circ}\text{C}$  [9].

Теплота образования -1447 кДж/моль. Теплоемкость при 300K 556 Дж/(кг·K), теплопроводность 1,07 Вт/(м·K). Плотность 4,498 г/см<sup>3</sup> [3].

Применяется как окислитель в малогазовых составах, спичках, а также как желтый пигмент.

Ядовит. Раздражает кожу. ПДК 0,01 мг/м<sup>3</sup> (в пересчете на хромовый ангидрид). Канцероген.

**Хромат свинца, пигмент хром лимонно-желтый,  $\text{PbCrO}_4$** 

Мол. масса 323,22. Желтые или желто-оранжевые кристаллы моноклинной модификации.

Температуры фазовых переходов 707 и  $783^{\circ}\text{C}$ .

В воде не растворим и не гигроскопичен.

t пл.  $844^{\circ}\text{C}$ . Разлагается выше температуры плавления.

Теплота образования -912,7 кДж/моль. Плотность 6,02 г/см<sup>3</sup>. Теплоемкость при 298K 376,7 Дж/(кг·K) [3, 19].

Сильный окислитель, в смеси с некоторыми орг. веществами может даже самовоспламеняться. Применяется как окислитель в малогазовых составах [9].

Токсичен, вызывает раздражения кожи. Обладает канцерогенной активностью. ПДК 0,01 мг/м<sup>3</sup> (в пересчете на хромовый ангидрид).

**Висмута хромат оксид, висмутил хромовокислый,  $(\text{BiO})_2\text{CrO}_4$**

Мол. масса 565,95. Оранжево-красные игольчатые кристаллы.

Не растворим в воде и спирте, растворим в разбавленной азотной кислоте, разлагается щелочами.

Используется как окислитель в отечественных малогазовых составах аналогично хромату свинца, а также в качестве пигмента для керамики.

ПДК 0,01 мг/м<sup>3</sup> (в пересчете на хромовый ангидрид). Слабый канцероген.

**Дихромат калия, бихромат калия, калий двуххромовокислый,  $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$**

Мол. масса 294,22. Оранжево-красные кристаллы.

**Табл. 2.11. Растворимость в воде при соответствующей температуре [1]**

T, °C	0	10	20	30	40	50	60	80	100
растворимость, г/100 г воды	4,5	7,7	12,2	18,3	26,3	35,7	46,4	70,9	95,7

Не гигроскопичен.

Выше 257°C из триклинной переходит в моноклинную модификацию. Теплота полиморфного перехода 1,53 кДж/моль. t пл. 398°C, разлагается при температуре около 500°C.

Плотность 2,676-2,723 г/см<sup>3</sup> (по разным источникам). Теплота образования -2033 кДж/моль. Теплоемкость при 300K 746,7 Дж/(кг·K) [3].

В пиротехнике имеет ограниченное применение в малогазовых и спичечных составах (как добавочный окислитель и катализатор). Катализатор термического разложения многих солей-окислителей. Добавка, увеличивающая сроки хранения составов на основе магния и солей аммония. Применяется при выделке кож и в лабораторной практике как окислитель.

Токсичен, пыль разъедает слизистые оболочки и хрящевые ткани. ПДК 0,01 мг/м<sup>3</sup> (в пересчете на хромовый ангидрид). Слабый канцероген.

**Перманганат калия, калий марганцевокислый, «марганцовка»,  $\text{KMnO}_4$**

Мол. Масса 158,03. Темно-фиолетовые кристаллы с бронзовым оттенком.

**Табл. 2.12. Растворимость в воде при соответствующей температуре [8]**

T, °C	0	10	20	30	40	50	60	80	100
растворимость, г/100 г воды	2,83	4,2	6,4	9,0	12,6	16,9	22,2	25,0	-

Кроме воды, растворим в ацетоне, метаноле.

Начинает разлагаться при 240°C с выделением кислорода.

Плотность 2,7032 г/см<sup>3</sup>. Теплота образования -813,4 кДж/моль.

Сильный окислитель, окисляет спирты, смесь с глицерином самовоспламеняется через несколько секунд после смешивания. С концентрированной серной кислотой может образовывать опасный в обращении марганцевый ангидрид. Соляную кислоту окисляет с выделением хлора. Смеси на его основе обладают очень низкой температурой воспламенения. Нельзя допускать растирания смесей перманганата с горючими компонентами. Смесь с серой имеет температуру вспышки около 170°C и легко воспламеняется даже при аккуратном перетирании в фарфоровой ступке. Медленно реагирует с магнием и алюминием. Одна из немногих положительно зарекомендовавших смесей на основе этого окислителя

– это малогазовые составы с сурьмой или железом, использовавшиеся немцами во время Второй мировой войны. Смесь с порошком железа способна воспламениться при ударе. В современной пиротехнике практически не используется из-за проблем, связанных с хранением составов на основе перманганатов. Используется как окислитель в лабораторной практике, как антисептическое средство в медицине. Обладает средней степенью токсичности. Пыль раздражает верхние дыхательные пути. Может вызывать ожоги.

ПДК 5 мг/м<sup>3</sup> (в пересчете на марганец) [9].

**Политетрафторэтилен, фторопласт-4, тефлон, флюп, ПТФЭ,  $[-CF_2-CF_2-]_n$ .**

Полимер белого цвета, в тонких пленках прозрачный. Степень кристалличности 93-97%. Химически инертен, не растворяется в органических растворителях и воде.

Температура размягчения около 325°C. Медленное разложение начинается при 274°C [9].

Теплота образования -810,1 кДж/мономоль (по другим данным, -828,8 кДж/мономоль). Плотность 2,1-2,3 г/см<sup>3</sup>. Теплота плавления 34,2 кДж/кг. Теплоемкость при 300K 1000 Дж/(кг·K), теплопроводность 0,241 Вт/(м·K) [3].

Не токсичен и физиологически инертен, но при термическом разложении выделяет высокотоксичные соединения фтора [9].

Применяется в качестве окислителя в инфракрасных пиротехнических составах, топливах ПВРД, трассирующих и прочих составах (гл. обр. в смеси с металлами типа магния и алюминия). Подобные смеси отличаются высокой теплотой сгорания и при горении излучают в широком спектре УФ-, видимого и, особенно, ИК-диапазона.

## 2.2. Горючие

**Горючие** – компоненты составов, за счет сгорания которых выделяется энергия, необходимая для достижения требуемого пиротехнического эффекта.

**В качестве горючих используются:**

- **активные металлы:** магний, алюминий, титан, цирконий;
- **сравнительно малоактивные металлы:** железо, марганец, вольфрам, молибден, хром и т.д.;
- **неметаллы:** кремний, сера, сурьма, сульфид сурьмы, уголь, фосфор, бор и т.д.;
- **органические горючие:** уротропин, параформальдегид, дициандиамида, оксамид, тиомочевина, углеводы, крахмал и т.д.;
- **жидкие и твердые углеводороды:** бензин, керосин, нефть, мазут и т.д.

**Характерные особенности указанных типов горючих:**

- **Активные металлы.** Металлические горючие, такие как магний, алюминий, титан и др., широко применяются в современной пиротехнике. Они обеспечивают полноту сгорания пиротехнических смесей за счет сочетания своей химической активности в реакциях горения с высокой теплотворной способ-

ностью. В осветительных составах основное излучение возникает именно за счет свечения раскаленных частиц окислов металлов типа магния или алюминия. В термитных и термитно-зажигательных пиротехнических составах металлы способствуют высокому удельному тепловыделению на единицу воспламеняемой поверхности и образованию расплавленных шлаков, чего нельзя добиться при использовании углеводородных зажигательных композиций типа «напалмов», т.к. высокая теплота сгорания углеводородов рассеивается газообразными продуктами горения.

- *Малоактивные металлы.* Использование малоактивных металлов в пиротехнике носит ограниченный характер, т.к. теплотворная способность на единицу массы обычных металлов заметно ниже, чем для магния и алюминия. Тем не менее они находят применение в малогазовых замедлительных, теплогенерирующих и реже – в воспламенительных составах, где излишне высокая температура сгорания может приводить к образованию газов и паров, что крайне нежелательно в некоторых типах изделий.
- *Неметаллы.* Неметаллы применяются весьма широко как в военной, так и в гражданской пиротехнике. Причем кратко охарактеризовать их не представляется возможным ввиду широчайшего разнообразия их свойств. Типичный неметалл – сера, обладает цементирующими (связующими) свойствами, а в смесях с активными металлами – проявляет свойства окислителя.
- *Органические горючие, образующие при сгорании мало сажи.* Органические горючие типа углеводов, уротропина и т.д. применяются главным образом в фейерверочных составах цветного огня и составах цветного дыма. При сгорании они выделяют сравнительно немного тепла, но при этом обладают ценным свойством давать бесцветное, хорошо окрашиваемое пламя [31]. Некоторые из них являются эффективными пламегасителями и в смесях с окислителями сгорают без пламени. Углеводы типа лактозы или сахарозы при запрессовке обладают слабыми связующими свойствами.
- *Жидкие углеводороды.* Используются в зажигательных смесях, в том числе и в самостоятельном виде без окислителей. В этом случае сгорание происходит за счет кислорода воздуха. Наиболее ценным свойством при использовании в качестве зажигательного материала следует отметить не столько высокую теплотворную способность, сколько возможность создания многочисленных очагов возгорания, чего нельзя добиться при использовании термитно-зажигательных составов.

### **Магний, Mg**

Мол. масса 24,30. Серебристо-белый металл. Широко используется в пиротехнике в качестве металлического горючего.

$t$  пл. 649 °С.  $t$  кип. магния 1107 °С, что позволяет ему улетучиваться и гореть за счет кислорода воздуха при избыточном содержании в смеси.

Удельная теплота плавления 349,7 кДж/кг. Удельная теплота испарения 5263 кДж/кг. Плотность 1,74 г/см<sup>3</sup>. Теплоемкость при 300K 1025 Дж/(кг·K), теплопроводность 160 Вт/(м·K). Теплота сгорания 25120 кДж/кг [3].

Химически более активен, чем алюминий. На воздухе достаточно устойчив, хотя со временем теряет блеск вследствие утолщения окисной пленки. С водой при комнатной температуре не реагирует, но из кипящей воды активно вытесняет водород. В присутствии влаги медленно реагирует с серой, содой, оксалатами. Не совместим с веществами кислотного характера, в присутствии влаги реагирует даже с солями аммония. Напротив, практически не реагирует с веществами щелочного характера. С нитратами достаточно стабилен (кроме нитрата аммония). Не совместим с окислителями на основе малоактивных металлов, типа нитрата свинца, т.к. в результате обменных реакций способен вытеснять малоактивные металлы из солей. Хлораты и перхлораты в присутствии влаги медленно окисляют магний. Перхлорат аммония и сульфаты реагируют достаточно активно, поэтому используемый в пиротехнике магний либо покрывают парафином, либо обрабатывают раствором дихромата калия (пассивируют). Наилучшее покрытие для магния – это льняное масло (олифа), однако оно не защищает от солей аммония. Для защиты от действия солей аммония помогает пассивация с одновременным добавлением в смесь небольшого количества бихромата калия. Также продолжительному хранению способствует тщательная сушка [2]. Применяется гл. обр. в сигнальных и осветительных составах, сообщая им яркое свечение, а также в других составах в качестве легко воспламеняющегося горючего, дающего при сгорании много тепла. Для нужд пиротехники промышленность выпускает магний порошкообразный фрезерованный МПФ-1 – МПФ-4. Содержание магния в порошках сорта МПФ 98-94%. В России начат выпуск сферических порошков марок МГП и МГС [36]. В пиротехнических сигнальных составах военного назначения используется гл. обр. МПФ-2 и реже МПФ-3, в трассирующих – МПФ-4. В осветительных – все марки. Магний пожароопасен. Тонко измельченный порошок или стружка легко загораются от пламени спички. При тушении нельзя использовать воду, углекислый газ и фреон. Тушат порошком талька.

Пассивируют магний следующим образом: 50 г бихромата калия растворяют в 300 мл горячей воды. Порошок магния нагревают на воздухе при 100°C в течение 1 часа. После чего магний смешивают с горячим раствором бихромата и перемешивают до тех пор, пока порошок не станет коричневым. Продукт отжимают и сушат.

**Табл. 2.13. Некоторые сорта порошков магния [18]**

Марка	Размер частиц, мкм	Уд. поверхность, см <sup>2</sup> /г	Форма частиц	Насыпная плот- ность, г/см <sup>3</sup>
МПФ-1	311	1900	оск.	0,35
МПФ-2	166	2300	оск.	0,38
МПФ-3	127	2950	оск.	0,40
МПФ-4	56	3000 (5300)	оск.	0,45

## **Алюминий, Al**

Мол. масса 26,98. Серебристый блестящий металл. Порошок чешуйчатого алюминия имеет серебристый цвет, сферический – внешне напоминает порошок цемента.

При обычной температуре алюминий устойчив к действию воды и слабых кислот благодаря тонкой защитной пленке оксидов и гидроксидов алюминия. Реагирует со щелочами, соляной и серной кислотой. Не реагирует с концентрированной азотной и уксусной кислотами.

$t$  пл.  $660^{\circ}\text{C}$ .  $t$  кип.  $2450^{\circ}\text{C}$ . Плотность  $2,699 \text{ г/см}^3$ . Теплоемкость при  $300\text{K}$   $899 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{K)}$ , теплопроводность  $217 \text{ Вт/(м}\cdot\text{K)}$ . Удельная теплота плавления  $396,6 \text{ кДж/кг}$ . Удельная теплота испарения  $10878 \text{ кДж/кг}$ . Теплота сгорания  $32740 \text{ кДж/кг}$ . Тонкая пыль взрывоопасна [3, 9]. Температура воспламенения воздушной взвеси порошка  $550\text{--}640^{\circ}\text{C}$ , слоя алюминиевой пыли  $470\text{--}750^{\circ}\text{C}$ .

Наиболее дешевый металлический порошок из широко применяющихся в пиротехнике. Составы на его основе трудней воспламеняются, чем с магнием. Выпускается в виде порошка с частицами неправильной (оскольчатой), сферической формы (atomized) и в виде чешуек (flake). Чешуйчатый алюминий применяется в пиротехнике, в искрящихся составах, сферический – как горючее в ВВ, смесевых ракетных топливах, военной пиротехнике, например в зажигательных составах. С оскольчатой формой – в искрящихся составах. Выпускается также специальный очень мелкий алюминий с развитой поверхностью (dark pyro). Он имеет темно-серый цвет, легко воспламеняется, но опасен в обращении. Сферический алюминий получают распылением расплавленного алюминия в среде азота с небольшой добавкой кислорода. Чешуйчатый – размолом алюминиевого pulverizata в шаровых мельницах. Некоторые сорта порошкообразного алюминия содержат значительное количество окиси. Пыль алюминия при высоких концентрациях в воздухе способна взрываться от малейшей искры.

И хотя алюминий достаточно стабильный при хранении материал, к составам с нитратами предъявляют повышенные требования по содержанию в них воды, иначе при хранении протекает следующая реакция (с разогревом):



Табл. 2.14. Некоторые сорта порошков алюминия [18]

Марка	Размер частиц, мкм	% алюминия	Уд. поверхность, $\text{см}^2/\text{г}$	Форма частиц
ПА-1	306	-	630-900	оск.
ПА-2	179	-	1200-1500	оск.
ПА-3	105	-	1900-2400	оск.
ПА-4	56	91	2700-2900	оск.
ПА-5	-	99	-	оск.
АСДТ	30	96	-	сфер.
АСД-1	15	99,2-99,5	-	сфер.
АСД-2	5	99	-	сфер.
АСД-4	8	98	-	сфер.
ПП-1	6-7	90	-	чеш.
ПП-2	5-6	90	-	чеш.
ПП-3	4-5	90	-	чеш.
ПП-4	3-4	90	-	чеш.
ПАК (ПАП)-3	0,8-0,9	-	-	чеш.
ПАК (ПАП)-4	0,7-0,8	-	-	чеш.

Для предотвращения этой реакции вводят небольшие кол-ва борной кислоты либо используют алюминий, покрытый гидрофобными добавками. При обычной температуре алюминий весьма устойчив к действию нитрата аммония, однако, предназначенный для использования в АСВВ подвергают пассивации обработкой порошка растворами солей хромовой кислоты или нитритов. Стабилизации защитной пленки на поверхности металла способствуют добавки фосфатов. В присутствии влаги медленно реагирует с хлоратами и перхлоратами, не реагирует с перхлоратом аммония. Продажный чешуйчатый алюминий во избежание окисления на воздухе часто покрывают стеарином [2].

### **Алюминий-магниевый сплав, ПАМ, магналий, сплав АМ**

Обычно представляет собой хрупкий сплав алюминия с магнием  $50 \pm 2\% / 50 \pm 2\%$  в виде фазы интерметаллида  $Al_3Mg_2$  в  $Al_2Mg_3$  с т.пл.  $490^\circ C$ .

Сплав легко измельчается. В химическом отношении менее устойчив, чем алюминий, но более устойчив, чем магний. Из-за отрицательной теплоты образования интерметаллидов менее энергоемок, чем простая смесь порошков металлов, его составляющих. Однако скорость горения составов на ПАМ-е выше, чем на простой смеси магния и алюминия. Медленно реагирует с влажным перхлоратом аммония и не реагирует с нитратом аммония.

Плотность  $2,15 \text{ г/см}^3$ . Теплоемкость при  $300K$   $965 \text{ Дж/(кг} \cdot K)$ , теплопроводность  $89 \text{ Вт/(м} \cdot K)$ . Теплота образования  $-205,31 \text{ кДж/моль}$  (в пересчете на  $Al_3Mg_4$ ) [3].

Используется в искрящихся, фейерверочных и сигнальных составах. С нитратами, особенно бария и стронция, обычно горит пульсирующими вспышками, что используется в некоторых фейерверочных составах. В условиях дефицита магния может заменять этот металл во многих пиротехнических составах.

На воздухе сгорает в 2 стадии: на первой стадии выгорает магний, а затем происходит воспламенение алюминия.

Выпускаются сферические сорта алюминий-магневых сплавов (АМД) с небольшим содержанием магния (около 15%), от алюминия они выгодно отличаются повышенной реакционной способностью и низкой температурой воспламенения. Так, например, сплав алюминия всего лишь с 10% магния имеет температуру воспламенения  $1150K$ , тогда как чистый алюминий такого же фракционного состава –  $2200K$ . Применяются в высокоэнергетических ракетных топливах и плазменных топливах на коллоидной основе. Одним из сравнительно новых методов получения таких порошков является т.н. «механическое сплавление» (mechanical alloying), представляющее собой интенсивное перетирание отдельных порошков металлов в специальных шаровых мельницах. В результате за счет диффузии образуются метастабильные фазы интерметаллидов, обладающие улучшенными энергетическими и реакционными свойствами. Образование таких фаз невозможно в условиях обычного термического сплавления [24].

Табл. 2.15. Некоторые сорта порошков алюминий-магневых сплавов [28]

Марка	Размер частиц, мкм	% металла	Удельная поверхность, см <sup>2</sup> /г	Форма частиц
АМД-5	135	98	-	сфер.
АМД-10	15	98	-	сфер.
ПАМ-1	210	96	1000	оск.
ПАМ-2	170	-	1450	оск.
ПАМ-3	130	-	1600	оск.
ПАМ-4	65	-	2200	оск.
ПАМ-5	менее 45	-	2800	оск.
ПАМ-6	5	94	-	оск.

### Титан, Ti

Мол. масса 47,90. Существует в двух модификациях альфа (гексагональная решетка) и бета (кубическая решетка) с температурой фазового перехода около 882°C. Теплота фазового перехода 3,8 кДж/моль. Порошок цвета от серебристого до темно-серого.

t пл. 1671°C. t кип. 3327°C. Температура воспламенения порошка на воздухе около 250°C. Пыль воспламеняется при 380°C. Компактный металл загорается при 700-800°C [9].

Плотность 4,502 г/см<sup>3</sup>, у бета-формы 4,32 г/см<sup>3</sup> при 900°C. Теплоемкость при 300K 548 Дж/(кг·K), теплопроводность 15,5 Вт/(м·K). Удельная теплота плавления 395,8 кДж/кг. Удельная теплота испарения 8575 кДж/кг [3]. Теплота сгорания около 20000 кДж/кг, однако, объемная теплота сгорания выше, чем у алюминия. Порошок титана применяется в воспламенительных и зажигательных составах в случаях, когда необходима повышенная плотность энергии. Кроме того, используется в искристых фейерверочных составах. Является, по-видимому, лучшим искрообразователем из существующих, широкое применение его сдерживается лишь большей ценой металлического титана по сравнению с железом или алюминием. Устойчив к коррозии. При повышенной температуре может гореть в двуокиси углерода. Не токсичен и физиологически инертен. Отечественная промышленность для нужд пиротехники массово выпускает 3 сорта порошка титана: ПТС (порошок титана средний), ПТМ (порошок титана мелкий), ПТОМ (порошок титана очень мелкий). Изготавливаются эти сорта порошков кальциевогидридным способом [18].

Табл. 2.16. Некоторые сорта порошков титана [18, 29]

Марка	Средн. разм. частиц, мкм	% металла	Удельная пов-ть, см <sup>2</sup> /г	N, %	C, %	H, %	Ni, Fe, %	Si, %	Ca, %	Cl, %
ПТС	180	98,92	900-980	0,07	0,07	0,35	0,4	0,01	0,08	0,06
ПТМ	80	98,92	1200-1300	0,07	0,07	0,35	0,4	0,01	0,08	0,07
ПТОМ	50	98,97	1300-1450	0,07	0,07	0,4	0,4	0,01	0,08	0,08

### Титана карбид, TiC<sub>x</sub>, где x ~ 0,49-1

Мол. масса 59,89. Серые кристаллы с кубической решеткой.

Не растворим в щелочах и кислотах, кроме царской водки и смеси азотной кислоты с плавиковой [14].

$t$  пл. 3257°C. Интенсивно окисляется на воздухе при температурах выше 1000°C.

Плотность 4,92 г/см<sup>3</sup>. Теплоемкость 34,23 Дж/(моль·К). Теплота образования -209 кДж/моль. Теплопроводность 6,9 Вт/(м·К).

Используется в отечественных составах инфракрасного излучения и в малогазовых замедлительных.

### Цирконий, Zr

Мол. масса 91,22. Серебристый металл. Тонкий порошок имеет черный цвет и по виду напоминает графит.

Очень медленно растворяется в обычных кислотах, быстро – в плавиковой. Существует в двух кристаллич. модификациях – альфа (гексагональная решетка) и бета (кубическая решетка). Теплота фазового перехода 3,89 кДж/моль, температура перехода 863°C.

$t$  пл. 1832°C.  $t$  кип. 4377°C. Тонкие порошки циркония могут самовоспламеняться на воздухе, а увлажненные – взрываться. В этом отношении цирконий является самым опасным из металлов, используемых в пиротехнике. Порошок воспламеняется при температурах выше 260°C. Компактный металл стоек к нагреванию [9].

Плотность 6,511 г/см<sup>3</sup>. Теплоемкость при 300K 280 Дж/(кг·К), теплопроводность 22,7 Вт/(м·К). Удельная теплота плавления 150,2 кДж/кг. Удельная теплота испарения 6118 кДж/кг [3].

Достаточно дефицитный материал, поэтому используется лишь в малогазовых и воспламенительных составах для малогабаритных изделий, где необходима стабильность горения в зарядах малого диаметра. Не токсичен.

Для нужд пиротехники отечественная промышленность выпускает 2 типа порошков циркония – ПЦрН (порошок циркония, полученный натриево-термическим способом) и ПЦрК (порошок циркония, полученный кальциево-термическим способом). В свою очередь, эти типы порошков в зависимости от дисперсности маркируются с добавлением к индексу буквы или цифры, например, ПЦрН-А, ПЦрН-Б, ПЦрК-1, ПЦрК-2 и т.д. [18].

Табл. 2.17. Некоторые сорта порошков циркония [18, 30]

Марка	Размер частиц основной фракции, мкм	% акт. металла	Удельная поверхность, см <sup>2</sup> /г	Вода, мин.
ПЦрН	до 10	67,2-76,9	11000-12000	18
ПЦрК	до 100	более 96	3000-9600	-

### Циркония гидрид, ZrH<sub>x</sub>, где $x \sim 1,67-1,99$

Мол. масса 93,24. Цирконий легко адсорбирует водород уже при комнатной температуре, образуя хрупкий металлоподобный материал. В порошке имеет цвет от темно-серого до черного. Оптимальная температура поглощения водорода – около 300°C (под давлением). Выше 100°C при обычном давлении начинает выделять водород.

Плотность 5,6-5,74 г/см<sup>3</sup>. Теплота образования  $ZrH_{1,99}$  -162,8 кДж/моль, теплоемкость 31,0 Дж/(моль·К).

Применяется в воспламенительных составах гл. обр. американского производства [9].

### **Циркония карбид, $ZrC_x$ , где $x \sim 0,56-1$**

Мол. масса 103,23. Серые кристаллы с кубической решеткой.

Не растворим в щелочах и кислотах, кроме царской водки и смеси азотной кислоты с плавиковой [15].

$t$  пл. ок. 3530°C. Интенсивно окисляется на воздухе при температурах выше 930°C.

Плотность 6,59 г/см<sup>3</sup>. Теплоемкость при 300K 397 Дж/(кг·К) [3]. Теплота образования -196,86 кДж/моль (по другим данным, -206,7 кДж/моль [34]). Теплопроводность 11,6 Вт/(м·К) (по другим данным, 20 Вт/(м·К) [3]. О механизмах окисления карбида циркония и преимуществах карбидов над металлическими горючими в ряде составов см. [34].

Используется в отечественных составах инфракрасного излучения и в малогазовых замедлительных.

### **Сплав цирконий-никель**

В основном используются 2 типа подобных сплавов – «тип 1» в соотношении  $Zr/Ni$  70/30 с плотностью 7,2 г/см<sup>3</sup> и «тип 2» 30/70 с плотностью 8,1 г/см<sup>3</sup>. Серебристый или серый порошок. Устойчив к кислотам и щелочам, хотя для продолжительного хранения составов на его основе необходима пассивация в растворе дихромата калия. Обходится заметно дешевле, чем производство смесей порошков никеля и циркония, поэтому с конца 50-х годов заменил эти металлы в малогазовых составах американского производства [9].

### **Цинк, Zn**

Мол. масса 63,38. Белый металл с синеватым оттенком. В порошке – темно-серый.

При контакте с влагой покрывается белым налетом основного карбоната цинка. Легко растворяется в кислотах и щелочах с выделением водорода. Во влажном виде реагирует с серой. В присутствии влаги самовоспламеняется в контакте с нитратом аммония.

$t$  пл. 419,8°C.  $t$  кип. 900°C. Температура воспламенения пылевого слоя 100°C. Тонкая взвесь в воздухе может самовоспламеняться [9].

Плотность 7,14 г/см<sup>3</sup>. Теплоемкость при 300K 389 Дж/(кг·К), теплопроводность 116 Вт/(м·К). Удельная теплота плавления 110,8 кДж/кг. Удельная теплота испарения 1765 кДж/кг [3].

Применяется как горючее в дымовых составах. Существует опасность, связанная с хранением таких смесей в присутствии влаги, поэтому в состав вводят стабилизатор. Кроме того, может быть использован в малогазовых, искристорфорсовых составах и в любительской пиротехнике для окрашивания пламени в голубой цвет. Сгорает белым пламенем с сине-зеленым оттенком.

## **Железо, Fe**

Мол. масса 55,85. Железо – блестящий, серебристо-белый металл, в порошке имеет темно-серый цвет. Существует в 4-х кристаллич. модификациях. До 917°C существует альфа-модификация с объемноцентрированной кубической решеткой, бета-модификация (парамагнитная) устойчива в интервале 769-917°C, гамма-модификация (гранецентрированная решетка) существует в пределах 917-1394°C. Теплота перехода альфа – бета 1,72 кДж/моль, бета – гамма 0,91 кДж/моль.

Тонкая железная проволока активно горит в чистом кислороде, разбрасывая искры.  $t_{пл.}$  1535°C. Плотность 7,86 г/см<sup>3</sup>. Теплоемкость при 300K 446 Дж/(кг·K), теплопроводность 71,0 Вт/(м·K). Удельная теплота плавления 246,6 кДж/кг. Удельная теплота испарения 6267 кДж/кг [3].

В виде чугуновых или стальных опилок используется как искрообразователь в искристо-форсовых фейерверочных составах, ограниченно в чистом виде – в воспламеняемых составах. Существенным недостатком железа является способность корродировать в присутствии влаги, причем коррозия сильно ускоряется в смесях железного порошка с различными солями. Поэтому порошки железа, используемые в пиротехнике обычно подвергают воронению – нагреванию в льняном масле. Порошок железа, получаемый нагреванием цитрата железа, обладает выраженной пирофорностью и часто самовоспламеняется на воздухе.

## **Марганец, Mn**

Мол. масса 54,94. Серый металл, с розовым оттенком. Плотность альфа-модификации (устойч. ниже 710°C) 7,44 г/см<sup>3</sup>, бета-м. (существует в пределах 710-1090°C) – 7,29 г/см<sup>3</sup>, гамма-м. (существует в пределах 1090-1137°C) – 6,37 г/см<sup>3</sup>, дельта-м. (существует выше 1137°C) 6,28 г/см<sup>3</sup> [9]. Теплота полиморфных переходов (кДж/моль): альфа – бета 2,2, бета – гамма 2,1, гамма – дельта – 1,9.

Реагирует с горячей водой, медленно – с холодной, растворяется в сильных кислотах. Окисляется при хранении на воздухе. Гамма-фаза (электролитический марганец) не реагирует с холодной водой.

$t_{пл.}$  1244°C.  $t_{кип.}$  2041°C.

Теплоемкость при 300K 448 Дж/(кг·K), теплопроводность 7,4 Вт/(м·K). Удельная теплота плавления 219,5 кДж/кг. Удельная теплота испарения 4131 кДж/кг [3].

Горячее гл. обр. в малогазовых составах американского производства. Мало-токсичен, но в высоких концентрациях может вызывать отравления.

## **Молибден, Mo**

Мол. масса 95,95. Серебристо-белый металл. В порошке – темно-серый.

Не реагирует с водой, разбавленными кислотами, конц. соляной кислотой. Растворяется в горячих концентрированных кислотах и расплавах некоторых солей-окислителей.

$t_{пл.}$  2620°C.  $t_{кип.}$  4800°C. При нагревании до красного каления окисляется до MoO<sub>3</sub>.

Плотность 10,22 г/см<sup>3</sup>. Теплота сгорания 7578 кДж/кг.

Горячее в малогазовых составах иностранного производства [9].

## **Вольфрам, W**

Мол. масса 183,86. Темно-серый металл. В порошке – черный. Существует в двух модификациях. Основная устойчивая модификация – альфа (объемноцентрированная кубическая решетка), бета-модификация необратимо переходит в альфа при нагревании выше 630°C.

t пл. 3650°C. t кип. 5427°C. В порошке чувствителен к огню [9].

Плотность 19,3 г/см<sup>3</sup>. Теплота плавления 35,3 кДж/моль. Теплоемкость при 300K 134 Дж/(кг·K), теплопроводность 174 Вт/(м·K). Удельная теплота плавления 250 кДж/кг. Удельная теплота испарения 4188 кДж/кг [3].

Применяется как горючее в малогазовых составах производства стран НАТО и Китая.

## **Кремний, Si**

Мол. масса 28,09. Существует в 3-х аллотропных модификациях: кубической, аморфной и графитоподобной.

Из них устойчивыми являются кубическая и аморфная. Порошок имеет цвет от черного до серого, нанодисперсный кремний – серо-зеленый. Кристаллический кремний менее химически активен, чем аморфный, но реагирует с кипящей водой, в отличие от последнего.

t пл. 1412°C. t кип. 2677°C. Воспламеняется с трудом, горение характеризуется малой полнотой и высокой агломерацией. Теплота воспламенения пыли 775°C, слоя пыли 950°C [9].

Плотность кристаллического 2,42 г/см<sup>3</sup>, аморфного 2,00 г/см<sup>3</sup>, графитоподобного 2,4 г/см<sup>3</sup>. Теплоемкость при 300K 714 Дж/(кг·K), теплопроводность 148 Вт/(м·K). Удельная теплота плавления 1774 кДж/кг. Удельная теплота испарения 12670 кДж/кг. Теплота сгорания 30560 кДж/кг [3].

Горючее в пиротехнических составах, гл. обр. воспламенительных и инфракрасных. Получают термическим восстановлением окиси кремния. Ввиду плохой воспламеняемости и полноты сгорания чистого кремния в отечественной пиротехнике используется в виде сплавов, например с магнием (68% магния – сплав К-20), железом (ферросилиций), железом и хромом (ферросиликохром), кальцием (силицид кальция).

**Силицид кальция, CaSi<sub>2</sub>**, нестехиометрический продукт называется «силикокальций» (СК), например СК-10 (10% кальция). Отечественные марки содержат до 20% железа.

Мол. масса 96,26. Стеклообразное вещество.

Разлагается горячей водой, кислотами и щелочами.

t пл. 1220°C. (для силикокальция – от 1000°C до 1245°C)

Плотность 2,5 г/см<sup>3</sup> (для СК-20 2,35 г/см<sup>3</sup>). Теплота образования -150 кДж/моль [9].

Используется как горючее в трассирующих, дымовых, малогазовых и ударно-воспламенительных составах. В последние годы вытесняется менее активными горючими. Не токсичен, но пыль может вызывать щелочные ожоги кожи и дыхательных путей [18].

## Ферросилиций

Ферросилиций – это сплав кремния с железом. Используется как дешевый заменитель кремния в малогазовых составах отечественного производства. Ферросилиций марки ФС-75 состоит из 20-26% железа и 74-80% кремния.

$t$  пл. 1300°C.

Плотность 2,91-3,27 г/см<sup>3</sup>. Теплоемкость при 300К 647 Дж/(кг·К), теплопроводность 23 Вт/(м·К), теплота сгорания 23,88 МДж/кг [3, 18, 34].

## Сера, S

Мол. масса 32,06. Светло-желтый порошок.

Не растворима в воде. Хорошо растворима в сероуглероде, хуже – в легкой бензиновой фракции, горячем бензоле и толуоле.

$t$  пл. 113°C.  $t$  кип. 445°C.  $t$  воспламенения около 250°C. Существует в ромбической (до 95,39°C), выше – в моноклинной модификации, при быстром охлаждении расплава может быть получена пластическая модификация серы, однако она неустойчива и постепенно затвердевает. Теплота фазового перехода 0,4 кДж/моль [2].

Плотность ромбической модификации 2,07 г/см<sup>3</sup>, моноклинической 1,96 г/см<sup>3</sup>. Теплоемкость при 300К 712 Дж/(кг·К), теплопроводность 0,269 Вт/(м·К). Удельная теплота плавления 53,6 кДж/кг. Удельная теплота испарения 287,3 кДж/кг [3].

Известна с глубокой древности, используется как дополнительное горючее в дымном порохе, а также в различных пиротехнических и фейерверочных составах. Даже в малых количествах существенно понижает температуру воспламенения пиротехнических составов. Легко электризуется. К сере, применяющейся в пиротехнике, предъявляются жесткие требования по содержанию серной кислоты. Смеси с хлоратами весьма опасны в обращении и обязательно требуют наличия в своем составе стабилизаторов – карбонатов. Обладает цементирующими свойствами, однако в современных военных составах в этом качестве не применяется. Не токсична, но при хранении больших количеств может выделять ядовитый сероводород [9].

## Трисульфид сурьмы, сурьма сернистая, природный минерал антимоний, Sb<sub>2</sub>S<sub>3</sub>

Мол. масса 339,7. Темно-серое кристаллическое вещество с металлическим блеском. Аморфная модификация имеет оранжевый цвет.

В воде и органических растворителях не растворяется. Растворяется в сульфидах щелочных металлов, в конц. соляной кислоте и в щелочах. Разлагается горячей водой с выделением токсичных продуктов, поэтому влажные составы с трисульфидом сурьмы нельзя сушить при повышенной температуре.

$t$  пл. 548°C. При нагревании на воздухе выше 176°C начинает медленно превращаться в оксид сурьмы. При температурах выше 380°C становится заметно летучей и может быть перегнана почти без разложения [9].

Плотность 4,635 г/см<sup>3</sup>. Теплота образования -182,1 кДж/моль. Теплота плавления 233 кДж/кг. Теплоемкость при 300К 347 Дж/(кг·К), теплопроводность 0,59 Вт/(м·К) [3].

Применяется в ударных, малогазовых, фейерверочных и в некоторых искрообразующих составах белого огня в качестве горючего. Бесцветному пламени придает бледно-зеленый оттенок. С хлоратами и перхлоратами образует смеси, очень чувствительные к механическим воздействиям.

Токсичен. Раздражает кожу. При сгорании образует ядовитую окись сурьмы. ПДК 1 мг/м<sup>3</sup>.

Существует также сурьма пятисернистая  $Sb_2S_5$  в виде оранжево-красного аморфного вещества, которая используется в ряде малогазовых составов. Плотность 4,12 г/см<sup>3</sup>. При нагревании до 135°C пятисернистая сурьма распадается на антимоний и серу.

### **Сульфид мышьяка, реальгар, $As_2S_2$**

Природный минерал, известный с глубокой древности. Моноклинные кристаллы красного цвета, жирные на ощупь. В порошке имеет оранжевый цвет. Бета-форма имеет черный цвет.

В холодной воде не растворим, в горячей разлагается. Разлагается кислотами и аммиаком. Медленно окисляется на воздухе, особенно в присутствии ультрафиолетового излучения, при этом желтеет [2].

t пл. 308-320°C. t кип. 565°C. При 267°C претерпевает переход из альфа в бета-форму.

Плотность 3,506 г/см<sup>3</sup>. Теплота образования -168,7 кДж/моль [9].

С хлоратом калия образует очень чувствительные смеси. Применялся как горючее в пиросоставах, а также как дымообразователь в дымовых смесях желтого дыма [2]. В современной пиротехнике не используется из-за токсичности продуктов сгорания. В чистом виде и в виде продукта возгонки малотоксичен, но продукты разложения и сгорания высокотоксичны. ПДК 0,01 мг/м<sup>3</sup> (в пересчете на мышьяк). Канцероген.

### **Углерод, С**

Мол. масса 12,011.

Углерод образует несколько форм, применяющихся в пиротехнике и ВВ.

#### *Древесный уголь.*

Формально считается формой углерода, хотя это не так. Древесный уголь – это продукт с условной формулой  $C_xH_yO_z$  и теплотой образования -100 кДж/моль.

Свойства древесного угля могут кардинально изменяться в зависимости от степени обжига и вида используемой древесины. Для производства черного пороха используется, как правило, обожженная древесина деревьев, не содержащих смолы – ольхи, ивы, осины или крушины. Температура воспламенения древесного угля в зависимости от сорта составляет около 200°C.

Табл. 2.18. Типы древесного угля

Тип угля	Т обжига, °С	Содержание углерода	Структура
шоколадный	140-250	52-60%	не хрупок, плохо измельчается
бурый	275-320	70-75%	хрупок, довольно легко измельчается
черный	более 350	80-85%	хрупок, хорошо измельчается

Крупные частицы угля дают желтые искры, которые используются в искрящихся составах. Применяется как горючее, уменьшающее температуру воспламенения пиротехнических составов. Уголь с высокой степенью обжига обладает развитой поверхностью и используется как адсорбент (активированный уголь). Гигроскопичен, поэтому хранить необходимо в герметичной таре. Угольная пыль при значительном содержании в воздухе способна взрываться [2]. Стоит отметить, что хранение больших количеств древесного угля на воздухе, сразу после процесса обжига, может привести к самовозгоранию. Причем опасность самовоспламенения увеличивается с ростом степени обжига угля [34].

*Газовая сажа и Lampblack.*

Плотность 1,8-2,1 г/см<sup>3</sup>. Теплота сгорания 32,7 МДж/кг.

Горючее в пиросоствах. Применяется также в качестве черного пигмента и наполнителя резин, пластмасс и т.п. Получают сжиганием газа или жидкого топлива при недостатке кислорода воздуха. Lampblack, получаемый из жидких топлив, обладает развитой поверхностью и способен адсорбировать побочно образующиеся канцерогенные и токсичные вещества.

*Графит, Black lead, Silver lead.*

Черный порошок с металлическим блеском.

Сублимируется при 4350°С.

Плотность 2,25 г/см<sup>3</sup>. Теплота сгорания 33075 кДж/кг. Теплоемкость при 300К 714 Дж/(кг·К), теплопроводность 335 Вт/(м·К). Удельная теплота плавления 8714 кДж/кг при 4864 МПа. Удельная теплота испарения 59573 кДж/кг [3].

Используется в бездымных порохах, смесевых ВВ и пиротехнических составах как твердый смазывающий агент, облегчающий механическую переработку состава, например экструзию и прессование, а также как вещество, препятствующее электризации составов. По сравнению с другими формами углерода малоактивен.

Встречается в природе в виде минерала графита. В промышленности получают нагреванием угля в электропечах.

## Фосфор, Р

Мол. масса 30,97. Существует в 4-х основных аллотропных модификациях: белый фосфор, красный фосфор, черный фосфор и фиолетовый [15].

*Белый фосфор* – белое или желтое воскоподобное вещество, светящееся в темноте. Очень активен. На воздухе самовоспламеняется при малейшем трении или нагревании. Температура самовоспламенения 30°С. Горит ярким пламенем с выделением большого количества плотного белого дыма.

Хорошо растворим в сероуглероде.

t пл. 44,3°С. t кип. 275°С.

Плотность 1,82 г/см<sup>3</sup>. Теплоемкость при 300К 899 Дж/(кг·К), теплопроводность 770 Вт/(м·К). Удельная теплота плавления 0,20 кДж/кг. Удельная теплота испарения 401 кДж/кг [3]. Применяется как зажигательное и дымовое средство. Очень ядовит, смертельная доза при приеме внутрь около 50 мг. ПДК 0,1 мг/м<sup>3</sup>.

*Красный фосфор* – красно-коричневое вещество, получаемое нагреванием белого фосфора без доступа воздуха. Красный фосфор, в свою очередь, при вакуумной дистилляции (температура процесса 290°C) образует белый фосфор.

При 429°C возгоняется. При поджигании легко загорается и горит довольно активно, выделяя белый дым. При хранении в больших количествах самовоспламеняется, по-видимому, из-за примесей белого фосфора. По той же причине корродирует металлы при хранении. Самовоспламеняется при 260°C [9].

Удельная теплота возгонки 964 кДж/кг. Плотность 2,20 г/см<sup>3</sup>. Чувствителен к трению. Теплоемкость при 300К 685 Дж/(кг·К) [3].

Применяется как компонент дымовых и дымозажигательных составов. Ядовит, но гораздо менее токсичен, чем белый фосфор. Особенно опасно попадание пыли в глаза. ПДК 0,1 мг/м<sup>3</sup>. В чистом виде красный фосфор склонен медленно окисляться на влажном воздухе с образованием фосфорной кислоты и токсичного газа – фосфина, поэтому в пиротехнике применяется красный фосфор, стабилизированный специальными гидрофобными добавками или ингибиторами.

При смешивании порошков красного фосфора с окислителями в сухом виде часто происходит самовоспламенение, а смесь с бертолетовой солью взрывается от малейшего механического воздействия.

*Черный фосфор* имеет черный цвет и графитоподобную структуру. Получают из белого фосфора обработкой под высоким давлением. Плотность 2,702 г/см<sup>3</sup>. Теплоемкость при 300К 700 Дж/(кг·К), теплопроводность 14,0 Вт/(м·К) [15]. Малоактивен, запатентован как компонент дымовых составов.

## **Бор, В**

Мол. масса 10,82. Моноклинные кристаллы серого или красного цвета. Аморфный бор представляет собой порошок желто- или темно-коричневого цвета. Всего известно более 10 аллотропных модификаций бора. Кристаллический бор проводит электрический ток, а аморфный – не проводит.

Растворим в конц. азотной и серной кислотах с образованием борной кислоты. В воде не растворяется.

$t_{пл}$  2037°C.  $t_{кип}$  3980°C. При нагревании тонкого порошка до 600°C загорается и горит ярким зеленым пламенем. Легко воспламеняется, однако горение сопровождается высокой агломерацией частиц и недостаточной полнотой сгорания, кроме того, большая часть выделяемого тепла расходуется на плавление и испарение его легкоплавкого оксида. Пыль бора взрывоопасна. Аморфная модификация бора более активна, чем кристаллическая. При хранении на влажном воздухе аморфный бор постепенно окисляется до борной кислоты.

Теплоемкость при 300К бора кристаллического 1032 Дж/(кг·К), теплопроводность 27,0 Вт/(м·К). Теплоемкость при 300К бора аморфного 1060 Дж/(кг·К),

теплопроводность 1,89 Вт/(м·К). Удельная теплота плавления 4643 кДж/кг. Удельная теплота испарения 47440 кДж/кг. Плотность аморфной модификации 2,34 г/см<sup>3</sup> [3]. Используется в качестве горючего в некоторых малогазовых и воспламенятельных составах, а также в некоторых современных составах зеленого огня в качестве горючего. Смеси на основе бора легко воспламеняются от первичных средств, таких как дымный порох.

Бор не является токсичным элементом, однако может накапливаться в организме и вызывать расстройства центральной нервной системы.

#### **Гексаметиленetetрамин, уротропин, гексамин, (CH<sub>2</sub>)<sub>6</sub>N<sub>4</sub>**

Мол. масса 140,19. Бесцветные кристаллы жгуче-сладкого вкуса. С ростом температуры растворимость в воде падает.

**Табл. 2.19. Растворимость в воде при соответствующей температуре [17]**

T, °C	0	25	50	70
растворимость, г /100 г воды	89,7	86,9	81,8	76,7

Малогигроскопичен. С кислотами образует малостойкие соли. Во влажном состоянии реагирует с солями аммония.

При нагревании на воздухе выше 200°C возгоняется с частичным разложением.

Теплоемкость при 300K 1470 Дж/(кг·K), теплопроводность 0,492 Вт/(м·K). Плотность 1,27 г/см<sup>3</sup> (по другим данным, 1,339 г/см<sup>3</sup>). Энтальпия образования -120,5 кДж/моль [3].

При сгорании дает бесцветное несветящее пламя, которое легко окрашивается, что ценится в цветопламенных фейерверочных составах. Используется также в качестве сырья для производства гексогена и октогена. Сшивающий агент для гуаргама в водонаполненных ВВ. Находит применение в медицине и как «сухой спирт» для разжигания костров.

Получают конденсацией формальдегида с аммиаком.

#### **Параформальдегид, параформ, (CH<sub>2</sub>O)<sub>n</sub> n ~ 8-12**

Бесцветные кристаллы с запахом формальдегида.

t пл. 120-170°C. Медленно растворяется в холодной воде с образованием формалина. В горячей – растворяется быстро. Плохо растворим в ацетоне. Горюч. В прошлом использовался в качестве горючего в фейерверочных составах. В настоящее время заменен более удобным уротропином. ПДК в воздухе рабочей зоны 0,5 мг/м<sup>3</sup> (в пересчете на формальдегид) в воде 0,05 мг/л [15].

#### **Тиомочевина, CS(NH<sub>2</sub>)<sub>2</sub>**

Мол. масса 76,12. Бесцветные кристаллы горького вкуса.

**Табл. 2.20. Растворимость в воде при соответствующей температуре [10]**

T, °C	0	20	60	100
растворимость, г /100 г воды	4,6	12,0	44,6	69

Кроме воды, растворяется в метаноле, этаноле, пиридине.

$t_{пл.}$  184,5°C.

Плотность 1,405 г/см<sup>3</sup>. Теплота плавления 277 кДж/кг. Теплота образования -88,2 кДж/моль.

Теплоемкость при 300K 1235 Дж/(кг·K), теплопроводность 0,647 Вт/(м·K) [3].

Используется как низкокалорийное горючее-активатор в цветопламенных и сигнальных дымовых составах. Способна облегчать воспламенение и интенсифицировать сгорание пиротехнических смесей. Смеси с хлоратом калия очень чувствительны к механическим воздействиям, поэтому наметилась тенденция по замене тиомочевина менее активным тиурамом или использовании комбинации тиомочевина/мочевина [25]. В составах горит бесцветным пламенем. В смесях с окислителями имеет низкую термостойкость и начинает разлагаться при 80-100°C. Малотоксична, однако при систематическом воздействии угнетает функцию щитовидной железы и цветочных органов.

**Дициандиамид, ДЦДА, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>N<sub>4</sub>**

Мол. масса 84,03. Бесцветные кристаллы.

Растворимость в воде 3,3% при 20°C. Не гигроскопичен. Растворим в спирте, хуже – в эфире.

$t_{пл.}$  210°C [12].

Плотность 1,386-1,405 г/см<sup>3</sup>. Теплота образования -24,9 кДж/моль. Теплота сгорания 1382 кДж/моль.

Теплоемкость при 298,15K 1674 Дж/(кг·K), теплопроводность 0,85 Вт/(м·K) [3].

Используется как продукт в орг. синтезе, как стабилизатор нитроцеллюлозы, удобрение. В пиротехнике – горючее, обладающее свойствами пламегасителя, в связи с чем применяется в сигнальных дымовых составах. Малотоксичен, но при систематическом контакте вызывает дерматиты. Получают димеризацией цианамида.

### **Сахара и крахмал**

Сахара ввиду большого содержания кислорода горят довольно чистым пламенем, но при сгорании выделяют мало тепла, что используется в составах цветного дыма и пламени.

**Сахароза C<sub>12</sub>H<sub>22</sub>O<sub>11</sub>**

Мол. масса 342,30. Бесцветные кристаллы.

Растворимость в воде при 0°C 179,2 г/100 мл, при 20°C 203,9 г/100 мл, при 100°C 487,2 г/100 мл. В спирте растворяется плохо. Более гигроскопичен, чем лактоза, поэтому в пиротехнических составах предпочитают использовать более дорогую лактозу [14].

$t_{пл.}$  186°C с разложением.

Плотность 1,588 г/см<sup>3</sup>. Теплота образования -2246,2 кДж/моль. Теплота сгорания 5657,6 кДж/моль. Теплоемкость при 300K 1164 Дж/(кг·K), теплопроводность 0,46 Вт/(м·K). Теплота плавления 237 кДж/кг [3].

Горючее в американских и английских дымовых составах. Реже применяется как горючее в фейерверочных составах. Обладает цементирующими свойствами.

*Лактоза, молочный сахар*  $C_{12}H_{22}O_{11} \cdot H_2O$

Мол. масса 360,31. Бесцветные кристаллы.

Растворимость в холодной воде 17 г/100 мл, в горячей 40 г/100 мл. В спирте растворяется плохо.

t пл. 201,6°C. Моногидрат обезвоживается при 120°C. Температура фазового перехода безводного вещества 93,5°C, теплота перехода 4,2 кДж/кг.

Плотность 1,525 г/см<sup>3</sup>. Теплота образования -2482,4 кДж/моль (альфа-лактоза), -2234,9 кДж/моль (бета-лактоза). Горючее в американских и английских дымовых составах. Реже применяется как горючее в фейерверочных составах. Обладает слабыми цементирующими свойствами [9].

*Крахмал*

Полимер из фрагментов глюкозы. Мол. масса приближается к 1000000. Формула  $(C_6H_{10}O_5)_n$ .

Не растворяется в холодной воде, но растворяется в горячей, при охлаждении образуя гель. Используется как горючее в низкотемпературных фейерверочных составах и составах цветного дыма. Обладает слабыми цементирующими свойствами. Выделяют из картофеля или кукурузы. Теплота образования -966,3 кДж/мономоль.

## 2.3. Связующие (цементаторы)

**Связующие (цементаторы)** – вещества, предназначенные для скрепления компонентов пиротехнической смеси и придания возможности формирования прочных, нерассыпающихся зарядов (шашек, звездок, таблеток и т.п.). Применение связующего обусловлено тем, что в несвязанном (порошкообразном) виде невозможно добиться стабильной скорости горения смеси и устойчивого пиротехнического эффекта. А составы, запрессованные без связующего, будут обладать низкой прочностью.

Следует отметить, что эта группа компонентов тесно связана с предыдущей, так как, являясь в подавляющем большинстве своем органическими соединениями, связующие играют роль горючего и зачастую полностью заменяют классические горючие вещества. Напротив, некоторые классические горючие, такие как сера и углеводы, при запрессовке обладают цементирующими свойствами и используются в качестве связки. Если в составе присутствуют одновременно 2 связующих и металлическое горючее, это обычно означает, что одно из них вводится в виде пленки, нанесенной на частицы металла для уменьшения его коррозии и увеличения сроков хранения смеси. Второй вариант – облегчение грануляции состава за счет растворимости связующих в разных растворителях.

**В качестве горючих используются:**

- связующие природного происхождения – шеллак, декстрин, олифа, различные природные смолы и камеди, асфальт, канифоль и т.д.;
- синтетические связующие – фенолформальдегидные, полиэфирные и эпоксидные смолы, каучуки, нитроцеллюлоза и т.д.

### Характерные особенности указанных типов связующих:

- *Связующие природного происхождения* используются с самого зарождения пиротехники. Некоторые из них обладают настолько удачным сочетанием свойств, что находят применение, несмотря на наличие синтетических аналогов. Впрочем, для современной военной пиротехники использование природных связующих не характерно по трем причинам. Во-первых, поставщиками наиболее ценных и эффективных связующих типа шеллака или камедей являются, как правило, тропические страны. В условиях военного времени снабжение этими материалами может оказаться затруднительным, хотя при наличии местных источников сырья связующие природного происхождения являются неплохой альтернативой синтетическим [32]. Во-вторых, свойства и качество этих материалов в большой степени колеблются от партии к партии. В-третьих, эти свойства зависят от способа обработки сырья и времени года. Поэтому связующие природного происхождения более активно применяются в гражданской пиротехнике, нежели в военной. Хотя, в целом, они взаимозаменяемы. Например, в первые месяцы Великой Отечественной войны завод, производящий синтетическую смолу – идитол, из-за эвакуации перестал выпускать продукцию. Однако на многих заводах мирной промышленности оказался большой запас природного связующего – шеллака, в результате многие рецептуры были временно переведены на него [33].

*Синтетические связующие.* Современные пиротехнические составы в основном ориентированы на использование синтетических связующих по упомянутым выше причинам. К тому же синтетические связующие, как правило, довольно дешевы и обладают лучшей водостойкостью, что очень важно для составов военного назначения, предусматривающих продолжительное хранение. В отечественной пиротехнике применяются синтетические связующие типа фенолформальдегидных (идитол), резольных и формальдегидомочевинных смол. Основное их достоинство – это сочетание широкой сырьевой базы, простой технологии получения, хороших связующих свойств и низкой цены. Зарубежные синтетические связующие типа полиэфиров (ламинак) более дороги, но в то же время выгодно отличаются способностью к отверждению в присутствии специальных отвердителей, что ускоряет процесс изготовления и позволяет формировать более крупные элементы.

### Шеллак, лас. Условная формула – $C_{16}H_{26}O_4$

Прозрачные листочки цвета от темно-оранжевого до лимонно-желтого.

Не растворим в воде, растворим в спирте (85-90 г на 100 г спирта) и ацетоне. В спирте и ацетоне растворяется очень медленно. Хуже растворим в эфире и бензоле.

Размягчается при 50-90°C, плавится при 115-120°C. Разлагается при 180°C. При поджигании легко воспламеняется и горит [9].

Плотность 1,08-1,15 г/см<sup>3</sup>. Теплопроводность при 300K 0,222 Вт/(м·K). Теплоемкость при 298K 1470 Дж/(кг·K) [3]. Вырабатывается азиатским червем, паразитирующим на некоторых деревьях, произрастающих в Индо-

китае. Основным компонентом является тригидроксипальмитиновая кислота  $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{11}(\text{СНОН})_3\text{COOH}$  с примесями смолы и воска. Наилучшим качеством обладает шеллак, совсем не содержащий смолы. Несмотря на высокое содержание углерода, при горении не дает сажи и поэтому пламя на нем чистое. Одно из лучших связующих в пиротехнике (основная область применения – цветопламенные фейерверочные составы). Составы на нем горят примерно с такой же скоростью, как и на идитоле. В пиротехнические составы обычно вводится в виде спиртового раствора [2].

### Декстрин, $(\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_5)_n$

Желтоватый или коричневатый порошок, продукт частичной деполимеризации крахмала.

Легко растворим в воде.

Плотность 1,03 г/см<sup>3</sup>.

Используется как связующее и одновременно горючее в гражданской и любительской пиротехнике. В современной военной пиротехнике применяется редко из-за пониженных связующих свойств и низкой водостойкости. Вводится в виде пасты на водной или водно-спиртовой основе. Использование водно-спиртовой основы оправдано при наличии в пиротехническом составе хорошо растворимых в воде солей, однако содержание спирта не должно превышать 30%, иначе связующие свойства декстрина резко падают.

Получают нагреванием крахмала до 200-270°C (продукт темно-кремового цвета) или до 100-120°C в присутствии 0,15-0,3% азотной или соляной кислоты, облегчающей деполимеризацию (продукт светло-желтого цвета). Декстрин в виде слегка прожаренного рисового крахмала (rice starch) широко используется в Японии как связующее в пиротехнике гражданского назначения [2].

**Табл. 2.21. Сорты декстрина применяющегося в американской пиротехнике**

Параметры	Белый	Желтый	Английский
катализатор	HCl	HCl	без катализатора
температура выдержки, °C	79-121	149-218	135-218
время выдержки, ч.	3-8	6-18	10-20
цвет	светло-кремовый	светло или темно-желтый	светло или темно-коричневый
растворимость %	До 98	90-100	до 100
частей воды на 1 ч.	2-5	менее 1 или 1	3-10

### Олифа, linseed oil. Условная формула – $\text{C}_{16}\text{H}_{28}\text{O}_2$

Свежее льняное масло представляет собой желтоватую жидкость, получаемую при отжиме семян льна. Для использования в пиротехнике его нагревают до 160°C и продувают через масло воздух. Перед применением добавляют ускорители сушки (сиккативы) – оксиды металлов, гл. обр. свинца и марганца. При высыхании на воздухе получается эластичный прозрачный материал, известный под названием «глиноксин».

t пл. от -19 до -27°C. t кип. 343°C.

Плотность 0,930-0,938 г/см<sup>3</sup>.

Используется в качестве связующих пиротехнических составов и как гидрофобная добавка. В настоящее время практически вытеснена синтетическими смолами и полимерами. Хорошее связующее, мало портящее окраску пламени. Великолепный пленкообразователь, защищающий металлы от коррозии. Существенным недостатком олифы является необходимость продолжительной сушки составов на ее основе [2, 9].

### **Акароидная смола, red gum, acaroid resin**

Под акароидной смолой подразумевают смолы, вырабатываемые некоторыми деревьями, произрастающими в Австралии. В пиротехнике применяется почти исключительно красная акароидная смола, известная в иностранной литературе как «red gum». Обладает свойствами хорошего горючего с низкой температурой плавления, способствующей надежному воспламенению. Более дешевый вариант шеллака. Составы на нем горят в 1,5-2 раза быстрее, чем на шеллаке [2].

### **Аравийская камедь, gum arabic.**

Смола, добываемая из акации (acacia genus), произрастающей в Судане и в других странах Восточной Африки. Химически представляет собой полимер (М до 600000) из фрагментов D-галактозы, L-арабинозы и L-рамнозы. Смолу добывают, измельчают вручную и оставляют на солнце для отбеливания.

Растворима в холодной и горячей воде, маслах и большинстве орг. растворителей. Связующая способность выражена в меньшей степени, чем для других типов камедей.

Плотность 1,3-1,49 г/см<sup>3</sup>.

Издавна используется как связующее в пиротехнике и пищевой промышленности. Обладает свойствами эмульгатора [2].

### **Гуаргам, guar gum, гуаровая камедь**

Светло-серый порошок, растворимый в горячей или холодной воде. Вырабатывается из растения, культивируемого в Пакистане. Имеет связующую способность в 7-8 раз выше, чем у крахмала. Используется как загуститель водонаполненных ВВ, пищевых продуктов, а также в качестве связующего в пиротехнике вместо декстрина. Сшивается при помощи солей хромовой кислоты или уротропина с образованием поперечных связей [2].

**Асфальтит.** В США известен под торговыми марками – гильсонит и уинтаит (gilsonite, uintaite).

Аморфная субстанция черного или темно-коричневого цвета. Природная смола, образующаяся из нефти. По составу представляет собой смесь насыщенных углеводородов.

Растворим в бензоле, эфире и ацетоне.

Температура размягчения 125°C, t кип. 470°C.

Плотность 1,05-1,10 г/см<sup>3</sup>.

Использовался в пиротехнических составах (гл. обр. в сигнальных, осветительных и зажигательных) в качестве связующего и горючего компонента.

Преимуществом асфальтита является термопластичность и возможность изготавливать изделия на нем по сокращенному производственному циклу, минуя стадию сушки [9].

### **Канифоль, rosin, colophony, tar, $C_{20}H_{30}O_2$**

Продукт, получаемый из сосновой смолы. Представляет собой остаток от отгона скипидара. Содержит гл. обр. смесь различных изомеров абиетиновой кислоты. Канифоль медленно окисляется на воздухе с потемнением по поверхности, однако это мало отражается на ее свойствах. При слабом нагревании реагирует с серой с образованием ретена, поэтому сочетание с серой не рекомендуется. При хранении слеживается [2].

Растворяется в спирте.

$t$  размягчения 54-80°C.  $t$  пл. 100-140°C. При дальнейшем нагревании начинает испаряться [9].

Теплота плавления 66,2 кДж/кг. Теплоемкость при 300K 1340 Дж/(кг·K), теплопроводность 0,164 Вт/(м·K).

Плотность 1,1 г/см<sup>3</sup> [3].

В цветопламенных составах ведет себя хуже шеллака, т.к. в пламени присутствуют частички сажи, ухудшающие цвет пламени. Составы на основе канифоли горят приблизительно в 2-3 раза медленнее, чем на основе идитола. В смеси с веретенным маслом используется как связующее в сигнальных и других составах отечественного производства (замена олифы). Пламегаситель в бездымных порохах. Канифоль способна возгораться с образованием нетоксичного дыма. В современных составах военного назначения часто используют полусинтетический продукт конденсации канифоли и глицерина. Это вещество обладает всеми свойствами чистой канифоли, но при этом не окисляется кислородом воздуха и не обладает кислотными свойствами, что положительно сказывается на сроках хранения составов.

### **Кальция резинат, lime rosin, $Ca(C_{19}H_{29}COO)_2$**

Светло-желтый аморфный порошок или листочки. Кальциевая соль абиетиновой и пимаровой кислот.

Растворим в бензине, амил- и бутилацетате. Не растворим в воде. Обладает хорошей водостойкостью.

Сгорает белым цветом пламени с оранжевым оттенком.

Теплоемкость при 300K 1480 Дж/(кг·K), теплопроводность 0,155 Вт/(м·K). Плотность 1,2 г/см<sup>3</sup> [3].

Изготавливают кипячением насыщенного водного раствора гашеной извести с канифолью либо сплавлением гашеной извести с канифолью (с последующей фильтрацией избытка извести). Используется как горючее-связующее в трассирующих, воспламенительных и др. пиротехнических составах, содержащих неорганические перекиси, раньше использовался как связующее в некоторых ВВ [9]. В составах красного огня вместо него часто применяется резинат стронция.

## Фенолформальдегидные смолы, ФФС

*Идитол (смола СФ-112А)  $C_{13}H_{12}O_2$*

Новолачная смола. Продукт поликонденсации фенола с формальдегидом. Желтоватое полупрозрачное стеклоподобное вещество. Легко измельчается.

Растворяется в ацетоне и спирте.

t пл. 120-150°C. Теплота плавления 66 кДж/кг.

Плотность 1,25 г/см<sup>3</sup>. Теплоемкость при 300К 1270 Дж/(кг·К), теплопроводность 0,205 Вт/(м·К) [3]. Из-за примеси фенола при хранении на свету краснеет и растрескивается. Хорошее и дешевое связующее для пиротехнических составов, гл. обр. цветного огня военного и гражданского назначения. В отечественной пиротехнике идитол применяется с 1930 г. Составы на нем горят примерно с такой же скоростью, как и смеси с таким же количеством шеллака. При работе следует защищать органы дыхания от пыли идитола. В Китае производится аналог идитола под торговой маркой «*resinox*». Он имеет формулу  $C_{48}H_{42}O_7$ .

Кроме идитола, в пиротехнике применяются резольные смолы:

*СФ-340А (смола 211)*

Плотность 1,20 г/см<sup>3</sup>. t пл. 90-110°C Теплоемкость при 300К 1202 Дж/(кг·К).

*СФ-342А (смола 214)*

Плотность 1,20 г/см<sup>3</sup>. t пл. 75-125°C. Теплоемкость при 300К 1025 Дж/(кг·К), теплопроводность 0,17 Вт/(м·К) [3].

## Поливинилацетат, VAAR, vinyl alcohol acetate resin, $C_{10}H_{16}O_5$

Полимер, на 82% состоящий из звеньев винилацетата и на 18% – из фрагментов винилового спирта. Выпускался в виде 28% раствора в метилацетате. Хорошее связующее с высокой адгезией, используется в американских пиротехнических составах. Имеется информация, что в середине 90-х годов 20 века был снят с производства. Выпускался компанией Union Carbide [2]. В некоторых странах выпускаются аналоги этого связующего.

## Ламинак, laminac 4116

Связующее, производимое компанией American Cyanamid Co уже более 50 лет. Представляет собой подвижную жидкость – сополимер ненасыщенных полиэфиров, сшитых стиролом. Для отверждения в состав вводят 1-2% перекиси метилэтилкетона (Lupersol DDM) и катализатор отверждения – нафтенат кобальта. Может отверждаться как при комнатной температуре, так и при нагревании. Качество отвержденного при нагревании продукта выше.

Плотность 1,10 г/см<sup>3</sup>. Скорость горения составов на его основе соответствует составам на идитоле и шеллаке. Часто используется как связка в пиротехнических составах американского производства. От других связующих отличается очень низкой вязкостью в неотвержденном состоянии, что позволяет на производстве обходиться без растворителей [2, 9]. В прошлом выпускался ламинак 4110, который по свойствам уступал ламинаку 4116.

### **Тиокол, thiokol LP-2, полисульфидный каучук LP-2**

Жидкий полимер светло-коричневого цвета, хорошо смешивающийся с большинством орг. растворителей, не растворим в спиртах. Сшитый полимер теряет способность растворяться. Быстро полимеризуется под действием щелочей.

Плотность 1,27 г/см<sup>3</sup>.

Сшивается в плотную резину при помощи органических пероксидов, типа перекиси бензоила. Применялся в качестве горючего-связующего ракетных топлив американского производства, находит применение в качестве связующего осветительных, зажигательных и воспламенительных составов [9].

### **Полибутадиеновый каучук**

Различают полибутадиен с карбоксильными концевыми группами и с гидроксильными. Полибутадиен с гидроксильными концевыми группами (НТРВ) более текучий в неотвержденном состоянии и более мягкий в отвержденном, лучше перерабатывается, поэтому в США ему отдают предпочтение.

Формула форполимера:  $\text{HO}-(\text{CH}_2-\text{CH}=\text{CH}-\text{CH}_2)_n-\text{OH}$ . Сшивается диизоцианатами. Условная формула сшитого полимера:  $\text{C}_{7,075}\text{H}_{10,65}\text{O}_{0,223}\text{N}_{0,063}$ . Теплота образования -0,058 МДж/моль. Для улучшения перерабатываемости добавляют пластификаторы и добавки типа лецитина [16].

### **Полиизобутилен П-200, $[-\text{C}(\text{CH}_3)_2-\text{CH}_2-]_n$**

Бесцветное аморфное вещество, растворимое в углеводородах.

Температура стеклования около -70°C. t пл. 100°C.

Теплоемкость при 300К 1914 Дж/(кг·К), теплопроводность 0,121 Вт/(м·К).

Плотность 0,91-0,93 г/см<sup>3</sup> [3].

Используется как загуститель в пластичных и гелеобразных пиросоствах (гл. обр в зажигательных) и ВВ.

### **Полистирол, $[-\text{CH}_2\text{CH}(\text{C}_6\text{H}_5)-]_n$**

Бесцветное аморфное вещество. Растворяется в бензине.

Для изотактического полистирола температура стеклования составляет ок. 92°C. t пл. 240°C.

Теплоемкость атактического полистирола при 300К 1220 Дж/(кг·К). Плотность 1,05 г/см<sup>3</sup> [3].

Применяется как связующее и загуститель в пиросоствах и ВВ. Может быть использован как нетоксичный заменитель антрацена в составах черного дыма.

### **Поли-3,3-бис-(азидометил)оксетан, азопентон, ВАМО, $(\text{C}_5\text{H}_8\text{ON}_3)_n$**

Свойства форполимера: молярная масса 300-5·10<sup>5</sup> г/моль, теплота образования +2,46 МДж/кг, температура горения 2020К. Форполимер твердый при комнатной температуре и обладает высокой степенью кристалличности, поэтому на практике используют его сополимер с тетрагидрофураном. Формула сополимера:  $\text{HO}-(\text{C}_5\text{H}_8\text{N}_3\text{O})_n-(\text{C}_4\text{H}_8\text{O})_m-\text{H}$ ; n=10,4, m=6,9. Свойства: плотность 1270 кг/м<sup>3</sup>, теплота образования +1,19 МДж/кг, температура горения 1520К.

Конечный полимер – это сополимер, сшитый гексаметилендиизоцианатом (HMDI) и триметилпропаном (TMP). Используется в новейших пиротехнических, взрывчатых составах, в твердых ракетных топливах в качестве высокоэнтальпийного связующего. Широкое применение сдерживается высокой ценой этого продукта. На практике часто применяют термопластичный сополимер ВАМО с АММО (3-азидометил-(3-метил)оксетаном) из-за лучших механических свойств и меньшей температуры стеклования [16, 19].

### **Нитроцеллюлоза, нитроклетчатка, НЦ, $[C_6H_7O_2(OH)_{3-n}(ONO_2)_n]_m$**

Белая волокнистая, очень горючая масса. Различают коллоксилин (растворяется в спирто-эфирной смеси) и пироксилин (растворим в ацетоне). Кроме того, разные сорта коллоксилина и пироксилина различаются по вязкости ацетоновых растворов, структуре полимера и содержанию азота. В пиротехнике обычно используется пироксилин с 12,6% содержанием азота. Нитроцеллюлоза термически малостойка и при хранении испытывает самопроизвольное разложение, поэтому ее применяют с добавками-стабилизаторами (дифениламин или этилцентралит). Сухой необработанный пироксилин чувствителен к удару и до Первой мировой войны использовался в качестве взрывчатого вещества. Энтальпия образования определяется по формуле:  $\Delta H_{\text{н}} = -1360,11 + 58,6718 \cdot N$  ккал/кг, где N – количество азота [19].

Применяется как компонент лаков, эмалей, вводится в состав некоторых взрывчатых веществ. Основа практически всех бездымных порохов. В пиротехнике применяется в качестве связующего, а также бездымной горючей основы, одновременно содержащей окислительные элементы. НЦ, пластифицированная камфорой, называется «целлулоид». Получают нитрованием специально обработанных древесных опилок или хлопковой ваты [9].

### **Этилцеллюлоза, этиловый эфир целлюлозы, $[C_6H_{10-x}O_{5-x}(OC_2H_5)_x]_n$ x ~ 2,4-2,5**

Аморфный порошок белого цвета.

Растворим в этилацетате, дихлорэтано, бензоле, толуоле, ксилоле, ацетоне, метаноле, этаноле, бутилацетате и др.

Размягчается при 152-162°C. Горюч.

Плотность 1,09-1,17 г/см<sup>3</sup>.

Использовался как связующее в пиротехнике. В настоящее время вытеснен другими связующими. Не токсичен [9].

**Сополимер винилиденфторида с трифторхлорэтиленом, Kel-F 800, FK-800  $[-C_2H_2F_2-]_n[-C_2F_3Cl-]_m$ , где n = 1, m = 3 (50.6% F), отечественный аналог – фторкаучук СКФ-32, в котором n = 2, m = 1 (54-55% F).**

Белый прозрачный полимер плотностью 1,83-1,85 г/см<sup>3</sup> (для Kel-F 800 2,02 г/см<sup>3</sup>). Термостойкое и химически стойкое фторорганическое связующее. Устойчив до 200°C. Температура стеклования -18°C (для Kel-F 800 от -28 до -38°C). Теплота образования Kel-F 800: -2418 кДж/мономоль. Не растворим в большинстве орг. растворителей, хорошо растворим в кетонах. Применяется как связующее в современных пиротехнических составах и ВВ [15, 37].

**Сополимер винилиденфторида с гексафторпропиленом, Viton A** (торговая марка duPont), отечественный аналог – фторкаучук СКФ-26,  $[-C_2H_2F_2-]_n[-C_3F_6-]_m$ , где  $n = 3,5$ ,  $m = 1$  (66% F)

Белый прозрачный полимер плотностью 1,80-1,86 г/см<sup>3</sup>. Термостойкое и химически стойкое фторорганическое связующее. Устойчив до 250°C. Температура стеклования -22°C. Теплота образования -2784 кДж/мономоль. Теплопроводность 0,226 Вт/(м·К) Не растворим в большинстве орг. растворителей, хорошо растворим в кетонах. Применяется как связующее в современных пиротехнических составах и ВВ [15, 37].

## 2.4. Пластификаторы

**Пластификаторы** – вещества, повышающие эластичность полимерных связующих и способствующие понижению температуры переработки состава за счет образования водородных связей и уменьшения жесткости молекул полимеров. В пиротехнике используются в составе полибутадиеновых, полиизобутиленовых, полиуретановых, полисульфидных и пр. связок. Зачастую являются «разбавителями» более дорогих синтетических каучуков.

В основном применяются сложные эфиры органических и неорганических кислот – дибутилфталат (ДБФ), дибутилсебацат (ДБС), трикрезилфосфат (ТКФ), трибутилфосфат (ТБФ), а также минеральные масла.

**Дибутилфталат, ДБФ,  $C_6H_4(COOC_4H_9)_2$**

Мол. масса 278,34. Маслообразная прозрачная бесцветная жидкость.

В воде практически не растворяется. Смешивается во всех пропорциях со спиртом, эфиром, ацетоном, бензолом и др.

t пл. -35°C. t кип. 340°C.

Плотность 1,0465 г/см<sup>3</sup>. Теплота образования -867,5 кДж/моль. Широко известный в химической промышленности пластификатор. Используется в пиротехнике как пластификатор нитроцеллюлозы и некоторых синтетических связующих. Не токсичен. Раньше использовался в качестве средства отпугивания насекомых [12].

**Трикрезилфосфат, ТКФ,  $(C_6H_5)_3PO$**

Мол. масса 368. Маслообразная прозрачная бесцветная жидкость. На солнечном свете желтеет. Технический продукт представляет собой смесь из 10 изомеров.

В воде практически не растворяется. Смешивается во всех пропорциях со спиртом, эфиром, ацетоном, бензолом и др. Незначительно растворим в минеральных маслах.

t пл. -36°C. t кип. 430°C (при атм. давлении). t всп. 250-260°C.

Плотность 1,15-1,17 г/см<sup>3</sup>. Вязкость 64-208 сПв. Широко известный дешевый пластификатор. Используется в пиротехнике как пластификатор некоторых полимеров и смол. Токсичность определяется содержанием сильноядовитого орто-трикрезилфосфата [35].

## Трибутилфосфат, ТБФ, $(C_4H_9O)_3PO$

Мол. масса 266,32. Маслообразная прозрачная жидкость без запаха.

В воде растворяется плохо: 39 г/л при 19°C, растворимость воды в ТБФ 70 г/л при 25°C. Смешивается во всех пропорциях со спиртом, эфиром, ацетоном, бензолом и др.

t пл. -80°C. t кип. 280-290°C (при атм. давлении). t восп. 158°C.

Плотность 0,975-0,985 г/см<sup>3</sup>. Вязкость 4,5-7,0 сПз. Широко известный универсальный пластификатор. Используется в пиротехнике для пластификации некоторых полимеров и смол [14, 35]. Раздражающе действует на кожу и слизистые оболочки. ПДК 2,5 мг/м<sup>3</sup>.

## 2.5. Соединения, окрашивающие пламя

Цветопламенные добавки – соли органических или неорганических кислот, сообщающие пламени характерный цвет, присущий содержащимся в них элементам. Обычно применяются в паре с донором хлора.

Основными цветопламенными добавками являются:

- соли шавелевой кислоты (оксалаты) стронция, бария, натрия;
- карбонаты и гидрокарбонаты стронция, бария, натрия;
- соли бензойной кислоты (бензоаты);
- пламенные добавки: криолит, фторид бария, фторид кальция;
- хлориды: хлорид бария, хлорид меди I;
- соединения меди: меди ацетат-арсенит, сульфид, оксид и т.д.

Характерные особенности указанных типов цветопламенных добавок:

- *Оксалаты* – используются в цветопламенных составах, содержащих магний, т.к. способствуют очистке зоны первичного пламени от оксида магния и тем самым увеличивают чистоту цвета [2]. Реже применяются в составах, содержащих хлораты или перхлораты. Обладают свойствами пламегасителя.
- *Карбонаты* – широко применяются в цветопламенных составах на основе хлоратов и перхлоратов, т.к. более дешевы, чем оксалаты. Из-за ярко выраженной щелочной реакции карбонаты не совместимы с алюминием и солями аммония. Кроме того, являются пламегасителями и добавками, понижающими температуру горения дымовых составов.
- *Бензоаты* (соли бензойной кислоты) – запатентованы во многих пиротехнических смесях, но применяются не так часто, как оксалаты или карбонаты, прежде всего из-за цены. Хорошие цветообразователи, сочетающие свойства горючего и модификатора горения. С перхлоратами образуют композиции, сгорающие с высокой скоростью и стабильностью.
- *Пламенные добавки* (селективные излучатели) – до сих пор используются в осветительных составах для увеличения светоотдачи в целях экономии более дорогого магния. Криолит способен окрашивать пламя в желтый цвет.
- *Хлориды* – хлориды для окрашивания пламени используются очень редко в связи с высокой гигроскопичностью и свойством корродировать металлы, содержащиеся в пиросоставах (в присутствии влаги). Тем не менее в качестве

цветообразующих добавок они очень эффективны и могут рассматриваться как альтернатива классическим цветообразователям, если получаемый состав не предусматривает продолжительного хранения.

- **Соединения меди** – применяются для сообщения пламени синего цвета. Среди пиротехников нет единого мнения о преимуществах какого-либо одного соединения меди, поэтому их ассортимент довольно велик.

### **Стронция оксалат, щавелевокислый стронций, $\text{SrC}_2\text{O}_4$**

Мол. масса моногидрата 193,66, безводного – 183,65. Бесцветные кристаллы.

В холодной воде практически не растворим, в кипящей воде растворимость около 5 г/100 мл. Не гигроскопичен.

Из раствора высаживается в виде моногидрата, полностью теряющего воду при 150°C (отщепление воды начинается при 43°C). При нагревании выше 400°C образует углекислый газ, монооксид углерода и оксид стронция.

Плотность 2,08 г/см<sup>3</sup>. Теплота образования -1372 кДж/моль.

Вводят в количестве 10-15% в сигнальные, фейерверочные и трассирующие составы для сообщения пламени красного цвета. Получают постепенным добавлением щавелевой кислоты в раствор хлорида стронция.

Токсичен и раздражает кожу [2, 9].

### **Бария оксалат, щавелевокислый барий, $\text{BaC}_2\text{O}_4$**

Мол. масса 225,36. Бесцветные кристаллы.

В воде не растворим, не гигроскопичен, но с водой образует гидраты.

При нагревании до 346-400°C разлагается до  $\text{BaCO}_3$  и  $\text{CO}$ .

Плотность 2,658 г/см<sup>3</sup>. Теплота образования -1371,6 кДж/моль.

Изредка применяется как компонент пиротехнических составов зеленого цвета пламени. В составах, не содержащих металлического магния, не используется. Токсичен, раздражает кожу. ПДК в пересчете на барий 0,5 мг/м<sup>3</sup> [2, 9].

### **Натрия оксалат, щавелевокислый натрий, $\text{Na}_2\text{C}_2\text{O}_4$**

Мол. масса 134,00. Бесцветные кристаллы.

**Табл. 2.22. Растворимость в воде при соответствующей температуре [10]**

$T, ^\circ\text{C}$	0	20	60	100
растворимость, г / 100 г воды	2,7	3,4	4,9	6,5

В воде растворим, не гигроскопичен.

Плавится при 232°C. Разложение по ДТА начинается при 480°C. При нагревании распадается на карбонат натрия и окись углерода.

Плотность 2,34 г/см<sup>3</sup>. Теплота образования -1315,9 кДж/моль. Теплоемкость 142 Дж/(моль·К).

Окрашивает пламя в желтый цвет. Не реагирует с алюминием, очень слабо взаимодействует при хранении с магнием, что выгодно отличает его от хлорида и карбоната натрия. Получают добавлением карбоната натрия к раствору щавелевой кислоты или нагреванием до 250°C сахарной пыли со смесью гидроксидов калия и натрия.

Токсичен. Может вызывать щелочные ожоги при продолжительном кожном контакте [2, 9].

**Кальция оксалат моногидрат, щавелевокислый кальций,  $\text{CaC}_2\text{O}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$**

Мол. масса 146,12. Бесцветные моноклинные кристаллы.

В воде не растворим.

При нагревании до 200°C отщепляет воду, а при температуре выше 350°C разлагается на карбонат кальция и окись углерода.

Плотность 2,2 г/см<sup>3</sup>. Теплота образования -1671 кДж/моль. Теплоемкость 152,4 Дж/(моль·К).

Раздражает кожу. Обладает щелочной реакцией. Используется как добавка, окрашивающая пламя в розовый цвет, селективный излучатель и замедлитель горения [2, 9].

**Стронция карбонат, углекислый стронций,  $\text{SrCO}_3$**

Мол. масса 147,63. Бесцветные кристаллы.

В воде не растворим и не гигроскопичен.

Плавится при 1497°C. При нагревании распадается на углекислый газ и оксид стронция.

Плотность 3,7 г/см<sup>3</sup>. Теплота образования -1227 кДж/моль. Теплоемкость 82,42 Дж/(моль·К). Теплота плавления 40 кДж/моль.

Обычно вводят в количествах 10-15% в смеси на основе перхлората или хлората калия для сообщения пламени красного цвета [2, 9].

**Бария карбонат, углекислый барий,  $\text{BaCO}_3$**

Мол. масса 197,35. Бесцветные кристаллы.

В воде почти не растворим, не гигроскопичен.

При нагревании выше 1360°C плавится, выше 1000°C диссоциирует на оксид бария и углекислый газ.

Плотность 4,25-4,43 г/см<sup>3</sup>. Теплота образования -1211 кДж/моль. Теплоемкость 85,98 Дж/(моль·К).

Не реагирует с алюминием, слабо взаимодействует при хранении с магнием. Изредка используют как источник бария в составах зеленого пламени с перхлоратами и как добавка для нейтрализации следов кислот. Раздражает кожу, токсичен при проглатывании. ПДК в пересчете на барий 0,5 мг/м<sup>3</sup> [2, 9].

**Кальция карбонат, углекислый кальций, мел,  $\text{CaCO}_3$**

Мол. масса 100,09. Белый кристаллический порошок.

В воде не растворим. Растворяется в кислотах с выделением углекислого газа.

t пл. 1098°C (предварительно отщепляет углекислый газ при 660°C с образованием оксида кальция).

Плотность 2,711 г/см<sup>3</sup> (кальцит) и 2,98 г/см<sup>3</sup> (арагонит). Теплота образования -1207,7 кДж/моль.

Применяется как стабилизатор, охладитель и замедлитель горения дымовых составов, а также как добавка в фейерверочные составы, придающая пламени оранжевый цвет [2, 9].

**Меди карбонат основной, малахит,  $\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu(OH)}_2$**

Мол. масса 221,11. Темно-зеленый кристаллический порошок.

В воде не растворим. Начинает разлагаться до черного оксида меди при 200°C.

Плотность около 4,0 г/см<sup>3</sup>.

Используется в смесях с хлоратом калия и перхлоратами, в т.ч. и перхлоратом аммония для создания синего пламени. Дает менее насыщенный цвет, чем парижская зелень, но гораздо менее токсичен, поэтому ему отдают предпочтение. Получают смешением раствора карбоната натрия с раствором сульфата меди и последующей тщательной промывкой водой. Токсичен. ПДК 0,2 мг/м<sup>3</sup> [2, 9].

**Гексафтороалюминат натрия, криолит,  $\text{Na}_3\text{AlF}_6$**

Мол. масса 209,94. Бесцветный порошок.

В воде растворяется плохо – 0,42% при 25°C. Претерпевает полиморфное превращение при 565°C, теплота превращения 43,6 кДж/кг.

t пл. ок. 1013°C с разложением.

Плотность 2,98 г/см<sup>3</sup>. Теплота плавления 545 кДж/кг. Теплоемкость при 300K 1030 Дж/(кг·K). Теплота образования -3312 кДж/моль [3].

Используется в осветительных составах как агент, повышающий яркость свечения пламени. Применяется для окрашивания пламени в желтый цвет, а также как модификатор, уменьшающий дульное пламя бездымных порохов [2].

**Меди I сульфид, сернистая медь,  $\text{Cu}_2\text{S}$**

Мол. масса 159,16. Темно-серые кристаллы.

В воде не растворяется, совместим с большинством компонентов пиротехнических составов.

t пл. 1129°C, в вакууме диссоциирует на медь и серу при 700°C.

Плотность 5,81 г/см<sup>3</sup>. Теплота образования -79,6 кДж/моль. Теплоемкость 76,37 Дж/(моль·K).

Получают пропусканием сероводорода через раствор солей меди в слабокислой среде либо нагреванием порошка меди с серой. Применяется в современной пиротехнике для придания пламени синего цвета. Токсичен. ПДК 4 мг/м<sup>3</sup> [13].

**Меди ацетат-арсенит, парижская зелень, изумрудная зелень,  $(\text{CuO})_3 \cdot \text{As}_2\text{O}_3 \cdot \text{Cu}(\text{CH}_3\text{COO})_2$**

Зеленый порошок, не растворимый в воде, растворяется в кислотах, нашатырном спирте, разлагается щелочами. Не гигроскопичен.

Комплексное соединение, используемое в некоторых странах в качестве источника чистого синего свечения пиротехнических составов. Особую популярность в пиротехнике приобрел в 50-х годах 20 века. В настоящее время практически вытеснен другими соединениями меди из-за высокой токсичности, обусловленной содержанием мышьяка. Вместо него также использовали мышьяковистую медь. При работе с веществом обязательно использование респиратора.

Получают смешением растворов сульфата меди, уксусной кислоты и раствора натриевой соли мышьяковистой кислоты [2].

**Медь, Cu**

Красноватый металл. Мол. масса 63,55.

t пл. 1083°C.

Плотность 8,9 г/см<sup>3</sup>.

Во влажной атмосфере покрывается зеленой пленкой основного карбоната. В присутствии влаги реагирует с солями аммония. Используется в составах синего огня с перхлоратом аммония (необходима хорошая защита от влаги при помощи пленкообразователя) и в составах зеленого огня на основе нитрата бария для устранения желтоватого оттенка пламени. Вводят в количестве около 5% [2].

## **2.6. Хлорсодержащие соединения**

**Хлорсодержащие соединения** (доноры хлора) – вещества, содержащие связанный хлор. Используются для усиления цветности цветопламенных составов за счет образования в пламени соответствующих хлоридов металлов, излучающих в определенном участке видимого света. С активными металлами типа магния и алюминия хлорорганические соединения выполняют функцию окислителей, например, в металлохлоридных дымовых составах.

**Доноры хлора можно условно разделить на следующие группы:**

- **хлорорганические соединения:** гексахлорбензол, дехлоран, гексахлорэтан, гексахлорциклогексан и т.д.;
- **хлорорганические связующие и полимеры:** поливинилхлорид (ПВХ), ХПВХ, парлон, саран и др.;
- **неорганические соединения:** хлорид аммония, хлорид ртути (каломель).

**Характерные особенности указанных типов доноров хлора:**

- *Хлорорганические соединения* – твердые кристаллические вещества с характерным запахом. Широко используются в цветопламенных составах и в металлохлоридных дымовых смесях. Некоторые из них высокотоксичны для насекомых и раньше применялись в качестве ядохимикатов. Из-за токсичности по отношению к теплокровным и способности накапливаться в организме большинство этих веществ в настоящее время снято с производства (кроме гексахлорэтана и хлорпарафинов).
- *Хлорорганические связующие и полимеры* – аморфные вещества белого цвета или стеклообразные субстанции. Играют роль одновременно донора хлора, горючего и связующего в сигнальных и фейерверочных составах, содержащих магний. В состав вводят в виде раствора в органических растворителях либо в порошке.
- *Неорганические хлорсодержащие соединения* – в пиротехнике применяются ограниченно, т.к. зачастую обладают рядом неприемлемых для современных составов свойств. Например, хлорид ртути (каломель) токсичен, содержит мало хлора и разлагается в составах, содержащих более активный металл. Хлорид аммония корродирует металлические горючие, а также в большой степени замедляет горение и делает его неустойчивым. Его краткое описание приведено в разделе 2.8.

### **Гексахлорэтан, ГХЭ, $C_2Cl_6$**

Мол. масса 236,76. Бесцветные или желтоватые кристаллы с сильным камфорным запахом. Содержит 89,9% хлора.

Растворим в бензоле, хлороформе, маслах. Хорошо растворим в спирте и эфире, не растворим в воде.

Существует в трех кристаллических модификациях: до 43,6°C устойчива ромбическая, в интервале 43,6-71,1°C – триклинная, выше 71,1°C – кубическая формы. Теплота перехода ромбическая – триклинная 7,1 кДж/кг, триклинная – кубическая 31,8 кДж/кг.

$t$  пл. ок. 185°C (с возгонкой). Летуч, начинает разлагаться выше 400°C.

Плотность 2,091 г/см<sup>3</sup>. Теплота образования -201 кДж/моль. Теплота сублимации 215,7 кДж/кг.

Теплоемкость при 300K 770 Дж/(кг·K), теплопроводность 0,243 Вт/(м·K) [3].

Может использоваться как донор хлора в сигнальных составах, но сейчас в этом качестве не применяется из-за повышенной летучести. Основной компонент металлохлоридных дымовых смесей. Влажная смесь гексахлорэтана и цинка реагирует с самопроизвольным нагревом, иногда с самовоспламенением. Смесей гексахлорэтана с алюминием и магнием довольно чувствительны к механическим воздействиям. Обладает средней степенью токсичности, при длительном контакте раздражает кожу и слизистые оболочки. В высоких концентрациях оказывает слабый наркотический эффект, подобный хлороформу. Вредно действует на печень и почки. В некоторых странах (США) снят с производства. ПДК 10 мг/м<sup>3</sup>. В воде 0,01 мг/л. По отдельным сообщениям, обладает канцерогенной активностью. Продукты термического разложения более опасны [9].

### **Гексахлорбензол, ГХБ, $C_6Cl_6$**

Мол. масса 284,78. Бесцветные кристаллы. Содержит 75% хлора.

Не растворим в воде и холодном спирте. Очень хорошо растворим в горячем спирте и бензоле.

$t$  пл. ок. 230°C.  $t$  кип. около 326°C. Начинает разлагаться выше 550°C.

Теплота плавления 122 кДж/кг. Теплота образования -130,96 кДж/моль. Плотность 2,044 г/см<sup>3</sup>. Теплоемкость при 300K 670 Дж/(кг·K), теплопроводность 0,296 Вт/(м·K) [3].

Раздражает кожу при длительном контакте. Обладает средней степенью токсичности при проглатывании или вдыхании пыли. Из-за токсичности снят с производства в большинстве стран. Используется как интенсификатор свечения в сигнальных и как донор хлора в дымовых составах. ПДК в воздухе 0,9 мг/м<sup>3</sup>, в воде 0,05 мг/л [9].

### **Дехлоран, димер гексахлорциклопентадиена, мирекс, $C_{10}Cl_{12}$**

Мол. масса 542,6. Бесцветные кристаллы. Содержит 78,3% хлора.

Хорошо растворим в бензоле, ксилоле и толуоле.

$t$  пл. ок. 485°C (в запаянной трубке). Начинает сублимироваться выше 240°C.

Плотность 2,02 г/см<sup>3</sup>.

Донор хлора в дымовых, сигнальных и трассирующих составах американского производства. Малотоксичен для человека. Использовался как инсектицид. В пиротехнике может быть с успехом заменен на гексахлорбензол без предварительного пересчета [9].

### **Гексахлорциклогексан, гексахлоран, ГХЦГ, $C_6H_6Cl_6$**

Мол. масса 290,83. Бесцветные кристаллы с запахом плесени. Содержит 73% хлора.

Не растворим в воде. Растворяется в большинстве орг. растворителей. Растворимость в ацетоне 43,5 г на 100 г растворителя, бензоле 28,9 г на 100 г растворителя. Образует 8 изомеров с т. пл. от 88 до 219,5°C. Гамма-изомер (линдан) широко применяется в качестве инсектицида.

Токсичен, оказывает кожно-резорбтивное действие. В пиротехнике использовался как интенсификатор свечения некоторых фейерверочных составов. В настоящее время снят с производства из-за токсичности. ПДК в воздухе для линдана 0,05 мг/м<sup>3</sup>, для технического – 0,1 мг/м<sup>3</sup> (в воде 0,02 мг/л) [2].

### **Поливинилхлорид, ПВХ, PVC, ехон, геон, $(C_2H_3Cl)_n$**

Термопластик белого цвета. Содержит 56% хлора по массе. По мнению многих специалистов, является одним из лучших доноров хлора для цветопламенных составов, т.к. при пиролизе образует хлороводород, который непосредственно образует в пламени излучающие монохлориды.

Растворим в тетрагидрофуране (ТГФ), метилэтилкетоне и циклогексаноне. В ацетоне набухает. В других растворителях не растворим. Низкомолекулярный ПВХ растворим в высших кетонах, диоксане и метиленхлориде.

Размягчается при 80°C, поэтому изделия могут быть изготовлены экструзией, однако высокомолекулярные сорта не могут быть экструдированы при температуре ниже 150°C. Начинает разлагаться при 120-160°C с выделением гл. обр. хлороводорода. Нестабилизированный распадается при меньших температурах [9].

Плотность 1,35-1,45 г/см<sup>3</sup>. Теплота образования -94,6 кДж/мономоль. Теплоемкость при 300K 953 Дж/(кг·K), теплопроводность 0,17 Вт/(м·K) [3].

Используется в различных цветопламенных составах в качестве донора хлора, раньше – в термопластичных смесевых ракетных топливах. Может служить также хорошим связующим. Широкое распространение в пиротехнике обусловлено низкой ценой, хорошими эксплуатационными свойствами. Не токсичен.

### **Поливинилхлорид хлорированный, перхлорвиниловая смола, ХПВХ**

Термопластичный продукт хлорирования ПВХ. Мол. масса (50-80) · 10<sup>3</sup>. Содержание хлора 62-64%.

Хорошо растворим во многих растворителях, например в ацетоне.

Начинает разлагаться с выделением хлороводорода выше 100-120°C.

Плотность 1,47-1,50 г/см<sup>3</sup>.

Донор хлора и одновременно связующее пиротехнических составов, гл. образом дымовых, сигнальных и трассирующих. Может эффективно заменять ПВХ, от последнего выгодно отличается растворимостью в ацетоне и содержанием большего кол-ва хлора [13].

**Полиизопропилен хлорированный, парлон, parlon, alloprene, хлоркаучук**

Парлон – торговая марка фирмы Hercules powders Co. Содержит 66% хлора. Белое аморфное вещество.

В воде и спирте не растворим, но гигроскопичен. Впитывает влагу до ее содержания в полимере 0,5%. Растворим в эфирах, ацетоне и других кетонах, четыреххлористом углероде, ароматических углеводородах.

Размягчается при 140°C с частичным разложением. Устойчив продолжительное время при 125°C.

Плотность 1,56 г/см<sup>3</sup> (по другим данным, 1,64 г/см<sup>3</sup>).

Донор хлора и одновременно хорошее связующее пиротехнических составов американского (парлон) и английского производства (аллопрен). Выпускается 5 сортов парлона, различающихся степенью полимеризации и, соответственно, вязкостью ацетоновых растворов. Стабилизированный парлон содержит 1% эпоксидной смолы для повышения тепло- и светостойкости [2, 9].

**Сополимер винилиденхлорида с винилхлоридом, саран, saran, PVDC,  $[-CH_2CCl_2-]_n-[-CH_2CHCl-]_m$**

Саран – торговая марка фирмы Dow chemical Co. Белое аморфное вещество.

Устойчив к действию кислот, разбавленных щелочей и углеводов. Растворим в ТГФ, ацетоне и других кетонах. Растворяется достаточно медленно. Образцы с высоким содержанием винилиденхлорида плохо растворяются в ацетоне либо растворяются только при нагревании.

Для сополимера с 80-95% содержанием фрагментов винилиденхлорида температура размягчения 115-133°C.

Отщепляет хлороводород выше 130°C.

Плотность 1,68-1,76 г/см<sup>3</sup>.

В пиротехнике обычно используется сополимер с 85-90% содержанием фрагментов винилиденхлорида в качестве связующего и донора хлора. В промышленности он применяется для изготовления термоусадочных пленок, пластмасс и т.д. Следует отметить, что саран редко используется в промышленной пиротехнике из-за высокой цены, хотя как донор хлора он превосходит как ПВХ, так и парлон [13].

**Хлорпарафины, chlorowax,  $C_nH_{2n-m}Cl_m$ , где  $n \sim 10-30$ ,  $m$  – до 24**

Продукты хлорирования парафинов. Различают жидкие хлорпарафины с содержанием хлора до 50% и твердые (70-72% хлора). Вязкие бесцветные жидкости либо белые порошкообразные вещества. В мире выпускается несколько десятков марок хлорпарафинов.

Не растворимы в воде. Жидкие – растворимы в маслах, эфирах, кетонах и др. Твердые ограниченно растворимы в ацетоне и бензоле.

В зависимости от содержания хлора температура застывания меняется от -35 до +85°C. Начинают разлагаться выше 150°C.

Плотность 0,9-1,6 г/см<sup>3</sup>.

Из производимых в России материалов представляют интерес хлорпарафины ХП-470 (жидкий) и ХП-1100 (твердый)

ХП-470 затвердевает от  $-12$  до  $-25^{\circ}\text{C}$ , содержание хлора 47%, плотность  $1,185-1,235 \text{ г/см}^3$ .

ХП-1100 затвердевает от  $+70$  до  $+76^{\circ}\text{C}$ , содержание хлора 70-72%, плотность  $1,60 \text{ г/см}^3$ .

Применяются как пластификаторы различных пластмасс, в качестве спец. смазок и как антипирен полимеров. В пиротехнике – донор хлора, связующее и пластификатор. В связи с запрещением производства гексахлорбензола и дехлорана, хлорпарафин ХП-1100 является хорошей альтернативой этим веществам. Обладают недостаточно хорошими связующими свойствами, составы на их основе плохо воспламеняются. Малотоксичны, но следует избегать продолжительного кожного контакта [15].

### **Хлорид ртути I, каломель, $\text{Hg}_2\text{Cl}_2$**

Мол. масса 472,14. Бесцветные кристаллы, не растворимые в воде. Содержит 15% хлора.

Возгоняется при нагревании выше  $400^{\circ}\text{C}$  с частичным разложением.

Плотность  $7,15 \text{ г/см}^3$ . Теплоемкость  $99,9 \text{ Дж/(моль}\cdot\text{K)}$ , теплота образования  $-265,1 \text{ кДж/моль}$ .

Медленно разлагается на свету. Применяется в медицине как антисептик. Получают прямым действием хлора на ртуть либо взаимодействием солей одновалентной ртути с хлоридом натрия. Раньше использовался в качестве донора хлора и как добавка, обеспечивающая чистоту пламени составов цветного огня. Из-за высокой токсичности продуктов сгорания и дороговизны в современной пиротехнике почти не применяется [14].

## **2.7. Красители**

**Красители** – органические соединения, возгоняющиеся при нагревании с образованием ярко окрашенного аэрозоля. Используются в составах цветных сигнальных дымов.

**Органические красители, применяющиеся в пиротехнике:**

- антрахиноновые красители;
- азокрасители;
- ксантеновые красители;
- другие типы органических красителей;
- неорганические красители и пигменты;

**Характерные особенности указанных типов красителей:**

- *Антрахиноновые красители* – наиболее термически устойчивые и эффективные для применения в дымовых составах вещества. В частности, большинство американских сигнальных дымовых составов базируется на антрахиноновых красителях.
- *Азокрасители* – большая группа дешевых красителей с разнообразными свойствами, некоторые из них весьма эффективны в цветных дымах.

- *Ксантеновые красители* – красители из группы родаминов. Обладают удачным сочетанием низкой стоимости с неплохой эффективностью и термостойкостью.
- Отдельные представители *других типов органических красителей* тоже находят применение при условии сочетания необходимых свойств – термостойкости и способности возгоняться при нагревании.
- *Неорганические красители и пигменты* находят применение лишь в составах экспериментального характера и в патентной литературе, т.к. по эффективности они не могут конкурировать с современными дымовыми составами на основе органических красителей.

#### **1-аминоантрахинон, 1-амино-9,10-дигидро-9,10-диоксоантрацен, альфа-антрахинониламмин, fast red A1, $C_{14}H_9O_2N$**

Мол. масса 223,23. Красно-оранжевые игольчатые кристаллы.

Не растворим в воде, плохо растворим в ледяной уксусной кислоте. Растворим в эфире, бензоле, хлороформе, конц. соляной и серной кислотах.

t пл. 252-253°C.

Теплота испарения 120,6 кДж/моль (при н.у.).

Используется в смесях оранжевого и красного дыма. Обладает средней степенью токсичности, раздражает слизистые оболочки [9].

#### **Бензантрон, 7-оксо-7-бензо(d,e)антрахинон, benzan-B, золотисто-желтый GK, $C_{17}H_{10}O$**

Мол. масса 230,25. Светло-желтые игольчатые кристаллы.

Плохо растворим в ледяной уксусной кислоте, бензоле и хлоробензоле. Не совместим с щелочами. Хорошо растворим в четыреххлористом углероде, толуоле и конц. серной кислоте.

t пл. 173-174°C. Разлагается при нагревании выше 426°C.

Плотность 1,371 г/см<sup>3</sup>.

Использовался в смесях желтого дыма. Обладает средней степенью токсичности, раздражает глаза [9]. В настоящее время заменен менее физиологически активными красителями.

#### **1,4-диамино-2,3-дигидроантрахинон, violet A100, $C_{14}H_{12}O_2N_2$**

Мол. масса 240,26. Фиолетовые кристаллы.

Хорошо растворим в 95% спирте.

Насыпная плотность около 0,35 г/см<sup>3</sup>. Использовался в смесях фиолетового дыма. Обладает свойствами мутагена и канцерогена [9]. В настоящее время заменен менее физиологически активными красителями.

#### **1,4-ди(метиламино)антрахинон, fast blue 8, disperse blue 14, $C_{10}H_{14}N_2O_2$**

Мол. масса 266,3. Синие кристаллы.

Слабо растворим в бензоле. t пл. 221-223°C.

Используется в смесях синего дыма. Обладает свойствами мутагена и канцерогена [9].

**1-метиламиноантрахинон, disperse red 9,  $C_{15}H_{11}NO_2$**

Мол. масса 237,11. Оранжевые игольчатые кристаллы.

Умеренно растворим в горячем спирте. Не растворим в воде. Хорошо растворяется в хлороформе, бензоле, конц. серной кислоте.

$t$  пл. 169-170°C.

Теплота сублимации 129,2 кДж/моль. Насыпная плотность 0,35 г/см<sup>3</sup>.

Применяется в дымовых смесях красного дыма, но подлежит замене на менее физиологически активные красители [9].

**1,4-ди-(*p*-толиламино)антрахинон, хинизарин зеленый, solvent green 3,  $C_{28}H_{22}N_2O_2$**

Мол. масса 418,5. Игольчатые кристаллы зеленого цвета (при перекристаллизации из хлоробензола – синие, из ледяной уксусной кислоты – темно-фиолетовые).

Умеренно растворим в спирте. Растворим в бензоле и кислотах.

$t$  пл. 218°C.

Насыпная плотность 0,45 г/см<sup>3</sup>.

Используется в смесях зеленого дыма. Обладает средней степенью токсичности, раздражает глаза [9].

**Аурамина гидрохлорид, 4,4'-диметиламинобензолиимид гидрохлорид, аурамин О, basic yellow 2, имидо-тетраметилдиамидодифенилметана гидрохлорид,  $C_{17}H_{21}N_3 \cdot HCl$**

Мол. масса 303,84. Желтые пластинчатые кристаллы.

При нагревании выше 70°C разлагается (в присутствии влаги). Хорошо растворим в хлороформе.

$t$  пл. 265-267°C.  $t$  кип. ок 290°C с частичным разложением.

Насыпная плотность около 0,35 г/см<sup>3</sup>.

Составы на основе аурамина и хлората калия следует тщательно оберегать от влаги, т.к. в ее присутствии отмечены случаи спонтанного самовозгорания таких составов. Краситель с повышенной токсичностью. Канцероген. В СССР/России снят с производства. В современных дымовых составах не используется из-за совокупности отрицательных свойств [2, 9].

**4-диметиламиноазобензол, бензилазодиметиланилин, N,N'-диметил-*p*-фенилазоанилин, судан желтый GGA, solvent yellow 2, метиловый желтый, жирорастворимый желтый,  $C_{14}H_{15}N_3$**

Мол. масса 225,3. Желтые пластинчатые кристаллы.

В воде не растворим, хорошо растворяется в пиридине, спирте, бензоле, хлороформе, эфире, маслах и т.д.

$t$  пл. 115-117°C, начинает возгоняться выше 200°C,  $t$  кип. 350°C.

Теплота сублимации 121 кДж/моль.

Используется в смесях желтого дыма. Также находил применение в пищевой промышленности, например для подкрашивания маргарина. Токсичен, обладает канцерогенной и мутагенной активностью [2, 9].

**2-(4-диметиламиноазофенил)нафталин,  $C_{18}H_{17}N_3$ , N,N-диметил-р-2-(1-нафтилазоанилин),**

Мол. масса 275,38. Коричневато-желтые кристаллы.

Хорошо растворим в бензоле, толуоле и четыреххлористом углероде.

t пл. 172-174 °С.

Используется в смесях желтого дыма. Токсичен, возможный канцероген [9].

**1-(2-метоксифенилазо)-2-нафтол, судан красный Ж, solvent red 1, жирорастворимый красный С,  $C_{17}H_{14}N_2O_2$**

Мол. масса 278,32. Оранжевые игольчатые кристаллы.

Не растворим в воде. Хорошо растворяется в хлороформе и в конц. серной кислоте. Плохо растворим в горячем спирте.

t пл. 175-178°С.

Насыпная плотность 0,3-0,7 г/см<sup>3</sup>. Применяется в дымовых смесях красного дыма. Раздражает глаза [9].

**1-(4-нитрофенилазо)-2-нафтол, паранитроанилиновый красный, para red, пигмент красный Ж,  $C_{16}H_{11}N_3O_3$**

Мол. масса 293,3. Красный порошок.

Не растворим в воде, конц. соляной кислоте, растворах щелочей. Растворяется в конц. серной кислоте, плохо растворяется в спирте.

t пл. 210°С. t кип. 230°С.

Окрашивает дым в оранжево-красный цвет. Недостатком является низкая термостойкость. Компонент смесей красного дыма вместе с родамином Б [2].

**1-(фенилазо)-2-нафтол, жирорастворимый оранжевый, жироранж, судан I,  $C_{16}H_{12}N_2O$**

Мол. масса 248,3. Красно-оранжевый кристаллический порошок, не растворимый в воде, растворимый в спирте и ацетоне.

t пл. ок. 100°С, начинает возгоняться выше 200°С, t кип. 270°С.

Вызывает раздражение и стойкое окрашивание кожи рук. Используется в дымовых составах оранжевого цвета и для маркировки гексогенсодержащих ВВ. Более устойчив к нагреванию, чем паранитроанилиновый красный [2].

**Хлорид 9-[2-карбоксифенил]-3,6-бис[N,N-диэтиламино]ксантилия, родамин С,  $C_{28}H_{31}N_2O_3Cl$**

(родамин Б представляет собой гидрохлорид родамин С)

Мол. масса 471. Красно-бурый порошок.

Хорошо растворим в метаноле, этаноле и др. орг. растворителях. В воде не растворим (гидрохлорид – растворим), в конц. серной кислоте образует желтовато-коричневый раствор с отчетливой зеленой флуоресценцией.

t пл. 270°С. t кип. 310°С.

Применяется как краситель кожи, бумаги, мыла, в производстве лаков. Несмотря на достаточно высокую кислотность гидрохлорида, его применение в соста-

вах с хлоратом калия вполне безопасно. Недостатком как дымового красителя является высокая красящая способность по отношению к контактирующим с ним материалам. Окрашивает дым в красно-фиолетовый цвет. Используется в смесях красного дыма вместе с пигментом красным Ж [2].

**1-(диметилфенилазо)-2-нафтол, краситель жирорастворимый красный,  $C_{18}H_{16}N_2O$**

Мол. масса 276. Ярко-красный порошок, не растворимый в воде, растворимый в спирте и ацетоне.

$t$  пл. ок.  $165^{\circ}C$ , начинает возгоняться выше  $270^{\circ}C$ ,  $t$  кип.  $330^{\circ}C$ .

Более устойчив к нагреванию, чем паранитроанилиновый красный. Цвет дыма оранжево-красный, поэтому для получения насыщенной красной окраски рекомендуется использовать его вместе с родамином Б [2].

**Индантреновый золотисто-желтый, дибензо-(а, h)-пирен-7,14-дион, 3,4,8,9-дибензопирен-7,14-дион, кубовый желтый 4,  $C_{24}H_{12}O_2$**

Мол. масса 332,3. Золотисто-желтые кристаллы.

Растворим в разбавленных щелочах, кислотах, ксилоле, нитробензоле. Плохо растворим в ацетоне, бензоле, хлороформе, пиридине, ацетоне.

$t$  пл.  $385^{\circ}C$ .

Используется в смесях желтого дыма. Возможно, обладает канцерогенными свойствами [9]. Вытеснен менее физиологически активными красителями.

**Индиго, 2,2'-бис-индолилиндигго,  $C_{16}H_{10}N_2O_2$**

Мол. масса 262. Темно-синий порошок.

Не растворим в воде, орг. кислотах и щелочах. Растворим в бензоле.

Сублимируется выше  $300^{\circ}C$ .

Плотность  $1,39 \text{ г/см}^3$ .

Окрашивает дым в темно-синий цвет. Применяется для крашения хлопчатобумажных тканей [2].

**Фталоцианиновый синий, пигмент голубой фталоцианиновый,  $C_{32}H_{16}N_8Cu$**

Мол. масса 576,07. Ярко-синие кристаллы.

Не растворим в воде, орг. растворителях, щелочах, соляной кислоте. Растворяется в конц. серной кислоте.

Термостоек, сублимируется при температуре около  $500^{\circ}C$ , однако при продолжительном нагревании разлагается. Плотность ок.  $1,6 \text{ г/см}^3$ .

Образует дым яркого сине-голубого цвета. Для успешного использования данного красителя необходимо достаточно большое количество смеси типа хлорат калия/сахар. Получают сплавлением фталевого ангидрида с мочевиной и хлоридом меди I в среде трихлорбензола, в присутствии каталитических количеств молибдата аммония [2].

### 2.3. Прочие компоненты:

**Прочие компоненты** – компоненты, носящие вспомогательные функции:

- **стабилизаторы** – добавки, продлевающие сроки хранения пиротехнических составов: борная кислота, парафин, стеарин, олифа;
- **пламегасители** – вещества, понижающие температуру горения составов и предотвращающие появление пламени: мел, гидрокарбонат натрия, оксамид;
- **дымообразователи**: оксиды **Zn**, **Ti**, хлорид аммония, антрацен, нафталин;
- **технологические добавки**: графит, диатомит, тальк, стеарин, масла индустриальные и др.;
- **катализаторы** – оксиды или соли переходных металлов, ускоряющие горение пиротехнических составов: окись железа, марганца, хрома, ферроцен, дихроматы аммония и калия.

### Описание характерных типов вспомогательных компонентов:

- *Добавки, продлевающие сроки хранения пиротехнических составов*, бывают 2-х типов. Стабилизаторы первого типа (активные) способны регулировать кислотность пиротехнических составов и замедлять коррозию металлов (борная кислота) либо поглощать продукты разложения, предотвращая самоускоряющиеся процессы распада (дифениламин, централиты). Стабилизаторы второго типа попросту изолируют частицы металлов от контакта с окислителем и влагой. Этими свойствами обладают многие связующие и пленкообразователи.
- *Пламегасители* – вещества, на термическое разложение которых затрачивается энергия, тем самым они способствуют понижению температуры горения. Некоторые пламегасители при пиролизе образуют продукты, затормаживающие цепные процессы окисления в зоне пламени. Такие пламегасители, как дициандиамид, кроме того, обладают и свойствами горючего. Следует отметить, что при внесении пламегасителей снижается скорость горения и ухудшается воспламеняемость составов.
- *Дымообразователи*. Дымообразователи типа оксидов цинка и титана реагируют при сгорании с хлорсодержащими веществами (донорами хлора) с образованием аэрозоля хлоридов этих металлов. Такие дымообразователи, как хлорид аммония, антрацен, дифенил и нафталин, образуют дым при возгонке. Антрацен, дифенил и нафталин в определенных условиях могут выполнять функцию горючего.
- *Технологические добавки* – различные вещества, облегчающие процесс изготовления, например повышающие сыпучесть, уменьшающие электризацию или пыление, облегчающие процесс прессования (твердые смазки) и т.д. Для этих целей используют тальк, графит, дисульфид молибдена, керосин, индустриальные масла и т.д.
- *Катализаторы* – регулируют скорость горения пиротехнических составов. Одни катализаторы ускоряют скорость горения за счет разложения окислителя, другие – за счет облегчения разложения горючего. Первый механизм катализа в пиротехнике наиболее распространен.

**Борная кислота,  $H_3BO_3$**

Мол. масса 61,8. Бесцветные кристаллы.

**Табл. 2.23. Растворимость в воде при соответствующей температуре [10]**

$T, ^\circ C$	0	20	60	100
растворимость, г/100 г воды	2,66	5,04	14,81	40,25

Растворяется в метаноле (21,0%), этаноле (11,2%), глицерине и т.д.

При медленном нагревании выше  $107,5^\circ C$  превращается в метаборную кислоту, при  $160^\circ C$  – в окись бора.

$t$  пл.  $170,9^\circ C$  с разложением.

Плотность  $1,46 \text{ г/см}^3$ . Теплосмкость  $81,3 \text{ Дж/(моль} \cdot K)$ . Теплота плавления  $22,34 \text{ кДж/моль}$ . Теплота образования  $-1094,9 \text{ кДж/моль}$ .

Слабая кислота. В пиротехнике используется как стабилизатор составов, содержащих алюминий и нитраты металлов [11].

**Парафин. Условная формула –  $C_{26}H_{54}$**

Смесь твердых насыщенных углеводородов, продуктов перегонки нефти. Белая или желтоватая воскообразная масса. В зависимости от сорта может иметь нефтяной запах.

$t$  пл.  $44-58^\circ C$ .

Плотность  $0,88-0,91 \text{ г/см}^3$ . Теплота сгорания  $46,85 \text{ МДж/кг}$ .

Применяется аналогично стеариновой кислоте. Обладает меньшей кислотностью, чем стеарин, поэтому лучше защищает металлы [19].

**Стеариновая кислота, октадекановая кислота, стеарин (с примесью пальмитиновой к-ты),  $C_{17}H_{35}COOH$**

Мол. масса 284,47. Белый воскоподобный материал.

В воде не растворяется, хорошо растворим в эфире, в спирте растворимость  $2,5 \text{ г/100 мл}$ .

$t$  пл. около  $69,5^\circ C$ .  $t$  кип. около  $383^\circ C$ .

Плотность около  $0,847 \text{ г/см}^3$  (твердый при  $69^\circ C$ ). Теплота образования  $-937 \text{ кДж/моль}$ .

В пиротехнике применяется как связующее, как смазывающий агент, в качестве покрытия металлического горючего и для гидроизоляции пиротехнических изделий. Получают либо гидролизом масел и жиров с последующей дистилляцией, либо гидрогенизацией олеиновой кислоты. Не токсична. Пары стеариновой кислоты раздражают верхние дыхательные пути [9].

**Магния карбонат, углекислый магний, магнезит,  $MgCO_3$**

Мол. масса 84,31. Белый кристаллический порошок.

В воде не растворим. Растворяется в кислотах с выделением  $CO_2$ .

При нагревании до  $350-500^\circ C$  отщепляет углекислый газ. Плавится при  $990^\circ C$ .

Плотность  $3,037 \text{ г/см}^3$ . Теплота образования  $-1096 \text{ кДж/моль}$ . Теплота плавления  $59 \text{ кДж/моль}$ . Теплосмкость  $76,11 \text{ Дж/(моль} \cdot K)$

Применяется как пламегаситель в дымовых составах [9].

### **Окись цинка, цинка оксид, цинковые белила, $ZnO$**

Мол. масса. 81,38. Белый или желтоватый рыхлый порошок.

$t$  пл. более 1975°C, при дальнейшем нагревании диссоциирует на цинк и кислород.

Плотность 5,47 г/см<sup>3</sup>. Теплота образования -350,8 кДж/моль. Теплота плавления 18,7 кДж/моль.

Теплоемкость при 300К 497 Дж/(кг·К), теплопроводность 29,5 Вт/(м·К) [3].

Адсорбирует из воздуха влагу и углекислый газ с образованием основного карбоната цинка. В воде не растворим. Применяется как дымообразователь в составах белого дыма. Токсичен, вызывает литейную лихорадку. ПДК 0,5 мг/м<sup>3</sup> [15].

### **Двуокись титана, титана диоксид, титановые белила, $TiO_2$**

Мол. масса. 79,90. Белый или белый с желтоватым оттенком порошок, существующий в четырех аллотропных формах, взаимно переходящих друг в друга при нагревании.

Не гигроскопичен, химически устойчив. Растворяется в горячей конц. серной кислоте и щелочах. В холодных соляной, серной и азотной кислотах не растворим.

$t$  пл. 1835°C.

Плотность в зависимости от модификаций изменяется от 4,17 до 3,84 г/см<sup>3</sup>. Теплота образования -912,7 кДж/моль. Теплота плавления 64,9 кДж/моль. Теплоемкость 55 Дж/(моль·К).

Используется как белый пигмент, как компонент дымовых составов и в качестве технологической добавки к пиросоствам [9].

### **Хлорид аммония, аммоний хлористый, нашатырь, $NH_4Cl$**

Бесцветный кристаллический порошок.

Хорошо растворим в воде (37,2 г/100 г воды при 20°C, 74,3 г/100 г воды при 100°C).

Возгоняется при 337,6°C.

Плотность 1,526 г/см<sup>3</sup>. Теплота образования -314,2 кДж/моль.

Технический продукт весьма гигроскопичен, очищенный – более устойчив. Используется в дымовых составах типа «смесей Ершова». Раньше применялся в качестве донора хлора в цветопламенных составах, однако возможность его использования ограничена высокой корродирующей активностью, оказываемой на металлы, плохой совместимостью с хлоратами и эффектом понижения скорости горения из-за низкой температуры сублимации. Не токсичен. Используется также как лекарство [11].

### **Антрацен, $C_{14}H_{10}$**

Мол. масса 178,22. Бесцветные кристаллы с фиолетовой флуоресценцией. Технический антрацен (green oil) представляет собой зеленовато-коричневую пластичную массу с содержанием антрацена около 30% (остальное – изомеры типа

фенантрена и смолы). Этот продукт хоть и дешев, обладает рядом отрицательных свойств, поэтому в последние годы в пиротехнике используют чистый антрацен.

В воде не растворим и не гигроскопичен.

$t$  пл.  $217^{\circ}\text{C}$  с возгонкой.  $t$  кип.  $355^{\circ}\text{C}$ .

Плотность  $1,25 \text{ г/см}^3$ . Теплота плавления  $162 \text{ кДж/кг}$ . Теплота испарения  $54,8 \text{ кДж/моль}$  (при н.у.). Теплоемкость при  $300\text{K}$   $1050 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{K)}$ , теплопроводность  $0,465 \text{ Вт/(м}\cdot\text{K)}$  [3].

Используется как горючее и дымообразователь, в том числе в составах ИК-излучения. В зависимости от рецептуры составов может как сгорать с образованием сажи, так и возгоняться. Пары раздражают кожу [9].

### Нафталин, $\text{C}_{10}\text{H}_8$

Мол. масса  $128,17$ . Бесцветные кристаллы с сильным характерным запахом.

В воде не растворим.

$t$  пл.  $80,4^{\circ}\text{C}$ .  $t$  кип.  $218^{\circ}\text{C}$ .

Плотность  $1,168 \text{ г/см}^3$ . Теплота плавления  $148,1 \text{ кДж/кг}$ . Теплота испарения  $1398 \text{ кДж/моль}$ . Теплоемкость при  $300\text{K}$   $1255 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{K)}$ , теплопроводность  $0,34 \text{ Вт/(м}\cdot\text{K)}$  [3].

Используется как горючее и дымообразователь. В зависимости от рецептуры составов может как сгорать с образованием сажи, так и возгоняться. Обладает повышенной летучестью уже при комнатной температуре, поэтому нафталин часто заменяют антраценом.

### Пентаэритрит, $\text{C}_5\text{H}_{12}\text{O}_4$

Мол. масса  $136,15$ . Бесцветные кристаллы сладкого вкуса.

Табл. 2.24. Растворимость в воде при соответствующей температуре [13]

$T, ^{\circ}\text{C}$	15	25	55	100
растворимость, г /100 г воды	5,89	7,6	23,9	327

$t$  пл.  $268^{\circ}\text{C}$ . Воспламеняется при  $450^{\circ}\text{C}$ .

Плотность  $1,397 \text{ г/см}^3$ . Теплота плавления  $488 \text{ кДж/кг}$ . Теплоемкость при  $300\text{K}$   $1159 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{K)}$ , теплопроводность  $0,269 \text{ Вт/(м}\cdot\text{K)}$ . Теплота образования  $-948 \text{ кДж/моль}$ .

Получают конденсацией ацетальдегида и формальдегида в присутствии гашеной извести. Применяется в производстве пентафталевых смол и взрывчатого вещества – тетранитропентаэритрита (ТЭН-а). Используется как нетоксичный дымообразователь в современных дымовых составах американского производства.

### Кальция фосфид, $\text{Ca}_3\text{P}_2$

Мол. масса  $182,2$ . Коричнево-красное кристаллическое вещество.

При контакте с водой выделяет фосфин, который самовоспламеняется на воздухе с образованием яркого пламени и густого белого дыма.

$t$  пл. около  $1600^{\circ}\text{C}$ .

Теплота образования  $-2112,2 \text{ кДж/моль}$ . Плотность  $2,51 \text{ г/см}^3$ .

Используется в морских светодымовых сигналах, например, американское сигнальное средство Mk25 Mod2 включает 250-граммовый заряд смеси фосфида кальция и магний-алюминия фосфида 1:4 [9]. Продукт гидролиза фосфин – сильно ядовитый газ.

### **Натрия азид, $\text{NaN}_3$**

Мол. масса 65,01. Бесцветные кристаллы, хорошо растворимые в воде (41,7 г/100 г воды при 17°C). Кислотами разрушается до взрывоопасной и ядовитой азотистоводородной кислоты. Претерпевает полиморфное превращение при 20°C, теплота фазового перехода 0,19 кДж/кг.

t пл. около 275°C, выше 300°C разлагается со вспышкой.

Плотность 1,864 г/см<sup>3</sup>. Теплоемкость при 300K 1182 Дж/(кг·K), теплопроводность 2,09 Вт/(м·K). Теплота образования +21,3 кДж/моль [3].

Используется в орг. синтезе, а также для получения других азидов. В пиротехнике находит применение в газогенерирующих и аэрозольгенерирующих составах для пожаротушения, в пиротехнических генераторах азота. Обладает высокой токсичностью. Смертельная доза для человека составляет немногим более 1 грамма [20].

### **Оксид магния, магния оксид, жженая магнезия, $\text{MgO}$**

Мол. масса 40,3. Белый кристаллический порошок.

В воде не растворим. Растворяется в кислотах.

t пл. 2827°C.

Плотность 3,58 г/см<sup>3</sup>. Теплота образования -601,5 кДж/моль. Теплота плавления 77 кДж/моль. Теплоемкость 37,24 кДж/(моль·K).

В пиротехнике используется как технологическая добавка и стабилизатор горения [9].

### **Диатомит, инфузорная земля, кизельгур, триполит, цеолит, Super-Floss**

Порошкообразная субстанция, состоящая из кремнийсодержащих скелетов микроскопических морских водорослей. Насыпная плотность около 0,3 г/см<sup>3</sup>. После добычи кизельгур нагревают для удаления органических включений и обрабатывают кислотами для очистки от железа. Таким образом получают продукт, состоящий на 84-92% из оксида кремния. Остальное – вода и примеси оксидов алюминия. Обладает сильно развитой поверхностью и хорошо впитывает жидкости. Используется в пиротехнике как разрыхлитель и инертный наполнитель, замедляющий скорость горения некоторых составов (гл. обр. малогазовых) [9].

### **Масло веретенное, масло индустриальное**

Жидкий нефтепродукт плотностью 0,88-0,89 г/см<sup>3</sup>.

t всп. около 160°C.

Используется в пиротехнических составах, содержащих металлы в качестве покрытия, защищает их от коррозии. Технологическая добавка, предотвращающая пыление при изготовлении. Также применяется для создания дымовых завес за счет испарения в специальных аппаратах или в учебных шашках термовозгонного типа [21].

**Тальк, магния силикат,  $4\text{SiO}_2 \cdot 3\text{MgO} \cdot \text{H}_2\text{O}$**

Белый или серый порошок, жирный на ощупь.

Плотность 2,78-2,82 г/см<sup>3</sup>.

Начинает отщеплять воду выше 930°C.

Используется как технологическая и инертная добавка в пиротехнических составах вместо более дефицитного диатомита. Физиологически безвреден [14].

**Дихромат аммония, аммоний двуххромовокислый,  $(\text{NH}_4)_2\text{Cr}_2\text{O}_7$**

Мол. масса 252,06. Оранжево-красные кристаллы.

**Табл. 2.25. Растворимость в воде при соответствующей температуре [10]**

T, °C	0	20	60	100
растворимость, г / 100 г воды	18,3	35,6	86,0	155,6

Термически малоустойчив, при нагревании бурно разлагается в самоподдерживающемся режиме с эффектом «Вулкан».

Плотность 2,15 г/см<sup>3</sup>. Теплоемкость 293 Дж/(моль·К). Теплота образования -1810 кДж/моль.

Используется как катализатор горения смесей на основе нитрата аммония и других окислителей, а также как газогенерирующая добавка.

Хроматы и дихроматы токсичны, канцерогенны, вызывают изменения хрящевых тканей, аллергию. ПДК 0,01 мг/м<sup>3</sup> (в пересчете на хромовый ангидрид) [11].

**Берлинская лазурь, милори, prussian blue,  $\text{Fe}_4[\text{Fe}(\text{CN})_6]_3 \cdot x\text{K}_4[\text{Fe}(\text{CN})_6] \cdot n\text{H}_2\text{O}$ ,  $x \sim 0,3-0,8$ ,  $n \sim 12-24$**

Темно-синий порошок.

Начинает разлагаться выше 180°C. При 280 выделяет пары синильной кислоты [12].

Устойчив к действию разбавленных кислот, разлагается щелочами. Катализатор разложения нитрата и перхлората аммония. Получают действием растворов солей двухвалентного железа на красную кровяную соль или растворов солей трехвалентного железа на желтую кровяную соль. Выделяется в виде объемистого осадка, который при высыхании слипается в твердые агломераты, трудно поддающиеся измельчению. Малотоксичен, но пыль раздражает органы дыхания. ПДК 10 мг/м<sup>3</sup>. Продукты термического разложения токсичны [2].

## Литература

1. Söhnel O., and Novotny P., Densities of Aqueous Solutions of Inorganic Substances, Elsevier, Amsterdam, 1985.
2. Takeo Shimizu. Fireworks: the Art, Science and Technique. Pyrotechnica Publication. 1981.
3. Ю.Е. Шелудяк, Л.Я. Кашпоров, Л.А. Малинин, В.Н. Цалков. Теплофизические свойства компонентов горючих систем. Справочник. / Под ред. Н.А. Силина. - М., 1992.
4. Дубнов Л.В. Бахареви́ч Н.С., Романов А.И. Промышленные взрывчатые вещества. 3-е изд., перераб. и доп. - М.: Недра, 1988.
5. T. Urbanski – Chemistry and Technology of Explosives. Vol 2 – Pergamon Press. Oxford, 1965.
6. Solubility Data Series, International Union of Pure and Applied Chemistry. Vol. 14. Pergamon Press. Oxford, 1983.
7. Solubility Data Series, International Union of Pure and Applied Chemistry. Vol. 30. Pergamon Press. Oxford, 1987.
8. Справочник по электротехническим материалам. В 3-х т. /Под ред. Ю.В. Корицкого и др. Т. 3. - Л.: Энергия, 1976.

9. Engineering Design Handbook. Military Pyrotechnics Series. Part Three – Properties of Materials Used in Pyrotechnic Compositions. Headquarters, U.S. Army Materiel Command, 1963.
10. J. Fogl, K.Volka. Analytické Tabulky. Vysoka Skola Chemicko-Technologicka v Praze. Praha, 2000.
11. Химическая энциклопедия: В 5 т. Т. 1. /Гл. ред. Кнунянц И.Л. – М.: Советская энциклопедия, 1988.
12. Химическая энциклопедия: В 5 т. Т. 2. /Гл. ред. Кнунянц И.Л. – М.: Советская энциклопедия, 1990.
13. Химическая энциклопедия: В 5 т. Т. 3. /Гл. ред. Кнунянц И.Л. – М.: Большая Российская энциклопедия, 1992.
14. Химическая энциклопедия: В 5 т. Т. 4. /Гл. ред. Зефилов Н.С. – М.: Большая Российская энциклопедия, 1995.
15. Химическая энциклопедия: В 5 т. Т. 5. /Гл. ред. Зефилов Н.С. – М.: Большая Российская энциклопедия, 1998.
16. Naminosuke Kubota. Propellants and Explosives. Thermochemical Aspects of Combustion. Wiley-VCH. GmbH, 2002.
17. J.F. Walker. Formaldehyde. Reinhold Publ. Corp. NY, 1944.
18. Г.А. Петров, И.А. Соболев, С.А. Дмитриев, Е.М. Тимофеев, С.В. Стефановский, А.Г. Петров. Порошкообразные металлизированные топлива для технологий переработки радиоактивных отходов. Ч.1. – М.: Наука, 2003.
19. Энергетические конденсированные системы. Краткий энциклопедический словарь. /Под ред. Б.П. Жукова. Изд. 2-е исправл. – М.: Янус К, 2000.
20. PATR 2700. Encyclopedia of Explosives and Related Items. /Basil T. Fedoroff & Oliver E. Sheffield. Vol 1 – Piccating Arsenal Dover, New Jersey, USA – 1960.
21. Платов Г.А. Пиротехник. Искусство изготовления фейерверков. – М., 2004.
22. Хмельницкий Л.И. Справочник по бризантным взрывчатым веществам. Ч.2. – М., 1962.
23. G. Santhosh, S. Venkatachalam, K. Krishnan, and K.N. Ninan. The Phase Stabilization of Ammonium Nitrate by Potassium Dinitramide – A Differential Scanning Calorimetric Study – Proc. of Eighth seminar «New trends in research of energetic materials» Pardubice, 2005.
24. Dr. Emil Shtessel, Dr. Edward Dreizin. High Energy Metallic Mechanical Alloys for New Explosives and Incendiary Devices with Controllable Explosion Parameters. New Jersey institute of technology, Newark, NJ, 2001.
25. R. K. Wharton and A. J. Barratt. Observations on the Reactivity of Pyrotechnic Compositions Containing Potassium Chlorate and Thiourea Propellants, Explosives, Pyrotechnics 18, 77-80 (1993).
26. Пат. US4535185 от 1985 г.
27. Пат. US2464247 от 1949 г.
28. Пат. US2375772 от 1945 г.
29. Пат. RU2088376 от 1991 г.
30. <http://www.pkometteh.ru/Zr.htm>
31. Шидловский А.А. Основы пиротехники. – М.: Машиностроение, 1973.
32. Brassey's World Military Technology. Explosives, Propellants and Pyrotechnics. Series Editor: Colonel R.G. Lee. London. 1989.
33. Вернидуб И.И. Боеприпасы – фронту. Очерки. – Москва – Сергиев Посад, 2003.
34. Ф.П. Мадьякин. Компоненты и продукты сгорания пиротехнических составов. Т.1. Основные понятия о пиротехнических составах и компонентах. Низкомолекулярные вещества. Учебное пособие. – Казань: Изд. КГТУ, 2006.
35. К.Тиниус. Пластификаторы. – Пер. Г.В. Ткаченко и Э.М. Левиной /Под редакцией проф. Е.Б. Тростянской. – М.-Л.: Изд-во «Химия», 1964.
36. Федин В.И., Шаинян Г.Р., Бригин Ю.П., Романова Ж.А., Трофимов А.И. Сырьевое обеспечение пиротехнических производств: Материалы II Всероссийской конференции «Современные проблемы пиротехники». – Сергиев Посад, 2003.
37. Ernst-Christian Koch. Metal-Fluorocarbon Based Energetic Materials. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA. 2012.

## Глава 3. Свойства и технология пиротехнических составов

### 3.1. Механизмы воспламенения и горения пиротехнических составов

Чтобы успешно разрабатывать и применять пиротехнические составы, необходимо понимать механизмы их горения и воспламенения. Как было сказано ранее, при воспламенении и горении вещества одновременно протекают конкурирующие процессы – энергосвободное в результате химической реакции и тепломассообмен как внутри навески состава, так и с окружающей средой. Баланс между этими конкурирующими процессами описывается уравнением Франк-Каменецкого [18]. Из соответствующего балансового уравнения, делая те или иные предположения о характере реакции, механизмах переноса и граничных условиях, можно вывести критерий воспламенения, зависимость времени вспышки и скорости послышного горения от различных факторов.

Известно, что для воспламенения какого-либо вещества обязательно наличие двух условий [1]:

1. *Наличие определенного запаса химической энергии, которую вещество или пиротехническая смесь может выделить при своём разложении.* Эта энергия может быть как запасенной внутри структуры самого вещества (энтальпия образования), так и выделяемой при окислительно-восстановительных реакциях горения. Суммарно эта энергия называется энтальпией сгорания (или взрыва).
2. *Нагрев воспламеняемого материала до определенной температуры.* Компоненты пиротехнического состава должны быть нагреты до такой температуры, чтобы из окисляющего компонента выделился кислород, а горючее нагрелось выше своей температуры воспламенения. Если нагревать весь объем пиротехнического состава до температуры, достаточной чтобы зажечь все горючие компоненты, температура состава резко возрастает – и сгорание происходит в форме вспышки (теплового воспламенения) или взрыва. Существует критическое условие, разделяющее 2 процесса: спокойное разложение вещества без перехода в тепловое воспламенение и разложение с переходом в тепловое воспламенение. Это условие «теплового взрыва» еще называют критерием Франк-Каменецкого, и, с учетом ряда предположений, оно выглядит следующим образом:

$$F_k = \frac{Q \cdot k_0 \cdot A \cdot r^2}{\lambda \cdot R \cdot T_0^2} \cdot e^{-\frac{A}{RT_0}} \quad (1)$$

$Q$  – тепловой эффект, приведенный к объему;

$k_0$  – предэкспоненциальный множитель;

$A$  – энергия активации (для большинства пиротехнических составов составляет 42-168 кДж);

$r$  – радиус сосуда;  
 $\lambda$  – средний коэффициент теплопроводности;  
 $R$  – универсальная газовая постоянная.

Критическое значение  $F_k$  зависит от геометрической формы реакционного сосуда и кинетических особенностей реакции. В случае реакции нулевого порядка  $F_k$  равно 0,88 для плоского реактора, 2,00 – для бесконечного цилиндра и 3,32 – для сферы.

Другое выражение, которое может быть получено из балансового уравнения, выражает зависимость между температурой и временем прогрева состава до момента вспышки:

$$\ln t = \frac{A}{R \cdot T_{\text{всп}}} + c \quad (2)$$

$t$  – время (сек.), за которое при нагревании до температуры  $T_{\text{всп}}$  происходит вспышка (время индукции);  
 $c$  – интегральная константа.

#### **Примечание.**

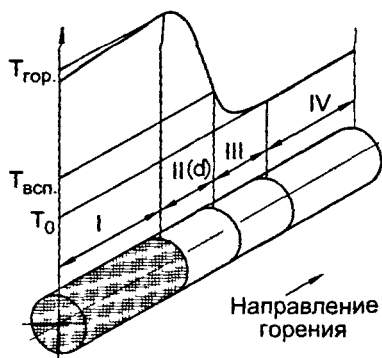
*Это выражение справедливо не только для пиротехнических составов, но и для других энергонасыщенных материалов – порохов и взрывчатых веществ.*

Из уравнений 2 видно, что повышение температуры в нагреваемом пиротехническом составе сокращает время, за которое происходит вспышка. В данном случае имеется в виду, что пиросостав изначально нагревают до определенной температуры (например, бросают небольшое количество на разогретую поверхность).

На практике зажигание пиротехнической смеси осуществляют не нагреванием всего объема состава, а действием тепла на относительно тонкий слой на поверхности пиротехнической шашки или таблетки. Это можно осуществить подводом тепла от нагретого газа (непосредственным действием пламени), от раскаленных частиц (подпрессовкой дымного пороха, воспламенительного состава или контакта с огнепроводным шнуром), а также контактом с раскаленным металлом (например, с нитью накаливания электровоспламенителя) и др. Под действием указанных факторов происходит вспышка тонкого слоя пиротехнического состава, а при благоприятном сочетании факторов – дальнейшее распространение горения.

#### **При вспышке пиротехнического состава различают две температуры:**

1. Температуру  $T_{\text{всп.}}$ , при достижении которой через некоторое время происходит вспышка – температура вспышки.
2. Температуру  $T_{\text{гор.}}$ , до которой нагреваются продукты горения теплом, выделяющимся при экзотермических реакциях – температура горения.



**Рис. 3.1.** Горение пиротехнического заряда в форме цилиндра и его профиль изменения температуры по длине.

- охлаждающегося слоя шлака;
- горящего слоя композиции с максимальной температурой горения  $T_{гор.}$ , которая медленно понижается в сторону охлаждающегося шлака (зона I). Перед горящим слоем находится слой воспламенения, где температура состава изменяется очень быстро (зона II);
- слоя композиции, нагревающегося до температуры воспламенения  $T_{всп.}$ ;
- слоя композиции, который подогревается теплом через предыдущие два слоя, однако в нем еще не начались реакции между горючим и окислителем (зона III);
- слоя, в котором композиция находится без изменений, т.е. с температурой  $T_0$  (зона IV).

**Скорость горения может изменяться со временем, если:**

- за счет охлаждения и застывания слоя шлака ограничивается отток газообразных продуктов сгорания из основной зоны реакции;
- изменяется слой шириной  $d$  (зона II), определенный, с одной стороны, температурой воспламенения –  $T_{всп.}$  и, с другой стороны, максимальной температурой горения –  $T_{гор.}$ . Его ширина определяет скорость передачи тепла в горящем составе и является критической для постоянства скорости горения;
- изменяется зона подготовительных реакций (зона III), которая особенно важна, поскольку определяет количество тепла, которое должно быть получено из зоны горения для подогрева компонентов от температуры окружающей среды до температуры воспламенения  $T_{всп.}$ .

Представим себе пиротехнический заряд в форме длинного цилиндра. Так как тепло передается от горящего слоя к неразогретому, каждый последующий за горящим слоем слой нагревается до температуры воспламенения  $T_{всп.}$ . Таким образом, горящий слой движется к неразогретому слою. Постепенный сдвиг слоя горящего состава называется «послойным горением». Скорость, с которой тепло передается от горящего слоя к неразогретому, называется скоростью горения.

Если продукты сгорания остаются в твердом состоянии (например, для малогазовых составов), мы можем представить процесс горения состава в виде набора перемещающихся слоев (Рис. 3.1):

**Металлическая стенка трубки, в которую запрессован состав, может влиять на скорость горения двояко в зависимости от конкретных условий:**

- за счет ускорения передачи тепла из зоны горения (зона II с температурой от  $T_{гор.}$  до  $T_{всп.}$ ) к зоне подготовительных реакций (зона III с температурой от  $T_{всп.}$  до  $T_0$ ) скорость прогрева не прореагировавшего состава увеличивается и, следовательно, повышается скорость горения;
- удаление большей или меньшей части тепла из зоны горения снижает общее количество тепла и, таким образом, скорость горения уменьшается. Если количество тепла, поглощаемого стенкой слишком большое, то это не позволяет зоне подготовительных реакций нагреться до температуры  $T_{всп.}$  – и горение прекращается. Характер влияния металлической стенки зависит от ее материала, толщины, диаметра, начальной температуры и типа запрессованного в нее состава.

**Можно записать относительно простые математические модели при условии, что линейная скорость передачи тепла является доминирующим фактором, влияющим на скорость горения:**

1. Уравнение теплопроводности Фурье для заряда с плоской поверхностью горения:

$$dQ_1 = \frac{\lambda}{d} \cdot (T_{гор} - T_{всп}) dt \quad (3)$$

2. Уравнение для передачи тепла, необходимое для нагрева всего объема композиции в зоне подготовки:

$$dQ_1 = q_1 \cdot \rho \cdot V \cdot dt \quad (4)$$

$Q_1$  – это количество тепла, переданного на единицу площади;

$d$  – толщина слоя, находящегося между слоями, нагретыми до  $T_{гор.}$  и  $T_{всп.}$ ;

$q_1$  – количество тепла, необходимое для нагрева единицы массы композиции;

$\rho$  – плотность;

$V$  – скорость горения;

$t$  – время.

Откуда:

$$V = \frac{\lambda}{\rho \cdot d} \cdot \frac{(T_{гор} - T_{всп})}{q_1}, \quad (5)$$

где  $q_1$  – это количество тепла, которое необходимо, чтобы нагреть непрореагировавший состав с начальной температуры  $T_0$  до температуры  $T_{всп.}$

**Это тепло состоит из:**

1. удельных теплоемкостей отдельно взятых компонентов;
2. тепла, необходимого для осуществления фазовых превращений;
3. тепла, необходимого для разложения эндотермически разлагающихся окислителей (или компонентов с отрицательными теплотами образования);
4. потерь тепла за счет теплопроводности в окружающую среду (например, корпус).

Уравнение 5 может быть разделено на теплоемкости, а оставшиеся теплоты пп 2-4 можно обозначить, как  $Q$ :

$$V = \frac{\lambda}{\rho \cdot d} \cdot \frac{(T_{гор} - T_{всп})}{c_p \cdot (T_{всп} - T_0) + Q} \quad (6)$$

Для времени горения (в данном случае – обратная величина скорости горения, выражающаяся в сек/см) это будет выглядеть следующим образом:

$$z = \frac{1}{V} = \frac{\rho \cdot d \cdot c_p \cdot (T_{всп} - T_0)}{\lambda \cdot (T_{гор} - T_{всп})} + \frac{\rho \cdot d \cdot Q}{\lambda \cdot (T_{гор} - T_{всп})} \quad (7)$$

### **Примечание.**

*Конечно, существуют и гораздо более сложные модели, чем описанная уравнением 7. Тем не менее многие экспериментальные результаты показывают справедливость этого уравнения при оценке происходящих процессов горения. Подобная модель позволяет провести наглядный анализ значений отдельных переменных и позволяет сделать качественные выводы, которые могут помочь в разработке пиротехнических составов.*

### **Анализ уравнений 6 и 7:**

1. Из уравнения 7 видно, что увлажнение состава обеспечивает значительное увеличение времени горения: правая часть уравнения тогда будет содержать теплоту парообразования воды, которая испаряется при температуре ниже температуры воспламенения даже самых восприимчивых к огню составов. Чем ниже температура воспламенения рассматриваемой композиции (уменьшение первой и второй части уравнения), тем более выражено замедление горения при смачивании состава. Поэтому, например, скорость горения черного пороха и воспламенительных составов сильнее изменяется при увлажнении, чем для современных замедлительных композиций.
2. Если компоненты состава не претерпевают значительных фазовых превращений (вклад правой части меньше, чем левой), то вполне возможно, что начальная температура окружающей среды будет влиять на время горения тем больше, чем ниже температура воспламенения композиции (уменьшение разницы между  $T_{всп.}$  и  $T_0$ ). Следовательно, уравнения 6 и 7 показывают, что снижение температуры окружающей среды замедляет горение. Наоборот, с повышением температуры окружающего воздуха скорость горения увеличивается. Таким образом, при  $T_0 = T_{всп.}$  происходит вспышка (значение индукционного периода определяется правой частью в уравнении 7).
3. Из предыдущего пункта также следует другой вывод: чем ниже температура горения, тем сильнее скорость горения зависит от температуры окружающей среды. Например, скорость горения цветного дымового состава, имеющего низкую температуру горения, сильнее зависит от изменений температуры окружающей среды, чем для осветительных или замедлительных композиций на основе металлов. Таким образом, увеличение температуры горения

составов в пределах, которые не могут привести к значительному ускорению горения, уменьшает влияние температуры окружающей среды на скорость горения состава.

4. Влияние тепловых потерь стенок корпуса, в который запрессован состав, приводит к замедлению горения (значение  $Q$  в правой части возрастает). Это замедление горения является более выраженным с ростом температуры воспламенения и одновременным уменьшением температуры горения составов. Поэтому чем холоднее состав, запрессованный в металлический корпус, тем должна быть тоньше стенка и толще изоляция от тепловых потерь в окружающую среду. Если же не ограничивать потери в окружающую среду сильно охлажденного состава, то возможны отказы.
5. Скорость горения находится в прямой зависимости от плотности (удельного веса). Плотность состава можно легко регулировать путем приложения различных давлений прессования: при снижении давления прессования увеличивается скорость горения, а при повышении давления прессования – уменьшается.
6. Уравнение (7) можно записать в следующем виде:

$$z = K_1 \cdot c_p + K_2 \quad (8)$$

Следовательно, путем изменения суммарной удельной теплоемкости можно влиять на скорость горения. На практике это обычно осуществляется путем добавления инертного вещества (например, диоксида или криолита) в пиротехническую смесь. Инертное вещество обладает собственной теплоемкостью и, поглощая энергию на свой разогрев, снижает интенсивность процесса горения. Согласно правилу Дюлонга и Пти, молярная теплоемкость твердых тел имеет значение, равное  $3R$  (примерно  $26,3 \text{ Дж/моль} \cdot \text{К}$ ).

7. Отношение  $\lambda/d$  является мерой «быстроты» повышения температуры с момента воспламенения  $T_{всп.}$  до температура горения  $T_{гор.}$ , характеризуя среднюю теплопроводность этой зоны. Отношение  $\lambda/d$  имеет существенное значение для сгорания пиротехнического состава – зона  $d$  представляет собой смесь газов, твердых и жидких веществ. Ее ширина зависит от внешнего давления: за счет увеличения давления  $P$  уменьшается протяженность зоны реакции и горение ускоряется. За счет уменьшения объема газовой фазы увеличивается и теплопроводность в этой зоне. Таким образом, чем больше содержание газообразных продуктов сгорания, тем больше влияние внешнего давления на скорость горения. Это влияние выражается эмпирическим уравнением:

$$V = V_0 \cdot P^v \quad (9)$$

В малогазовых составах показатель  $v$  меняется в пределах 0,01-0,3, для черного пороха он составляет величину 0,75, тогда как для бездымных порохов – около 1.

#### **Примечание.**

*Для некоторых составов показатель «v» может иметь разные величины в определенных интервалах давлений.*

Зависимость величины отношения  $\lambda/d$  от объема образующихся газов является причиной колебательного горения и даже затухания некоторых составов. При горении состава в металлическом корпусе расплавленный шлак может затвердевать, препятствуя истечению газообразных продуктов сгорания, поэтому давление в зоне горения растет. При превышении силой давления газов силы сопротивления шлака, шлак перемещается (или даже вылетает из трубки, в которую запрессован состав) и газообразные продукты в зоне горения расширяются. Это значительно ухудшает теплопроводность горящего слоя (газы имеют на 2 порядка хуже теплопроводность, чем жидкие и твердые вещества), поэтому скорость горения значительно понижается. Этот процесс может повторяться достаточно долго, особенно в смесях с окислителями, которые разлагаются экзотермически (например, с хлоратом калия). Если расширяющиеся газообразные продукты сгорания находятся в непосредственном контакте с зоной первичного воспламенения, то потери тепла могут быть слишком большими, и передача тепла прекращается. В этом случае горение затухает. Подобное «отрезание» слоя горения иногда наблюдается при воспламенении зарядов твердого топлива в ракетном двигателе. Эффект можно устранить или, по крайней мере, уменьшить его влияние за счет повышения давления газа в камере (например, сужением критического сечения сопла), установлением более мощных воспламенительных систем, снижением содержания газообразных продуктов в топливе либо понижением температуры воспламенения [1].

Скорость горения любого пиротехнического состава или твердого ракетного топлива можно существенно увеличить за счет непосредственного влияния на теплопроводность. Этого можно достичь путем упорядоченного армирования заряда тонкими металлическими волокнами или проволочками. Соответственно, скорость горения сильно повышается по направлению вдоль волокон. Проволочки обычно выполняют из металлов с высокой теплопроводностью, также они могут служить дополнительным горючим.

**В пиротехнике обычно выделяют 3 типа реакций воспламенения и горения, протекающих последовательно с ростом температуры [2]:**

- **реакция между твердыми веществами;**
- **реакция между твердыми и жидкими веществами;**
- **реакция между твердыми (жидкими) и газообразными веществами.**

**Описание типов реакций, происходящих при сгорании пиротехнических составов:**

- *Реакция между твердыми веществами.* Хотя подавляющее большинство пиротехнических композиций – это смесь твердых веществ, в действительности реакции горения, в которых идет взаимодействие между истинно твердыми веществами, очень редки. Это связано с тем, что процесс диффузии и массопереноса между твердыми материалами значительно затруднен и, как правило, не приводит к выделению энергии в количествах, достаточных для возникновения самоподдерживающегося процесса.

Процессы окисления типа «твердое вещество – твердое вещество» обычно соответствуют начальным стадиям воспламенения при внешнем подводе энергии. Эти процессы характерны для медленных реакций при температурах на несколько сотен градусов ниже температуры самовоспламенения пиротехнической композиции. Особенно интересно протекание реакций «твердое вещество – твердое вещество» в пиротехнических системах типа оксид металла – металл, которые начинаются обычно задолго до достижения температуры самовоспламенения. Наличие примесей в таких системах способствует снижению порога воспламенения. Многие вещества, которые широко применяются в пиротехнике как инициаторы реакций между оксидами и металлами, в хорошо очищенном состоянии чрезвычайно малоактивны и воспламеняются только при очень высоких температурах. Это свойственно таким неметаллам, как бор, кремний, углерод. Технические же сорта этих веществ обладают очень высокой реакционной способностью как раз за счет примесей.

Снижению температурного порога воспламенения также способствует наличие дефектов в кристаллической решетке компонентов. В частности, оксид железа, приготовленный пиролизом сульфата железа, из-за сильно дефектной структуры проявляет большую активность в реакциях горения, чем приготовленный пиролизом оксалаата железа.

В очень большой степени на легкость инициирования термитных смесей влияет площадь контакта между частицами компонентов. Например, при использовании компонентов обычного термита (оксид железа/алюминий) нанометрического размера, можно получать композиции, которые взрываются от удара или сравнительно слабого нагревания. Хотя смеси грубых порошков этих веществ практически не чувствительны к удару, воспламеняются с большим трудом при температурах, превышающих 1000°C. Еще более разительный эффект достигается применением вместо оксида железа оксида молибдена. В настоящее время в литературе проявляется большой интерес к использованию подобных нанодисперсных композитов с целью модификации свойств уже известных комбинаций веществ или увеличения их полноты сгорания. Другим способом повышения активности пиротехнических композиций в начальных реакциях типа «твердое вещество – твердое вещество» является соосаждение растворимых компонентов пиротехнических смесей. В этом случае кристаллическая решетка конечного продукта образуется обоими компонентами. Таким способом достигается наиболее плотный контакт между молекулами окислителя и горючего.

Типичным примером самоподдерживающейся реакции горения, начинающейся и заканчивающейся на стадии «твердое вещество – твердое вещество», является образование карбида и борида тантала из элементов в вакууме. Реакция ограничена скоростью диффузии между твердыми веществами и может протекать в самораспространяющемся режиме, только если размеры частиц компонентов не превышают 5 мкм. Причем коэффициент диффузии достаточно велик для того, чтобы в результате образовался спеченный монолит.

- *Реакция между твердыми и жидкими веществами.* Многие реакции горения, которые традиционно считаются твердофазными, в действительности представляют собой реакции между твердой и жидкой фазой. Оксидные пленки и примеси приводят к образованию жидкой фазы на границах между частицами пиротехнической смеси. В жидкой фазе коэффициенты диффузии в среднем на 5 порядков превосходят коэффициенты диффузии между твердыми веществами. Реакция между твердыми и жидкими веществами обычно является второй стадией воспламенения пиротехнической смеси и начинается при плавлении какого-либо компонента. Она характеризуется значительной интенсификацией процессов горения и массопереноса по сравнению с реакциями между твердыми веществами из-за скачкообразного роста коэффициента диффузии. Соответственно, одним из способов улучшения воспламеняемости пиротехнических смесей является введение какого-либо легкоплавкого компонента за счет увеличения коэффициента диффузии при плавлении этого вещества.

Реакциями, заканчивающимися на стадии «твердое вещество – жидкое вещество», являются процессы горения упомянутых выше термитных смесей и образование интерметаллидов. Также к ним можно отнести горение замедлительных композиций типа хромат бария – бор, когда образование жидкого оксида бора на фронте горения способствует перемещению этого фронта.

- *Реакции горения типа «твердое (жидкое) вещество – газовая фаза».* В отличие от двух предыдущих типов реакций, определяются не диффузионными процессами, а процессами химической кинетики. Их скорость находится в большой зависимости от внешнего давления. Реакции горения типа «твердое вещество – газовая фаза» характерны не только для пиротехнических смесей, выделяющих газы, но и для ряда составов, образующих конечные конденсированные продукты сгорания, которые в зоне реакции находятся в виде паров. Так, например, сгорание смесей типа оксид меди/алюминий, сопровождается перемещением разогретых паров меди во фронте горения, которые вызывают воспламенение последующих слоев состава. Также типичной реакцией горения типа «твердое вещество – газовая фаза» является горение замедлительных смесей типа вольфрам/хромат бария. Распространение реакции происходит за счет перемещения во фронте горения паров оксида вольфрама.

### ***Примечание.***

*Реакции взаимодействия веществ в различных фазах (агрегатных состояниях) можно рассматривать как в качестве стационарных (установившихся) процессов горения, так и в качестве последовательно протекающих процессов при воспламенении пиротехнического состава. Для большинства смесей начальный этап воспламенения переходит в самоподдерживающийся процесс горения уже на второй или даже на третьей стадии.*

### 3.2. Основные характеристики пиротехнических составов

Некоторые характеристики пиротехнических составов уже были так или иначе упомянуты в предыдущей главе, в этой же главе они рассмотрены с технической точки зрения.

Общими характеристиками пиротехнических составов являются:

- скорость горения;
- удельный вес (плотность);
- температура горения;
- теплота сгорания;
- температуры терм. разложения;
- чувствительность состава к механическим воздействиям;
- гигроскопичность.

Кроме того, для каждого типа пиротехнических составов существуют свои характеристики в зависимости от того, к какому типу принадлежит этот состав. Так, например, для дымовых составов существует характеристика, определяющая эффективность состава при образовании дыма, а для сигнальных – определяющая яркость и чистоту цвета пламени. Подробнее об этих специфических характеристиках см. в соответствующих разделах, посвященных этим составам.

**Описание основных характеристик пиротехнических составов:**

- *Скорость горения* определяет, с какой скоростью движется поверхность горения при сжигании образца пиротехнического состава цилиндрической формы. Скорость горения – важнейшая характеристика, определяющая продолжительность и стабильность пиротехнического эффекта. Измеряется обычно в мм/сек и составляет для большинства запрессованных пиротехнических составов от 0,2 до 500 мм/сек. В зарубежной литературе часто встречается понятие «время горения», которое является ничем иным, как обратной величиной скорости горения. Выражается обычно в сек/см.

На скорость горения, кроме химической природы компонентов, оказывает большое влияние ряд внешних факторов. В насыпном состоянии составы горят заметно быстрее, чем в сильно запрессованном, потому что ток разогретых газов и паров быстро проникает в промежутки между частицами и инициирует горение в толще массы. При наличии оболочки некоторые уплотненные составы могут взрываться. Напротив, в условиях сплошного заряда скорость горения определяется больше температурой горения, теплоемкостью и теплопроводностью компонентов.

Скорость горения находится в большой зависимости от степени измельчения компонентов состава, а также от формы частиц: чем мельче частицы и чем

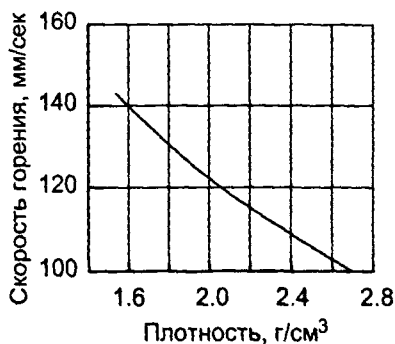


Рис. 3.2. Зависимость скорости горения смеси ферросилиция и свинцового сурика 50/50 от плотности запрессовки [1].

выше площадь контакта между ними, тем быстрее горит состав. Например, для спрессованной смеси Ti-2B при размере частиц титана 60 мкм и бора 10 мкм скорость горения составляет 15,7 мм/сек. Если же использовать 1 мкм титан и 2 мкм бор, скорость горения возрастает до 94,4 мм/сек.

С ростом давления скорость горения может значительно повышаться, хотя это характерно только для составов, образующих при сгорании большое количество газов. Ускорение горения при повышении давления связано с тем, что у составов со значительным газообразованием зона основного тепловыделения обычно находится на некотором расстоянии от поверхности горения. С повышением давления эта зона смещается ближе к поверхности состава, усиливая обратный тепловой поток на горящую поверхность и ускоряя тем самым процесс прогрева слоя состава до температуры воспламенения.

Инертные добавки, такие как цветообразователи и наполнители, замедляют горение, а катализаторы – ускоряют.

**Ориентировочно скорость горения пиротехнических смесей составляет:**

- фотосмеси и светозвуковые составы – до 1200 м/с (в слабо уплотненном состоянии при инициировании детонатором);
  - осветительные и трассирующие составы, составы пламенных сигнальных огней – 1-3 мм/сек для крупных изделий и 10-15 мм/сек для мелких;
  - составы маскирующих дымов – 0,5-5 мм/сек;
  - составы цветных сигнальных дымов – 0,4-3 мм/сек;
  - малогазовые замедлительные составы – 0,5-2500 мм/сек;
  - газогенерирующие составы – 0,2-500 мм/сек.
- *Удельный вес (плотность)* определяет, какая масса содержится в единице объема вещества. Измеряется в г/см<sup>3</sup>. Важная характеристика, т.к. в значительной степени определяет конечную массу и размер пиротехнического изделия. Различают насыпную и максимальную (теоретическую) плотность. Насыпная плотность важна при хранении готовой смеси или компонентов состава, а также в случае, если отмеривание компонентов ведется объемными методами. Ее величина может значительно изменяться в зависимости от дисперсности компонентов, степени утряски и других внешних факторов, поэтому в большинстве случаев дозировку состава точнее проводить по весу, а не по объему. Объемные методы применимы только в случае дозировки малых количеств смесей или использования какой-то определенной дисперсности частиц компонентов. Максимальный теоретически достижимый удельный вес (TMD в англоязычной литературе) смеси может быть рассчитан по формуле:

$$\rho = \frac{1}{\frac{M_1}{\rho_1} + \frac{M_2}{\rho_2} + \dots}, \quad (10)$$

где  $M_1, M_2, \dots$  – массовые доли соответствующих компонентов, а  $\rho_1, \rho_2, \dots$  – их плотности.

Реальная величина удельного веса смеси всегда ниже теоретической, но различными методами (прессование, подбор нужного размера частиц и т.д.) может быть доведена до 98-99% ТМД. При повышении давления прессования наступает такой момент, когда прилагаемое усилие не вызывает дальнейшего увеличения плотности пиротехнического состава, и в полученной шашке возникают трещины и сколы. Такое состояние называют «перепрессовкой». Плотность большинства составов в насыпном состоянии составляет 0,5-2,5 г/см<sup>3</sup>.

**Плотность запрессованных в изделие составов обычно составляет:**

- светозвуковые составы – 1,0-1,3 г/см<sup>3</sup>;
  - составы цветных сигнальных дымов – 1,2-1,5 г/см<sup>3</sup>;
  - газогенерирующие составы – 1,2-2,0 г/см<sup>3</sup>;
  - осветительные, сигнальные и трассирующие – 1,6-2,5 г/см<sup>3</sup>;
  - малогазовые составы – до 5 г/см<sup>3</sup>;
  - термитные и термитно-зажигательные – до 4 г/см<sup>3</sup>;
  - реакционные материалы – до 11 г/см<sup>3</sup>.
- *Температура горения* пиротехнических составов самым непосредственным образом влияет на создаваемый пиротехнический эффект. Наибольшую температуру горения до 2500-3500°C имеют осветительные, зажигательные и некоторые воспламенительные составы. Несколько меньшие температуры (до 2000-2500°C) характерны для сигнальных и большинства воспламенительных составов. Другие составы при горении развивают меньшие температуры, наименьшей температурой горения (несколько сотен градусов Цельсия) обладают составы цветных сигнальных дымов, т.к. избыточное теплообразование приводит к разложению содержащегося в них красителя. Одной из самых низкотемпературных пиротехнических композиций, с температурой горения немногим выше 200°C, является смесь из 90% нитрата гуанидина и 10% оксида марганца. Температура горения может быть определена, как отношение теплоты сгорания (см. далее) к суммарной теплоемкости продуктов сгорания. При этом необходимо учитывать теплоту плавления или кипения компонентов состава, для чего сначала задают ориентировочную температуру горения смеси, характерную для данного типа составов, берут из справочника данные по теплоемкостям продуктов сгорания при этой температуре, а затем проводят расчет. При расчетах для температур выше 2500-3000°C необходимо делать поправку на диссоциацию продуктов сгорания. Температура горения часто определяется пирометрическими методами.
- *Теплота сгорания* – это величина, определяющая энергетические характеристики состава и непосредственно влияющая на температуру горения. Измеряется в МДж/кг (или ккал/кг). Определяется как разница между теплотой образования исходных компонентов смеси и теплотой образования продуктов сгорания либо контрольными сжиганиями в специальной камере, в практике называемой «калориметрической бомбой». Подробнее о расчете см. раздел «Принципы построения и расчет пиротехнических составов». Многие пиро-

технические горючие обладают сравнительно невысокой массовой теплотой сгорания, но из-за значительной плотности их теплота сгорания, приведенная к единице объема (МДж/дм<sup>3</sup>), может быть весьма значительной (см. Табл. 3.1). Это следует учитывать при составлении пиротехнических составов.

**Табл. 3.1. Теплота сгорания металлов и неметаллов, приведенная к массе и к объему [3]**

Горючее	Окислитель – кислород			Окислитель – сера		
	Оксид:	МДж/кг	МДж/дм <sup>3</sup>	Сульфид:	МДж/кг	МДж/дм <sup>3</sup>
<b>Металлы:</b>						
алюминий	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	31,3	84,5	Al <sub>2</sub> S <sub>3</sub>	9,4	25,4
магний	MgO	24,8	42,2	MgS	14,3	24,3
титан	TiO <sub>2</sub>	20,0	89,8	-	-	-
цирконий	ZrO <sub>2</sub>	12,1	77,2	-	-	-
железо	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	7,5	58,9	FeS	1,7	13,3
вольфрам	WO <sub>3</sub>	4,6	89,2	WS <sub>2</sub>	1,1	20,3
<b>Неметаллы:</b>				<i>В самоподдерживающемся режиме образовываться не могут</i>		
бор	B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	57,8	135,2			
кремний	SiO <sub>2</sub>	31,3	62,5			
углерод	CO <sub>2</sub>	32,7	65,3			
фосфор	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	24,0	43,7			
сера	SO <sub>2</sub>	9,3	18,6			

**Ориентировочно теплота сгорания пиротехнических смесей составляет (без учета догорания на воздухе):**

- фотосмеси – 1,7-3,0 ккал/г (7,1-12,6 МДж/кг);
- осветительные и трассирующие – 1,5-2,0 ккал/г (6,3-8,4 МДж/кг);
- смесевые ракетные топлива – 1,0-1,8 ккал/г (4,2-7,5 МДж/кг);
- зажигательные с окислителем – 0,8-3,0 ккал/г (3,4-12,6 МДж/кг);
- пламенных сигнальных огней – 0,6-1,2 ккал/г (2,5-5,0 МДж/кг);
- маскирующих дымов – 0,4-1,0 ккал/г (1,7-4,2 МДж/кг);
- цветных сигнальных дымов – 0,3-0,6 ккал/г (1,3-2,5 МДж/кг).

### **Примечание.**

*Пусть читателя не смущает такая большая разница (на порядок) между Табл. 3.1 и приведенными теплотами сгорания пиротехнических составов. Дело в том, что в таблице приведена теплота сгорания 1 кг вещества без учета массы окислителя, тогда как пиротехнические смеси содержат в своем составе окислитель.*

- **Температура вспышки** (температура самовоспламенения) – обычно определяется как температура, при которой воспламенение состава происходит за время индукции, равное 5 секундам. Следует отметить, что процессы термического разложения пиротехнических смесей начинаются задолго до того, как достигнута температура вспышки, что должно всегда учитываться при хранении и обращении с составами. Наименьшей температурой вспышки обладают смеси на основе активных окислителей типа хлората калия и горючих типа

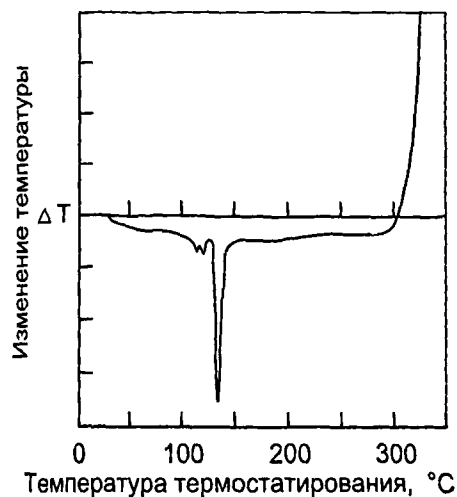
серы или фосфора – они могут воспламеняться при температурах порядка 150°С; напротив, некоторые термиты воспламеняются лишь при температуре, превышающей 1000°С.

В первом приближении температура воспламенения зависит от температуры плавления наиболее активных компонентов смеси, т.к., как было указано ранее, при переходе из твердого состояния в жидкое резко возрастает коэффициент диффузии. Также большое влияние оказывает характер разложения окислителя (эндотермический или экзотермический), что может быть проиллюстрировано таблицей 3.2.

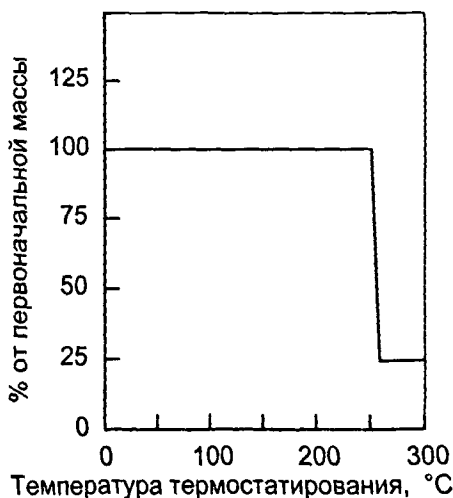
**Табл. 3.2. Температура вспышки некоторых комбинаций окислитель/горючее [17]**

Окислитель	Характер разложения окислителя	Сера, Т пл. 119°С	Лактоза, Т пл. 202°С	Магний, Т пл. 649°С
Хлорат калия, Т пл. 356°С	экзотермический	150	195	540
Нитрат калия, Т пл. 334°С	эндотермический	340	390	565

Температура вспышки – легко определяемый параметр. Тем не менее в современных условиях предпочитают использовать комплексные тесты на термостойкость. Наиболее распространенный и наглядный метод определения термостойкости – дифференциально-термический анализ (ДТА) в паре с термогравиметрическим анализом (ТГА). В специальной установке происходит медленный нагрев навески пиротехнического состава с постоянным измерением ее температуры. Фиксируются все измерения температуры в зависимости от приводимого нагрева. Таким образом можно определить температуру начала разложения (**Тнр**) и температуру интенсивного разложения (**Тнир**). **Тнр** обычно характеризуется уменьшением температуры образца по срав-



**Рис. 3.3. ДТА термического разложения дымного пороха [15].**



**Рис. 3.4. ТГА термического разложения дымного пороха [15].**

нению с эталоном за счет поглощения тепла на разложение, тогда как Тнир характеризуется быстрым увеличением температуры вплоть до самовоспламенения, что сопровождается появлением характерного «пика» на термограмме. Поэтому, в определенном смысле, Тнир является эквивалентом температуры вспышки. ДТА позволяет выявить и другие термические процессы, происходящие в смеси при изменении его температуры, например фазовые переходы компонентов состава. Термогравиметрический анализ осуществляется путем медленного нагревания навески исследуемого материала, при этом контролируется изменение массы этой навески.

Для газообразующих составов при оценке термостойкости может быть использован т.н. «вакуум-тест» – термостатирование в запаянной ампуле, из которой откачан воздух. По истечении определенного времени измеряется выход газообразных продуктов.

### *Примечание.*

*Небольшое уменьшение температуры относительно температуры эталона на графике ДТА (Рис. 3.3) в диапазоне приблизительно от 30 до 300°C, по-видимому, связано с эндотермическими превращениями древесного угля. Так же хорошо видны эндотермические пики, связанные с плавлением серы и переходом нитрата катия из ромбической в гексагональную кристаллическую систему. Следует отметить, что ДТА и ТГА на приведенных рисунках не совпадают в связи с тем, что скорость нагревания в первом и втором случае различалась. Поэтому более удобным является анализ на комбинированном ДТА-ТГА приборе.*

- Чувствительность к механическим воздействиям – очень важный параметр, характеризующий степень опасности при обращении с составами, в итоге определяющий технологию производства и ограничения при использовании пиротехнического средства. Следует отметить, что подавляющее большинство индивидуальных компонентов пиротехнических составов сами по себе не восприимчивы к механическим воздействиям и с этой точки зрения совершенно безопасны. Однако составленные из них пиротехнические смеси при значительном механическом воздействии либо взрываются, либо воспламеняются. И хотя сравнительно небольшое число современных составов в обычных для себя условиях применения способно взрываться, опасность воспламенения от трения или ударного воздействия всегда сохраняется. Особенно опасны в этом отношении составы на хлоратах, перманганатах, неорганических перекисях и смесях с использованием красного фосфора. Чувствительность к удару и трению определяется на специальных приборах. Действие прибора по определению чувствительности к удару основано на падении груза определенной массы (2, 5 или 10 кг) с определенной высоты. Измеряется процент взрывов для данной фиксированной высоты. В другом случае измеряется высота падения груза, при которой происходит определенный процент срабатывания (обычно 50%).

Также различают нижний и верхний предел чувствительности. Нижним пределом чувствительности называют такую максимальную высоту падения груза, при которой еще не происходит взрыва или воспламенения. Верхним пределом чувствительности называют минимальную высоту падения груза, при которой взрыв происходит во всех случаях. Ввиду чрезвычайной важности этого параметра рецептура той или иной смеси всегда выбирается с учетом восприимчивости к механическим воздействиям.

При изготовлении пиротехнических составов неизбежно механическое воздействие на них – трение, удары и толчки, возникающие при перетирании, запрессовывании и т.п. К тому же при использовании боеприпасов или зарядов к салютам, начиненных пиротехническими составами, неизбежны удары и значительные перегрузки. В силу этого обстоятельства пиротехнические составы должны иметь как можно меньшую восприимчивость к механическим воздействиям.

**Табл. 3.3. Степень восприимчивости двойных смесей [5]**

Окислитель	Воздействие	Кр. фосфор	Реальгар	Антимоний	Сера	Лактоза	Al *	Др. уголь
$\text{KClO}_3$	удар	5	4	3	4	3	1	1
	трение	5	4	3	4	1	1	1
$\text{NH}_4\text{ClO}_4$	удар	4	3	3	3	1	1	1
	трение	4	1	1	1	1	1	1
$\text{KClO}_4$	удар	4	3	2	3	1	2	1
	трение	4	1	2	1	1	1	1
$\text{KNO}_3$	удар	3	2	1	3	1	1	1
	трение	3	1	1	1	1	1	1

\* – аналог пигментной пудры, известной как «серебрянка»;

5 – высочайшая степень чувствительности (смесь чрезвычайно опасна в обращении, составление недопустимо);

4 – очень высокая степень чувствительности (смесь опасна в обращении, составление допустимо только при обязательном использовании средств защиты и при высокой квалификации персонала; при растирании в ступке взрывается даже при сравнительно невысокой степени давления; составление не рекомендуется);

3 – высокая степень чувствительности (смесь опасна в обращении, но при соблюдении всех мер безопасности составление допустимо);

2 – средняя степень чувствительности (смесь взрывается или воспламеняется при сильном ударе, необходимо соблюдение мер безопасности);

1 – низкая степень чувствительности (смесь взрывается или воспламеняется при очень сильном ударе или приложении экстремальной силы трения; необходимо соблюдение основных мер безопасности).

**Табл. 3.4. Чувствительность к удару двойных смесей в стехиометрическом отношении ( $\text{кгс} \cdot \text{м} / \text{см}^3$ ) [4]**

Окислитель	Горючее				
	Сера	Лактоза	Древ. уголь	Магний	Алюминий
$\text{KClO}_3$	1,1	1,8	3,2	4,5	4,5
$\text{KClO}_4$	1,2	2,9	4,2	4,4	5
$\text{KNO}_3$	3,6	5	5	4,6	5

Почти все пиротехнические составы представляют собой смесь окислителей и горючего, часто с различными добавками. Если глубоко не вдаваться в теорию, то чувствительность будет определяться тем, насколько легко окислитель способен отдавать кислород, а горючее – легко подвергаться окислению. Чем легче осуществляются эти процессы, тем меньше энергии требуется передать составу для возникновения в нем самоподдерживающейся реакции горения или даже взрыва. Безусловно, наличие инертных компонентов, затрудняющих взаимодействия окислителя и горючего, а также степень измельчения компонентов, их фракционный состав и даже технология изготовления могут значительно влиять на чувствительность смеси. Основным по массе компонентом почти всех составов является окислитель, следовательно, его свойства и будут в самой значительной мере определять, насколько состав чувствителен к механическим воздействиям.

Как правило, наиболее восприимчивы к удару и трению составы на основе хлоратов и перманганатов, чуть менее восприимчивы составы на основе перхлоратов и пероксидов, а составы на основе нитратов проявляют наибольшую стойкость. Чувствительность композиций на основе сульфатов и таких оксидов, как железа, марганца и др., чрезвычайно низка, лишь смеси на основе оксидов некоторых малоактивных металлов (свинца, висмута, ртути и др.) по восприимчивости к механическим воздействиям могут приближаться к составам на основе хлората калия.

- *Гигроскопичность* – способность веществ или смесей впитывать влагу из воздуха. Гигроскопичность самих составов – величина достаточно неопределенная, на нее влияет множество факторов, связанных с технологией производства данной смеси. Поэтому обычно говорят о гигроскопичности компонентов пиротехнических составов и в первую очередь – солей-окислителей. Высокая гигроскопичность компонентов состава приводит к накоплению влаги при хранении изделий. Под действием влаги происходит деградация некоторых компонентов пиротехнических смесей (в первую очередь металлов), изменение реологии составов и резкое ухудшение их свойств.

Чем выше растворимость вещества в воде, тем, как правило, более гигроскопично это вещество. Так как практически все вещества в большей или меньшей степени поглощают влагу из воздуха, за меру гигроскопичности принимается гигроскопическая (критическая) точка. Численно она равна относительной влажности воздуха, при превышении которой начинается значительное поглощение влаги из воздуха веществом в условиях постоянной температуры и продолжительного времени выдержки. Критическая точка приблизительно соответствует влажности воздуха, находящегося над поверхностью насыщенного раствора растворимого в воде вещества.

Технические сорта веществ, как правило, более гигроскопичны, чем очищенные. Например, гигроскопическая точка чистого нитрата натрия при 25°C составляет 74,2%. Для нитрата натрия, содержащего 0,5% хлорида натрия (допускается по ГОСТ 828-77), – 68,2%. Если же дополнительно содержится

примесь нитрита натрия, то гигроскопическая точка снижается до 55%. На гигроскопичность нитрата стронция влияние примесей сказывается еще сильнее: если чистый безводный нитрат стронция почти не гигроскопичен, то содержание всего 0,2% нитрата кальция понижает гигроскопическую точку до 45% [16].

По причине высокой гигроскопичности, а также способности образовывать комплексы с водой в пиротехнике не применяются нитраты и перхлораты лития, магния, алюминия и других элементов, хотя по содержанию кислорода они превосходят все традиционные пиротехнические окислители.

### **3.3. Совместимость компонентов пиротехнических составов**

Компоненты пиротехнических составов очень различаются по своей химической природе. При хранении готовых смесей между компонентами могут протекать нежелательные химические реакции, поэтому при разработке новых пиротехнических составов постоянно приходится сталкиваться с проблемой химической или физической совместимости компонентов. Более того, в некоторых случаях приходится использовать химически более совместимые компоненты, нежели наиболее удачные с точки зрения максимального пиротехнического эффекта.

Так, например, если рассматривать фейерверочные составы зеленого цвета пламени на основе перхлората аммония, то одни из лучших цветовых показателей будут иметь смеси, содержащие перекись бария. Однако перекись бария имеет щелочную реакцию и даже при тщательной просушке компонентов медленно реагирует с солями аммония. Через довольно непродолжительное время такие смеси полностью теряют все свои положительные качества.

**Несовместимость компонентов можно условно разделить на:**

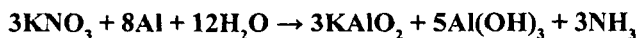
- физическую – когда в результате смешения компонентов резко повышается чувствительность к механическим воздействиям, и состав становится непригодным к безопасному использованию;
- химическую – когда в результате химического взаимодействия компонентов в смеси проходят химические реакции, приводящие либо к потере нужного пиротехнического эффекта, либо даже к самовоспламенению смеси при хранении. Стоит отметить, что при хранении большинства штатных пиросоставов так или иначе между компонентами этих составов со временем происходят различные химические реакции, приводящие к постепенной утрате нужного пиротехнического эффекта. Однако выраженность этих реакций невелика и позволяет использовать данный состав на протяжении всего срока эксплуатации пиротехнического изделия.

Возможен вариант, когда несовместимыми являются сами пиротехнические смеси, находящиеся в непосредственном контакте друг с другом. Наиболее часто такие эффекты проявляются между основным и воспламенительным составом.

Например, использование состава на основе перхлората аммония в паре с воспламенительным, содержащим в качестве окислителя какой-либо из нитратов, приводят к тому, что в месте контакта этих смесей в результате обменных реакций

выкристаллизовывается гигроскопичный нитрат аммония. Нитрат аммония впитывает влагу, образуя увлажненный слой с низкой реакционной способностью, и надежность воспламенения основного состава значительно понижается.

В современной военной пиротехнике проблемы хранения в основном связаны с медленной реакцией между металлами типа магния и алюминия с нитратами в присутствии влаги. Реакция с алюминием, например, может быть описана уравнением:



Поэтому, чем тщательнее высушены компоненты перед смешением, тем дольше сохраняются свойства у готовых составов.

Для обработки магния в целях понижения его реакционной способности при хранении используют методы нанесения пленок, что может быть достигнуто как протравливанием порошка металла определенными солями (пассивация), так и нанесением гидрофобных органических покрытий на металл. Описание способа обработки порошкообразного магния раствором дихромата калия см. в главе 2 (магний).

**Табл. 3.5. Характер несовместимости основных компонентов составов**

Компонент 1 (окислитель)	Компонент 2 (горючее)	Характер несовместимости и меры ее предотвращения
хлораты	фосфор	очень высокая чувствительность к мех. воздействиям; составление подобных смесей не рекомендуется;
хлораты	сера, соли аммония, любые «кислые» добавки	опасность самовоспламенения при хранении; в случае серы самовоспламенение может быть предотвращено добавками щелочного характера — карбонатами или гидрокарбонатами; смеси на основе хлоратов и солей аммония в США запрещены к производству;
хлораты	металлы типа магния и алюминия	высокая чувствительность к механическим воздействиям; неустойчивость при хранении; составление подобных смесей не рекомендуется;
перхлораты	магний	высокая чувствительность к мех. воздействиям; неустойчивость при хранении; с перхлоратом аммония в присутствии влаги возможно самовоспламенение, что может быть компенсировано пассивацией металла и добавлением бихромата калия в состав; перхлорат аммония не совместим с веществами щелочного характера;
нитраты	магний и алюминий	коррозия магния или алюминия в присутствии следов влаги; устраняется либо добавкой борной кислоты (алюминий), либо пассивацией металла (магний); смесь непассивированного магния с нитратом аммония может самовоспламеняться; нитрат аммония разлагается с веществами щелочного характера;
перманганат калия, оксиды свинца	фосфор, сера, активные горючие	высокая чувствительность к механическим воздействиям; опасность самовоспламенения;
пероксиды	сера	опасность самовоспламенения при хранении; высокая чувствительность к механическим воздействиям;
сера	магний	коррозия магния; быстрая утрата необходимых свойств;
гексахлорэтан	некоторые металлы (цинк)	опасность самовоспламенения в присутствии влаги; необходим стабилизатор;

**Табл. 3.6. Стойкость металлов к действию различных солей во влажном состоянии [5]**

Вещество	Алюминий	Сплав АМ	Магний
вода	0	1	2
перхлорат аммония - $\text{NH}_4\text{ClO}_4$	0	2	4
нитрат калия - $\text{KNO}_3$	1*	2	3
нитрат бария - $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$	1*	2	3
нитрат аммония - $\text{NH}_4\text{NO}_3$	0	0	4
хлорат калия - $\text{KClO}_3$	0	2	4
перхлорат калия - $\text{KClO}_4$	0	1	5
оксалат натрия - $\text{Na}_2\text{C}_2\text{O}_4$	3	4	5
хлорид натрия - $\text{NaCl}$	1	5	5
сульфат меди - $\text{CuSO}_4$	1	5	5
бикарбонат натрия - $\text{NaHCO}_3$	1	0	5
карбонат натрия - $\text{Na}_2\text{CO}_3$	5	3	4
борная кислота - $\text{H}_3\text{BO}_3$	0	3	5
дихромат аммония - $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$	0	0	0

\* – при 60°C – бурное разложение.

**Табл. 3.7. Эффективность различных покрытий для защиты магния от коррозии в водных растворах соответствующих солей [5]**

Компонент	Без покрытия	Олифа (4%)	Парафин (5%)	Полиэфирная смола (7%)	Пассивация бихроматом
$\text{NH}_4\text{ClO}_4$	5	5	5	5	1
$\text{KClO}_3$	4	0	3	1	1
$\text{KClO}_4$	5	0	3	1	1
$\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$	4	0	1	0	1
$\text{Sr}(\text{NO}_3)_2$	4	0	1	1	1
$\text{KNO}_3$	4	0	1	1	1
$\text{NaNO}_3$	3	0	0	3	1
$\text{Na}_2\text{CO}_3$	-	3	0	5	1
вода	2	0	0	0	0

0 – нет реакции, 1 – слабая реакция, пригоден для практического применения, 2 – медленное разрушение, 3 – значительное разрушение, 4 – активное разрушение, 5 – бурное разрушение.

### **Примечание.**

Из таблицы следует, что наилучшими защитными свойствами обладает пленка из олифы (льняного масла), несколько худшими параметрами обладает пленка, полученная обработкой порошка магния раствором бихромата калия (хромпика), однако в отличие от олифы она устойчива к действию перхлората аммония. При совместном покрытии магния олифой и пассивацией дихроматом могут быть достигнуты очень длительные сроки хранения готовых пиротехнических составов с металлическими горючими.

### 3.4. Принципы построения и расчет пиротехнических составов

Как и любую химическую реакцию, реакцию сгорания пиротехнического состава можно рассчитать. Это позволяет установить «оптимальное» соотношение исходных компонентов. Слово «оптимальное» взято в кавычки в связи с тем, что для реальной смеси расчет позволяет лишь приблизительно указать область соотношений «там, где нужно искать». Реальные же пропорции между компонентами определяются исходя из экспериментальных исследований по оптимизации состава.

**Для возникновения процесса устойчивого горения обязательны 3 условия** (два из них уже были упомянуты в разделе 3.1):

- достаточный запас энергии для протекания самоподдерживающегося процесса;
- тепловой импульс достаточный для возникновения самоподдерживающегося процесса;
- способность компонентов состава реагировать между собой синхронно.

Последнее условие носит прикладной характер и не является столь очевидным, как первые два. Отсутствие этого условия не позволяет сформироваться стабильной поверхности горения и обычно определяется при практических испытаниях. Например, смесь бензина и перхлората калия имеет и достаточный запас энергии и воспламеняется очень легко, но при ее воспламенении наблюдается выгорание бензина без заметного участия окислителя – перхлората калия. Основная зона тепловыделения при горении бензина находится на удалении от поверхности, соответственно на испарение бензина с поверхности затрачивается энергия из зоны тепловыделения, это, в свою очередь, охлаждает поверхность и не позволяет частицам перхлората калия нагреться до температуры разложения.

Чаше всего составы не горят или сгорают неудовлетворительно при попытках разработать принципиально новую пиротехническую смесь. Еще более часты случаи, когда в целом пиротехнический эффект устраивает, но скорость горения неудовлетворительно низкая или высокая. В связи с тем, что сырьевая база пиротехники уже 40-50 лет остается примерно постоянной, в реальных условиях перед разработчиками возникают задачи более практического плана, вызванные необходимостью подкорректировать состав, если вдруг какой-то из компонентов снят с производства либо, наоборот, начат выпуск нового перспективного вещества.

Реальная пиротехническая смесь состоит из нескольких компонентов. Непосредственно рассчитывать многокомпонентное уравнение реакции горения очень неудобно, поэтому на практике такие уравнения обычно раскладывают на несколько простых смесей «окислитель/горючее». Простейшие смеси «окислитель/горючее» называют «двойными смесями» [4]. В свою очередь, двойными смесями можно оперировать как одним компонентом. Для определения состава продуктов сгорания двойных смесей можно привести следующую таблицу:

**Табл. 3.8. Основные продукты сгорания двойных смесей:  
окислитель/горючее**

Окислитель	Уголь	Сера	Магний	CxHy
KClO <sub>3</sub>	KCl, CO <sub>2</sub> /CO	KCl, K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , Cl <sub>2</sub> , SO <sub>2</sub> **	KCl, MgO **	KCl, CO <sub>2</sub> /CO, H <sub>2</sub> O/H <sub>2</sub>
KClO <sub>4</sub>	KCl, CO <sub>2</sub> /CO	KCl, SO <sub>2</sub>	KCl, MgO	KCl, CO <sub>2</sub> /CO, H <sub>2</sub> O/H <sub>2</sub>
NH <sub>4</sub> ClO <sub>4</sub>	N <sub>2</sub> , HCl, Cl <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O/H <sub>2</sub> , CO <sub>2</sub> /CO	N <sub>2</sub> , HCl, Cl <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O, SO <sub>2</sub>	N <sub>2</sub> , MgCl <sub>2</sub> , MgO, H <sub>2</sub> O/H <sub>2</sub> **	N <sub>2</sub> , HCl, CO <sub>2</sub> /CO, H <sub>2</sub> O/ H <sub>2</sub>
Ba(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> , Sr(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	MeO, N <sub>2</sub> , CO <sub>2</sub> / CO	MeS, SO <sub>2</sub> , N <sub>2</sub> *	MeO, Me, N <sub>2</sub> , MgO, Mg <sub>3</sub> N <sub>2</sub>	MeO, N <sub>2</sub> , CO <sub>2</sub> /CO, H <sub>2</sub> O/ H <sub>2</sub>
KNO <sub>3</sub> , NaNO <sub>3</sub>	Me <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> , Me <sub>2</sub> O, N <sub>2</sub> , CO <sub>2</sub> /CO	Me <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> /K <sub>2</sub> S, SO <sub>2</sub> *	Me <sub>2</sub> O, Me, N <sub>2</sub> , MgO, Mg <sub>3</sub> N <sub>2</sub>	MeNO <sub>2</sub> , Me <sub>2</sub> O, Me <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> , CO <sub>2</sub> /CO, H <sub>2</sub> O
NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub>	N <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O, CO <sub>2</sub> / CO	N <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O, SO <sub>2</sub> *	N <sub>2</sub> , MgO, Mg <sub>3</sub> N <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O/H <sub>2</sub> **	N <sub>2</sub> , CO <sub>2</sub> /CO, H <sub>2</sub> O/H <sub>2</sub> *
CaSO <sub>4</sub> , SrSO <sub>4</sub>	MeS, CO <sub>2</sub> /CO *	MeS, SO <sub>2</sub> *	MeS, MgO	MeS, CO <sub>2</sub> /CO, H <sub>2</sub> O *
BaO <sub>2</sub> , SrO <sub>2</sub>	MeO, CO <sub>2</sub> /CO	MeS, SO <sub>2</sub> **	MeO, Me, MgO	MeO, CO <sub>2</sub> /CO, H <sub>2</sub> O/H <sub>2</sub>
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe, CO <sub>2</sub> /CO, *	FeS, SO <sub>2</sub> *	Fe, MgO	Fe, CO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O *
BaCrO <sub>4</sub>	BaO, Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , CO <sub>2</sub> /CO *	BaO, BaS, BaSO <sub>4</sub> , Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Cr <sub>2</sub> S <sub>3</sub>	BaO, Ba, Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> / Cr, MgO	BaO, Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , CO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O *
PbO <sub>2</sub>	Pb, CO <sub>2</sub> /CO	PbS, SO <sub>2</sub> **	Pb, MgO **	Pb, CO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O *
(-CF <sub>2</sub> -CF <sub>2</sub> -) <sub>n</sub>	не горит	не горит	MgF <sub>2</sub> , C/C <sub>x</sub> F <sub>y</sub>	не горит

\* – Реакция идет только в специальных условиях или при наличии других компонентов. При нормальных условиях сама не может поддерживаться.

\*\* – Сочетание опасно в силу плохой химической совместимости или чувствительности к механическим воздействиям. Эти смеси изготавливать не допустимо.

**Чтобы максимально точно определить соотношения компонентов, обычно следует придерживаться определенного алгоритма, состоящего из 4 пунктов:**

1. *Определить основной эффект пиротехнического состава. Подобрать возможные компоненты рассчитываемого состава, а также источник целевого продукта реакции.*
2. *Установить нужный кислородный баланс для смеси. Написать уравнение (уравнения) реакции и установить соотношения компонентов.*
3. *При необходимости определить теплоту реакции горения (энтальпию реакции). Этот пункт наиболее важен при составлении принципиально новых составов, т.к. позволяет оценить, будет ли устойчивым горение смеси и достаточно ли энергии для возникновения нужного пиротехнического эффекта.*
4. *Провести экспериментальные опыты и в случае необходимости подкорректировать соотношения компонентов.*

Безусловно, алгоритм носит общий характер и для некоторых случаев он может иметь другую структуру.

**Распишем алгоритм расчета пиротехнических составов на примере смеси нитрата калия и сахара, использующейся как топливо для модельных ракет:**

- 1. Определить основной эффект пиротехнического состава. Подобрать возможные компоненты рассчитываемого состава, а также источник целевого продукта реакции.*

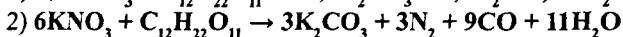
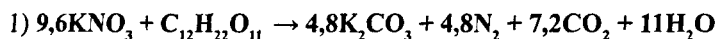
Учет требований технического задания и принадлежность состава к какому-либо из типов позволяет химику-пиротехнику предположить предварительный ассортимент компонентов. Далее этот ассортимент сужается с учетом совместности, экономической целесообразности и доступности компонентов.

Смесь предполагается использовать как топливо для модельных ракет, следовательно, требуется сочетание энергетики и наличие рабочего тела, т.е. достаточное газообразование.

- 2. Установить нужный кислородный баланс для смеси. Написать уравнение (уравнения) реакции и установить соотношения компонентов.*

Кислородный баланс (или схожий параметр – кислородный коэффициент) определяет основные коэффициенты в уравнении горения, а также влияет на достижение пиротехнического эффекта. В большинстве случаев от соотношения исходных компонентов зависит и состав продуктов сгорания.

**Рассмотрим 2 случая горения нитрата калия с сахарозой:**



#### **Примечание.**

Пусть читателя не смущают дробные числа в коэффициентах уравнения. Хотя в общей химии это не принято, однако позволяет определить соотношения компонентов, не прибегая к слишком большим коэффициентам, загромождающим процесс вычисления.

Первый случай соответствует кислородному коэффициенту, равному единице или «CO<sub>2</sub>-баланс». С точки зрения энергетики это наиболее оптимальное соотношение компонентов. Однако он не всегда обеспечивает нужный пиротехнический эффект, особенно в случае излучающих и газогенерирующих составов.

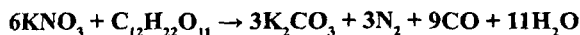
Второй случай «СО-баланс» обеспечивает поддержание восстановительной среды в пламени, что очень важно для некоторых типов составов (в первую очередь – цветопламенных). При этом обычно не наблюдается накопления значительных количеств сажи, портящих цветность пламени.

#### **Примечание.**

Третий случай, когда углерод сгорает до СО, а водород выделяется в свободном виде, может быть реализован лишь приближенно и при высоких температурах. Например, при добавлении достаточного количества магния или алюминия.

*Первый случай:* при  $\text{CO}_2$ -балансе для смесей окислителя типа нитрата калия и органического вещества процесс горения обычно носит неустойчивый характер, при этом выделяется слишком незначительное количество газов, необходимых для совершения работы, и повышенное количество шлаков.

*Второй случай:* при  $\text{CO}$ -балансе, как правило, образуется значительное количество газов и пониженное количество шлаков, поэтому выбираем  $\text{CO}$ -баланс.



**Определяем соотношения компонентов:**

$M(\text{KNO}_3) = 101,1$  г/моль;  $M(\text{C}_{12}\text{H}_{22}\text{O}_{11}) = 342$  г/моль. Следовательно, соотношение между компонентами будет равно:  $6 \cdot 101,1 : 342 = 606,6 : 342$ .

Если состав выразить в процентном соотношении, то он будет содержать 65,95% нитрата калия и 36,05% сахара.

В условиях реального промышленного производства придерживаться таких точных соотношений компонентов не имеет смысла. Это приведет лишь к удорожанию операции взвешивания компонентов. Свойства же устойчиво сгорающей пиротехнической рецептуры обычно сохраняются при отклонении от номинала в пределах 3-10%. Действительно, все технологические рецептуры указываются как номинальные проценты с определенным допуском. На компоненты, содержащиеся в большом количестве, этот допуск больше, на другие – меньше. Существование допуска на рецептуру также диктуется тем, что различные партии пиротехнических компонентов могут различаться по качеству. Например, на завод приходит партия связующего с несколько пониженными связующими свойствами, и, чтобы изделие соответствовало стандартам по прочности, количество связующего несколько увеличивают в пределах допуска.

Поэтому принимаем 64%  $\text{KNO}_3$  и 36% сахарозы.

### **Примечание.**

*В литературе иногда встречаются пропорции составов, выраженные не в целых числах, а с десятичными или сотыми долями процентов. Это обычно означает, что либо соотношение компонентов определено в результате химического анализа, либо состав первоначально был указан в частях, а затем его привели к процентам.*

### **3. Определить энтальпию реакции горения.**

Энтальпия сгорания определяется как разность энтальпий образования исходных компонентов и продуктов реакции (энтальпия горения и теплота сгорания – очень близкие понятия). Энтальпии образования исходных компонентов можно взять из справочной части этой книги. Энтальпии образования часто встречающихся продуктов реакции приведены в следующей таблице (для элементов, не приведенных в таблице, величины  $\Delta H_f$  можно найти в [6]):

Табл. 3.9. Энтальпии образования продуктов сгорания пиротехнических составов [4, 6]

Эл-т	Вещ-во	Мол.вес, г/моль	$\Delta H_f^\circ$ , кДж/моль	Эл-т	Вещ-во	Мол.вес, г/моль	$\Delta H_f^\circ$ , кДж/моль	Эл-т	Вещ-во	Мол.вес, г/моль	$\Delta H_f^\circ$ , кДж/моль
H	H <sub>2</sub> O	18	-242	Al	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	102	-1676	Zr	ZrO <sub>2</sub>	123	-1100
	HCl	36,5	-92,3		AlCl <sub>3</sub>	136	-705*		ZrOCl <sub>2</sub>	178	-1083
	HF	20	-273		AlF <sub>3</sub>	84	-1510		ZrCl <sub>4</sub>	233	-980
C	CO <sub>2</sub>	44	-393,5		Al <sub>2</sub> S <sub>3</sub>	150	-723		ZrF <sub>4</sub>	167	-1911
	CO	28	-110,5		BaO	153	-548		ZrS <sub>2</sub>	155	-567
Na	Na <sub>2</sub> O	62	-414,8	Ba	BaCl <sub>2</sub>	208	-844	B	B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	70	-1255
	NaCl	58	-411,3		BaCl	172,5	-255,4		BCl <sub>3</sub>	117	-404,5
	NaF	42	-577		BaF <sub>2</sub>	175	-1187		BF <sub>3</sub>	68	-1119
	Na <sub>2</sub> S	78	-358,8		BaS	169	-453	Zn	ZnO	81	-350,8
	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	142	-1388	Sr	SrO	103,5	-590,5		ZnCl <sub>2</sub>	136	-415,3
	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	106	-1129		SrCl <sub>2</sub>	158	-833		ZnF <sub>2</sub>	103	-764
K	K <sub>2</sub> O	94	-361,7		SrCl	123	-230,3		ZnS	97	-205
	KCl	74,5	-436,9	Ca	SrF <sub>2</sub>	125,5	-1228	P	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	142	-1505
	KF	58	-536		SrS	119,5	-480		PCl <sub>3</sub>	137	-289,5
	K <sub>2</sub> S	110	-387,3		CaO	56	-635		PF <sub>3</sub>	88	-957,4
	K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	174	-1438		CaCl <sub>2</sub>	111	-796		P <sub>4</sub> S <sub>3</sub>	220	-130
	K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	138	-1152		CaF <sub>2</sub>	78	-1221	Cu	CuO	80	-162,1
Li	Li <sub>2</sub> O	30	-598	Si	CaS	72	-481		CuCl <sub>2</sub>	134	-215
	LiCl	42	-408,5		SiO <sub>2</sub>	60	-911		CuCl	99	-137,3
	LiF	26	-618,3		SiCl <sub>4</sub>	170	-662		CuF <sub>2</sub>	102	-544
Mg	MgO	40	-601,5	Ti	SiF <sub>4</sub>	104	-1615		CuS	96	-53,2
	MgCl <sub>2</sub>	95	-644		TiO <sub>2</sub>	80	-944	S	SO <sub>2</sub>	64	-296,8
	MgF <sub>2</sub>	62	-1124		TiCl <sub>4</sub>	190	-804		SCl <sub>2</sub>	174	-56,1
	MgS	56	-348		TiF <sub>4</sub>	124	-1649		SF <sub>4</sub>	108	-770

\* — для газа: -584 кДж/моль.

Как известно из физики, энтальпия образования простых веществ равна 0. Соответственно, для нашей смеси запишем:

$$\begin{aligned}
 & 6\text{KNO}_3 + \text{C}_{12}\text{H}_{22}\text{O}_{11} \rightarrow 3\text{K}_2\text{CO}_3 + 3\text{N}_2 + 9\text{CO} + 11\text{H}_2\text{O} \\
 & 6 \cdot \Delta H_f(\text{KNO}_3) + 1 \cdot \Delta H_f(\text{C}_{12}\text{H}_{22}\text{O}_{11}) = 3 \cdot \Delta H_f(\text{K}_2\text{CO}_3) + 3 \cdot (\text{N}_2) + 9 \cdot \Delta H_f(\text{CO}) + \\
 & 11 \cdot \Delta H_f(\text{H}_2\text{O}) + (-\Delta H_f) \\
 & 6 \cdot (-495) + 1 \cdot (-2246,2) = 3 \cdot (-1151,5) + 3 \cdot (0) + 9 \cdot (-110,5) + 11 \cdot (242) + (-\Delta H_f) \\
 & -\Delta H_f = 1894,8 \text{ кДж} \\
 & -\Delta H_{f, \text{сгор.}} = 1894,8 \cdot 1000 / 948,6 = 1997 \text{ кДж/кг}
 \end{aligned}$$

### Примечание.

За критерий оценки способности состава к горению удобно использовать теплоту сгорания не на единицу массы, а на моль·атом, т.е. тепло, полученное по уравнению реакции, делится на общее количество атомов в уравнении. Для нашего примера:  $1894,8 / (6 \cdot 5 + 12 + 22 + 11) = 25,3$  кДж/моль·атом. Для типичных пиротехнических составов удельного энерговыделения 25 кДж/моль·атом достаточно для устойчивого процесса горения; для малогазовых

составов, согласно закону Дюлонга и Пти, эта величина соответствует температуре к-фазы более 1000°C. Так как теплоемкость газообразных продуктов (на моль атом) заметно ниже, чем для к-фазы, то в приведенном примере температура выше. Кроме того, ее дополнительно повышает протекание реакции водяного газа:  $\text{CO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2 + 40 \text{ кДж/моль}$ . Критерий по удельному энерговыделению на моль атом не является строгим правилом, а скорее характеризует интенсивность реакции в благоприятных условиях. При малой энергии активации реакция может протекать и при меньших величинах (например, для составов цветных дымов). В то же время состав может не гореть в обычных условиях даже при значительной величине энерговыделения. Например, смесь из 85% хлората калия и 15% парафина характеризуется величиной в 53 кДж/моль атом, однако при нагревании состава парафин плавится и испаряется с отбором энергии, не давая сформироваться горячей поверхности. Поэтому при нормальных условиях состав затухает при удалении источника пламени. Введение незначительного количества каркасообразователя или повышение давления возвращают составу способность гореть.

4. Провести экспериментальные опыты и в случае необходимости подкорректировать соотношения компонентов.

Контрольные сжигания показали, что состав устойчиво сгорает без образования шлака с хорошим газовыделением.

Стоит упомянуть другой способ определения соотношений компонентов без необходимости составления уравнений реакции.

Этот метод лишен наглядности, но достаточно удобен для рутинных расчетов, когда необходимо перебрать несколько десятков компонентов с целью получения оптимального состава. На примере смеси нитрата калия и алюминия расчет выглядит следующим образом:

1. Отдельно задается некая условная стехиометрия разложения 1 моль окислителя и окисления 1 моль горючего:  
$$2\text{KNO}_3 \rightarrow \text{K}_2\text{O} + \text{N}_2 + 5\text{O}$$
$$2\text{Al} + 3\text{O} \rightarrow \text{Al}_2\text{O}_3$$
2. По каждому компоненту состава вычисляется масса на единицу поглощаемого и выделяемого кислорода:  
 $M(2 \cdot \text{KNO}_3)/N(\text{O}) = 2 \cdot 101,1/5 = 40,4 \text{ г/атом}$ ,  
 $M(2 \cdot \text{Al})/N(\text{O}) = 54/3 = 18 \text{ г/атом}$ .
3. Определяются массовые соотношения компонентов в двойной смеси, которые в нашем случае будут соответствовать 40,4 : 18 (или 69 %  $\text{KNO}_3$  и 31% алюминия).
4. Если горючих и окислителей несколько, то исходя из тех или иных соображений задается пропорция между двойными смесями и определяется соотношение компонентов в итоговой смеси.

При данном методе расчета необходимо следить, чтобы стехиометрии разложения окислителей и горючих были согласованы между собой. В практике

распространена вариация этого метода, когда высчитывается, сколько кислорода выделяет 1 г окислителя и требуется для окисления 1 г горючего, затем составляется пропорция и определяется массовое соотношение компонентов.

Далее приведем еще примеры различных подходов при расчете пиротехнических составов:

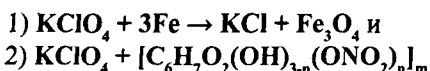
**Рассчитать воспламенительный состав, содержащий перхлорат калия, железо и нитрат целлюлозы в количестве 10%.**

Ввиду необходимости достижения максимальной теплоты сгорания принимаем кислородный баланс, ориентированный на  $\text{CO}_2$ .

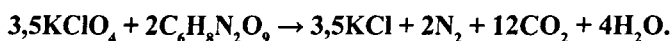
**Примечание.**

*Более правильным было бы рассчитать составы с различными соотношениями компонентов и сравнить, который из них даст больше тепла.*

Состав из трех компонентов принимаем за 2 состава, содержащих 2 компонента – окислитель и горючее.



В формуле нитроцеллюлозы допустим, что  $n = 2$  (коллоксилин), тогда



Соотношения компонентов в первой смеси будет:  $138,5 : 3 \cdot 56 = 138:168$ .

Соотношение компонентов во второй смеси будет  $3,5 \cdot 138,5 : 2 \cdot 252 = 485 : 504$ .

Коллоксилина должно быть 10%, следовательно, в 100 ч. смеси из доли второй смеси будет содержаться 10 ч. НЦ и  $(485/504) \cdot 10 = 9,6$  ч. перхлората калия.

Содержание первой смеси в 100 ч. общей композиции будет  $100 - (10 + 9,6) = 80,4$  ч., следовательно, содержание перхлората калия в первой смеси будет:  $80,4 \cdot 138 / (138 + 168) = 36,3$  ч.

Соответственно, содержание перхлората калия в общей смеси будет:  $9,6 + 36,3 = 45,9$  ч., следовательно, смесь должна содержать:

45,9% перхлората калия,

10% коллоксилина,

44,1% железа.

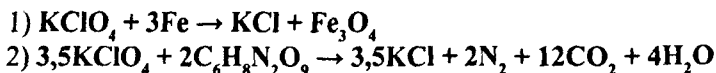
Итого:

45% ПХК;

45% железа;

10% коллоксилина.

Расчет теплоты сгорания ведем следующим образом:



Уравнение для теплот сгорания будет выглядеть следующим образом:

$$-433 + 0 = -437 + (-1120) + \Delta H_f$$

$$3,5 \cdot (-433) + 2 \cdot (-747) = 3,5 \cdot (-437) + 0 + 12 \cdot 394 + 4 \cdot (-242) + \Delta H_f$$

( $\Delta H_{f_0}$  коллоксилина =  $-1360,11 + 58,6718 \cdot N$  ккал/кг, где  $N$  – количество азота.

В данном случае  $N=11,1\% \Rightarrow \Delta H_{f_0} = -708,2$  ккал/кг, т.к.  $1 \text{ кал} = 4,1868 \text{ Дж} \Rightarrow \Delta H_{f_0} = -2965 \text{ кДж/кг}$  или  $-2965 \cdot 252/1000 = -747 \text{ кДж/моль}$ )

$$\Delta H_f = 1124 \text{ кДж}, \Delta H_f = 4216 \text{ кДж}$$

$$\Delta H_{\text{сгор.}} = \Delta H_f \cdot 80,4/100 + \Delta H_f \cdot 19,6/100 = 1,73 \text{ МДж/кг}$$

### **Примечание.**

Теплота реакции у данного воспламенительного состава сравнительно невелика. Однако воспламенительный эффект, вероятно, будет достаточным из-за образования большого количества шлаков.

Состав горит неустойчиво и плохо воспламеняется. Видно, что сначала выгорает  $\text{HCl}$ , а  $\text{KClO}_4$  плавится и лишь частично вступает в реакцию с железом.

Учитывая, что воспламенительные составы должны легко воспламеняться, используем распространенный прием для улучшения воспламеняемости и обеспечения полноты горения: внесем 1-2% древесного угля.

Итого:

45% ПХК,

45% железа,

10%  $\text{HCl}$ ,

1% древесного угля (сверх 100%).

Состав сгорает устойчиво и образует раскаленные шлаки.

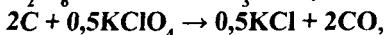
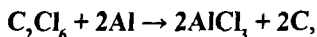
**Рассчитать металлохлоридный быстрогорящий дымовой состав белого дыма, содержащий 5% фтороорганического связующего.**

Классические металлохлоридные составы обычно содержат хлорорганическое соединение, активный металл и дымообразователь (оксид менее активного металла). В настоящее время производятся 2 хлорорганических вещества – хлорпарафины и гексахлорэтан. Гексахлорэтан более активен в реакциях горения в смесях с активным металлом, поэтому выбираем его. Наличие типичных дымообразователей типа оксида цинка или титана будет затормаживать реакцию горения, поэтому их не используем. Среди активных металлов в реальных составах используются алюминий, ПАМ, магний, титан и цинк. Титан и цинк исключаются в связи с тем, что составы на их основе сгорают менее активно. Магний хоть и проявляет высокую активность, но тогда продуктом его сгорания будет хлорид магния, который не слишком хорошо возгоняется, поэтому выбираем алюминий – его хлорид достаточно летуч. В качестве альтернативы алюминию можно использовать ПАМ с небольшим количеством дымообразователя типа оксида цинка. ПАМ более активен, чем алюминий, а оксид цинка замедляет реакцию горения. Можно подобрать такое сочетание этих компонентов, чтобы полноценно заменить алюминий.

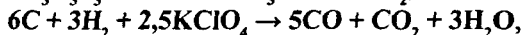
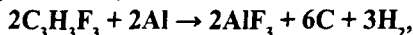
Для дожигания избытка сажи, с целью получения белого дыма, в смесь вводим окислитель. Использование нитратов в металлохлоридных дымовых составах нецелесообразно, т.к. они связывают определенную долю хлора в малолетучий (при характерной для этих составов температуре горения) хлорид соответствующего элемента. Поэтому акцентируем свое внимание на перхлоратах. Выбираем перхлорат калия, как обеспечивающий большую скорость горения, чем для составов с перхлоратом аммония. Тройную смесь гексахлорэтан/алюминий/перхлорат калия невозможно сформировать в заряд, и сгорать она будет слишком активно. Поэтому необходимо связующее, которое в достаточном количестве не слишком бы замедляло горение. Такими связующими являются галогенсодержащие полимеры, которые с активными металлами образуют смеси, способные к самостоятельному горению с образованием дыма. В качестве связки используем термопластичный 1,1,1-политрифторпропилен (не стоит искать скрытый смысл в применении ПТФП, просто имелась возможность испытать этот материал в качестве связующего).

Условие образования белого дыма достигается при кислородном балансе, ориентированном на  $\text{CO}$  или  $\text{CO}_2$ .

Распишем уравнения горения параллельно протекающих реакций двойных смесей:



объединяем уравнения:  $\text{C}_2\text{Cl}_6 + 2\text{Al} + 0,5\text{KClO}_4 \rightarrow 2\text{AlCl}_3 + 0,5\text{KCl} + 2\text{CO}$  (первая смесь)



объединяем уравнения:  $2\text{C}_3\text{H}_3\text{F}_3 + 2\text{Al} + 2,5\text{KClO}_4 \rightarrow 2\text{AlF}_3 + 5\text{CO} + \text{CO}_2 + 3\text{H}_2\text{O}$  (вторая смесь).

Соотношение компонентов в первом уравнении:

237 : 56 : 69 ( $\text{C}_2\text{Cl}_6$  :  $\text{Al}$  :  $\text{KClO}_4$ ).

Соотношение компонентов во втором уравнении:

192 : 56 : 485 ( $\text{C}_3\text{H}_3\text{F}_3$  :  $\text{Al}$  :  $\text{KClO}_4$ ).

Из условия содержания 5% или 5 ч. связки, в 100 ч. общей смеси будет содержаться из второй смеси  $56 \cdot 5 / 192 = 1,46$  ч. алюминия и  $485 \cdot 5 / 192 = 12,63$  ч. перхлората калия.

Доля второй смеси в 100 ч. общей смеси:  $5 + 1,46 + 12,63 = 19,1$  ч.  $\Rightarrow$  доля первой смеси составляет  $100 - 19,1 = 80,9$  ч., соответственно доля гексахлорэтана составит  $80,9 \cdot 237 / (237 + 56 + 69) = 52,95$  ч.,

доля алюминия из первой смеси в общем составе:  $80,9 \cdot 56 / (237 + 56 + 69) = 12,51$ ,

доля перхлората калия из первой смеси в общем составе:  $80,9 - 52,95 - 12,51 = 15,44$ .

Состав будет содержать:

52,95% гексахлорэтана,  
1,46 + 12,51 = 13,97% алюминия,  
12,63 + 15,44 = 28,09% ПХК,  
5% политрифторпропилена

После округления:

53% - гексахлорэтана,  
14% - алюминия,  
28% - перхлората калия (ПХК),  
5% - политрифторпропилена.

Расчет энтальпии сгорания можно провести аналогично предыдущему примеру.

При испытании состав показал удовлетворительную дымообразующую способность и высокую скорость горения.

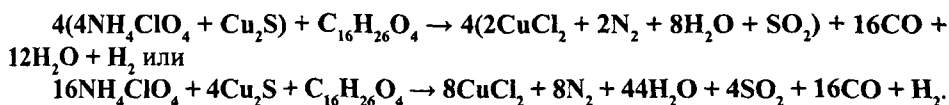
**Рассчитать фейерверочный состав синего огня на основе перхлората аммония, содержащего шеллак и сернистую медь.**

Составы синего огня должны содержать значительный избыток хлора и восстановительную среду.

Выбираем кислородный баланс, ориентированный на СО. Т.к. основной излучатель  $\text{CuCl}$  образуется по схеме  $2\text{CuCl}_2 \leftrightarrow 2\text{CuCl} + \text{Cl}_2$ , считаем, что весь хлор перхлората аммония переходит в  $\text{CuCl}_2$ .

$4\text{NH}_4\text{ClO}_4 + \text{Cu}_2\text{S} \rightarrow 2\text{CuCl}_2 + 2\text{N}_2 + 8\text{H}_2\text{O} + \text{SO}_2 + 6\text{O}$ , где «6O» – остаток кислорода, который должен уходить на окисление шеллака до СО.

Формула шеллака  $\text{C}_{16}\text{H}_{26}\text{O}_4$ , для его окисления необходимо:  $\text{C}_{16}\text{H}_{26}\text{O}_4 + 25\text{O} \rightarrow 16\text{CO} + 13\text{H}_2\text{O}$ . Т.к.  $6 \cdot 4 = 24$ , а  $24 - 25$ , напомним суммарное уравнение:



Находим соотношения компонентов:

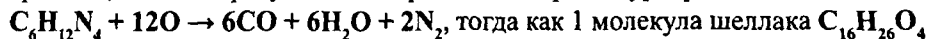
$16 \cdot 117,5 + 4 \cdot 159 + 282 = 2798$ . Соотношение между компонентами  $1880 : 636 : 282$ , следовательно, состав будет содержать: 67,2% ПХА, 22,7%  $\text{Cu}_2\text{S}$  и 10,1% шеллака.

Принимаем 67% ПХА, 23% сернистой меди и 10% шеллака.

Расчет энтальпии сгорания можно провести аналогично предыдущему примеру.

Контрольные сжигания показали хорошую цветность пламени, но неудовлетворительную технологичность и довольно высокую дымность. При прессовании в увлажненном спиртом виде из-за избытка связующего состав чересчур пластичен и налипает на стенки матрицы. Поэтому его необходимо доработать, уменьшив количество связующего и частично заменив его горючим, не дающим при сгорании сажи. Таким горючим является уротропин.

Сравним, сколько требуется кислорода для сгорания уротропина и шеллака:



требует 250; для того чтобы восстановить 250, необходимо:  $140 \cdot 25/12 = 292$  г уротропина, или можно говорить, что на 1 г шеллака тратится столько же кислоты, сколько тратится на  $292/282 = 1,04$  г уротропина. Цифры примерно эквивалентны, поэтому можно считать, что шеллак можно заменить эквивалентным количеством уротропина.

Примем количество шеллака 7%, слегка уменьшим количество сернистой меди до 19% и подкорректируем количество перхлората аммония и уротропина.

Получим:

шеллак – 7%,

сернистая медь – 19%,

уротропин – 5%,

ПХА – 69%.

Проверка показала удовлетворительную технологичность, несколько сниженную дымность и хороший цвет пламени.

**Необходимо разработать сигнальный пиротехнический состав зеленого цвета пламени, обладающий повышенной яркостью и цветностью.**

Окрашивают пламя в зеленый цвет некоторые соединения меди, бора и бария. Последние дают наиболее интенсивный и чистый цвет.

Повышенную яркость дает добавление в состав активных металлов и их гидридов. Наиболее доступными и одновременно наиболее эффективными являются порошки алюминия, магния и их сплавов. Известные экспериментальные данные показывают, что составы с магнием заметно превосходят алюминий по светосиле, поэтому выбираем магний.

Интенсивное свечение в зеленой области спектра дают неустойчивые молекулы монохлорида и монобромиды бария, образующиеся при диссоциации при высокой температуре:  $\text{BaX}_2 \leftrightarrow \text{BaX} + \text{X}$ .

Из соединений бария, удовлетворяющим условиям умеренной гигроскопичности и доступности, можно использовать нитрат, хлорат, бромат, карбонат, оксалат. При этом разложение карбоната и оксалата требует заметных затрат энергии, что снижает температуру пламени и его яркость. Наилучший эффект могли бы дать хлорат и бромат – они разлагаются экзотермически и, кроме того, уже содержат необходимый для образования моногалогенида хлор или бром. Однако составы на их основе обладают высокой чувствительностью, поэтому их нельзя рекомендовать для массового производства.

Следовательно, оптимальным будет использование нитрата бария, который хотя и требует для разложения энергии, но является окислителем. Возможно также использование дополнительного окислителя, не портящего цвет пламени и содержащий хлор – например, перхлоратов калия и аммония (использование ПХА может вызвать проблемы из-за недостаточной совместимости с магнием и образованием гигроскопичного нитрата аммония при обменной реакции с нитра-

том бария). Использование нитрата бария требует введения в состав донора хлора, например хлорорганических соединений. На данный момент выпускаются только ПВХ, хлорированный ПВХ (ХПВХ), гексахлорэтан (ГХЭ) и хлорпарафины.

Выберем сочетание ПВХ и гексахлорэтана. При этом исходим из того, что ПВХ, перегруженный углеродом и водородом, не позволит одновременно добиться хорошей цветности и яркости пламени, а ГХЭ, содержащий максимальное количество хлора, летуч. Нанесение пленки из ПВХ на частицы ГХЭ (например, в виде раствора в тетрагидрофуране) уменьшит его летучесть и, таким образом, удастся достичь требуемых характеристик.

### **Примечание.**

*На реальном производстве скорее всего выбрали бы ПВХ, ПВХ или ХП-1100, т.к. в этом случае используется один хлорорганический компонент. Однако автор предлагает использовать 2 вещества, чтобы показать, как рассчитывается состав с большим количеством компонентов.*

Связующее выберем, наиболее характерное для отечественной промышленности, – фенолформальдегидную смолу СФ-112 (идитол).

Таким образом, состав будет содержать следующие компоненты: нитрат бария, магний, ПВХ, ГХЭ, идитол.

При выборе стехиометрии горения следует иметь в виду, что для цветопламенных составов желательно большое количество газообразных продуктов (для увеличения размеров пламени) и отсутствие в продуктах большого количества углерода, но при этом среда пламени должна быть восстановительной. Основным источником энергии в данной смеси является магний, поэтому оптимальный выбор – стехиометрия  $\text{CO}/\text{H}_2\text{O}$ .

В составе 5 компонентов, поэтому для расчета необходимо ввести 3 дополнительных условия.

- Количество связующего: введение идитола в количестве больше 6% не дает преимуществ в прочности (табл. 3.10.); двойная смесь нитрат бария/идитол обладает низкими энергетическими характеристиками, поэтому количество идитола – минимальное, т.е. 6%.

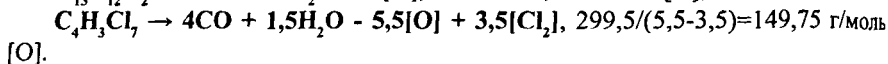
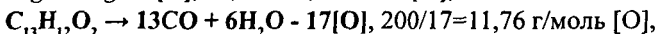
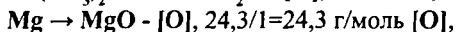
**Табл. 3.10. Зависимость прочности звездок от содержания связующего на модельной смеси нитрата бария и алюминиевой пудры [4]**

$\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$	Al-пудра	идитол	предел прочности при сжатии, $\text{кг}/\text{см}^2$ *
80	20	0	288
78	20	2	408
76	20	4	460
74	20	6	530
72	20	8	562

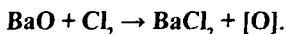
\* – давление прессования  $3000 \text{ кг}/\text{см}^2$ , диаметр и высота шашек 20 мм.

- Соотношение ГХЭ/ПВХ; количество связующего, достаточного для полного покрытия кристаллического материала, составляет 10-25%; для удобства приемем соотношение 237:62,5, т. е. 1 моль ГХЭ на 1 моль ПВХ, что соответствует смеси 20,9% ПВХ и 79,1% ГХЭ. Т.е. суммарная формула хлороорганического компонента выходит как  $C_4H_3Cl_7$ .
- Содержание хлора в составе: для образования большой концентрации молекул-излучателей  $BaX$  соотношение атомов хлора и бария должно находиться в диапазоне 1-2. При меньшем соотношении часть атомов бария присутствует в виде молекул  $BaO$ , что снижает чистоту свечения. Большее количество хлора также нецелесообразно, т.к. снижается энтальпия сгорания, а равновесие смещается в сторону образования дихлорида, который не излучает в нужной области спектра. Приемем соотношение атомов хлора и бария  $\approx 1,5$ , для этого массовое соотношение между содержанием нитрата бария и  $C_4H_3Cl_7$  должно быть равно  $(299,5 \cdot 1,5/7)/261 = 0,246$ .

Запишем соотношения для двойных смесей; смесь ГХЭ и ПВХ рассмотрим как одно вещество:



Для последней реакции постулируем эквивалентность  $[O]$  и  $[Cl_2]$ , т.к. выделившийся в восстановительной атмосфере хлор реагирует с оксидом бария:



Таким образом, массовые соотношения в двойных смесях с нитратом бария (НБ):

$$Mg/НБ = 24,3/52,2 = 1/2,15,$$

$$C_4H_3Cl_7/НБ = 149,75/52,2 = 1/0,35,$$

$$\text{идитол}/НБ = 11,76/52,2 = 1/4,44.$$

Обозначим  $x$  - содержание магния в составе,  $y$  -  $C_4H_3Cl_7$ .

Получим систему двух уравнений:

$$x \cdot (1 + 2,15) + y \cdot (1 + 0,35) + 0,06 \cdot (1 + 4,44) = 1 - \text{общее содержание компонентов} = 100\%,$$

$$0,246 \cdot (x \cdot 2,15 + y \cdot 0,35 + 0,06 \cdot 4,44) = y - \text{содержание хлора обеспечивает}$$

$$Ba/Cl = 1/1,5.$$

Отсюда:

$$x = 0,147,$$

$$y = 0,156.$$

Вспоминая, что  $y$  соответствует смеси из ПВХ и ГХЭ, для каждого из них получаем 0,0326 и 0,1234.

Для облегчения переработки состава предусмотрим наличие технологических добавок.

Получаем следующее соотношение компонентов:

$\text{Ba}(\text{NO}_3)_2 - 63,7\%$ ,

$\text{Mg} - 14,7\%$ ,

$\text{ПВХ} - 3,3\%$ ,

$\text{ГХЭ} - 12,3\%$ ,

идитол – 6%.

технологич. добавки св. 100%.

Была приготовлена смесь близкого состава:

$\text{Ba}(\text{NO}_3)_2 - 62\%$ ,

$\text{Mg} - 17\%$ ,

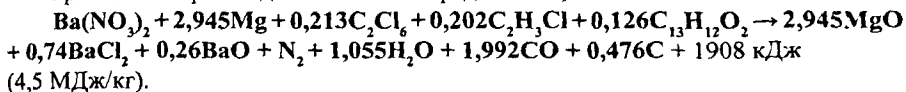
$\text{ПВХ} - 3\%$ ,

$\text{ГХЭ} - 12\%$ ,

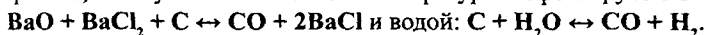
идитол – 6%.

технологич. добавки св. 100%.

Уравнение горения для нее можно представить, как



В данном случае присутствие небольшого количества избыточного углерода не страшно, т.к. в условиях высокой температуры он реагирует с  $\text{BaO}$ :



Кроме того, влияние углерода на цвет пламени звездок зависит от условий сгорания. Находящиеся в свободном падении (будучи выпущенными из сигнального патрона) звездки обдуваются воздухом, поэтому их цветность может существенно отличаться от цветности, полученной при статических сжиганиях. Например, немецкий состав времен Второй мировой войны, содержащий 55% нитрата бария, 16% магния и 29% ПВХ, перегружен горючими компонентами и при статических сжиганиях демонстрирует грязно-желтый цвет пламени из-за избытка сажи. Однако звездка, выпущенная из ракетницы, горит ярким, изумрудно-зеленым пламенем.

Энерговыведение при горении составляет порядка 104 кДж/моль·атом, что заведомо обеспечивает интенсивное протекание реакции.

Испытания данного состава показали, что он устойчиво сгорает, обеспечивает хорошую яркость и чистоту цвета. Впрочем, ничего удивительного, т.к. по соотношению компонентов он близок к современным составам зеленого огня.

Был приведен наиболее типичный пример для расчета сигнальных составов, тем не менее определение нужного соотношения компонентов в ряде случаев имеет свои особенности в зависимости от того, к какому типу принадлежит данный пиротехнический состав и какие к нему предъявляются требования. Например, расчет соотношения компонентов в замедлительных составах, как правило, не имеет смысла, т.к. они устойчиво сгорают в широком диапазоне содержания компонентов, и решающую роль будут играть не расчеты, а практические испытания на скорость горения состава и устойчивость этого горения. В воспламеняемых составах определяющими факторами будут энергетические расчеты и эксперименты на легкость воспламенения и т.д.

### 3.5. Предварительная подготовка компонентов. Технология изготовления пиротехнических составов

В общем случае технология изготовления пиротехнических изделий включает следующие стадии [4, 7, 8, 9, 10].

- *Транспортировка.* Междучеховое перемещение компонентов или готовых пиротехнических композиций следует осуществлять в герметичных, водостойких и неразрушаемых контейнерах. Композиции и компоненты, восприимчивые к механическим воздействиям, перевозятся на тележках, на руках их переносить запрещается.
- *Хранение.* Готовые пиротехнические композиции и готовые изделия следует хранить согласно существующим на них нормативам. Хранилища нельзя переполнять. Компоненты или смеси, которые при контакте могут реагировать друг с другом, не допускается держать в одном хранилище. Каждый ящик в хранилище должен иметь бирку с указанием содержимого. Некоторые компоненты (фосфор, тонкий порошок циркония и т.д.) должны храниться в воде или во избежание замерзания при низких температурах – в водно-спиртовом растворе.

Пришедшие на завод или в пиротехническую мастерскую компоненты должны удовлетворять ряду требований. Некоторые вещества со временем теряют или изменяют свои свойства. Например, оксид цинка, использующийся в маскировочных дымах, во влажном воздухе склонен к поглощению углекислого газа и образованию карбоната цинка. Как известно, карбонат цинка является замедлителем горения металлохлоридных смесей. В результате скорость горения дымового состава на просроченном продукте может выходить за допустимые пределы.

Раскупорка банок с компонентами или готовыми пиротехническими составами во избежание искрообразования осуществляется неискрящим инструментом из цветного металла или на специальных станках с дистанционным управлением. Некоторые компоненты склонны к слипанию и комкованию, что должно учитываться как при хранении, так и при переработке.

- *Дробление.* При хранении многие компоненты слеживаются или поступают в больших кусках, поэтому необходимо их предварительно раздробить. Для дробления крупных кусков материала используют дисковые, шнековые и валковые дробилки. Конечный размер раздробленных фрагментов составляет 5-10 мм. Далее они поступают на обработку молотковыми дробилками, которые измельчают куски материала до размера 0,5-0,3 мм. Управление процессом дробления должно осуществляться дистанционно. Перед операцией дробления или помола установка должна быть проверена на заземление, очищена от пыли, грязи и посторонних предметов. После выключения дробилки в комнату необходимо заходить в респираторе.
- *Сушка и предварительная подготовка.* Предварительно раздробленные компоненты проверяют на содержание влаги и, как правило, подвергают сушке.

По требованиям, существующим в отечественной пиротехнической промышленности, конечная влажность продукта не должна превышать 0,2%. Сушку производят в специальных сушилках с паровым обогревом при температуре от 40 до 100°C. Порошки циркония, поставляемые на предприятие в увлажненном виде, сушат в вакуумных сушилках.

Металлические порошки типа магнезия и ПАМ-а измельчению не подлежат, т.к. они приходят на предприятие в уже измельченном и просеянном состоянии. Их подвергают лишь контрольному просеиванию.

В целях продления сроков хранения пиротехнических составов порошки металлов подвергают пассивации, а другие компоненты – микрокапсулированию.

Пассивацией называют процесс нанесения на поверхность частиц металлов специальной пленки, защищающей их от нежелательных химических реакций.

Традиционными пленкообразователями для процесса пассивации являются олифа (льняное масло), парафин, стеарин, различные синтетические смолы. С 1944 г. применяется обработка порошка магнезия раствором хромпика. В результате реакции хромпика с магнием на поверхности частиц возникает тонкая пленка, устойчивая к действию большинства реагентов.

Более прогрессивными методами является осаждение тонкой пленки полиэтилена на частицы металла, обработка молибдатами [11], а также добавление непосредственно в смесь фосфатов [12] и бензоатов [13], что заметно дешевле, чем проводить дополнительную операцию пассивации.

• *Измельчение.* После сушки дальнейшее измельчение до размеров частиц 50-140 мкм осуществляют на дезинтеграторах или дисмембраторах. Далее компоненты подвергаются измельчению (помолу) на шаровых, вибрационных или газоструйных мельницах. При измельчении легкоплавких материалов типа восков и смол в целях сохранения твердости часто используют сухой лед или даже жидкий азот. Некоторые компоненты допускается измельчать совместно, в ряде случаев это позволяет улучшить некоторые свойства конечного материала. Например, при производстве дымного пороха древесный уголь обычно измельчается вместе с серой. Во-первых, это позволяет несколько удешевить процесс и предотвратить налипание серы на стенки мельницы. А во-вторых, сера забивает поры в частицах древесного угля, в результате гигроскопичность конечного продукта уменьшается.

Однако в большинстве случаев всегда следует иметь в виду, что горючие и окислители нельзя измельчать совместно.

### *Примечание.*

Если активность конечного пиротехнического состава недостаточна для его нормального применения (такая ситуация возможна для некоторых реакционных материалов и СВС), то вместо операции смешения проводят энергичное совместное измельчение окислителей и горючих в присутствии смачивающего агента (растворителя). Таким образом, за счет более тесного контакта частиц

и совместного внедрения их друг в друга повышается реакционная способность и восприимчивость материала. Этот процесс называется «механической активацией». Однако целесообразность проведения механоактивации в промышленных условиях на данный момент находится под вопросом из-за довольно быстрого ухудшения свойств конечного продукта в процессе хранения и опасности такой технологической операции. В некоторых СВС-технологиях, когда продолжительное хранение состава не предусматривается, использование механоактиваторов может быть оправдано. Внедрение механоактивации в процесс производства пиротехнических составов требует тщательнейшей проработки в каждом конкретном случае.

- *Разделение по фракционному составу (рассев).* Так как для большинства пиротехнических составов важно, чтобы размер частиц находился в определенных пределах, производят рассевание компонентов на металлических и шелковых ситах. В промышленности применяются гирационные спиральные сита, сита вибрационно-вращательные и сита-трясуны. Для рассевания хлората калия необходимо пользоваться одним и тем же ситом, не допуская его использования для просеивания других компонентов. Рабочие, производящие эту операцию, должны иметь индивидуальные средства защиты от пыли. Фракционный и химический состав индивидуальных компонентов может изменяться даже в пределах одной партии. Для их выравнивания используют специальные смесительные агрегаты – установки усреднения.

**Табл. 3.11. Основные типоразмеры сит по американскому стандарту и их соответствие российскому стандарту [7, 14]**

№ меш	Ячеек на дюйм	Ячеек на см	Размер отв. мм	Соответствие по ГОСТ Р 51568-99*	№ меш	Ячеек на дюйм	Ячеек на см	Размер отв. мм	Соответствие по ГОСТ Р 51568-99*
2,5	2,58	1	8,0000	8	35	32,15	13	0,5000	500
3	3,03	1,2	6,7300	6,7	40	38,02	15	0,4200	425
3,5	3,57	1,4	5,6600	5,6	45	44,44	18	0,3510	355
4	4,22	1,7	4,7600	4,75	50	52,36	20	0,2970	300
5	4,98	2	4,0000	4	60	61,93	24	0,2500	250
6	5,81	2,3	3,3600	3,35	70	72,46	29	0,2100	212
7	6,80	2,7	2,8300	2,8	80	85,47	34	0,1770	180
8	7,89	3	2,3800	2,36	100	101,01	40	0,1490	150
10	9,21	3,5	2,0000	2	120	120,48	47	0,1240	125
12	10,72	4	1,6800	1,7	140	142,86	56	0,1040	106
14	12,56	5	1,4100	1,4	170	166,67	66	0,0880	90
16	14,66	6	1,1900	1,18	200	200	79	0,0740	75
18	17,15	7	1,0000	1	230	238,10	93	0,0620	63
20	20,16	8	0,8400	850	270	270,26	106	0,0530	53
25	23,47	9	0,7100	710	325	323	125	0,0440	45
30	27,62	11	0,5890	600	400	400	157	0,0370	38

\* – Ближайшее соответствие отечественным лабораторным ситам по ГОСТ Р 51568-99. Жирным шрифтом указаны основные типоразмеры сит.

- *Взвешивание.* После рассеивания происходит взвешивание и отмеривание компонентов состава на специальных настольных или напольных весах. Весы и поверхности, на которых они находятся, должны быть чистыми и тщательно заземленными. Компоненты нужно вычерпывать специальным совком или лопатой, а не высыпать на весы. Окислители и горючие должны взвешиваться на разных весах, а взвешивание чувствительных компонентов или составов необходимо осуществлять за бронированным стеклом. После взвешивания весы должны быть тщательно вычищены.
- *Смешение.* Смешение компонентов осуществляют в специальных конических или двухлопастных смесителях, а также в шаровых мельницах, в которых стальные или фарфоровые шары заменены на резиновые пробки или деревянные шары. Смешение – это одна из самых опасных операций, она осуществляется дистанционно из другой комнаты. Помещение, где расположен смеситель, обычно оборудуется запорным устройством, не позволяющим войти в комнату, пока работает смеситель. Экспериментальные составы сначала смешивают в небольших количествах (не более 50 г) и определяют их чувствительность. Смешение бывает как «сухое», так и «мокрое». При «мокром» смешении к компонентам добавляют определенное количество летучего растворителя. Если в состав входят связующие компоненты, то их вводят в виде лакового раствора. Маловязкие смолы типа ламинака, хотя в теории не требуют добавления растворителей, не всегда демонстрируют удовлетворительное качество смачивания твердых компонентов, поэтому к ним обычно добавляют небольшое количество ацетона и/или специального смачивающего агента марки «Pluronic». Перед смешением в состав ламинака вводится отвердитель и катализатор отверждения.
- *Проявление.* После смешения пиротехнические составы, содержащие растворитель, проявляют путем выдерживания при комнатной или слегка повышенной температуре для удаления его избытка.
- *Грануляция.* После проявления для обеспечения удобства дозирования лаковых смесей и предотвращения пыления при формировании зарядов из ПС их подвергают грануляции. Грануляция осуществляется вручную или в специальных аппаратах для гранулирования – грануляторах – путем протирания увлажненных растворителем составов через сетку с размером ячеек 0,5-1,5 мм. Этот процесс улучшает сыпучесть составов, позволяющую применять объемное дозирование, а также предупреждает пыление. Грануляция осуществляется в увлажненном растворителем состоянии, поэтому после нее необходима сушка. Содержание растворителя при грануляции составляет 0,5-0,7%. При меньшем содержании гранулы не образуются, а при большем – слипаются.
- *Сушка.* Гранулированный продукт сушат в специальных сушилках при 40-90°C в зависимости от состава. Содержание остаточного растворителя после сушки не более 0,2-0,1%. Для ускорения процесса его проводят под пониженным

давлением либо пропускают теплый воздух над поверхностью состава. Для составов, в процессе изготовления которых растворители не используются, операции провяливания, гранулирования и сушки не проводятся.

- **Формирование зарядов.** В зависимости от типа связующего и вида состава, формирование зарядов проводится различными способами: прессованием, литьем, сухой набивкой, шнекованием или даже засыпкой с последующим виброуплотнением. Прессование бывает *глухим, проходным, послойным*.

Глухое прессование обычно осуществляется для составов со сравнительно небольшим количеством связующего (менее 10%).

В зависимости от типа связки составы прессуют:

- *В сухом виде.* Такая технология предусматривает, что связующее находится в тонко размолотом состоянии либо в виде пленки, нанесенной на поверхность частиц. Прессование проводят под давлением  $7000 \text{ кг/см}^2$  для трассеров,  $2000\text{-}3000 \text{ кг/см}^2$  – для сигнальных и осветительных звездок и  $1000 \text{ кг/см}^2$  – для крупногабаритных изделий. Сухим способом прессуют звездки, изготовленные с применением фенольных смол типа идитола, шеллака, олифы и т.д. Сухое прессование – довольно простой процесс, но из-за приложения довольно высоких давлений не применим в случае чувствительных к трению составов. При прессовании крупных зарядов часто используют заранее приготовленные небольшие заряды ПС (таблетки). Прессование таких таблеток, как правило, автоматизировано и осуществляется под сравнительно небольшим давлением ( $300\text{-}400 \text{ кг/см}^2$ ).
- *В смоченном растворителем виде* после стадий провяливания и грануляции. Этот способ обеспечивает наилучшую прочность и влагостойкость звездок, т.к. после сушки твердые частицы состава оказываются равномерно склеенными тонкой пленкой связующего. Как следствие – возможность достижения нужной прочности изделий без приложения значительных усилий прессования, что благоприятно сказывается на безопасности процесса. Сушка таких изделий, как правило, продолжительный процесс, т.к. внешние более сухие слои препятствуют выветриванию растворителя из глубины звездок. Этим методом невозможно изготавливать крупные изделия, т.к. остатки растворителя практически невозможно удалить из глубины звездки или шашки. Поэтому способ прессования в увлажненном виде ограничивается производством мелких гражданских изделий в пиротехнических мастерских, где отсутствует нормальное прессовое оборудование.
- *С последующим отверждением* (при использовании в качестве связующих маловязких полиэфирных и эпоксидных смол, например ламинака). В смолу непосредственно перед смешением добавляют отвердитель и при необходимости – катализатор отверждения. После смесителя звездки провяливают для удаления вспомогательного количества растворителя, при этом жидкий ламинак постепенно переходит в гелеобразное состояние.

Затем под сравнительно небольшим давлением выпрессовывают пиротехнические элементы. Процесс окончательного отверждения связующего протекает подобно сушке при повышенных температурах после прессования. Этот способ позволяет получать изделия с частицами, равномерно покрытыми пленкой связующего без необходимости продолжительной сушки. Метод широко применяется в США. Его недостатком является необходимость точного соблюдения временных лимитов с момента добавления отвердителя. Несоблюдение временных рамок ведет к преждевременному или недостаточному застыванию смолы на стадии выпрессовывания и, соответственно, к разбросу характеристик пирозлементов от партии к партии. Вдобавок, после операции прессования, матрица и пуансон должны быть тщательнейшим образом очищены перед каждой запрессовкой во избежание налипания и застывания состава на рабочих поверхностях прессового оборудования.

*Прессование* – одна из самых опасных операций, поэтому осуществляется дистанционно. Она может осуществляться как для одиночных изделий, так и для группы мелких элементов одномоментно. Прессовое оборудование должно проходить частую и регулярную проверку, т.к. при разбалтывании подвижных узлов пресса возможно локальное увеличение трения, что крайне опасно. При прессовании следует не допускать перегрева, вызванного трением за счет уплотнения состава.

Способ *проходного прессования (экструзии)* или шнекования применим в случаях, когда состав содержит большое количество связующего, обладающего определенной степенью пластичности. В частности, так формируют заряды на пластизольных смесях и составах на баллиститной основе. Этот метод отличается высокой степенью безопасности и производительности.

Способ формирования зарядов *литьем* с последующей полимеризацией предусматривает содержание в составе большого (более 15-20%) количества связующего типа полиуретановых, полибутADIеновых, полисульфидных и т.п. каучуков. Метод схож с изготовлением топливных зарядов ракетного топлива, однако из-за ряда особенностей оправдывает себя только при изготовлении крупных изделий, которые для пиротехники не характерны. После заливки происходит отверждение состава при нагревании.

В США литьем иногда называют изготовление крупных изделий типа осветительных звездок, однако этот процесс отличается от свободного литья ракетных топлив и больше соответствует набивке, нежели литью. При его осуществлении полупластичные комки смеси укладываются вручную в оболочку факела и уплотняются ручными приспособлениями (уплотнение набивкой) или на прессе. По окончании процесса состав полимеризуется в монолитную массу. Таким образом, удается формировать заряды для составов, содержащих менее 10-12% связующего.

Кроме указанных методов изготовления пиротехнических элементов, при изготовлении изделий гражданского назначения применяются другие спо-

собы формирования зарядов и звездок, кратко описанные в главе о фейерверочных составах.

Составы, используемые в насыпном виде (светозвуковые и фотосоставы), уплотняют непосредственно в корпусе изделия вибрационным методом.

- *Последующая доработка.* Если состав запрессовывается непосредственно в корпус, то изделия дорабатывают, например, удаляют избыток пиротехнического состава. Эта операция называется «развертка» (reaming), довольно долгое время она осуществлялась вручную. Является одной из самых опасных операций.
- *Сборка изделий.* Сборочные цеха не всегда снабжены системами поддержания нужной степени влажности, поэтому при сборке изделий в таких помещениях следует избегать нахождения пиротехнических элементов продолжительное время, т.к. они могут поглощать влагу из воздуха. По соображениям безопасности, количество находящихся в сборочном помещении готовых изделий должно быть как можно меньшим.
- *Контроль качества.* Контроль качества изделий обычно осуществляют случайной выборкой из каждой партии и контрольными сжиганиями. При соответствии изделий предъявляемым требованиям, партия признается годной.

## Литература

1. Brebera Stanislav etc. Specialni Technica. I Dil. Гл. ред. Urban Ladislav. Praha 1976.
2. A.P. Hardt. Pyrotechnics. Pyrotechnica Publications. 2001.
3. Brassey's World Military Technology. Explosives, Propellants and Pyrotechnics. Series Editor: Colonel R.G. Lee. London. 1989.
4. Шидловский А.А. Основы пиротехники. - М.: Машиностроение, 1973.
5. Takeo Shimizu. Fireworks: the Art, Science and Technique. Pyrotechnica Publication. 1981.
6. Химическая энциклопедия: В 5 т. /Под ред. И.Л. Кнунянц - М.: Советская энциклопедия, 1988-1998.
7. Engineering Design Handbook. Military Pyrotechnics Series. Part Two. Safety, Procedures And Glossary. US Army Materiel Command. AMCP 706-186, 1963.
8. Емельянов А.А., Королев Д.В., Свиридов Л.Н., Суворов К.А. Технологическое оборудование пиротехнического производства: Альбом. Ч. 1: Оборудование для подготовки, смешения и транспортировки компонентов. - СПб.: СПбГИ(ТУ), 2002. - 39 с.
9. Королев Д.В., Суворов К.А. Технологическое оборудование пиротехнического производства: Альбом. Ч. 2: Оборудование для формования изделий.- СПб.: СПбГИ(ТУ), 2002. - 29 с.
10. F. L. McIntyre, R.M. Rindner. A Compilation of Hazard and Test Data for Pyrotechnic Compositions. ARLCD-CR-80047, 1980.
11. Alenfelt Per. Corrosion Protection of Magnesium without the Use of Chromates, Pyrotechnica XVI (August, 1995), pp. 44-49. Pyrotechnica Publications, Austin, Texas.
12. Пат. SU1763438 от 1990 г.
13. Пат. RU2171247 от 1999 г.
14. ГОСТ Р 51568-99 (ИСО 3310-1-90). Сетки лабораторные из металлической проволочной сетки. Технические условия.
15. B.M. Dobratz, P.C. Crawford. LLNL Explosives Handbook - Properties of Chemical Explosives and Explosive Simulants. University of California. Livermore, CA. JAN 1985.
16. Ф.П.Мадьякин. Компоненты и продукты сгорания пиротехнических составов. Т.1. Основные понятия о пиротехнических составах и компонентах. Низкомолекулярные вещества. Учебное пособие. - Казань: Изд-во КГТУ, 2006.
17. Jai Prakash Agrawal. High Energy Materials. Propellants, Explosives and Pyrotechnics. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. 2010.
18. D. A. Frank Kamenetskii. Calculation of Thermal Explosion Limits. Acta Physicochimica U.R.S.S. 10, 365, 1939.

## Глава 4. Составы первичного воспламенения

Составами первичного воспламенения называют пиротехнические композиции, воспламенение которых осуществляется за счет первичных воздействий: удар, трение и т.п. Узлы, снаряженные этими смесями, первыми получают и развивают термический импульс, в конце концов приводящий к срабатыванию боеприпаса или какого-либо технического устройства.

**Различают следующие типы составов первичного воспламенения:**

- *ударные и наконьные составы* – смеси, воспламенение которых возбуждается ударом или наконем;
- *терочные составы* – смеси, воспламенение которых осуществляется за счет трения;
- *электровоспламенительные составы* – теплочувствительные смеси, которые воспринимают и развивают тепловой импульс, возникающий при подаче электрического тока на электровоспламенитель или электродетонатор.

Все виды составов первичного воспламенения чрезвычайно опасны в обращении и требуют специальных мер предосторожности на производстве. После изготовления эти смеси тут же перерабатываются в изделия, избегая накопления в значительных количествах [1].

### 4.1. Ударные и наконьные составы

*Ударные составы* (в американской литературе «*percussion primers*») иногда называют смесевыми иницирующими взрывчатыми веществами или *ударно-воспламенительными составами* (УВС). При ударном воздействии они воспламеняются с хлопком и формированием луча огня. Будучи взятыми в разумных количествах, способностью к возбуждению детонации обычных ВВ практически не обладают. Используются во всевозможных капсюлях-воспламенителях (КВ) и взрывателях ударного действия, например, в капсюлях для снаряжения патронов стрелкового оружия, снарядов и т.д. Принцип ударного воспламенения основан на том, что при резком сжатии наконьного или ударного состава возникают локализованные тепловые возмущения, вызывающие воспламенение восприимчивых компонентов смеси. Поэтому в каком-то смысле ударное воспламенение в действительности является термическим. На производстве снаряжение капсюлей-воспламенителей ввиду особой ответственности этой операции до сих пор осуществляют вручную [2, 3]. Продукты сгорания корродирующих УВС способны вызывать коррозию ствола огнестрельного оружия, тогда как продукты сгорания некорродирующих УВС этим свойством не обладают. Корродирующие составы до сих пор используются в отдельных образцах устаревших КВ.

*Наконьные составы* (в американской литературе «*stab primers*») являются разновидностью ударных смесей. В капсюлях они подвергаются непосредственному ударному воздействию заостренным жалом, тогда как ударные составы иницируются за счет сжатия между дном и наковальней капсюля при ударе. Наконь, кроме сжатия, подразумевает действие трения между составом и поверхностью внедряющегося в него жала.

Стандартное напольное жало обычно представляет собой стальную иглу длиной 30-35 мм, диаметром порядка 3 мм с усеченным конусом к вершине. Угол конуса обычно составляет 22-26°, его усеченная вершина имеет диаметр 0,38-0,13 мм в зависимости от используемого напольного состава. Благодаря малым габаритам напольных механизмов, их применяют в запалах и инициаторах, установленных непосредственно в боеприпасах.

Напольные составы схожи с классическими ударными составами, только содержат большее количество сенсibilизатора (до 15% тетрацена), а также они более восприимчивы к механическим воздействиям. Высокой восприимчивости к наколу способствует большая степень запрессовки. При увеличении плотности возрастает сопротивление наколу, и кинетическая энергия напольного жала переходит в тепловую на меньших расстояниях, чем достигается большая концентрация тепловой энергии (см. Рис. 4.1).

**Табл. 4.1. Зависимость чувствительности к наколу штатного состава типа «NOL» от степени запрессовки [5]**

Давление прессования, кг/см <sup>2</sup>	Высота сброса груза массой 2 унции (56,7 г), мм., 50% срабатываний
1055	33,3
1758	23,1
2813	19,6
4218	17,3
5625	14,5

Целесообразно, чтобы напольные составы давали мощный форс огня и раскаленных частиц, т.к. передача луча огня в напольных КВ обычно происходит на большие расстояния, чем для ударных КВ. Помимо напольного состава, напольные КВ иногда содержат усиливающий заряд, например, смесь из 11% азидов свинца, 26% циркония, 60,5% двуокиси свинца и 2,5% фторкаучука используется в американском

взрывателе M734 [108]. Современные китайские усиливающие составы содержат 40-46% сплава Zr-Al, 10-30% двуокиси свинца, 0-20% свинцового сурика, 24% хлората калия, 0-6% бора и 0,1% связки [127]. Впрочем, отличие напольных и ударных составов кроется скорее в способе применения, нежели в чувствительности к механическим воздействиям или в воспламеняющих свойствах. Поэтому одни и те же композиции, в зависимости от плотности запрессовки, могут использоваться как в ударных средствах, так и в напольных.

Ввиду того, что напольные смеси не применяются в современном огнестрельном оружии, при их составлении безразлично, корродируют они ствол оружия или нет [2, 3, 5, 6].

**Табл. 4.2. Основные компоненты ударных и напольных составов**

Компонент	Наименование	Содержание
инициирующее ВВ (ИВВ)	стифнат и азид свинца, гремучая ртуть, динитродиазофенол, динитробензофуросанат калия (К-ДНБФ), пикрат свинца	до 60%
окислитель	нитраты бария и калия, хлорат калия, двуокись свинца	до 60%
горючее	сульфид сурьмы, силицид кальция, алюминий, цирконий	5-55%
сенсibilизатор	тетрацен	до 15%
инертный сенсibilизатор	стеклянный порошок, карборунд	до 50%
газообразователь	ТЭН, тротил, сферический бездымный порох	до 15%
связующее	шеллак, камеди, синтетические смолы	0,1-6%

1. *Иницирующее ВВ* является основным компонентом ударного состава. Оно обеспечивает его чувствительность к удару. Основным компонентом большинства современных неоржавляющих составов является стифнат свинца, также известный как тенерес, ТНРС, тринитрозорцинат свинца.
2. *Окислитель* своим количеством экономит более дорогое ИВВ и обеспечивает окисление горючего с точки зрения достижения максимального теплового эффекта. К тому же он «разбавляет» смесь, уменьшая бризантное действие ИВВ и увеличивая зажигательное.
3. *Горючее* обеспечивает выделение значительного количества тепла за счет своего окисления.
4. *Сенсибилизатор* (тетразен), взятый в небольшом количестве, придает необходимую чувствительность к удару менее восприимчивым ИВВ, наподобие стифната свинца. Это ИВВ отличается очень хорошей восприимчивостью к наколу, но не может быть использовано в чистом виде или в количествах, превышающих 15%.
5. *Инертный сенсибилизатор* иногда добавляется для корректировки восприимчивости к механическим воздействиям ударных составов.
6. *Газогенерирующее вещество* обеспечивает эффективное образование пламени и вынос нагретых продуктов сгорания. Тем самым повышает воспламеняющее действие.
7. *Связующее* позволяет формировать в капсулях прочные микрочастицы ударных составов и улучшает технологию изготовления. Стоит отметить, что содержание связующего в ударных составах часто не указывается из-за крайне малого его содержания.

### **Характеристики ударных и напольных составов**

- В США и в странах НАТО восприимчивость к наколу измеряется на специальном копре. Принцип его действия основан на падении стального шарика на центрированное напольное жало, находящееся в непосредственном контакте с составом. Определяется энергия, с которой вызывается воспламенение в 100% случаях в сумме с некоторым статистическим запасом. Эта энергия выражается либо в произведении высоты падения груза на ее массу (обычно дюйм·унция или кгс·см), либо непосредственно в джоулях. Большинство напольных составов надежно воспламеняются при энергии 0,036-0,36 кгс·см (0,0035-0,035 Дж или 0,5-5 дюйм·унция).
- С испытаниями ударных составов дело обстоит несколько сложнее. Чувствительность самой ударной композиции не имеет практического значения, ведь один и тот же состав может использоваться в КВ разных конструкций. Поэтому определяется чувствительность самого капсюля, снаряженного данной смесью. Так, например, широко применявшийся ранее в США состав FA-70 имеет чувствительность 1,3 кгс·см в КВ «М29», тогда как в КВ «8-1/2» чувствительность составляет 4,3 кгс·см.

### **Примечание.**

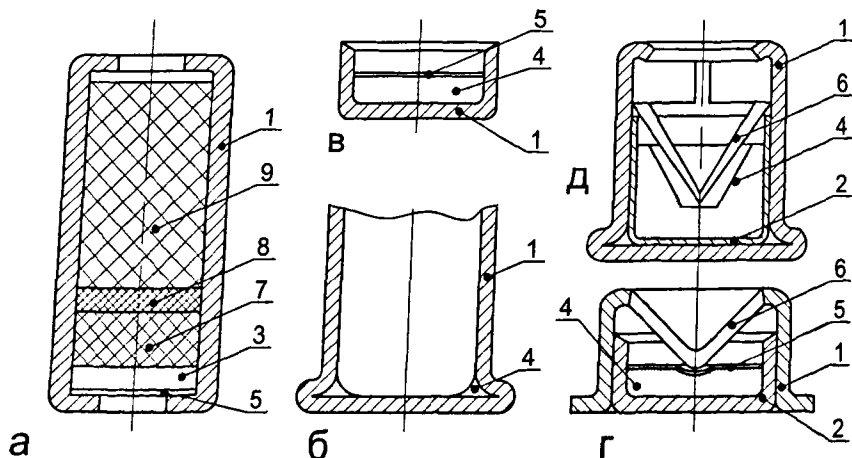
*Энергия сильного удара ручным молотком имеет порядок 15-20 Дж.*

При инициировании ударных КВ ударник тратит большое количество энергии на смятие капсюльного колпачка, тогда как при наколе жало прокалывает лишь тонкий лист фольги, поэтому в равных условиях накольные составы не намного чувствительнее ударных.

Установка для определения восприимчивости к удару схожа с установкой для определения чувствительности к наколу с той разницей, что вместо жала используется ударник с полусферической головкой. Радиус головки ударника для инициирования самых небольших капсюлей составляет около 0,05 дюйма (1,27 мм). Восприимчивость наиболее распространенных КВ находится в пределах 1,45-4,3 кгс·см (меньшие величины соответствуют самым малым КВ). Некоторые артиллерийские КВ могут иметь чувствительность до 11 кгс·см. При испытаниях ударных КВ также определяется величина, соответствующая максимальной энергии падения груза, не вызывающей срабатывания капсюля. Этот параметр важен с точки зрения безопасности применения ударного КВ [7].

Существует некоторое оптимальное количество ударного состава для снаряжения капсюлей-воспламенителей. При меньших значениях возникают т.н. «затяжные выстрелы», а при больших значениях возможно разрушение капсюля-воспламенителя. Для небольших капсюлей оптимальный вес ударного состава находится в пределах 0,018-0,023 г, для капсюлей к винтовочным патронам – 0,028-0,032 г. Для ранее выпускавшихся синхронных патронов (предназначенных для стрельбы через плоскость винта двигателя самолета) – 0,11-0,125 г.

Оптимальное количество накольных смесей составляет от 0,03 г для самых маломощных капсюлей и до 0,21 г для особо мощных [6].



**Рис. 4.1. Накольные и ударные капсюли-воспламенители (КВ) [2, 8].**

а) – американский капсюль-детонатор накольного действия; б) – гильза патрона бокового боя; в) – КВ типа «Бердан»; г) – КВ типа «Винчестер»; д) – КВ типа «Жевело».

1 – корпус, 2 – вкладная чашечка с ударным составом, 3 – накольный состав, 4 – ударный состав, 5 – металлическая фольга, 6 – наковальня, 7 – замедлительный состав, 8 – инициирующее ВВ (азид свинца), 9 – бризантное ВВ (гексоген).

**В силу исторических обстоятельств УВС делят на 6 типов [4]:**

- гремучертутные корродирующие;
- гремучертутные некорродирующие;
- корродирующие без гремучей ртути;
- некорродирующие без гремучей ртути;
- некорродирующие нетоксичные;
- нетрадиционные ударные составы.

Согласно [3], прототип ударного капсюля-воспламенителя (КВ) был изобретен в начале 19 века англичанином Джозефом Иггом (Egg) и независимо от него в 1814 г. американцем Джошуа Шо (Shaw). Однако более удачной реализацией КВ следует признать конструкцию Фредерика Джойса, датированную 1824 г. Исторически самый первый ударный состав, состоящий из 70,6% хлората калия, 17,6% серы и 11,8% древесного угля, предложил шотландец Александр Форсайт (Forsyth) в 1807 г. Несколько позже серу заменили антимонием, что положительно сказалось на безопасности в обращении [4].

Ударные составы с гремучей ртутью известны с 1831 г. Кроме гремучей ртути, они также содержали селитру, серу или дымный порох [24]. В это же время было установлено, что капсюльное воспламенение имеет неоспоримые преимущества над воспламенением кремневыми замками.

Прототип унитарного патрона накольного действия был реализован во Франции в 1836 г. Накольная смесь к капсюлю этого патрона содержала 52,4% хлората калия и 47,6% антимония (сульфида сурьмы).

В России внедрение КВ началось в 1840 г. Первоначально использовались импортные (бельгийские) КВ, и только в 1843 г. на территории Шосткинского порохового завода было создано собственное капсюльное производство (ныне НПП «Краснознаменец»). К тому моменту крупные производства КВ уже существовали в Бельгии, Германии и Франции [129].

Унитарный патрон центрального боя был разработан в 1858 г. (Morse) и несколько позже усовершенствован американским полковником Берданом.

Германские КВ образца 1883 г. уже снаряжались знаменитым впоследствии УВС на основе гремучей ртути, хлората калия и антимония [118]. В России массовый выпуск КВ с этим составом начался в 1890 г. [129].

Специфика использования дымного пороха предусматривала чистку ствола оружия после каждого выстрела. С 90-х годов 19 века в обиход вошли патроны, снаряженные бездымным порохом, и необходимость в частой чистке ствола отпала. Однако обнаружилось, что выделяющийся при срабатывании штатных гремучертутных составов хлорид калия вызывает интенсивное оржавление ствола. Впоследствии эти составы были названы гремучертутными корродирующими. Гремучертутные корродирующие композиции достаточно долго использовались в ряде образцов КВ для патронов стрелкового оружия производства России и стран Восточной Европы.

Германской фирмой «RWS» (Rheinische – Westphalische Sprengstoff AG) в 1891 г. был внедрен первый «гремучертутный некорродирующий состав», в котором

хлорат калия был заменен нитратом бария. Он состоял из: 39% гремучей ртути, 41% нитрата бария, 9% антимония, 5% пикриновой кислоты и 6% стекла.

Гремучертуговые составы плохо хранились в условиях влажного или жаркого климата, например в тропиках, а выделяющаяся при выстреле металлическая ртуть вызывает микроэрозацию внутренней поверхности ружейных стволов. Из-за нехватки сырья для изготовления гремучей ртути в США с 1898 г. стали производить корродирующие ударные составы гражданского назначения, не содержащие дефицитных соединений ртути. Первая такая композиция «Н-48», предназначенная для снаряжения патронов .30 калибра, содержала: хлорат калия – 49,6%, сульфид сурьмы – 25,1%, серу – 8,7%, порошок стекла – 16,6%. Корродирующие ударные составы без гремучей ртути просуществовали до 30-х годов 20 века и даже сохранились в более поздних изделиях приблизительно до 50-х годов 20 века [4].

Гремучая ртуть является достаточно дорогим и дефицитным продуктом, а технология производства композиций на ее основе отличается значительной опасностью, поэтому по всему миру предпринимались неоднократные попытки получить эффективный ударный состав, который одновременно был некорродирующим и не содержал гремучей ртути. Эти исследования в 1926 году увенчались успехом, а с 1928 года немецкой фирмой RWS был внедрен такой состав под торговой маркой «Sinoxid».

Согласно [4], «Sinoxid» содержит 25-55% стифната свинца, 24-25% – нитрата бария, 0-10% – сульфида сурьмы, 5-10% – диоксида свинца, 0,5-5% – тетразена, 3-15% – силицида кальция и от 0 до 5% – порошка стекла. Замена нитрата бария на нитрат свинца повышает способность УВС типа «Sinoxid» к зажиганию пороха в неблагоприятных условиях (низкая начальная температура, низкая плотность заряжания, флегматизирующие добавки на поверхности гранул пороха) [49, 87].

Стоит отметить, что поначалу военные весьма скептически отнеслись к новой композиции из-за недостаточного воспламеняющего действия этого УВС при отрицательных температурах, в результате чего во время Второй мировой войны все стороны конфликта применяли проверенные временем смеси на основе гремучей ртути, сульфида сурьмы и хлората калия. Лишь немецкие и гражданские капсюли американского производства к отдельным видам стрелкового оружия снаряжались составами типа «Sinoxid» на основе стифната свинца [9]. Эффективность смеси «Sinoxid» была подтверждена войной, и после Второй мировой все страны начали интенсивно переходить на новый тип ударных смесей. В США переход на некорродирующие составы начался в 1948 г., в Великобритании – закончился в конце 60-х годов 20 века.

В 1949 г. в Америке в обиход вошла более термостойкая ударная смесь с использованием основного стифната свинца. Она получила индекс «К-75» и содержала 40% основного стифната свинца, 42% – нитрата бария, 11% – антимония, 6% – НЦ и 1% – тетразена. Связующее – гуммиарабик. Впрочем, содержание основного стифната свинца характерно больше для накольных составов, нежели ударных [4].

Первая американская универсальная неоржавляющая композиция FA-956, была стандартизирована армией США в конце 50-х годов 20 века. До этого при-

менялись неоржавляющие УВС от частных производителей. Безусловно, решить все задачи при помощи одного состава для КВ не представляется возможным из-за использования в боеприпасах порохов с различающимися баллистическими характеристиками и оптимальными режимами воспламенения [3]. По этой причине штатных неоржавляющих УВС в армии США к 80-м годам 20 века насчитывалось уже около десятка. Ассортимент американских коммерческих рецептур еще выше (скорее из патентных соображений, нежели из функциональной необходимости).

В СССР серьезно заниматься проблемой замены гремучертуговых составов начали в середине 60-х годов 20 века не столько из-за проблем, связанных с оржавлением стволов оружия, сколько из-за эксплуатационных недостатков и дефицита гремучей ртути. Создать неоржавляющие составы, полностью удовлетворяющие требованиям военных, тогда не удалось, хотя композициями на основе ТНРС, нитрата бария и тетразена в СССР занимались еще в 30-е годы. В первую очередь, не удавалось подавить искрение пламени при выстреле. Было принято решение использовать составы на основе ТНРС и тетразена, в которых нитрат бария был заменен более активным хлоратом калия, т.е. в обиход вошли корродирующие составы без гремучей ртути, которые уже применялись в накольных КВ. Уровень коррозионной активности продуктов сгорания предложенных композиций был все же ниже, чем у обычных гремучертуговых составов, поэтому по отечественной терминологии они называются «полунеоржавляющими». Стойкость стволов к оржавлению дополнительно повышали хромированием. Реально же от гремучертуговых УВС в России полностью отказались только к концу 90-х годов 20 века. Классические неоржавляющие составы на основе ТНРС, тетразена и нитрата бария в 70-х и 80-х годах были внедрены в КВ для охотничьего и спортивного оружия, где, по-видимому, и велась их доработка [129].

В 60-ые годы 20 века зарубежные исследователи обнаружили, что тяжелые металлы, которые входят в состав ударных композиций (свинец, ртуть, барий), интенсивно накапливаются в организмах людей, которые проводят много времени на стрельбищах и в тирах. В результате инструкторы по стрельбе и военные специалисты были подвержены ряду профессиональных заболеваний, связанных с накоплением тяжелых металлов в организме. В конце 70-х – начале 80-х годов 20 века, чтобы решить эту проблему, фирма «Динамит Нобель», а следом за ней шведская «Бофорс» разработали целую серию нетоксичных композиций типа «Sintox» и «Nontox», не содержащих в своем составе тяжелых металлов [24]. В настоящее время нетоксичные ударные составы по своим боевым качествам приближаются к уровню некорродирующих смесей на основе стифнатов и активно применяются в КВ для патронов полицейского и гражданского оружия. В ряде стран исследуется возможность замены штатных армейских композиций нетоксичными ударными составами.

В патенте [40] от 2001 г. предложена композиция, содержащая органический пероксид – ГМТД. Считается, что в силу низкой стойкости и опасности в обращении использование орг. пероксидов в ударных составах нецелесообразно [1]. Но авторы патента указывают на то, что состав внедрен в промышленные изделия

гражданского назначения и обеспечивает требуемые показатели. Он содержит: 20% ГМТД, 10% тетразена, 36% нитрата бария, 20% антимония, 7% ТЭНа, 7% циркония, 0,12% шеллака (св. 100%).

С 2000 г. в США развивается концепция нетоксичных капсульных составов типа «МИС» (Metastable Interstitial Composites), известных также под названием «нанотермиты». Основными компонентами в них являются оксид металла (преимущественно оксиды молибдена, железа, висмута) и нанодисперсный порошок алюминия. Для образования газообразных продуктов нанотермиты содержат добавку ТЭН-а или НЦ. При ударном воздействии эта смесь легко воспламеняется с формированием интенсивного флорса пламени и раскаленных частиц, обладающих повышенной воспламеняющей способностью [30]. На данный момент смеси «МИС» активно исследуются и внедряются в США, т.к. не содержат иницирующих ВВ и токсичных соединений, а их параметры соответствуют требованиям к штатным неоржавляющим составам. Совсем недавно составом, содержащим 50-70% оксида висмута, 5-30% алюминия и 5-30% НЦ, начали снаряжать капсулы к американским патронам калибра 5,56, 7,62 и 9 мм, предназначенным для использования в гражданском оружии [105].

**Табл. 4.3. Гремучертутные корродирующие (1-11) и некорродирующие (12-20) ударные составы**

Состав:	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Hg(CNO) <sub>2</sub>	25	16	35	26,7	11	25	19	27	16	31,25	44,5	55	40	40	50	36	44,5	40,8	41,1	35
KClO <sub>3</sub>	37,5	55,5	40	38,5	52,5	40	33,4	37	34	37,5	28,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Ba(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	40	-	-	30,5	22,2	26	5
BaO <sub>2</sub>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	27	25	-	-	-	-	-	-	-
PbO <sub>2</sub>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	20	-	-	-	-	30
Sb <sub>2</sub> S <sub>3</sub>	37,5	28,5	25	34,8	36,5	35	42,8	29	50	31,25	27	11	25	14	-	20	-	-	-	-
стекло	-	-	-	-	-	-	-	7	-	-	-	-	4	6	6	4	20,6	28,4	26,7	20
Pb(SCN) <sub>2</sub>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4,2	8,2	5,2	-
связка	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,2	0,4	0,6	0,5
прочее*	-	-	-	-	-	-	4,8	-	-	-	-	7	6	-	24	40	-	-	-	10

1. Отечественный состав времен Второй мировой войны для патронов калибра 5,6, 6,35, 7,62, 12,7, 14,5, 20 мм. Аналогичный состав использовали немцы и англичане (смесь А1). Считается, что эта композиция является самой чувствительной из всех сочетаний гремучей ртути, хлората калия и антимония [9, 10].
2. Отечественный состав времен Второй мировой войны для патронов калибром 7,62 мм [9].
3. Отечественный состав для снаряжения капсуля KBM-3 [111].
4. Немецкий состав времен Второй мировой войны для патронов калибром 7,92 мм [9].
5. Английский состав В1 для ударного воспламенения замедлителей [10].
6. Английский состав D1 для использования в гражданских изделиях [10].
7. Английский состав E1 для малокалиберных боеприпасов. Известен как «смесь SAA»: \* – сера и пороховая мякоть по 2,4% [10].
8. Патроны к винтовке Маузера [8].
9. Чешский состав для ударного воспламенения замедлителей [8].
10. Американский состав OS866 [2].
11. Американский состав для снаряжения KB M27 мгновенного действия [2].
12. Состав фирмы RWS для патронов калибра .22. Производился с 1910 г: \* – тротил [4].

13. Состав, принятый на вооружение в швейцарской армии с 1911 г.: \* – карбонат бария [4].
14. Немецкий состав [24].
15. Немецкий состав: \* – хромат свинца [24].
16. Немецкий состав: \* – хромат ртути [24].
17. Состав американской фирмы Remington. Конец 20-х годов 20 века [4].
18. Состав американской фирмы Western. Конец 20-х годов 20 века [4].
19. Состав американской фирмы Winchester. Остаток от анализа 0,4%. Конец 20-х годов 20 века [4].
20. Состав из книги Штетбахера: \* – ТЭН [125].

**Табл. 4.4. Корродирующие ударные составы, не содержащие гремучей ртути**

Состав	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
хлорат калия - $KClO_3$	47,2	53	41,5	36,5	54	54	53	53	53	45	50	35	52	37,1	50
антимоний - $Sb_2S_3$	30,8	17	9,5	54,5	40	13	12	25	30	22	20	30	13	-	-
тиоцианат свинца - $Pb(SCN)_2$	-	25	-	-	-	23	25	-	-	33	-	17	25	38,1	10
тиоцианат меди I - $CuSCN$	-	-	4,7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
диоксид свинца - $PbO_2$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	25	-	-	-	-
железистосинеродистый свинец	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	40
сера - S	22	-	-	3	6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
стекло (порошок)	-	-	44,3	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	10,4	-
тринитротолуол (тротил)	-	5	-	-	-	-	-	-	-	-	5	3	-	5,7	-
пороховая мякоть (ПМ)	-	-	-	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
тетранитропентаэритрит - ТЭН	-	-	-	-	-	10	10	-	-	-	-	-	-	-	-
силицид кальция - $CaSi_2$	-	-	-	-	-	-	-	12	17	-	-	15	-	-	-
термостойкое ВВ (ТАКОТ)	-	-	-	-	-	-	-	10	-	-	-	-	-	-	-
тенерес (ТНРС)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	10	-	-	-
нитрат бария - $Ba(NO_3)_2$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	8,7	-

1. Американский состав FH-42 1910 г. Основной ВВС армии США времен Первой мировой войны [4].
2. Американский состав 35-NF фирмы Winchester (1911 г.). Впоследствии был стандартизован и переименован в FA-70. Выпускался до 50-х годов 20 века, например в KB M54. Также находит применение в напольных KB [4, 25].
3. Американский состав «NRA». Выпускался для револьверных патронов бокового боя калибра 0,22 [4].
4. Английская смесь QF (использовалась до Второй мировой войны) [10].
5. Английская смесь Q3 (использовалась до Второй мировой войны) [10].
6. Английская смесь RD1610. Была перенята у американцев, но в массовых изделиях не использовалась [10].
7. Американский состав FA 90A [2].
8. Американская термостойкая смесь G-11, разработанная для авиационных и космических изделий, испытывающих интенсивный нагрев [3].
9. Американская термостойкая смесь G-16 [3].
10. Американская смесь OS 891 для снаряжения детонаторов мгновенного действия [3].
11. Американская смесь для снаряжения KB M42 [25].
12. Американская смесь №793 для снаряжения KB M42A2 [25, 109].
13. Французский состав для инициирования замедлительной цепи [36].
14. Американская смесь для снаряжения KB M39A1 [25].
15. Состав из книги Штетбахера [125].

**Табл. 4.5. Некорродирующие (неоржавляющие) ударные составы  
производства стран Европы и России**

Состав	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
ТНРС	23,7	37,5	26,4	40	30-35	38	-	27	35	46	44,2	45	40	35	38	38	18	75	19	27	24
ДАНФ	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	10	16	-	-
ДНРС	-	-	-	-	-	-	50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
тетразен	2,2	4,2	-	3	2-3	2	5	2	3	4	3,3	5	3	3	2	3	2	-	-	5	1
Ba(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	62,1	38,5	-	42	40-45	39	45	44	47	25	20,4	25	42	42	-	32	22	-	45	35	44,7
Pb(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	-	-	50,1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	48	-	-	-	-	-	-
PbO <sub>2</sub>	-	-	-	5	5-8	5	-	-	15	-	-	-	5	5	-	-	-	-	-	5	5
Sb <sub>2</sub> S <sub>3</sub>	6,2	7,4	18,2	-	6-9	5	-	27	-	20	-	20	10	7,05	12	15	-	-	-	20	25
алюминий	5,8	-	-	-	-	-	-	-	-	5	-	-	-	7,8	-	-	-	-	-	-	-
цирконий	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	7	-	-	-	-	-
бор	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3	-
CaSi <sub>2</sub>	-	12,4	-	10	6-12	11	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	50	-	-	-	-
ТЭН	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5	8	-	-	5	-
ПАМ-3,4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Pb(H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	6,8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
связка	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,3	-	-	0,15	-	-	-	-	-	0,1	-
стекло	-	-	5,3	-	-	-	-	-	-	-	25	-	-	-	-	-	-	15	20	-	-

1. Немецкий состав времен Второй мировой для некоторых патронов калибром 7,92, 15 и 20 мм [9].
2. Немецкий состав времен Второй мировой для снаряжения KB [21].
3. Немецкий состав времен Второй мировой для снаряжения KB к 50 мм миномету [21].
4. Немецкий состав «30/40» конца Второй мировой войны для снаряжения KB к патронам стрелкового оружия. Позднее использовался в Чехословакии для снаряжения 5,5 мм KB [8, 21, 118].
5. Немецкие составы для KB к ружейным патронам, производившиеся во время Второй мировой войны в городе Фюрт [118].
6. Классический немецкий состав типа SINOXID конца Второй мировой войны. Используется до настоящего времени в разных странах под шифрами VN2, EP-41, Gevelot VI, УН-2 [26, 37].
7. Английский состав RD1651, был введен в обращение в 1961 г. и заменил гремучертутные композиции типа А1 и В1. Применяется также в наковальных воспламенителях [10].
8. Английский состав VN4/1 [4].
- 9 - 11. Английские составы [4].
12. Чешский состав «оксид» времен Второй мировой войны для снаряжения револьверных патронов. Впоследствии широко использовался в изделиях стран Восточной Европы [38, 118].
13. Отечественный состав К-2-1 для снаряжения капсулей спортивно-охотничьих патронов. Содержит 0,2-0,3% графита сверх 100% [39, 41].
14. Отечественный состав, используется к KB ЦБО-Н [39].
15. Отечественный состав. Содержит 0,2-0,3% графита сверх 100% [39].
16. Штатный отечественный состав [40].
17. Отечественный состав [37].
18. Термостойкий состав для KB к гранатомету. Содержит графит и азросил св. 100% [42].
19. Термостойкий состав [43].
20. Новый отечественный состав. Используется в KB [44].
21. Новый отечественный состав. Используется в KB. Содержит технический углерод – 0,3% [45].

Табл. 4.6. Неоржавляющие ударные составы производства США

Состав	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
ТНРС	38	40	28	35	36	37	40	36	38	26	40	45	37	36	37	43	39	41	40	45	40	37	38	45
тетразен	2	5	3	3,1	12	4	4	3	4	2	5	5	5	5	3	3	4	3	2	4	2	4	2	3
Ba(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	43	33	39	31	22	32	30	29	39	41,5	30	27	29	28	38	36	40	39	30	22	-	30	39	42
Pb(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	30	-	-	-
PbO <sub>2</sub>	-	-	-	10,3	9	-	-	9	-	-	-	-	-	-	6	6	-	-	7	-	-	-	5	-
Sb <sub>2</sub> S <sub>3</sub>	9	16	12	10,3	7	15	15	9	12	20	16	-	19	20	11	-	11	9	-	-	-	25	5	-
Al	-	-	10	-	-	7	6	-	7	-	5	-	-	11	-	-	-	-	-	-	-	4	-	-
Zr	-	-	-	10,3	9	-	-	9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
НЦ пор.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4	-	-	-	-	-	6	-	-	-	-	-	-	-
CaSi <sub>3</sub>	8	-	-	-	-	-	-	-	-	10,5	-	-	-	-	-	12	-	8	-	-	-	-	11	-
ТЭН	-	6	8	-	5	5	5	5	-	-	-	-	5	-	5	-	-	-	-	-	-	-	-	3
Pb(SCN) <sub>2</sub>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5	-	-	-	-	-	8	-	8	-	-	-
связка	-	-	-	-	-	0,2	-	-	-	+	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
стекло	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	22	-	-	-	-	-	-	20	22	20	-	-	7

1. Штатная рецептура №5061W для KB №50M к патронам .50 и .38 кал [109].
2. Коммерческая рецептура Winchester 116-282A для KB к 9 мм пистолетным патронам [109].
3. Смесь FA-958 для снаряжения KB №35 для патронов .50 кал [109].
4. Смесь FA-959 [25].
5. Смесь FA-982 [25].
6. Универсальная смесь FA-956 в KB №41. Используется в KB для патронов калибра 5,56 мм, 7,62 мм, .30 кал, для KB к 25 мм снарядам [25, 109].
7. Смесь №955 фирмы Olin. Используется в ряде KB для пиротехнических изделий (M125A1, M195, M127) и в KB к патронам 12 калибра [109].
8. Смесь FA-961 для KB к патронам калибра 7,62 мм [109].
9. Смесь FA-1023 для KB к учебным патронам M181A1 и патронам с пулями M118 кал. 7,62 мм [109].
10. Низкобрызганный состав №5086 для KB PVU-1/A в пиропатроне CCU-61/A [29].
11. Смесь K90 для KB к 40 мм выстрелам к подствольному гранатомету M203 (выстрелы без ВВ – пиротехнические и имитационные) [109].
12. Состав для KB к патронам малокалиберной винтовки кал. .22LR [109].
13. Состав №295A для KB к пистолетным патронам калибра .45 [109].
14. Состав №100 для KB к 40 мм выстрелам к подствольному гранатомету M203 [109].
- 15 - 24. Коммерческие рецептуры [28, 116].

Среди нетрадиционных капсюльных смесей следует отметить американский УВС FA-675, разработанный в 1947 г. и состоящий из нитрата бария и красного фосфора в соотношении 82/18. После его внедрения было обнаружено, что технический красный фосфор, будучи заключенным в металлическом корпусе, довольно быстро окисляется кислородом воздуха с образованием кислых продуктов неустойчивого состава. Технический сорт фосфора вскоре был заменен на чистый, смесь была несколько усовершенствована и выпущена под индексом «FA-716». FA-716 содержал: нитрат бария – 77%, красный фосфор – 18%, тротил – 5% и трагакантовую камедь – сверх 100%.

Смеси с фосфором из-за ряда технологических особенностей вышли из употребления вскоре после своего появления. Тем не менее на фоне развития эколо-

гически чистых составов в США интерес к фосфорным ударным смесям постепенно возрождается.

В 1939 г. был получен патент на ударные составы с комплексным гипофосфитом и нитратом свинца.

В 60-х годах 20 века широко патентовались смеси на стабнате – двойной соли нитроаминотетразолата и стифната свинца [4].

Известен довольно нетипичный малогазовый ударный состав, который предполагалось использовать для замены капсюльной смеси в КВ М42. Он состоит из свинцового сурика – 85,5%, бора – 9,5%, тетразена – 5,0% [25, 31]. Наконец, предпринимались попытки по применению в КВ миш-металла (сплава на основе железа, церия и других редкоземельных металлов). Как известно, миш-металл используется в качестве «кремня для зажигалок» и способен генерировать искры при сравнительно слабом воздействии трения [4].

**Табл. 4.7. Нетоксичные ударные составы**

Состав:	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
тетразен	3	5	25	-	8	6	-	5	15	6	4-7	10	6	8	2	6	6	5	3	6
ДАНФ	15	20	-	-	-	24	-	-	40	56	-	-	45	25	-	24	22	28	20	-
К-ДНБФ	-	-	-	-	-	-	45	45	-	-	30-40	36	30	-	26	-	-	-	-	42
К-АДНФ	-	-	-	-	-	-	-	-	-	20	-	-	-	35	-	-	-	-	-	-
Sr-диазинат	-	-	-	-	28	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
К-стифнат	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	57	-
KNO <sub>3</sub>	-	-	33,5	20	-	-	10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	37
Ba(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	41,5	-	-	50	-	-
Sr(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	48	33	-	-	-
ZnO <sub>2</sub>	50	50	-	-	40	14,5	-	30	8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
MnO <sub>2</sub>	-	-	-	44,5	-	16	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ТЭН	-	-	25	15	-	-	-	-	-	-	-	30	-	-	-	-	-	-	-	-
бездымн. порох	27	20	0,5	-	-	22	-	-	-	-	-	-	-	-	-	22	8	6	-	8
титан	5	5	-	-	-	-	-	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
алюминий	-	-	-	-	-	5	4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Sb <sub>2</sub> S <sub>3</sub>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	20	-	-	11	-	-
бор	-	-	6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	7
инерт. сенсиб.	-	-	10	-	16	1	40	-	35	18	60-65	23,5	19	15	-	-	30	-	20	-
связка	-	-	-	-	1	0,2	1	-	2	-	-	0,5	-	1	+	-	-	0,5	-	-
прочее *	-	-	-	20,5	7	11,3	-	15	-	-	-	-	-	16	10,5	-	1	-	-	-

1. Смесь SINTOX фирмы Dyno Nobel. НЦ используется в виде сферического пороха [46].

2. SINTOX с увеличенным сроком хранения [47].

3. Смесь NONTOX, производимая шведским концерном Bofors [85].

4. Смесь NOTOX. Швейцарский состав: \* – 20% циркония, 0,5% аэросила [48].

5. Состав фирмы Dyno Nobel с пониженной чувствительностью к удару: \* – сульфат стронция [47].

6. Американский состав: \* – окись цинка [50].

7. Состав для снаряжения патронов бокового боя [51].

8. Состав с улучшенной термостойкостью: \* – окись олова [52].

9. Состав фирмы Dyno Nobel [52].

10-12. Отечественные составы [53, 55, 57].

13. Отечественный состав для снаряжения КВ к 9 мм патронам [54].
14. Отечественный состав: \* – перманганат калия [56].
15. Новый американский состав для замены смеси №5086. \* – силицид кальция [106].
16. Похожий состав имеют УВС под торговыми марками «Blazer», «Cleanfire», «Cleanrange» [112, 115].
17. Состав для снаряжения патронов бокового боя. \* – аравийская камедь и пигмент [113].
18. Состав фирмы «Winchester» [114].
19. Отечественный состав [41]. Согласно [116], КВ с подобным составом промышленно выпускаются в России (г. Муром) и поставляются на экспорт.
20. Современный американский состав фирмы Olin Corporation [119].

### Примечание.

По американским данным, нетоксичные гражданские УВС на основе ДАНФ неудовлетворительно функционируют в холодном климате и имеют ограниченный срок годности. Поэтому разработка армейских нетоксичных УВС в США основывается на использовании динитробензофуросаната калия (К-ДНБФ) и композиций типа «МКС» (см. далее).

Табл. 4.8. Накольные составы

Состав	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
Hg(CNO) <sub>2</sub>	32	32-35	28	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ТНРС-осн.	-	-	-	-	40	-	-	-	-	-	-	40	-	25	60	53	-	-	-	-	41	-
ТНРС	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	50	8,4	-	-	-
ДНРС	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	50	-	-	-	-	-	-	-	-	-
азид Рb	-	-	-	92,5	-	29	5	-	-	-	-	20	-	-	-	-	-	-	15,6	-	21	-
тетразен	-	-	-	7,5	4	-	-	-	-	-	-	5	5	5	5	5	8	5	-	-	-	6
KClO <sub>3</sub>	45	45-35	14	-	16	33	53	53	36	45	53	-	-	-	-	-	37	-	-	50	-	-
Ba(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	-	-	-	-	-	-	-	-	9	-	-	20	45	45	25	22	-	25	-	-	18	35
PbO <sub>2</sub>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	15	-	-	-	-	2
Sb <sub>2</sub> S <sub>3</sub>	23	23-30	21	-	40	33	17	12	-	22	17	15	-	15	10	10	25	20	58	-	18	40
ZrC	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	48	-	-
Pb(SCN) <sub>2</sub>	-	-	-	-	-	-	25	25	38	33	25	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Al	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	10	-	10	-	-	-	-	-	-
тротил	-	-	-	-	-	-	-	-	6	-	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
стекло	-	-	35	-	-	-	-	-	11	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
прочее*	-	-	2	-	-	5	-	10	-	-	-	-	-	-	-	-	15	-	18	2	2	17

1. Устаревшая американская смесь «Pot-pot №74». Использовалась на флоте. В Англии известна как C1 [2].
2. Типичные устаревшие напольные смеси на основе гремучей ртути [2].
3. Устаревшая американская смесь: \* – шеллак [2].
4. Чешский состав для напольных детонаторов [8].
5. Чешский состав для напольных воспламенителей [8].
6. Американская смесь: \* – карборунд [25].
7. Американская смесь PA-100. Детонаторы M26, M45, M41, M56 [25].
8. Американская смесь FA-90A: \* – ТЭН [2].
9. Американская смесь №5. Используется в КВ М39А1, например, для снаряжения запала для гранат М201А1 [5, 109].
10. Американская смесь OS-891. Вышла из употребления в 60-х годах 20 века [25].
11. Американская смесь FA-70. Одновременно используется в качестве УВС [25].

12. Американская смесь NOL-130. Воспламенители и детонаторы Mk102 Mod1, M45, M47, M55 [25].
13. Английский состав RD1651, введен в обращение в 1961 г. [10].
14. Американский состав [25].
15. Американская смесь NOL-60A. Использовалась на флоте и в запалах M227 [25].
16. Американская смесь PA-101. Иницирует столбик замедлителя [25].
17. Немецкий состав: \* – силицид кальция [58].
18. Отечественный состав [11].
19. Отечественный влагостойкий состав: \* – **перхлорат калия**. Азид свинца и ТНРС – в соосажденном виде [59].
20. Отечественный термостойкий состав [104]: \* – фторкаучук.
21. Американский термостойкий состав: \* – карборунд [117].
22. Современный китайский состав: \* – основной пикрат свинца [127].

## 4.2. Терочные составы

Терочные (фрикционные) составы применяются в тех узлах воспламенения пиротехнических средств и боеприпасов, где нет необходимости в создании точной временной задержки. Сфера применения ТС обычно ограничивается сравнительно безопасными изделиями наподобие дымовых шашек, пиротехнических средств гражданского назначения и спичками. В прошлом получили определенное распространение артиллерийские вытяжные воспламенители и ручные осколочные гранаты с терочным воспламенением [6].

**Соответственно различают следующие типы терочных составов [12, 13]:**

- *Фрикционные составы напольного типа* для снаряжения вытяжных воспламенителей (Рис. 4.2 а). Применяются в запальных трубках, при этом запальная трубка и терка выполняются в одном корпусе. В вытяжных напольных воспламенителях роль терки играет изогнутая стальная проволока с насечками. Проходя через слой фрикционного состава, она накаливается насечками фрикционный состав и тем самым вызывает воспламенение. До Второй мировой войны запальные трубки применялись в артиллерии. Вытеснены более удобными ударными КВ.
- *Двухкомпонентные фрикционные составы для снаряжения вытяжных воспламенителей* (Рис. 4.2 б).

Как и в первом случае, терка и запальная трубка выполняются в одном корпусе. Принцип действия основан на том, что намазка на основе хлората калия, приведенная в контакт с красным фосфором, проявляет высокую чувствительность к трению, позволяющую прилагать довольно незначительные усилия, чтобы вызвать воспламенение. Терка выполняется в виде изогнутой металлической проволоки, на которую нанесен красный фосфор. При вытягивании проволоки она трется о воспламенительную намазку, намазка воспламеняется, передает луч огня замедлительной цепи либо основному воспламенительному составу. Пока терка находится в начальном положении, такой воспламенитель сравнительно безопасен.

- *Двухкомпонентные терочные составы для иницирования пиротехнических изделий*. Под двухкомпонентными терочными составами подразумевают 2 композиции и соответственно 2 изделия, на которые они нанесены – воспла-

менительный состав в виде намазки и терку. Основной воспламенительного состава является смесь хлората калия, горючего, связующего и добавок; терка же выполняется из смеси красного фосфора с каким-либо абразивным материалом наподобие порошка стекла. Воспламенительный состав замешивается на воде и наносится в виде пасты на изделие. Высыхая, состав формирует довольно прочную каплю, надежно скрепленную с поверхностью, на которую он нанесен.

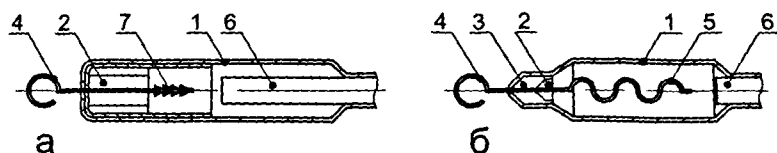


Рис. 4.2. Вытяжные воспламенители [2, 6].

а) – вытяжной воспламенитель наконечного типа, б) – вытяжной фосфорный воспламенитель.

1 – металлическая гильза, 2 – чувствительный состав, 3 – воспламенительный состав, 4 – вытяжной элемент, 5 – проволока с нанесенным на нее красным фосфором, 6 – огнепроводный шнур, 7 – проволока с насечками-зубцами.

- *Терочные составы для спичек.* Двухкомпонентные терочные составы и смеси для намазок спичечных головок принципиально очень похожи. Можно лишь указать на то, что спичечные составы более сложны, т.к. в малом количестве должны обеспечивать надежное воспламенение лучины. Для успешного зажигания лучины составы должны сгорать с определенной скоростью, для чего в них вводят модификаторы. Кроме простейших спичек, знакомых всем, существуют охотничьи спички, которые содержат намазку, способную поддерживать горение при сильном ветре и дожде. В США и Европе выпускаются спички «Strike Anywhere» (SAW), воспламеняющиеся при трении практически о любую поверхность. В настоящее время они постепенно вытесняются обычными безопасными спичками. Намазка на спичечном коробке обычных спичек, кроме красного фосфора, содержит строго подобранное количество связующего и абразива, чтобы, с одной стороны, обеспечить легкость воспламенения, а с другой – предотвратить выгорание самого фосфора. С точки зрения спичечного состава как воспламенительного при сжигании головки спички должно выделяться не менее 14 калорий тепла, что примерно соответствует температуре от 1350 до 1930°C. Температура самовоспламенения обычных спичечных составов находится в пределах 180-200°C, спичек типа SAW – около 120°C [13].

Как правило, для успешного зажигания лучины состав спичечной намазки должен выделять приблизительно на 15% больше кислорода, чем требуется для полного окисления горючих компонентов самой намазки. Намазки, предназначенные для использования в неблагоприятных погодных и климатических условиях, могут содержать еще больший избыток кислорода [87].

**Табл. 4.9. Основные компоненты терочных составов [87]**

Компонент	Наименование	Содержание
окислитель	хлорат калия	25-65%
горючее	сульфид сурьмы, сера, древесный уголь	5-50%
связующее	камеди, гуммиарабик, костный клей, декстрин, ПВА, синтетич. смолы	1-25%
катализатор	дихромат калия, тиосульфат свинца (американские спички), $MnO_2$	0,5-5%
сенсibilизатор	красный фосфор, сесквисульфид фосфора, карбид титана, кварц	0-37%
разрыхлитель	диатомит (кизельгур), стеклянные микросферы	0-7%
наполнитель	оксид цинка, стеклянный порошок, серный колчедан	0-35%
стабилизатор	мел	0-5%
пигмент	окись железа, ламповая сажа, орг. красители	До 5%

1. Окислители. В качестве окислителя во всех терочных составах используется хлорат калия. Другие окислители типа перхлоратов и нитратов не обеспечивают требуемой чувствительности к трению терочного состава.
2. Горючие. Как правило, это хорошо освоенные компоненты типа серы или антимония, которые образуют с хлоратом калия смеси с достаточной чувствительностью к трению.
3. Связующие – это широко используемые, как правило, водорастворимые полимеры природного происхождения, обладающие клеящими свойствами. В составах, предназначенных для использования в тропиках или влажном климате, где основное требование – это водостойкость, применяют синтетические формальдегидомочевинные смолы, поливинилацетат и т.д.
4. Катализаторы – облегчают разложение окислителя, промотируют начальную реакцию между хлоратом калия и красным фосфором и тем самым повышают безотказность воспламенения. Дихромат калия также является сшивающим агентом для водорастворимых связующих, что увеличивает водостойкость. Впрочем, содержание дихромата не должно превышать 1,5%, иначе связующее слишком сильно загустеет и спичечная масса потеряет технологические свойства.
5. Сенсibilизатор повышает чувствительность смеси к трению в тех случаях, когда это необходимо. Как правило, это твердые инертные материалы (кварц) либо вещества, в смеси с которыми хлорат калия демонстрирует высокую чувствительность к трению (красный фосфор).
6. Разрыхлитель. Диатомит используется в качестве регулятора плотности спичечной массы, способствуя правильному распространению пламени. Вдобавок он частично поглощает вредные вещества при воспламенении спичечной головки. В более прогрессивных композициях вместо диатомита применяются стеклянные микросферы.
7. Наполнитель. Оксид цинка регулирует скорость горения намазки, вдобавок он является стабилизатором, который поглощает следы кислот. Порошок стекла отвечает, с одной стороны, за безотказность воспламенения, а с другой – способствует образованию нетоксичных спекшихся шлаков с высокой степенью адгезии к лучине.

8. Стабилизатор. Мел регулирует кислотность спичечной массы, нейтрализует следы кислот, так или иначе образующихся при хранении.
9. Пигменты – придают спичечной головке нужную окраску (в декоративных целях). Наиболее распространенный пигмент – окись железа, которая затемняет состав, делая его коричневым. Кроме оксида железа, используются органические красители, например родамин, который окрашивает массу в красный цвет.

### *Примечание.*

*Если спичечную массу необходимо окрасить в яркий цвет, нельзя применять в качестве катализатора оксид марганца, т.к. он обладает свойствами неорганического пигмента и затемняет состав.*

История терочных составов начинается с 1674 года, когда, нагревая остаток от выпаривания мочи в смеси с углем, Бранд получил белый фосфор. Чуть позже Роберт Бойл (Boyle) использовал фосфор для зажигания деревянных щепок, опудренных серой.

Как таковые, фосфорные спички появились в период с 1780 по 1830 года. С 1835 года в Британии их называли «Congreves». Воспламенительный состав в таких спичках был покрыт лаком и содержал до 20% фосфора. При трении о любую твердую поверхность лак разрушался и спичка воспламенялась. Чуть позже количество фосфора было уменьшено до 5%, а в смесь начали вводить серу, канифоль, хлорат калия.

Белый фосфор вызывал тяжелые хронические заболевания у рабочих спичечных фабрик, если же спички попадали в руки детям, возникал риск серьезного отравления. При нарушении целостности оболочки такие спичка иногда самовоспламенялись. Поэтому фосфорные спички к концу 19 века были полностью заменены безопасными, или «шведскими спичками».

Концепция безопасных спичек, или «двухкомпонентных» терочных составов, эволюционировала параллельно с развитием фосфорных спичек. С 1805 года известны спички, представляющие собой лучину с нанесенной на нее смесью хлората калия, сахара, серы, канифоли и гуммиарабика. Их воспламенение осуществлялось путем опускания спички в стеклянный пузырек, содержащий асбест с адсорбированной на нем концентрированной серной кислотой. При реакции между кислотой и хлоратом калия выделялся  $\text{ClO}_2$ , который вызывал самовоспламенение сахара, а затем и всей спичечной головки. Такие спички производились массово на довольно крупных фабриках и мануфактурах.

Первый прототип безопасной спички, воспламеняемой за счет трения, был изобретен Джоном Уокером в Англии в 1826 г. Головка спички содержала хлорат калия с сульфидом сурьмы и зажигалась трением между полосками абразивной бумаги. Однако из-за трудности в воспламенении, обращение с такими спичками требовало некоторого опыта. Намазка спичечных головок, произведенных в Англии в 1832-1833 гг., содержала: 6,5% серы, 24,6% сульфида сурьмы, 27,6% хлората калия, 5,6% оксида железа и 35,7% гуммиарабика. Французский вариант

намазки для этих спичек состоял из: 12,5% серы, 18,1% сульфида сурьмы, 41,0% хлората калия, 3,5% оксида железа и 24,9% гуммиарабика [87].

В 1844 г. Pasch (подданный Швеции) догадался нанести красный фосфор на абразивную поверхность, чем была достигнута одновременно легкость воспламенения и безопасность в обращении со спичками.

А приблизительно в 1848 г. благодаря работам австрийца Шроттера был получен красный фосфор в чистом виде. В 1892 году Joshua Pusey в США изобрел спички-книжки (book-match), представляющие собой нарезанные полоски картона с зажигательными головками. Примерно в то же время французы Генри Сивен и Эмиль Давид Кашен разработали более безопасный аналог фосфорных спичек типа «SAW» (strike anywhere). Эти спички воспламенялись при трении о любую твердую поверхность, но при этом не были склонны к самовоспламенению и не обладали токсичностью белого фосфора. Эффект достигался введением в состав сесквисульфида фосфора –  $P_4S_3$  и покрытием головки нитроцеллюлозным лаком. В США производство таких спичек началось в 1900 году. В США SAW выпускают двухслойными (наружный слой более чувствителен к трению, а внутренний обладает лучшей воспламеняющей способностью), в Европе выпускаются спички однослойные.

Со времен Второй мировой войны во многих странах производятся т.н. «охотничьи» спички. Они содержат специальную намазку, нанесенную по всей длине лучины, благодаря которой спичка не затухает на ветру или при дожде, а головка спички покрывается специальным лаком. Один из современных вариантов намазки содержит [70]: хлорат калия – 35%, серу – 13%, порошок стекла – 30%, оксид цинка – 12%, клей мездровый – 10%.

Примерно со Второй мировой войны немцы производят цветопламенные спички, которые, помимо прямого назначения, применяются для передачи сигналов, а также в качестве миниатюрных фейерверков [3, 13]. Получен отечественный патент на подобные спички [103].

Специальные спички, способные сгорать не только при неблагоприятных погодных условиях, но и под водой, имеют один или несколько каналов, заполненных смесью 30-58% перхлората аммония, 30-56% порошка титана, 8-12% бронзово-вой пудры и 1-5% органической добавки [102].

Состав фосфорной намазки (терки), при трении о которую воспламеняется терочная композиция, более однообразен. Как правило, он содержит красный фосфор, абразив в виде порошка стекла, добавки-модификаторы и связующие. Причем фосфорные намазки, предназначенные для использования в странах с влажным климатом, должны содержать наиболее водостойкие связующие (поливинилацетат).

После Второй мировой войны в связи с временным дефицитом фосфора в некоторых странах были разработаны намазки, не содержащие этого компонента. Например, в итальянском патенте [88] была заявлена композиция: силицид кальция – 100 ч., порошок стекла – 10-13 ч., калия хромат – 50 ч., декстрин или клей – 15 ч. Остальное – вода для разведения массы.

Стоит отметить, что по денежному обороту и массовости в конце 20 века производство спичек с лихвой перекрывало всю индустрию фейерверочных изделий и сигнальных средств гражданского назначения. Таким образом, спички стали самым доступным и массовым пиротехническим изделием из всех существующих.

Однако в последнее время спичечная индустрия переживает спад, связанный со значительным удешевлением одноразовых зажигалок и появлением бытовых пьезоэлектрических воспламенителей для газовых плит.

**Табл. 4.10. Составы для вытяжных воспламенителей (1-5) и двухкомпонентные терочные составы для снаряжения пиротехнических воспламенителей (6-18)**

Состав	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
хлорат калия - $KClO_3$	60	44,6	35	66,7	56,2	63	53	42	88	52	60	28	60,4	53	45	49	37	48
антимоний - $Sb_2S_3$	30	44,6	38	33,3	24,6	32	22	42	-	31	30	-	-	7	28,5	4	32	-
сера - S	10	3,6	-	-	9	-	9	3	-	-	-	-	-	5	6	4	-	-
стекло (порошок)	-	3,6	12	-	10,2	-	10	3	-	-	-	-	5,4	-	-	12	-	-
мел - $CaCO_3$	-	-	-	-	-	-	1	2	-	-	-	2	-	-	1,2	-	-	3,6
пороховая мякоть (ПМ)	-	3,6	-	-	-	-	-	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
древесный уголь	-	-	-	-	-	-	-	-	10	-	-	2	-	-	-	-	-	1,6
нитрат стронция - $Sr(NO_3)_2$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3	-	-	-	-	-	7,7
кварц - $SiO_2$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	6	-	15	-	-	-	-
окись железа - $Fe_2O_3$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2	6	-	2,5
связка*	-	-	-	-	-	5	5	5	2	17	10	40	30,4	10	8,3	25	1	12,1
прочее**	-	-	15	-	-	-	-	-	-	-	-	19	-	10	9	-	30	24,5

- Отечественный состав времен Второй мировой войны [6].
- Английский состав [14].
- Чешский состав: \*\* – гремучая ртуть [8].
- Американские составы [3, 14].
- Американский состав: \* – арабийская камедь [25].
- Американский состав: \* – декстрин. Используется с терочной смесью 2, Табл. 4.13. Имитаторы M116A1, M115A2 [109].
- Американский состав: \* – декстрин. Используется с терочной смесью 1, Табл. 4.13. Имитатор M117 [109].
- Отечественный состав: \* – идиол. Используется с терочной смесью 5, Табл. 4.13 [15].
- Состав, сгорающий пламенем красного цвета: \* – шеллак; \*\* – 14% перхлората калия и 5% древесной муки. Используется с терочной смесью 6, Табл. 4.13 [16].
- Чешский состав с высокой водостойкостью: \* – резольная смола, отверждаемая нагреванием [60].
- Польский состав: \* – идиол; \*\* – 8%  $MnO_2$  и 2%  $K_2Cr_2O_7$ . Используется с терочной смесью 5, Табл. 4.13 [61].
- Отечественный состав: \* – клей столярный; \*\* – красный фосфор [62].
- Отечественная композиция с улучшенной адгезией к основному составу: \* – 24% поливинил-ацетата, 1% дибутилфталата [63].
- Отечественный состав: \* – НЦ; \*\* – карбид титана или циркония [64].
- Воспламенительная головка для американского железнодорожного фальшфейера, сгорающая красным пламенем: \* – шеллак; \*\* – нитрат калия [120].

Как видно из табл. 4.10, терочные составы базируются на основе хлорат калия + горючее. Исключением являлись некоторые немецкие композиции времен Второй мировой войны, применявшиеся в вытяжных воспламенителях. В качестве примера можно привести смесь №39 для снаряжения вытяжного воспламенителя к ручной гранате: стифнат свинца – 25%, нитрат бария – 33%, двуокись свинца – 24%, кремний – 15%, порошок стекла – 3% [118].

**Табл. 4.11. Составы намазок спичечных головок**

Состав	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
KClO <sub>3</sub>	53,62	54,18	45,8	53,5	51	53,03	52	53	53	45-55	55	65,22	57,97	82,76	56,52
сера	-	-	7,37	-	5	5,23	6	5,2	8,3	3-5	5	5,02	9	-	6,21
стекло	-	-	-	18,95	15	16,7	14	16,3	16,1	15-32	7,5	12,04	14	-	-
кварц	18,9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5,9	13,55
диатомит	5,01	2,71	-	-	-	-	-	-	-	5-6	6,25	3,01	5	-	7,06
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,31	6,77	3,45	6,5	6	6,38	7,2	-	6,2	-	-	3,01	-	-	-
крахмал	1,54	4,06	-	-	-	-	-	-	-	2-3	2,25	-	-	3,54	3,88
CaF <sub>2</sub>	-	20,32	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ZnO	-	-	31	7	7	4,17	5,5	12,7	-	-	5	-	-	-	1,92
K <sub>2</sub> Cr <sub>2</sub> O <sub>7</sub>	-	-	-	1,45	1	1,32	1	1,4	1,2	+	0,75	-	-	0,72	-
MnO <sub>2</sub>	-	-	1	1,35	4	1,50	2	-	1,2	-	-	2,0	-	-	-
CaCO <sub>3</sub>	-	6,77	-	-	-	-	-	-	-	3	-	-	-	-	-
краситель	0,08	-	-	-	-	-	-	0,3	-	+	0,25	-	0,03	-	-
связка *	10,83	4,06	11,38	11,25	11	11,03	12,3	11,1	10	9-11	10,5	9,7	11	7,08	9,78
прочее **	7,71	1,09	-	7	-	-	-	-	6	-	7,5	-	3	0,24	0,99

1. Польский состав: \* – 3,5% канифоли, 7,33% столярного клея; \*\* – 2,7% сахара, 5,01% ферросилиция [65].
2. Польский состав: \* – желатин; \*\* – 0,5% красного фосфора, 0,5% цитрата железа, 0,09% ПАВ-а [66].
3. Немецкий состав: \* – желатин [67].
4. Отечественный состав: \* – 11% клея столярного, 0,25% трагакантовой камеди; \*\* – серный колчедан сверх 100% [68].
5. Отечественный состав: \* – клей. Используется с терочной смесью 8, Табл. 4.13 [15].
6. Отечественный состав для изготовления спичек повышенного качества: \* – 5,38% клея мездрового, 5,38% клея костного, 0,27% трагакантовой камеди [17].
7. Отечественный состав: \* – 3% клея мездрового, 9% клея костного, 0,3% Na-КМЦ [69].
8. Отечественный состав: \* – 11% клея мездрового, 0,1% Na-КМЦ [70].
9. Отечественный состав: \* – клей; \*\* – 3,72% каолина, 2,28% глинозема [101].
10. Состав американских спичек: \* – клей костный [13].
11. Английские спички-книжки «book match»: \* – 10% клея костного, 0,5% трагакантовой камеди; \*\* – стеклянные микросферы [89].
12. Французские спички: \* – 8,03% высококачественного костного клея, 1,67% канифоли [90].
13. Французские водостойкие спички: \* – клей костный; \*\* – 1% двуокиси титана, 2% сульфата свинца [91].
14. Японские водостойкие спички: \* – желатин; \*\* – глиоксаль сверх 100% (сшивающий агент для желатина) [92].
15. Американские водостойкие спички: \* – 8,07% поливинилового спирта, 1,71% формальдегидной смолы; \*\* – канифоль [93].

**Табл. 4.12. Составы намазок спичечных головок типа «SAW»**

Состав	1	2	3	4	5	6
хлорат калия - $KClO_3$	32	37	40	35	30,6	45,09
сера - S	-	6	-	-	-	2,79
стекло (порошок)	33	21,5	15	-	26	33,81
диатомит	-	3	-	-	-	5,22
крахмал или мука	4	5	-	-	7,8	-
окись цинка - $ZnO$	-	-	6	6	6,5	-
гипс	-	-	5,5	15,5	-	-
мел - $CaCO_3$	6	1	-	-	-	-
фосфора сесквисульфид - $P_4S_3$	10	3	7	7	10,3	2,82
краситель	-	-	0,5	0,5	0,5	-
связка *	15	23	18	17	15	8,82
прочее **	-	0,5	8	19	3,3	1,46

1. Американские двухслойные спички, первый слой: \* – 11% клея костного, 4% канифоли [14].
2. Американские двухслойные спички, второй слой: \* – 12% клея костного, 2% парафина, 6% канифоли, 3% камеди; \*\* – бихромат калия [14].
3. Английские спички: \* – костный клей; \*\* – кремний [71].
4. Английские спички: \* – костный клей; \*\* – стеклянные микросферы [89].
5. \* – Костный клей; \*\* – асбест [87].
6. Испанские спички: \* – 8,38% клея костного, 0,43% канифоли; \*\* – окись свинца [94].

**Табл. 4.13. Составы фосфорных намазок**

Состав	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
фосфор красный	53	21,4	50	50	56	26	42	37,2	52	40	25,2	61	25,5	30	41
древ. уголь	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
$Sb_2S_3$	42	-	-	-	-	-	-	33,5	25	24	8,6	-	23	17	-
кварц	-	-	30	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
стекло	-	-	-	25	24	-	-	0,6	6,5	8	-	-	11	1,5	-
сажа	-	-	-	4	-	-	-	-	-	-	-	4,5	-	-	-
$ZnO$	-	-	-	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
лемза	-	-	-	-	-	2,2	-	-	-	-	-	-	-	-	-
диатомит	-	-	-	-	-	-	-	-	2,8	3	-	-	-	-	-
$TiO_2$	-	-	-	-	-	-	18,3	-	-	-	-	-	-	-	-
$MnO_2$	-	-	-	-	-	-	-	3,4	-	4	-	-	-	-	30,9
$CaCO_3$	-	-	-	-	-	-	-	2	-	-	-	-	-	-	2,8
$Fe_2O_3$	-	-	-	-	-	-	-	7	-	4	7,1	-	-	1,5	-
связка	+	-	20	16	-	-	-	-	-	13,3*	14,25*	34,5**	-	50***	25,3*
шеллак	-	78,6	-	-	-	61	-	-	-	-	-	-	-	-	-
идитол (ФФС)	-	-	-	-	20	-	34	-	-	-	-	-	32,5	-	-
клей	-	-	-	-	-	-	-	9,3	13,7	-	-	-	-	-	-
декстрин	-	-	-	-	-	-	-	7	-	3,7	-	-	-	-	-
краситель	-	-	-	-	-	-	5,7	-	-	-	-	-	-	-	-
растворитель	-	-	-	-	-	10,8	-	-	-	-	44,85	-	8	-	-
литература	109	109	14	14	61	16	72	15	87	95	96	97	98	99	100

\* – поливинилацетат,

\*\* – акриловый полимер + 2% стеарата алюминия (применяется в намазках для спичек-книжек),

\*\*\* – пластизоль на основе ПВХ для водостойкой намазки.

### 4.3. Электровоспламенительные составы

Современное развитие пиротехники и средств подрыва немислимо без электровоспламенителей (ЭВ) и электродетонаторов (ЭД). Электрическое инициирование отличает высокая степень надежности и точности срабатывания, недостижимые при использовании огневого и прочих способов воспламенения. Электрический способ инициирования позволяет решать задачи подрыва нескольких зарядов с заданной задержкой, а в пиротехнике легко планировать сценарий фейерверка.

ЭВ был впервые изобретен англичанином Уотсоном в 1745 г. и модернизирован Б. Франклиным в 1749 г. Электрические генераторы 18 века не подразумевали практического применения, поэтому вскоре изобретение было забыто. В 1800-1801 гг. была разработана, а в 1812 г. (барон Павел Шиллинг) – улучшена электрическая батарея, достаточно удобная для использования в качестве источника энергии для ЭВ. Им же был изобретен «угольковый запал» и продемонстрирован подрыв морской мины в присутствии императора Александра I. В 1830 г. Шо (Moses Shaw) получил патент на ЭВ. С 1835 по 1840 год электроискровое взрывание обрело популярность в Англии, США и Франции. В 1841 г. академик Б.С. Якоби разработал магнитоэлектрическую подрывную машинку. Русские саперы уже во время Крымской кампании 1854-1855 гг. широко использовали электрический способ подрыва, тогда как ведущие мировые державы – Англия и Франция все подрывы осуществляли огневым способом. В 1850 г. появилась первая фрикционная подрывная машинка (изобретатель – австриец Барон фон Эбнер) и в 1851 г. – индукционная (изобретатель – граф Румкорф). Впоследствии они были заменены на магнето и динамические устройства. ЭВ в классическом понимании появились в конце 19 – начале 20 века [3, 18, 131].

Применительно к пиротехническим составам существует 4 основных типа ЭВ [25]:

- *Мостиковые ЭВ.* Воспламенение осуществляется при подаче тока на мостик накаливания. Частным и самым распространенным исполнением мостиковых устройств являются капельные ЭВ, в которых теплочувствительный состав наносится в виде капли на накальный мостик электровоспламенителя, где и застывает. Задача любого ЭВ – максимально быстро передать запальный импульс основному воспламенительному составу после подачи тока. Поэтому композиции для мостиковых ЭВ являются самыми теплочувствительными среди всех ПС. Наибольшее распространение получили смеси на основе азотетразолата и стифната свинца, а также хлората калия и тиоцианата свинца (в СССР они обрели популярность в 30-х годах 20 века) [130]. В Германии во время Второй мировой войны на мостик накаливания наносили смесь стифната свинца с 6-11% нитроцеллюлозы, в США на флоте использовали аналогичную смесь ХС-1А с 2% НЦ [2]. Известно об использовании в некоторых американских ЭВ динитробензофуроксаната калия (К-ДНБФ). В патенте [73] предложен воспламенительный состав (ВС), содержащий азид бария с добавкой 2% НЦ. Простейшие мостиковые воспламенители называются «*электро-воспламенительными головками*» (*electric match*).

- *Искровые ЭВ.* Не содержат электропроводящего мостика. Пространство между электродами заполняется инициирующим ВВ или (реже) специальным пиротехническим составом. При подаче высоковольтного (неск. кВ) импульса, состав срабатывает. Характеризуются очень малым временем и энергией срабатывания, однако очень восприимчивы к статическому электричеству. Используются в системах инициирования пьезоэлектрических взрывателей [130].
- *ЭВ с токопроводящим составом.* Относятся к безмостиковым ЭВ. Воспламенение осуществляется за счет подачи тока на промежуток, заполненный электропроводящим пиротехническим составом с достаточно высоким сопротивлением. Электропроводность обеспечивается добавкой в смесь небольшого количества порошка графита либо металла. Принцип действия безмостиковых ЭВ основан на том, что частицы проводящего компонента контактируют друг с другом в нескольких точках. Таким образом, в массе пиротехнического состава находится проводящая трехмерная «сетка». Один из множества путей протекания тока между электродами через эту сетку имеет наименьшее электрическое сопротивление. Ток вызывает омический нагрев частиц и концентрирование тепла по пути с наименьшим электрическим сопротивлением, которое, в свою очередь, воспламеняет теплочувствительные компоненты состава. Первые образцы таких ЭВ были разработаны немцами еще в начале Второй мировой войны для осуществления синхронной стрельбы сквозь плоскость винта самолета. В СССР токопроводящие составы разрабатывали в период с 1963 по 1972 г., а в 1970-1980 гг. были приняты на вооружение соответствующие электровоспламенители [130]. Раньше наиболее распространены были смеси ТНПС с графитом в различных пропорциях. Например, в Англии применяли смеси RD1653 и RD1654, содержащие 9-10% и 6-7% графита соответственно. Несколько позже ТНПС заменили основной свинцовой солью азотетразола [10]. Подобные ЭВ довольно устойчивы к статическому электричеству и применяются в том числе для электроинициирования снарядов к скорострельным пушкам. Из недостатков ЭВ с токопроводящим составом следует отметить достаточно большой разброс некоторых параметров даже в пределах одной партии. В настоящее время в США и ряде других стран разработаны и используются мостиковые и безмостиковые ЭВ, позволяющие осуществлять воспламенение как электричеством, так и ударом (гальвано-ударные втулки), чем достигается высокая степень надежности и унификации боеприпасов [74].
- *ЭВ с взрывающимся мостиком* (известные в США под аббревиатурой «*EBW*»). Эти электровоспламенители содержат металлическую проволочку, которая взрывается при пропускании через нее мощного электрического импульса. Выделившаяся энергия взрыва проволочки передается специальному воспламенительному составу либо ВВ. Отличаются устойчивостью к статическому электричеству и малой задержкой воспламенения, но требуют специальных источников питания. Используются в особо ответственных узлах космической и военной техники. Разновидностью сильноточных ЭВ являются инициирующие устройства с разрядным промежутком. Разрядный промежуток «обостряет» электрический импульс, обеспечивая меньший разброс параметров такого ЭВ.

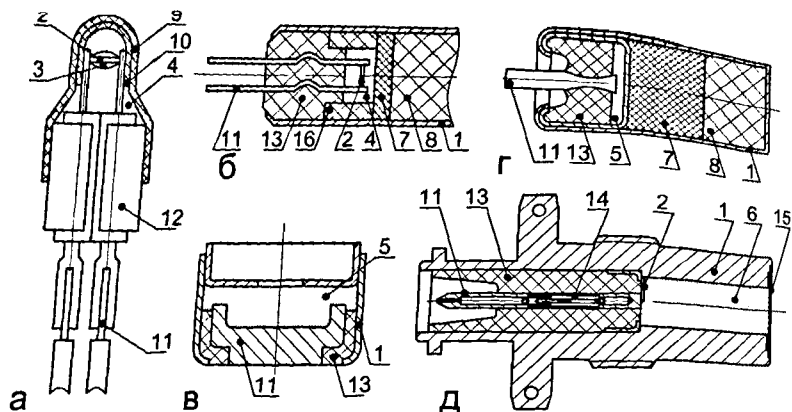


Рис. 4.3. Электровоспламенители (ЭВ) [19, 20, 25].

а) – электровоспламенительная головка капельного типа (electric match), б) – мостиковый ЭВ в составе электродетонатора, в) – безмостиковый электрический KB (электрокапсюльная втулка с электропроводным составом) типа М52А3В3, г) – безмостиковый электрический КД кнопочного типа с токопроводящим составом, д) – ЭВ с взрывающимся мостиком (EBW – воспламенитель).

1 – корпус, 2 – мостик накаливания, 3 – ЭВ состав в виде капли на мостике накаливания, 4 – ЭВ состав, 5 – электропроводный состав, 6 – воспламенительный состав, 7 – инициирующее ВВ, 8 – бризантное ВВ, 9 – защитный кожух, 10 – защитный колпачок, 11 – электроды, 12 – металлический зажим, 13 – изолятор, 14 – разрядный промежуток, 15 – мембрана, 16 – защитная втулка.

• ЭВ с полупроводниковым мостиком (ЭВПМ или «SCB» воспламенители). Представляют собой дальнейшую эволюцию мостиковых и EBW-воспламенителей. Содержат плоскую полупроводниковую структуру с тонкопленочным мостиком из кремния. При подаче короткого импульса (порядка 30 микросекунд) полупроводниковый мостик взрывается, формируя облако плазмы, которая вызывает воспламенение примыкающего к мостику пиротехнического состава. Прототип ЭВПМ был разработан в 1966 г., однако первая полупроводниковая структура, представляющая практический интерес, была запатентована американцами только в 1985 г. До этого времени американцы использовали специальные ЭВ с полупроводящим графитовым мостиком [121, 122]. В СССР разработка ЭВПМ была начата в 1978 г., ряд образцов нашел применение в военной и гражданской технике [130].

ЭВПМ имеют следующие преимущества над мостиковыми ЭВ [123]:

- количество энергии, которое необходимо затратить на срабатывание, примерно на порядок ниже, чем у классических мостиковых ЭВ;
- одновременно ЭВПМ имеют достаточно высокий порог по срабатыванию, т.к. полупроводниковый мостик обладает хорошей теплопроводностью. Соответственно, такие системы лучше защищены от статического электричества и наводок;
- компактные размеры;

– ЭВПМ отличаются очень малой задержкой срабатывания. Задержка от начала подачи импульса тока до прорыва мембраны пиропатрона может составлять несколько десятков микросекунд и даже меньше.

Из недостатков следует отметить несколько усложненную цепь электропитания воспламенителя. Ввиду указанных свойств ЭВПМ нашли применение в космической технике, в особо ответственных изделиях военной техники, в системах инициирования подушек безопасности и т.д.

Для снаряжения ЭВПМ пригоден достаточно широкий ассортимент электровоспламенительных смесей, однако габариты полупроводниковых мостиков в некоторых устройствах настолько малы, что требуется использование самых активных пиротехнических составов, например состава хлорат калия/цирконий (ЗРС) [124].

Табл. 4.14. Составы для нанесения на мостик накаливания ЭВ

Состав	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
КСО <sub>3</sub>	8,5	55	40	44,5	25	60	48,3	-	-	-	-	30	-	49,5	50	-	-	50	75	-	-	-
ДАНФ	-	-	-	-	-	75	20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Pb(SCN) <sub>2</sub>	-	45	32	35,5	-	-	48,3	-	-	-	-	-	-	49,5	47	-	-	35,7	-	-	-	-
др. уголь	-	-	18	20	-	15	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
пикрат Pb	-	-	-	-	-	-	-	90	45	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
PbO <sub>2</sub>	-	-	-	-	-	-	-	30	-	-	-	-	-	-	20	-	-	-	-	-	-	-
КСО <sub>4</sub>	-	-	-	-	-	-	-	10	-	64	-	65	-	-	60	-	-	-	-	-	-	52,5
цирконий	-	-	-	-	-	-	-	-	60	24	-	-	-	-	-	20	-	-	-	33	-	-
бор	-	-	-	-	-	-	-	-	12	7	-	-	-	-	20	-	-	-	25	-	20	42,5
KNO <sub>3</sub>	-	-	-	-	-	-	-	-	28	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Ba(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	34	-	-
пикрат K	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	23	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Pb <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	76	-	-	-	-	-
связка *	15	+	10	1,6	+	5	2,8	+	-	-	5	40	12	+	+	2	-	0,3	10	5	-	5
прочее **	76,5	-	-	-	-	-	0,6	10	15	-	-	30	-	-	3	-	4	14	-	33	80	-

1. Американский состав для простейших ЭВ: \* – НЦ; \*\* – мономитрозорцинат свинца [25].
2. Американский состав для ЭВ М59: \* – НЦ [25].
3. Американский состав в пиропатроне М2: \* – лак [2].
4. Американский состав для ЭВ М74: \* – лак [2].
5. Американский состав ХС-9 для Mk1 Mod 0: \* – 2,4% раствор нитрокрахмала [25].
6. Американский состав для ЭВ: \* – нитрокрахмал [25].
7. Американский состав для ЭВ: \* – ПВА; \*\* – аэросил [75].
8. Немецкий состав времен Второй мировой войны: \*\* – кремний [21].
9. Чешский современный состав: \*\* – силицид кальция [76].
10. Французский состав [77].
11. Французский состав: \* – Viton В [78].
12. Отечественный состав, применявшийся во время Второй мировой войны: \* – НЦ; \*\* – свинец железистосинеродистый [6].
13. Отечественный термостойкий состав: \* – 8% силиконовый полимер, 4% полиакрилат [79].
14. Отечественный состав: \* – НЦ [22].
15. Отечественный состав: \* – НЦ; \*\* – хромат свинца [22].
16. Отечественный термостойкий состав: \* – СКФ-26 [80].
17. Отечественный состав: \*\* – дисульфид молибдена [81].

18. Отечественный состав: \*\* – графит [82].
19. Отечественный состав: \* – НЦ сверх 100% [104].
20. Отечественный состав: \* – НЦ сверх 100%; \*\* – ТЭН [104].
21. Американский состав в мостике пиропатрона М796: \*\* – хромат кальция [107].
22. Американский состав в мостике пиропатрона ВВU-36/В: \* – Viton A [107].

**Табл. 4.15. 1-3 – мостиковые составы; 4-9 – токопроводящие составы; 10-15 – составы для ЭВ с взрывающимся мостиком (EBW)**

Состав	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
тенерес (ТНРС)	-	35	70	95	48	40	-	-	40	-	-	-	-	-	-
2,4-ДНОК* свинца	25	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
графит	-	-	-	5	2	0,8	-	-	1	-	-	-	-	-	1
хлорат калия - $\text{KClO}_3$	25	-	-	-	-	-	-	68	-	-	-	-	-	-	-
нитрат бария - $\text{Ba(NO}_3)_2$	-	-	-	-	12	44,2	20	-	37,2	-	-	-	-	-	-
двуокись свинца - $\text{PbO}_2$	-	45,5	-	-	-	-	20	-	-	-	-	-	-	-	-
перхлорат калия - $\text{KClO}_4$	-	-	20	-	28	-	-	-	-	66,7	66,7	55,8	77,5	-	42
перхлорат аммония - $\text{NH}_4\text{ClO}_4$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	32,7	-
силицид кальция - $\text{CaSi}_2$	-	-	-	-	10	13	-	-	-	-	-	-	-	-	-
цирконий	-	19,5	10	-	-	-	40	-	-	-	-	-	-	66,3	52
бор аморфный	-	-	-	-	-	-	-	5	-	-	-	-	-	-	-
ВВ (ТЭН)	-	-	-	-	-	-	20	-	-	-	-	-	-	-	-
титан	-	-	-	-	-	-	-	27	11,8	33,3	-	-	-	-	-
алюминий	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	33,3	31,4	22,5	-	-
ВВ (ТНР или тротил)	-	-	-	-	-	1	-	-	10	-	-	-	-	-	-
свинец	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	12,8	-	-	-
связка**	50	0,8	+	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	1	5

1. Смесь фирмы Дюпон «50/25/25» для мостиков коммерческих и военных ЭД: \* – основной 2,4-динитроортокрезилат свинца; \*\* – бездымный порошок [20].
2. Американский состав. Пригоден для использования в верхних слоях атмосферы [128].
3. Чешский состав: \*\* – фторкаучук в виде 6-10% раствора в бутилацетате св. 100% [126].
4. Первая запрессовка состава в воспламенителе M52 DEFA [33].
5. Вторая запрессовка состава в воспламенителе M52 DEFA [33].
6. Состав FA-874 для воспламенителя M52A3B3: \*\* – арабийская камедь [33].
7. Американская смесь FA-878 для снаряжения воспламенителей и ракетных пиропатронов Mk10, Mk11, Mk13, Mk17 [34].
8. Термостойкий состав [84].
- 9 - 11. Американские составы [23, 25].
12. Английская смесь SR817, впоследствии была заменена на более надежную SR818 [35].
13. Английская смесь SR818 [35].
14. Используется в американских воспламенителях XM-6, XM-8, MB-1: \*\* – НЦ [34].
15. Смесь ZPP. Используется в EBW-пиропатронах: \*\* – Viton A [34].

Теплового импульса от сгорания электровоспламенительной композиции, нанесенной на мостик накаливания, порой бывает недостаточно для надежной передачи луча огня к основному ВС. Поэтому в непосредственном контакте с электровоспламенительной композицией обычно находится навеска усиливающего ВС. В Англии для этих целей используют смесь RD1652 из стифната бария, хлората калия и антимония, а в США – целый ряд малогазовых ВС, которые при сгорании дают разогретые интерметаллидные соединения:

1. Свинец – 73,5%, селен – 25,5%, нитрокрахмал – 1% [2].
2. Сплав магний/церий – 51%,  $PbO_2$  – 40,5%, алюминий – 6,5%, связка – 2% (darco x). Используется в M103/M203 electric match [32].
3. Висмут – 48%, селен – 47%, хлорат калия – 5%. Устаревший состав фирмы DuPont [83].
4. Усиливающий заряд к германским ЭВ времен Второй мировой войны: перхлорат калия – 47%, ТНРС – 23%, силицид кальция – 30% [21].
5. Усиливающий заряд к ЭВ для американского 30 мм снаряда M788 содержит 44,6% нитрата бария, 40,3% – ТНРС, 13,1% – силицида кальция, 1% – тринитротрезорцина (ТНР) и 1% – связки [109].

## Литература

1. Барал Л.И. Химия и технология инициирующих взрывчатых веществ. - М.: Машиностроение, 1975.
2. PATR 2700. Encyclopedia of Explosives and Related Items./ Basil T. Fedoroff & Oliver E. Sheffield. Vol 4 – Piccattiny Arsenal Dover, New Jersey, USA – 1969.
3. PATR 2700. Encyclopedia of Explosives and Related Items./ Seymour M. Kaye. Vol 8 – Piccattiny Arsenal Dover, New Jersey, USA – 1978.
4. James Smyth Wallace. Chemical Analysis of Firearms, Ammunition, and Gunshot Residue. CRC Press. Taylor & Francis Group. Boca Raton. 2008.
5. Engineering Design Handbook. Explosive Trains. US Army Materiel Command. AMCP 706-179. 1974.
6. П.Ф. Бубнов, И.П. Сухов. Средства инициирования. Краткий курс. – М.: Оборонгиз, 1945.
7. Paul W. Cooper. Explosives Engineering. Wiley-VCH. 1996.
8. Brebera Stanislav etc. Specialni Technica. I Dil. Гл. ред. Urban Ladislav. Praha 1976.
9. Н.Г. Меньшиков. Альбом конструкций патронов стрелкового и крупнокалиберного автоматического оружия (от 6,5 до 37 мм). – М.: Артиллер. акад. КА им. Дзержинского, 1946.
10. L.T. Dunnett. Services Textbook of Explosives. Ministry of Defence. JSP333. 1974.
11. М.А. Будников и др. Взрывчатые вещества и пороха. - М.: Оборонгиз, 1955. С. 119.
12. Ellern H. Military and Civilian Pyrotechnics. Chemical Publishing Company Inc. New York. 1968.
13. A.P. Hardt. Pyrotechnics. Pyrotechnica Publications. 2001.
14. Engineering Design Handbook. Military Pyrotechnics Series. Part One. Theory and Application. US Army Materiel Command. AMCP 706-185. 1967.
15. Шидловский А.А. Основы пиротехники. - М.: Машиностроение, 1973.
16. Conkling J.A. Chemistry of Pyrotechnics. Basic Principles and Theory. NY. 1985.
17. Г.А. Быстров. Технология спичечного производства. - М.: Гослесбумиздат, 1961. С.60.
18. PATR 2700. Encyclopedia of Explosives and Related Items./ Basil T. Fedoroff & Oliver E. Sheffield. Vol 7 – Piccattiny Arsenal Dover, New Jersey, USA – 1975.
19. Ucební Podklady. Pro Odbornou Přípravu Odpalovačů Ohňostroju. Odborný Institut Speciální Techniky. Policka. CZ. 2000.
20. Вспомогательные системы ракетно-космической техники. - Пер. с англ. Н.В. Обезьяева и к.т.н. М.С. Шура. - М.: Мир, 1970.
21. Basil T Fedoroff etc. Dictionary of Explosives, Ammunition and Weapons (german section) Dover, New Jersey. 1958.
22. Щукин Ю.Г. Лютиков Г.Г., Поздняков З.Г. Средства инициирования промышленных взрывчатых веществ. - М.: Недра, 1996. С. 23.
23. PATR 2700. Encyclopedia of Explosives and Related Items./ Basil T. Fedoroff & Oliver E. Sheffield. Vol 5 – Piccattiny Arsenal Dover, New Jersey, USA – 1972.
24. R. Hagel and K. Redecker. Sintox - A New, Non-Toxic Primer Composition by Dynamit Nobel AG. Propellants, Explosives, Pyrotechnics 11, 184-187 (1986).
25. F. L. McIntyre, R.M. Rindner. A Compilation of Hazard and Test Data for Pyrotechnic Compositions. ARLCD-CR-80047. 1980.

26. Def. Standard 13-173. Ministry of Defence. Glasgow 1995.
27. Def. Standard 13-179. Ministry of Defence. Glasgow 1995.
28. Frost George E. Ammunition making. National Rifle Association (NRA), Fairfax, VA. 1990.
29. Frank J. Valenta. Variables Affecting the Output of Low Brisance Percussion Primers. Proceedings of Twenty-Eighth International Pyrotechnics Seminar. Adelaide, South Australia. 2001.
30. Michael Ellis. Environmentally Acceptable Medium Caliber Ammunition Percussion Primers. WP-1308. 2007.
31. J. Bentley and P. Elischer. Gasless Pyrotechnic Cap. Proceedings of the Sixth International Pyrotechnics Seminar 12-21 July 1978.
32. Guenter Klingenberg, John D. Knapton etc. Flame Temperatures and Internal Pressures of Pyrotechnic Igniters Used in Liquid Propellant Gun Firings. Tech Report ARBRL-TR-0398. US ARDEC. 1982.
33. Spear, Robert J. and Redman, Lance D. The Origin of Performance Differences Between Two Conducting Composition (CC) Primers, Journal of Energetic Materials, 3, 173 – 186. 1985.
34. Donald H. Barrett. Solid Rocket Motor Igniters. /ed. Russell B. Keller. NASA SP-8051. 1971.
35. W.P. Walker, Development of an Aluminum/Potassium Perchlorate Mixture for Use in a Bursting Bridgewire Igniter, Atomic Weapons Research Establishment, England. Proceedings of the Sixth International Pyrotechnics Seminar 12-21 July 1978.
36. Пат. FR2650586 от 1989 г.
37. Пат. RU2296733 от 2005 г.
38. Пат. RO102058 от 1988 г.
39. Пат. RU2245315 от 2003 г.
40. Пат. RU2209808 от 2001 г.
41. Пат. RU2399021 от 2009 г.
42. Пат. RU2175652 от 2000 г.
43. Пат. RU2179962 от 2001 г.
44. Пат. RU2188811 от 2000 г.
45. Пат. RU2106330 от 1995 г.
46. Пат. DE2952069 от 1983 г.
47. Пат. US4581082 от 1984 г.
48. Пат. US5492577 от 1994 г.
49. Пат. US2095302 от 1934 г.
50. Пат. US4608102 от 1984 г.
51. Пат. US5538569 от 1995 г.
52. Пат. US6997998 от 2004 г.
53. Пат. RU2086523 от 1996 г.
54. Пат. RU2199511 от 2001 г.
55. Пат. RU2317966 от 2006 г.
56. Пат. RU2269503 от 2004 г.
57. Пат. US6165294 от 1998 г.
58. Пат. DE3530184 от 1985 г.
59. Пат. RU2309138 от 2006 г.
60. Пат. CZ280132 от 1992 г.
61. Пат. PL130357 от 1983 г.
62. Пат. RU2199515 от 2002 г.
63. Пат. RU2205817 от 2001 г.
64. Пат. RU2253647 от 2003 г.
65. Пат. PL175072 от 1994 г.
66. Пат. PL320604 от 1997 г.
67. Пат. EP0489939 от 1990 г.
68. А.с. СССР SU624910 от 1978 г.
69. Пат. RU2258058 от 2003 г.
70. Пат. RU2276126 от 2003 г.
71. Пат. GB2227815 от 1989 г.
72. Пат. GB2148870 от 1984 г.
73. Пат. RU2233258 от 2002 г.
74. Пат. US4386567 от 1981 г.
75. Пат. US5750922 от 1996 г.
76. Пат. CZ280175 от 1993 г.
77. Пат. EP0076746 от 1981 г.
78. Пат. FR2861389 от 2003 г.
79. Пат. RU2315027 от 2006 г.
80. Пат. RU2202100 от 2000 г.
81. Пат. RU2297404 от 2005 г.
82. А.с. СССР 184677 от 1966 г.
83. Пат. US2607672 от 1948 г.
84. Пат. US4994125 от 1989 г.
85. Пат. DE0656332 от 1994 г.
86. Королев В.П., Бибнев В.М., Баскаков Ю.М., Колесов В.И., Евдокимова И.Ф., Ховансков В. Н. Новое направление создания ударно-воспламенительных составов и капсулей-воспламенителей на их основе: Материалы 2-й Всероссийской конференции «Энергетические конденсированные системы», Черногоровка, 2004. С. 40.
87. C.A. Finch, S. Ramachadran. Matchmaking. Science, Technology and Manufacture. Ellis Horwood Limited/Halsted Press. 1983.
88. Пат. IT413509 от 1946 г.
89. Пат. GB1506185 от 1978 г.
90. Пат. FR1523349 от 1968 г.
91. Пат. FR2051933 от 1976 г.
92. Пат. JP73/23909 от 1973 г.
93. Пат. US3650712 от 1972 г.
94. Пат. SP281960 от 1963 г.
95. А.с. СССР SU514801 от 1976 г.

96. Пат. JP75/11445 от 1975 г.
97. Пат. US3329521 от 1967 г.
98. А.с. СССР SU391120 от 1973 г.
99. Пат. DE1943866 от 1977 г.
100. Hartig H. Zundwaren, pp 93-96. 1971: Leipzig. VEB Fachbuchverlag.
101. В.Н. Лашков, Н.В. Потанина, А.А. Селезнев, И.Н. Коломыцева. Определение термической стабильности и оптимизация по характеристикам горения спичечных зажигательных составов. Proceedings of the Twenty-First International Pyrotechnics Seminar. September. 11-15. 1995.
102. Пат. RU2153484 от 1999 г.
103. Пат. RU2074847 от 1995 г.
104. Материалы Интернет-ресурса [www.pyrotechnics.net.ru/](http://www.pyrotechnics.net.ru/) Материалы лекций Дудырева А.С., «Разработка пиротехнических составов». Переработка и оформление Е. Мисоночкиковой и Королева Д.В.
105. Joel Sandstrom. Composite Primer. Next Generation Primer Technology. Презентация американской корпорации «АТК». 2012.
106. Пат. US8062443 от 2009 г.
107. <http://www.acc.af.mil/shared/media/document/AFD-070802-066.pdf>.
108. Marianne E. Walsh, Charles M. Collins, Charles H. Racine, Thomas F. Jenkins, Arthur B. Gelvin, and Thomas A. Ranney. Sampling for Explosives Residues at Fort Greely, Alaska. ERDC/CRREL TR-01-15. November 2001.
109. MIDAS database 2007.
110. Пат. US4429632 от 1981 г.
111. Пат. RU2443969 от 2010 г.
112. Пат. US4963201 от 1990 г.
113. Пат. US5216199 от 1991 г.
114. Пат. US5684268 от 1995 г.
115. Oliver Dalby, David Butler, and Jason W. Birkett. Analysis of Gunshot Residue and Associated Materials – A Review. J Forensic Sci, July 2010, Vol. 55, No. 4.
116. Tom Warlow. Firearms, the Law and Forensic Ballistics. – Second Edition. CRC Press. Boca Raton. 2005.
117. Пат. DE4012663 от 1990 г.
118. T. Urbanski. Chemia I Technologia Materialow Wybuchowych. Tom III. Warszawa. 1955.
119. Пат. WO2012/011897 от 2010 г.
120. Пат. US8182622 от 2011 г.
121. Пат. US3366055 от 1966 г.
122. Пат. US4708060 от 1985 г.
123. R.W. Bickes, M.C. Grubelich, J.K. Hartman, C.B. McCampbell, J.K. Churchill. A Low Cost Igniter Utilizing an SCB and Titanium Subhydride Potassium Perchlorate Pyrotechnic. Second NASA Aerospace Pyrotechnic Systems Workshop. Compiled by William W. St. Cyr. 1994.
124. Peter L. Langsjoen. Development of an Improved Ignition Train for the 120mm Tank Ammunition Primer. For presentation at the NDA 39th Annual Gun & Ammunition / Missiles & Rockets Conference & Exhibition. April 13-16, 2004, Baltimore, MD.
125. А. Штетбахер. Пороха и взрывчатые вещества. ОНТИ. Главная редакция химической литературы. Москва. 1936.
126. Пат. CZ126696 от 1996 г.
127. Kaimin Wang, Yuquan Wen. Design of Initiators and Pyrotechnics for Weapon Systems. Beijing Shi: Gong fang gong ye chu ban she, 2006 (in Chinese).
128. PATR 2700. Encyclopedia of Explosives and Related Items./ Seymour M. Kaye & Henry L. Herman. Vol 10 – Piccattiny Arsenal Dover, New Jersey, USA – 1983.
129. ОАО «НПП «Краснознаменец». Первое капсюльное предприятие России. 170 лет: создание, становление и деятельность. / Под общ. ред. В.И. Вареницы. – СПб: «Компьютербург», 2013.
130. Взрывчатые вещества, пиротехника, средства инициирования в послевоенный период: Люди. Наука. Производство. Второе издание. /Коллектив авторов. – М.; СПб.: Издательство «Гуманистика». – 936 с., 2002.
131. М.М. Граевский. Изобретение и развитие электровзрывания в России. Журнал «Горная промышленность» №2, 2001. <http://www.mining-media.ru/ru/article/company/1906-izobretenie-i-razvitie-elektrovzryvaniya-v-rossii>.

## Глава 5. Воспламенительные составы

Подавляющее большинство пиротехнических смесей не способно надежно воспламеняться от составов первичного воспламенения, поэтому необходимо использовать специальные воспламенительные композиции. Воспламенительные составы (ВС) обычно подпрессовывают к основным составам. Также распространены впрессовка гранул ВС непосредственно в поверхность основного состава и нанесение ВС в виде застывающей пасты.

В отечественной классификации различают обычные и переходные ВС. При этом переходными называют композиции, полученные смешением в нужной пропорции воспламенительного и основного состава. Если основной состав воспламеняется особенно трудно, этих переходных составов может быть запрессовано несколько, при этом в каждой запрессовке соотношение между ними изменяется с определенным шагом [1].

### В США ВС классифицируются следующим образом [15]:

- *Ignition mixtures* (IM) – это ВС с высокой чувствительностью к лучу огня. Они служат для развития слабого теплового импульса, полученного от первичного источника (например, капсюля-воспламенителя) и передачи этого импульса основному ВС.
- *First fire* (FF) – ВС, наносимый непосредственно на основной состав. Основная задача First Fire – покрыть поверхность основного состава раскаленными шлаками с целью вызвать его воспламенение. Являются самым уязвимым элементом в пиротехнической цепи с точки зрения надежности передачи теплового импульса.
- *Starter mixtures* (SM) – аналогично First Fire наносятся непосредственно на основной состав и имеют то же назначение. Поэтому некоторые авторы книг по пиротехнике не делают различий между First Fire и Starter mixtures. Starter mixtures применяются в больших количествах для энергичного разгорания основной пиротехнической смеси и несут то же функциональное назначение, что и переходные составы. Эти смеси также отличаются видом входящих в состав компонентов. Если в First Fire используют самые легко воспламеняющиеся горючие наподобие титана или циркония, то для Starter mixtures характерны более «инертные» горючие вроде алюминия, кремния, силицида кальция и т.д.

Температура горения ВС должна быть как минимум на 200°C выше температуры воспламенения основного состава.

Успешность воспламенения реального пиротехнического заряда зависит не только от температуры начала термического разложения воспламеняемой пиротехнической смеси, но и от характера теплоотвода в несгоревшую область состава. Чем больше теплопроводность и теплоемкость воспламеняемой смеси, тем интенсивнее нужно подводить тепло, чтобы зажечь состав. По этой причине запрессованные составы воспламеняются гораздо труднее, чем в насыпном состоянии.

Среди продуктов сгорания воспламенительных составов лучше всего аккумулируют тепло жидкие и твердые шлаки. Поэтому надежность воспламенения будет тем выше, чем больше нагретых шлаков останется на поверхности воспламеняемого изделия.

**Следовательно, можно сформулировать основные требования к воспламенительным составам [1]:**

- Легкость воспламенения от первичного теплового импульса.
- Способность оставлять максимальное количество шлаков на поверхности поджигаемого изделия. При этом шлак должен быть плотным, а для обеспечения эффективной теплопередачи должен иметь хорошую адгезию к основному составу.
- Компоненты воспламенительного и основного состава должны иметь максимальную физическую и химическую совместимость. Между ними не должны идти химические реакции. По этой причине многие воспламенительные составы часто состоят из тех же веществ, что и основной состав, но с другим соотношением компонентов, обеспечивающим легкость воспламенения.
- ВС не должен портить или искажать пиротехнический эффект основного состава. Такое искажение наиболее заметно при воспламенении составов цветных сигнальных огней или цветных дымов. В первом случае возможно искажение цвета в начальный момент горения пиротехнической звездки. Во втором случае аэрозоль органического красителя может воспламеняться при выходе из шашки, если выбран ВС с высокой температурой горения.

Из-за наличия последних двух пунктов большинство ВС имеют определенные особенности, из-за которых они пригодны для воспламенения только какой-то определенной группы или групп ПС.

Подбор ВС обычно осуществляют эмпирически с учетом требований по энергетике, температуре горения, шлакообразованию, совместимости и виду воспламеняемого материала.

## **5.1. ВС для малогазовых составов**

Некоторые малогазовые составы (МГС типа  $\text{KMnO}_4/\text{Sb}$ ,  $\text{PbO}_2/\text{Zr}$  и др.) для замедлителей сами по себе довольно хорошо воспламеняются от первичных источников типа капсюля-воспламенителя. Поэтому подбор ВС может ограничиваться подпрессовкой со стороны капсюля слоя того же малогазового состава, содержащего наиболее благоприятное для успешного воспламенения соотношение компонентов. В остальных случаях требуется специальный воспламенительный состав. Безусловно, он должен обладать всеми свойствами малогазовых составов – обеспечивать малый временной разброс при воспламенении и не образовывать газов. Наиболее часто для этих целей используют малогазовые составы – вспышки [2]. Например, смесь мелкодисперсных титана 80% и бора 20% [38], смесь 90% свинцового сурика и 10% силикокальция, замешанная на 3% нитролаке [86], а также композиции на основе циркония или бора [3].

Табл. 5.1. Воспламенительные смеси для малогазовых составов

Состав	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
KClO <sub>4</sub>	-	-	-	50	-	-	-	-	-	-	31	-	-	-	-	-	4,5	15	-	-	-	-	-	75
PbO <sub>2</sub>	70	70	-	-	-	90	-	-	-	-	-	-	-	-	-	30	-	-	-	-	-	50	-	-
PbO	-	-	-	-	50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Pb <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	80	-	85	55	-	80	-	-
BaCrO <sub>4</sub>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	75	-	-	-	-	-	90	-	60	-	-	-	-	-	-
MoO <sub>3</sub>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	26	31,3	25	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	20	16	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	21
Bi <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	49	-	-	-	-	-	-	-	-	-	66
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	-	39	-	-	-	25	49	50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Zr	-	30	51	50	50	-	65	41	33	25	53	48,7	58	48	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
бор	30	-	-	-	-	10	-	-	-	-	-	-	-	-	10	-	4,5	-	-	-	-	-	25	12
кремний	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	40	-	-	15	45	50	-	-	-
Al	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	7,5	-	-	-	-	-	-	-
TiB <sub>2</sub>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	20	-	-	-	-	-	-
диатомит	-	-	10	-	-	-	10	10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
прочее *	-	-	-	-	-	-	-	-	17	-	-	-	-	1	3	1	30	3,5	5	0,5	+	2	20	-

- 1 - 6. Американские составы [2, 3, 15, 19, 20].
7. Американский состав A1A [15].
8. Американский состав F33B [16].
9. Американский состав: \* – титан [3].
10. Американский состав Z-3 [4].
11. Американский состав SI-98 [3].
12. Американский состав SI-113 [3].
13. Американский состав: \* – VAAR. Воспламеняет замедлители с вольфрамом [17, 18].
14. Шведский состав: \* – 1% стеарата цинка, 2% связующего [39].
15. Американский состав: \* – VAAR св. 100% [3].
16. Американский состав «6-6-8»: \* – окись меди [2].
17. Отечественный термостойкий состав: \* – кремнийорганический лак [40].
18. Отечественный термостойкий состав для воспламенения медленногорящих замедлительных смесей: \* – фторкаучук [41].
19. Отечественный состав, воспламеняет малогазовый столбик хромат свинца/кремний в ЭД [76, 77].
- 20-21. Отечественные составы, воспламеняют МГС в короткозамедленных ЭД [77, 78].
22. Японский состав времен конца Второй мировой войны. Разработан для воспламенения состава Pb<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/Fe-Si/PbCrO<sub>4</sub>: \* – ферросилиций [81].
23. Воспламенитель-вспышка (замена состава пп. 13) [17, 85].
24. Английский состав SR-92 для воспламенения составов пироавтоматики и МГС. Используется предположительно с 1940-1950 гг. 20 века [84].

## 5.2. ВС для термитных составов

Термиты характеризуются наибольшей температурой воспламенения и теплопроводностью среди всех рассматриваемых ПС. Поэтому они должны воспламеняться самыми высокотемпературными композициями, содержащими много металлического горючего и образующих в большом количестве расплавленные шлаки. Легкость воспламенения этих композиций и повышенное шлакообразование обычно обеспечивается наличием специфических окислителей наподобие перекиси бария [1].

**Табл. 5.2. Воспламенительные смеси для термитных составов**

Состав	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
хлорат калия - $\text{KClO}_3$	-	-	-	-	-	60	-	-	-	-	25	-	-
свинцовый сурик - $\text{Pb}_3\text{O}_4$	-	-	70	25	25	-	-	-	-	-	-	-	-
трехокись железа - $\text{Fe}_2\text{O}_3$	-	-	-	25	-	-	70	48	-	-	-	-	-
железная окалина - $\text{Fe}_2\text{O}_3$	29	-	-	-	25	-	-	-	-	-	-	57,5	-
перекись бария - $\text{BaO}_2$	31	91	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	75
окись марганца IV - $\text{MnO}_2$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	50	-	-
нитрат калия - $\text{KNO}_3$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	66	-	7	-
хромат бария - $\text{BaCrO}_4$	-	-	-	-	-	-	-	-	34	-	-	-	-
перхлорат аммония - $\text{NH}_4\text{ClO}_4$	-	-	-	-	-	-	-	-	14	-	-	-	-
дихромат аммония - $(\text{NH}_4)_2\text{Cr}_2\text{O}_7$	-	-	-	-	-	-	-	-	7	-	-	-	-
пороховая мякоть (ПМ)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	10	-
алюминий - Al	40	-	-	-	-	-	-	-	-	8	10	17,5	22
магний - Mg	-	9	-	-	-	35	-	-	-	-	-	8	3
титан - Ti	-	-	30	25	25	-	30	31,5	-	11	-	-	-
цирконий - Zr	-	-	-	-	-	-	-	17,5	45	-	-	-	-
кремний - Si	-	-	-	25	25	-	-	-	-	6	-	-	-
серы - S	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2	15	-	-
древесный уголь	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5	-	-	-
связка *	-	-	-	4,5	4,5	5	-	3	-	2	-	-	-

- 1-2. Американские составы [1].
3. Американский ВС «FF-30» в устройстве уничтожения криптографического оборудования M1A2 и M2A1 (воспламеняет обыкновенный термит) [15].
4. Американский ВС «FF-VII» для воспламенения термитных смесей в зажигательной гранате AN-M14, зажигательной бомбе M36, средстве уничтожения документов M3: \* – НЦ св. 100% [15, 21].
5. Модификация FF-VII: \* – НЦ сверх 100% [15].
6. Воспламеняет термит в пиротехническом сварочном стержне: \* – олифа [42].
7. Отечественный состав [43].
8. Американский состав для воспламенения термита в пиротехническом резаке: \* – полиакрилат [44].
9. Состав для воспламенения смеси  $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Mg}/\text{KClO}_4$  34/36/30 [45].
10. Новый американский состав для воспламенения термита в зажигательной гранате XM-89 (замена ВС «FF-VII», содержащего токсичный свинец): \* – полиакриловое связующее [22].
- 11-13. Отечественные воспламенители для сварочного термита [5].

### 5.3. ВС для газогенерирующих составов

Подбор ВС для газогенерирующего состава зависит от того, для каких целей используется газогенератор. В автомобильных газогенераторах на первый план выходят малая дымность и низкая токсичность, в составах для генерирования тех-то определенных газов – идентичность газового состава продуктов сгорания ВС продуктам сгорания основной смеси либо отсутствие газов вовсе.

Так, например, для воспламенения кислородных свечей используется состав: титан – 14%, окись меди – 75%, бор – 4, перекись кальция – 7% [46].

#### 5.4. ВС для сигнальных и осветительных составов

Для воспламенения хлоратных сигнальных и осветительных составов до Второй мировой войны зачастую было достаточно подпрессовки гранул дымного пороха или состава, содержащего 75% нитрата калия, 15% древесного угля и 10% идитола [1]. При этом гранулы пороха или ВС внедряются в сигнальную звезду, а большая поверхность соприкосновения с основным составом компенсирует сравнительно невысокую воспламеняющую способность дымного пороха и обеспечивает надежность срабатывания. Во время Второй мировой войны появились сигнальные составы с большим количеством порошкообразного металла, которые уже было не так просто поджечь дымным порохом. В дымном порохе содержится сера, которая в присутствии влаги реагирует с магнием с выделением сероводорода (при хранении изделий во влажной атмосфере). Сероводород реагирует с солями тяжелых металлов в средствах инициирования сигнальных изделий – и это приводит к отказам [6]. Поэтому были разработаны специальные воспламенительные составы. Впрочем, в ряде современных гражданских сигнальных изделий все еще используется подпрессовка гранул пороха.

Для простейших сигнальных средств, во избежание демаскировки солдат, желательно, чтобы при горении ВС выделялось мало света. Подобный тусклый состав может содержать: 41,66% окиси свинца, 23,44% кремния, 11,46% марганца и 23,44% связки [47].

**Табл. 5.3. Воспламенительные смеси для сигнальных и осветительных составов**

Состав	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
KNO <sub>3</sub>	16	46	40	-	-	-	-	75	-	33	-	30	78,5	70	-	27	70,7	40	-	58
Ba(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	16	-	-	-	50	-	50	-	53	-	-	-	-	-	-	31	-	-	-	-
Sr(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	-	-	-	-	-	50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
KClO <sub>4</sub>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	74	-	-	-	36,4	-	-	-	-	-
BaO <sub>2</sub>	-	-	-	42,5	-	-	-	-	-	-	-	40	-	-	-	-	-	-	66	-
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	20,7	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-
(NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> Cr <sub>2</sub> O <sub>7</sub>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	10,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-
кремний	-	-	-	-	20	16	13	-	10	24,5	-	-	-	-	-	24	-	40	-	-
ZrH <sub>1,99</sub>	-	-	-	-	15	15	20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
магний	-	-	-	5	-	-	-	15	-	-	-	18	-	10	36,4	-	-	-	19	-
алюминий	10	11	30	2,5	-	-	-	-	20	12	-	-	-	-	-	3	-	-	-	-
сера	8	11	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ферросилиций	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5	-	-	-	-	-	-	-	-
бор	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	12,5	-	-	-	23,6	-	-	19
железо	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	10	-	-	-	-	-	-
ПАМ	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	10	-	-	-	-	-	-
ТНК**	-	-	30	-	10	10	10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ПМ	50	29	-	50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	25	-	-	20	-	-
древ. уголь	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3,8	-	-	-	-	-	9	-	-	-	-
ПВХ	-	-	-	-	-	5	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ПТФЭ	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	18
прочее*	-	3	-	-	5	4	4	10	17	6	10,5	7	9	10	2,2	6	5,7	-	15	5

1. Немецкий ВС времен Второй мировой войны [6].
2. Немецкий ВС времен Второй мировой войны; \* – цирконий [6].
3. Немецкий ВС конца Второй мировой войны. Этим составом заменили предыдущие композиции, содержащие серу: \*\* – тетранитрокарбазол [6].
4. Американский ВС для воспламенения трассирующих, осветительных и сигнальных составов времен Второй мировой войны и в послевоенные годы [23].
5. Американский состав FF тип I, внедренный в начале 60-х годов 20 века и использующийся до сих пор для воспламенения сигнальных и осветительных звездок желтого пламени. Применяется в сигнальных средствах МК-24, 105 мм снарядах М314А3 и т.д.: \* – ламинак [15, 20].
6. Американский состав FF тип II для воспламенения звездок красного огня: \* – ламинак [20].
7. Американский состав FF тип III для воспламенения звездок зеленого огня: \* – ламинак [20].
8. Отечественный состав: \* – идитол [1].
9. Французский состав: \* – 10% НЦ, 7% полиэфирной смолы [48].
10. Американский состав starter mix №25 для воспламенения звездки в зеленой сигнальной ракете: \* – НЦ [18].
11. Состав Г. Эллера «FC-2» 50-х годов 20 века: \* – НЦ. Используется в Mk24 Mod3 и 4 [4].
12. Отечественный состав В-6М, раньше использовался с черным порохом в соотношении 50/50: \* – идитол [7, 72].
13. Современный американский состав для воспламенения в условиях низкого давления: \* – 7% полиакриламида и 2% стекловолокна [49].
14. Отечественный состав: \* – идитол св. 100% [50].
15. Американский состав, ранее использовавшийся в изделиях M113 и M114: \* – связующее [2].
16. Немецкий состав: \* – связующее [24].
17. Первичный воспламенитель в 60 мм инфракрасной мине XM767: \* – Viton A [25].
18. Английский состав SR-252. В качестве ПМ применяется бессерный дымный порох. Иногда используется для воспламенения фейерверочных звездок [13].
19. Американский состав для воспламенения звездки зеленого пламени в Mk122 Mod 0; \* – 9,4% дехлорана и 5,6% ламинака. В составе для воспламенения звездки желтого пламени в изделии Mk123 Mod 0 содержится 14% перекиси стронция за счет содержания перекиси бария [82].
20. Американский состав SI-282. Используется для воспламенения осветительной звездки в 40 мм выстреле M583A1: \* – ламинак [20].

## 5.5. ВС для трассирующих составов

ВС для трассирующих составов бывают 2-х типов: тусклые (dim) и обычные. Они должны надежно инициировать воспламенение основного трассирующего состава при высоких механических нагрузках и резких перепадах давления при выстреле, а также легко воспламеняться от пороховых газов.

Горение тусклых ВС практически не сопровождается видимым излучением, что обеспечивает вынос трассы на 50-200 м от места выстрела. Вынос трассы предотвращает демаскировку огневой позиции и устраняет слепящее действие, мешающее прицеливанию ночью. Горение тусклого состава, в свою очередь, инициирует воспламенение обычного ВС, содержащего большое количество магния и поэтому способного воспламенить основной трассирующий состав. В инфракрасных трассерах они либо непосредственно воспламеняют основной заряд, либо используются переходные составы. Тусклые ВС используются в ряде трассирующих боеприпасов калибром более 7,62 мм (включительно), однако они не настолько распространены, как это принято считать.

Обычные ВС для трассеров схожи с ВС для сигнальных и воспламенительных составов, часто содержат металл и перекись стронция/бария для легкости вос-

пламенения. К шлакам, образующимся при сгорании таких ВС, предъявляются определенные требования – они должны быть сыпучими, чтобы избежать зашлаковывания выходного трассирующего отверстия и искажения пиротехнического эффекта горения трассирующего состава [51]. При сгорании ВС для трассеров должно выделяться относительно небольшое количество газов, чтобы состав не выгорал преждевременно [4].

Табл. 5.4. Тусклые ВС для трассеров

Состав	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
нитрат калия - $KNO_3$	-	-	-	50	-	-	-	70,5	-	-	-	-	8	-	-	-
перхлорат калия - $KClO_4$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	55
перекись бария - $BaO_2$	-	-	-	0,8	81	78,4	-	-	4	59	-	82	53	-	82	-
перекись стронция - $SrO_2$	90	84,6	88-91	-	3	-	-	-	78	-	-	-	-	-	-	-
свинцовый сурь - $Pb_2O_3$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	72	-	-	64,5	-	-
хромат свинца - $PbCrO_4$	-	-	-	-	-	-	50	-	-	-	-	-	-	-	-	-
двуокись олова - $SnO_2$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	36	-	-	-	-	-	-
магний - $Mg$	-	6	-	2,7	-	2,2	-	-	-	-	-	-	4	2	-	-
поливинилхлорид (ПВХ)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	22	-	-	-
марганец - $Mn$	-	-	-	-	-	-	32,5	-	-	-	-	-	-	-	16	-
ферросилиций (Fe-Si)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	25	15	-	20	-	-
аморфный бор - $B$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	7	-	42,5
сера - $S$	-	-	-	6,1	-	-	17,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-
древесный уголь	-	-	-	15,9	-	-	-	29,5	-	-	-	-	-	-	-	-
антимоний - $Sb_2S_3$	-	-	-	13,9	-	18,4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
силицид кальция - $CaSi_2$	-	-	-	-	9	-	-	-	7	-	-	-	-	-	-	-
связка *	10	9,4	9-12	10,6	4	-	-	-	7	5	3	3	8	2	2	5
прочее**	-	-	-	-	3	1	-	-	4	-	-	-	5	4,5	-	-

1. Американский состав I-136, разработан еще до Второй мировой войны, но используется до сих пор в пулях калибром 7,62 мм: \* – резинат кальция [15, 21].
2. Американский состав I-194: \* – резинат кальция [20].
3. Современный американский состав для воспламенения ИК-трассеров: \* – полиуретан [52].
4. Немецкий состав начала Второй мировой войны для 7,92 мм трассирующих пуль: \* – фенолформальдегидная смола [6].
5. Немецкий состав конца Второй мировой войны для 7,92 мм трассирующих пуль: \* – фенолформальдегидная смола; \*\* – стронция оксалат [6].
6. Устаревший состав для воспламенения трассера в американских снарядах калибром 20 мм: \* – графит [53].
7. Американский состав времен Второй мировой войны [2].
8. Английский состав времен Второй мировой войны и позже [8].
9. Американский состав: \* – резинат кальция; \*\* – двуокись свинца [54].
10. Шведский состав. Использовался в трассерах для ПТУР: \* – парлон [55].
11. Чешский состав для патронов 7,62 мм: \* – нитроцеллюлоза [58].
12. Чешский состав: \* – идитол [57].
13. Отечественный состав ВТЗ-3: \* – идитол; \*\* – сульфат бария [72].
14. Отечественный состав: \* – фторопласт 32Л; \*\* – 4% окиси железа и 0,5% графита [51].
15. Устаревший американский состав [10].
16. Американский современный состав пониженной яркости горения для использования с комбинированными учебными трассерами: \* – Viton A. Соотношение компонентов в частях [74].

Табл. 5.5. Обычные ВС для трассеров

Состав	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
KNO <sub>3</sub>	48	12	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Ba(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	48	45	22	48
Sr(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
BaO <sub>2</sub>	-	-	39,6	63,8	78	81	86	4	-	79	80,5	-	-	-	-	3,4	30	32	55	30
SrO <sub>2</sub>	-	-	-	5,3	-	-	-	70	76,5	-	-	65	71,6	30	74,25	65,6	-	-	-	-
PbO <sub>2</sub>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4,8	-	-	3,4	-	-	-	-
Sr ликрат	-	-	14,2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
цирконий	52	13	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
магний	-	-	30	16	20	17	12	25	15	14	16,5	15	15,7	27,5	17,5	21,6	13	16	17	13
Zn стеарат	-	-	-	-	-	-	1	1	-	0,9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ПМ	-	75	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
связка*	-	-	9,4	4,3	2	2	-	-	8,5	5,6	2	20	7,9	15	8,25	6	9	7	6	9
прочее**	-	-	6,8	10,6	-	-	1	-	-	0,5	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-

- 1-2. Немецкие составы времен Второй мировой войны [6].
3. Немецкий ВС времен Второй мировой войны для 7,92 мм трассирующих пуль: \* – фенолформальдегидная смола; \*\* – оксалат натрия [6].
4. Немецкий ВС начала Второй мировой войны для 7,92 мм трассирующих пуль: \* – шеллак; \*\* – свинцовый сурок [6].
5. Американская композиция «К» времен Второй мировой войны: \* – асфальтит [2].
6. Американская композиция «К-29»: \* – резинат кальция. ВС в 40 мм снарядах М81 и М81А1 [15].
7. Американская композиция I-181: \*\* – краситель [2].
8. Американская композиция I-237. ВС в крупнокалиберных патронах [2].
9. Американская композиция I-280: \* – резинат кальция [15].
10. Американская композиция I-508: \* – парлон; \*\* – краситель [15].
11. Американская композиция I-527: \* – резинат кальция; \*\* – графит [20].
12. Американская композиция I-548: \* – резинат кальция [21].
13. Американская композиция I-559: \* – резинат кальция. ВС для пуль калибра 5,56 мм [15].
14. Американская композиция I-560: \* – ПВХ. Промежуточный ВС для пуль калибра 5,56 мм [15].
15. Американская композиция I-561: \* – резинат кальция. Замена I-559 для пуль калибра 5,56 мм [18].
16. Американская композиция R-20C: \* – резинат кальция. ВС для пуль калибра 7,62 мм [15].
17. Отечественный ВС времен Второй мировой войны: \* – идитол [11].
18. Отечественный ВС №3: \* – идитол [7].
19. Чешский ВС: \* – идитол [73].
20. Чешский ВС: \* – канифоль [73].

## 5.6. ВС для фейерверочных составов

Фейерверочные составы (преимущественно звезды), как правило, изготавливаются приемами, отличными от прессования. А упорядоченная укладка прессовых звездок в фейерверочное изделие не всегда возможна. Поэтому традиционный метод подпрессовки гранул пороха или ВС в торец пиротехнической звезды для них не подходит. Наиболее оптимальным является метод нанесения ВС на поверхность пиротехнических элементов путем обмазки звездок пастообразной воспламенительной композицией. Эти композиции по составу обычно представляют собой дымный порох, замешанный на растворимом в воде или в

орг. растворителе связующем, поэтому их часто называют «*пороховыми намазками*». Намазки для звезд, содержащих магний, во избежание реакций взаимодействия с серой, должны базироваться на орг. растворителе. А намазки для звезд на перхлорате аммония не должны содержать хлоратов и нитратов, иначе возможны проблемы, связанные с хранением готовых изделий. В случае ПХА обычно используют 2 намазки – промежуточную на перхлорате калия и первичную на пороховых смесях [13, 14].

**Табл. 5.6. Рецептуры пороховых подмазок**

Состав	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
нитрат калия - $KNO_3$	75	-	65	-	154	66	64	35	-	-	38	40	-
перхлорат калия - $KClO_4$	7	71	-	-	-	-	-	35	74	37	-	-	58
свинцовый сурик - $Pb_3O_4$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	22	-	-	-
сосновый уголь	-	5	35	-	34	-	-	-	-	-	-	-	-
древесный уголь	-	-	-	-	-	16	13	25	6	30	-	-	12
пороховая мякоть (ПМ)	-	-	-	114	-	-	-	-	-	-	19	50	-
антимоний - $Sb_2S_3$	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
акаронидная смола	2	12	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	6
рисовый декстрин	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
дихромат калия - $K_2Cr_2O_7$	-	3	-	-	-	-	-	-	3	-	-	-	-
желтый декстрин	-	-	-	14	14	5	5	5	-	4	5	-	-
сера - S	-	-	-	-	24	13	8,5	-	-	-	-	-	-
кремний - Si	-	-	-	-	-	-	-	-	-	7	38	-	12
ферротитан (Fe-Ti)	-	-	-	-	-	-	9,5	-	-	-	-	-	-
канифоль	-	-	-	-	-	-	-	-	12	-	-	-	-
алюминий - Al	-	-	-	-	-	-	-	-	5	-	-	-	-
прочее*	8	9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	10	12
литература	13	13	13	9	9	12	12	12	12	12	12	79	79

1. «Тусклый» промежуточный воспламенительный состав в многослойных звездках, меняющих цвет. Из-за наличия антимония не рекомендуется для воспламенения хлоратных звездок: \* – уголь павлонии (павлония – дерево, произрастающее на Дальнем Востоке, Китае, Японии).
2. Промежуточный воспламенительный состав для звездок на ПХА: \* – карбонат стронция.
3. Первичный воспламенительный состав для звездок на ПХА.
- 4-11. Универсальные намазки.
12. «Тусклый» ВС: \* – шеллак.
13. ВС для фигурный свечей: \* – титан.

Для воспламенения искристых свечей (бенгальских огней) пригодны смеси на основе титана, например: титан – 85%, нитрат калия – 15%, нитроклей АК-20 – 25% (св. 100%) и титан – 76%, нитрат калия – 8%, идитол – 8%, метилцеллюлоза – 3%, целлюлоза – 5% [58].

Современный состав от НИИПХ для воспламенения искристых свечей содержит: 29-33% пороховой мякоти, 20-18% нитрата бария, 7-9% ферросилиция, 4-2% фенолформальдегидной смолы и 36-42% крахмально-декстринового клейстера [56].

## 5.7. ВС для порохов и твердых ракетных топлив

В боеприпасах малого и среднего калибров типа автоматных/ружейных патронов, снаряженных порохами с малым размером гранул, надежное воспламенение осуществляется непосредственно от ударного капсюля-воспламенителя. В крупных же снарядах порох обычно применяется в виде длинных шашек, которые воспламеняются хуже. Хотя воспламенение такого пороха от капсюля-воспламенителя теоретически возможно, но на практике приводит к неравномерному сгоранию пороха или затяжному выстрелу, что является опасным для сохранения целостности орудийного ствола. По этой причине в реальных условиях капсюль воспламеняет небольшую навеску дымного пороха или подобного пороку воспламенительного состава, заключенного в корпус – т.н. «капсюльную втулку». В США для подобных целей применяли дымный порох или т.н. «бенит». Впоследствии в обиход вошла более устойчивая смесь – нитрат калия/бор. Эта композиция не вызывает оржавления ствола и достаточно эффективна. Сравнение различных воспламенителей для артиллерийских порохов приведено в [26].

Воспламенительные составы для твердых ракетных топлив должны эффективно воспламенять заряд твердого топлива и обеспечивать начальный подъем давления в камере сгорания до рабочего. Их горение не должно зависеть от внешнего давления, т.к. запуск двигателя может осуществляться в том числе и на большой высоте. В простейших ракетах может быть использован заряд дымного (бездымного) пороха либо тот же бенит. В современных ракетных двигателях наибольшее распространение получили композиции на основе магния и тефлона (МТВ) либо нитрата калия и бора, горение которых мало зависит от внешнего давления. В последние годы был проявлен интерес к смесям тефлона и титана [27].

Табл. 5.7. ВС для воспламенения порохов и твердых ракетных топлив

Состав	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
KNO <sub>3</sub>	-	-	-	-	50	37,4	-	-	70,7	70	-	-	-	-	61,3	60	65	-	67,5	32,9
KClO <sub>4</sub>	63	64	59	26,7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3	-	26,5	-	-
Ba(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	-	-	-	-	-	-	-	30	-	-	-	-	-	-	-	-	10	16,6	-	-
PbO <sub>2</sub>	-	-	-	-	-	-	-	6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ПТФЭ	-	-	5	-	-	-	-	-	-	-	30	67,5	40	35	-	-	-	-	-	-
алюминий	20	35	30	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	26,3	-	-	-	-	-
титан	13	-	-	-	-	-	-	24	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
магний	-	-	-	-	42	22,6	-	-	-	-	54	32,5	60	60	-	34	12	-	-	-
цирконий	-	-	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
гафний	-	-	-	68,6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
бор	-	-	-	-	-	2	-	-	23,7	30	-	-	-	-	8,9	-	-	-	13,5	-
сплав Zr/Ni	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	53,9	-	-
гидрид Zr	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	32,8
НЦ	-	-	-	-	-	40	40	30	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	9,85	-
ПМ	-	-	-	-	-	-	59,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
стабил-р	-	-	-	-	-	1	0,5	0,5	-	-	-	-	-	2	-	-	-	-	0,15	-
прочее *	4	1	1	4,7	8	-	-	9,5	5,6	-	16	2	1	5	3,5	3	13	3	9	33,3

1. Американская смесь «Trichloral»: \* – полиизобутилен [4].
2. Смесь ALCLO: \* – олифа. Плохо воспламеняется при низких давлениях и поэтому впоследствии вышла из обращения [4].
3. Французский состав: \* – стеарат алюминия [59].
4. Американский состав: \* – нейлон [60].
5. Английская смесь SR-371C: \* – акароидная смола [29].
6. Американский ракетный воспламенитель «Eimite» (поздняя модификация). Соотношения в частях [30].
7. Американский воспламенитель ТРТ и артиллерийских порохов «Venite» [61].
8. Немецкий воспламенитель: \* – нитрогуанидин [62].
9. Американский состав, разработан в начале 60-х, но в модифицированном виде используется до сих пор. Характеризуется хорошей воспламеняемостью при низких давлениях и низкой зависимостью скорости горения от давления. Назначение – воспламенители Mk247 и Mk265: \* – ламинак [31].
10. Английская смесь SR-44. Во многих странах широко используется как воспламенитель ТРТ и артиллерийских порохов [32].
11. Американский состав типа MTV в ракетах «Sidewinder»: \* – Viton A [28].
12. Американский состав, воспламеняет ТРТ в ракетах «Phoenix»: \* – добавки сверх 100% [28].
13. Воспламенители NOTS Mod 39, воспламеняет ТРТ в ракетах «Polaris»: \* – графит [28].
14. Английская смесь SR-888: \* – Viton A. Стабилизатор – карбонат магния св. 100% [33].
15. Воспламенитель в двигателе ракеты Mk38 Sparrow: \* – связующее [21].
16. Югославский состав: \* – фенолформальдегидная смола [34].
17. Воспламенительная звездка (шашка сопровождения горения) в отечественном 30 мм реактивном осветительном патроне: \* – фенолформальдегидная смола [72].
18. Высотный состав для воспламенения ТРТ на основе нитрата аммония, обеспечивает минимальную задержку воспламенения: \* – тефлон [75, 80].
19. Американский состав для воспламенения порохов в гильзах малокалиберных снарядов: \* – 4,5% графита, 4,5% поливинилацетата [18].
20. Американский литевой состав для воспламенения ТРТ. Используется в воспламенительных системах типа «pyrojet»: \* – каучук, пластифицированный ДБФ [80].

## 5.8. Универсальные ВС

Универсальные воспламенительные составы не имеют четких признаков, позволяющих их отнести к какой-либо из вышеперечисленных групп. Их используют для воспламенения массовых пиротехнических композиций типа дымовых, зажигательных и прочих смесей. Дымовые, зажигательные и подобные им составы воспламеняются достаточно легко, поэтому основными требованиями к универсальным ВС являются хорошая совместимость с основным составом и способность образовывать жгучие шлаки.

Универсальные ВС несут функцию не только воспламенения основного пиротехнического состава, но способствуют его быстрому разгоранию и выходу на требуемый режим горения.

Поэтому возможны случаи, когда способность к воспламенению у основного и воспламенительного состава примерно одинаковая, тем не менее от ВС не отказываются, т.к. применение быстрогорящего ВС позволяет быстро получить требуемый эффект от изделия. Обычно подобные ВС называются «стартовыми смесями» (starter mixtures).

**Табл. 5.8. Универсальные воспламенительные составы**

Состав	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
KNO <sub>3</sub>	-	-	-	66	35	70,5	54	-	-	54	75	-	-	-	-	-	-	50	-	-	-
KClO <sub>4</sub>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	24	-	-	56	-	-	-	-
KClO <sub>3</sub>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	43,2	39	-	-	-	-	-
Pb <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	50	55	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	52	-	-
PbO <sub>2</sub>	-	-	-	-	-	-	-	20	14	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	-	50	-	-	-	-	-	-	-	-	85	-	16	-	-	-	-	-	60	-
Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	-	-	-	-	22	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,3	-	-	-	-
CuO	-	-	-	-	-	-	-	30	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Cu <sub>2</sub> O	-	-	-	-	-	-	-	-	14	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	70
MnO <sub>2</sub>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	57	-	-	-	-	-	-	-	-
Si	25	33	-	6	26	-	40	50	14	40	-	-	15	34	-	-	-	50	-	-	-
Al	-	-	-	8	13	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	27	-	-	40	30
титан	25	12	32,5	11	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	8	-	-	-	-
бор	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	25	15	25	-	-	-	-	-	-	-	-
Zr	-	-	17,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	24	-	-	-	-	37	-	-
сера	-	-	-	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	16,8	-	-	-	-	-	-
др. уголь	-	-	-	5	4	29,5	6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
NaHCO <sub>3</sub>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	30	9	-	-	-	-	-
связка *	-	1,8	3,5	2	1	2	0,12	-	-	6	1	-	3	2	11,6	52	8,7	-	6	-	-

1. Американский состав FF-X. Применяется для воспламенения дымовых смесей в бомбе BLU-16/B, гранатах HC AN-M8 и XM74E1 [15].
2. Американский состав FF-VI: \* – НЦ сверх 100%. Воспламенитель в плавучих дымовых шашках AN-M7 и AN-M7A1, а также замедлители M220 [15].
3. Американский состав IM-III: \* – НЦ сверх 100%. Первичный воспламенитель для авиационного сигнала XM176, а также в дымовой бомбе BLU-16/B, гранате HC AN-M8 [15].
4. Новый состав для американской зажигательной гранаты AN-M14: \* – полиакрилат [22].
5. Американский состав SM-II: \* – НЦ сверх 100%. Применение – 105 и 155 мм дымовые шашки M1, M2, дымовые бомбы BLU-16B, сигнальные средства XM176, граната AN-M8 [15].
6. Американский состав SM-12: \* – НЦ сверх 100%. Без добавки НЦ известен как SM-III. Применение – дымовые шашки XM-7, XM-8, M2, дымовые снаряды, гранаты ABC-M7A1, M7A3 [15].
7. Американский состав SM-V: \* – НЦ сверх 100%. Применение – дымовая граната M8 [15].
8. Американский состав. Используется в светодымящем бое Mk25 Mod 0 [15].
9. Американская смесь «666». Используется в светодымящих бучах [15].
10. Американский состав IM-6: \* – Viton A [20].
11. Универсальный американский состав: \* – VAAR сверх 100% [15].
12. Американский ВС в детонаторах [64].
13. Состав для воспламенения металлохлоридной смеси. Наносится на гранулы дымового состава: \* – НЦ [65].
14. Состав фирмы «Talley» для воспламенения теплового состава: \* – силикат натрия [35].
15. SM-VI: \* – 10% крахмала, 1,6% НЦ св. 100%. Воспламенитель составов цветного дыма в гранатах M18 старого образца, в дымовой гранате XM651 и авиационном сигнале XM177 [15].
16. Экспериментальный американский состав для воспламенения составов сигнального дыма: \* – 3% упрочнителя, 5% пластификатора, 44% тиокола [15].
17. Вторичный состав для электровоспламенения: \* – НЦ [36].
18. Английский состав SR-251 для воспламенения фосфорной смеси в сигнальном бое Mk3. Воспламеняется смесью SR-252 (SR-251 с добавкой 20% бессерного дымного пороха) [37].
19. Украинский состав 12-04: \* – фторкаучук СКФ-32. Добавки: 2% LiF и 3% ДЦДА [66].
- 20-21. Смеси для воспламенения ТЭН-а в безопасных детонаторах [63].

Табл. 5.9. Универсальные воспламенительные составы

Состав	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
KNO <sub>3</sub>	-	-	-	-	-	-	-	65	50	-	-	-	-	10	60,7	69	-	-	33,7	19
KClO <sub>4</sub>	30	30	28,1	-	-	-	-	-	-	48	-	-	-	-	-	-	-	10	-	-
Ba(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	-	-	-	-	-	24	59	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
BaCrO <sub>4</sub>	-	-	25,5	45	-	-	-	-	-	-	-	-	-	65	-	-	60	64	37,4	58
BaO <sub>2</sub>	-	-	-	-	-	30	-	-	-	-	-	73,9	-	-	-	-	-	-	-	-
TeO <sub>2</sub>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	88,4	-	-	-	-	-	-	-
CaSi <sub>2</sub>	35	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
магний	-	-	25,5	32,5	-	-	-	-	-	-	14	-	12	-	-	-	40	-	-	-
ПАМ	-	-	-	-	-	-	-	10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ФС-75	-	-	-	-	-	-	-	10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
сурьма	35	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
бор	-	-	12,8	5	-	-	-	-	-	-	-	6,6	23,9	21	8,8	-	-	-	18,7	19
алюминий	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	27	-	-	-	6,2	-
ПТФЭ	-	-	-	14	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
цирконий	-	-	-	-	-	40	-	-	-	46	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
титан	-	70	-	-	-	35	-	45	-	-	-	-	-	-	-	-	-	26	-	-
милори	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	9	-	-	-	-	-	-	-
ПМ	-	-	-	-	82,5	-	-	-	-	-	-	-	47,1	-	-	-	-	-	-	-
FeS	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	26	-	-	-	-
связка *	5,3	1	8,1	3,5	17,5	6	6	15	5	6	12,1	5	8	4	3,5	5	3	-	4	4

1. Американская смесь: \* – НЦ сверх 100%. Применение – воспламенение в огнеметах М1 и М7 [15].
2. Американский состав для воспламенения промежуточного состава SM-II в дымовой гранате AN-M8: \* – VAAR сверх 100% [18].
3. Американская смесь: \* – Viton A [20].
4. Американская смесь для воспламенения основного состава в ИК-ловушках: \* – Нусар [20].
5. Воспламенитель в ряде американских имитационных устройств (например, М117): \* – НЦ [17].
6. Отечественный ВС «В-31»: \* – смола СФ-342А [66].
7. Отечественный универсальный ВС «Б-20-СН»: \* – 3% идитола, 3% целлюлоида в виде лака Н-15, графит – 0,5% (сверх 100%) [72].
8. Отечественный ВС «УВС»: \* – идитол [76].
9. Отечественный ВС «Т-30»: \* – идитол [76].
10. Американский воспламенитель основного заряда в пиропатроне: \* – 1% графита, 5% Viton A [67].
11. Американский воспламенитель I-508, наряду с трассерами использовался в пиропатроне авиационной катапульты: \* – 5,3% парлона, 0,9% стеарата Zn, 0,9% красителя, 5,0% резината кальция [68].
12. Дополнительный воспламенитель в американских ЭД: \* – Viton A [71].
13. Воспламенитель дымовой смеси: \* – хлорпарафин [69].
14. Американский состав, используется в выстрелах к 40 мм гранатомету: \* – VAAR [21].
15. Американский состав для воспламенения смеси цветного дыма в специальной сигнальной пуле: \* – Viton A [70].
16. Отечественный состав в дымовой гранате РДГ-24: \* – идитол [72].
17. Американский послевоенный состав. Использовался в Mk29 Mod 0 Tracking flare: \* – полиизо-бутилен св. 100% [23].
18. «Титановый» воспламенитель. Теплота реакции 3,1 МДж/кг. Температура вспышки 540°C [83].
19. Американский передаточный ВС: \* – VAAR. Используется в замедляющем устройстве М733 для 40 мм выстрелов вспомогательного назначения М713 [18].
20. Американский ВС для воспламенения состава цветного дыма в М713, М715, М716: \* – VAAR [18].

1. Шидловский А.А. Основы пиротехники. - М.: Машиностроение, 1973.
2. PATR 2700. Encyclopedia of Explosives and Related Items./ Basil T. Fedoroff & Oliver E. Sheffield. Vol 4 – Piccattiny Arsenal Dover, New Jersey, USA – 1969.
3. Engineering Design Handbook. Military Pyrotechnics Series. Part One. Theory and Application. US Army Materiel Command. AMCP 706-185. 1967.
4. Ellern H. Military and Civilian Pyrotechnics. Chemical Publishing Company Inc. New York. 1968.
5. Б.В. Малкин, А.А. Воробьев. Термитная сварка. – М.: Изд-во Мин. коммун. хоз-ва РСФСР, 1963.
6. Basil T Fedoroff etc. Dictionary of Explosives, Ammunition and Weapons (german section) Dover, New Jersey. 1958.
7. В.Н. Дик. Взрывчатые вещества, пороха и боеприпасы отечественного производства. Ч.1. – Минск: Охотконтракт, 2009.
8. L.T. Dunnett. Services Textbook of Explosives. Ministry of Defence. JSP333. 1974.
9. Westech Fireworks Manual. Westech. 1970.
10. PATR 2700. Encyclopedia of Explosives and Related Items./ Basil T. Fedoroff & Oliver E. Sheffield. Vol 7 – Piccattiny Arsenal Dover, New Jersey, USA – 1975.
11. Н.Г. Меньщиков. Альбом конструкций патронов стрелкового и крупнокалиберного автоматического оружия (от 6,5 до 37 мм). - М.: Артиллер. акад. КА им. Дзержинского, 1946.
12. A.P. Hardt. Pyrotechnics. Pyrotechnica Publications. 2001.
13. Ronald Lancaster. Fireworks. Principles and Practice. 3rd Edition. Chemical Publishing Co., Inc. New York, N.Y. 1998.
14. Takeo Shimizu. Fireworks: the Art, Science and Technique. Pyrotechnica Publication. 1981.
15. F. L. McIntyre, R.M. Rindner. A Compilation of Hazard and Test Data for Pyrotechnic Compositions. ARLCD-CR-80047. 1980.
16. Стандарт США MIL-P-71093 от 1992 г.
17. Wayne W. Smith. Single Column Pyrotechnic Delay. Tech. Report ARFSD-TR-95006. Picatinny Arsenal. New Jersey. 1996.
18. MIDAS database 2007.
19. E. Eugene Kilmer. A Low Gassing Igniter Mixture for Various Pyrotechnic Delay Compositions. NOLTR 61-15. Explosions Research Department US Naval Ordnance Laboratory. White Oak, Maryland. 1961.
20. Russel N. Broad. Replacement of First Fire Composition in M127A1 Ground Illumination Signal. ARWEC-TR-97002. 1997.
21. L. M. Aikman, T. E. Shook, R. M. Lehr, E. Robinson, F. McIntyre. Improved Mixing, Granulation and Drying of Highly Energetic Pyromixtures. Propellants, Explosives, Pyrotechnics 12, 17-25 (1987).
22. Gene V. Tracy, Eugene Song. High Energy, Lead-free Ignition Formulation for Thermate. Tech. Report ECBC-TR-205. 2002.
23. Toxic Hazards Associated with Pyrotechnic Items. NAVWEPS OP 2793. 1963.
24. G. Krien, Thermoanalytische Ergebnisse der Untersuchung von Pyrotechnischen Satzen, Az.: 3,0-3/5446/81, Wehrwissenschaftliches Institut für Werk-, Explosiv- und Betriebsstoffe Swisttal-Heimerzheim, 05,03,1981.
25. E. David Shoua, Paul Betts, Diane Scheneck. Demilitarization Plan for XM767 Infrared Illumination Round. Tech. Report ARWEC-TR-98009. 1998.
26. G. Klingenberg. Experimental Study on the Performance of Pyrotechnic Igniters. Propellants, Explosives, Pyrotechnics 9, 91-107 (1984).
27. Takuo Kuwahara. Ignition Characteristics of Ti/ Teflon Pyrolants: Safety Igniter with Partition. Propellants, Explosives, Pyrotechnics 30, No. 6. P 425-429 (2005).
28. Donald H. Barrett. Solid Rocket Motor Igniters. /ed. Russell B. Keller. NASA SP-8051. 1971.
29. L.M. Davis. Evaluation of Igniter Compositions SR371C and SR44. Technical Memorandum. WSRL-0424-TM. DSTO. Adelaide. 1985.
30. Guenter Klingenberg, John D. Knapton etc. Flame Temperatures and Internal Pressures of Pyrotechnic Igniters Used in Liquid Propellant Gun Firings. Tech Report ARBRL-TR-0398. US ARDEC. 1982.
31. Стандарт США MIL-P-46994B от 1982 г.
32. Beat Berger. Heinz Brechbühl. Wim de Klerk. Shelf Life Prediction of a Rocket Motor Igniter. Proceedings of the Twenty-Ninth International Pyrotechnics Seminar Westminster, CO. July 14-19, 2002.
33. Def. Standard 13-164. Ministry of Defence. Glasgow 1994.

34. Ivan Spasojevic, Ines Batinic-Haberle, and Dubravka Barisin. Functional and Chemical Characterization of the Aging Process of an Igniter. Propellants, Explosives, Pyrotechnics 18,89-92 (1993).
35. Christian W. Salafia and Gregory D. Knowlton. Development of a Heat Transfer Delay. Proceedings of the Twenty-Ninth International Pyrotechnics Seminar Westminster, CO. July 14-19, 2002.
36. S. F. Son, M. A. Hiskey, D. L. Naud, J. R. Busse, and B. W. Asay. Lead-free Electric Matches. Proceedings of the Twenty-Ninth International Pyrotechnics Seminar Westminster, CO. July 14-19, 2002.
37. T. A. Vine, W. Fletcher, An Investigation of Failures to Function of a Red Phosphorus Marine Marker. Proceedings of the Twenty-Ninth International Pyrotechnics Seminar Westminster, CO. July 14-19, 2002.
38. Пат. EP0411992 от 1989 г.
39. Пат. US4853052 от 1988 г.
40. Пат. RU2202528 от 2001 г.
41. Пат. RU2229468 от 2002 г.
42. Пат. RU2169066 от 1997 г.
43. Пат. SU1736972 от 1989 г.
44. Пат. US7117796 от 2005 г.
45. Пат. FR2146648 от 1971 г.
46. Пат. RU2259344 от 2004 г.
47. Пат. US3611935 от 1969 г.
48. Пат. FR1410760 от 1963 г.
49. Пат. US6170399 от 1998 г.
50. Пат. RU2354634 от 2007 г.
51. Пат. RU2045508 от 1992 г.
52. Пат. US6036794 от 1998 г.
53. Пат. US2976136 от 1948 г.
54. Пат. US2709129 от 1952 г.
55. Пат. GB924954 от 1960 г.
56. Пат. RU2492159 от 2012 г.
57. Пат. CZ299393 от 1997 г.
58. Пат. SU1724659 от 1990 г.
59. Пат. FR2151496 от 1971 г.
60. Пат. US3109762 от 1962 г.
61. Пат. US3182595 от 1962 г.
62. Пат. DE3243425 от 1982 г.
63. Пат. US6227116 от 1996 г.
64. Пат. US4484960 от 1983 г.
65. Пат. US4898098 от 1988 г.
66. Пат. UA22434 от 2006 г.
67. Пат. US3203843 от 1962 г.
68. Пат. US3317362 от 1965 г.
69. Пат. US4474715 от 1981 г.
70. Пат. US3713394 от 1971 г.
71. Пат. US3519505 от 1967 г.
72. Материалы Интернет-ресурса [dzromon.narod.ru](http://dzromon.narod.ru).
73. Brebera Stanislav etc. Specialni Technica. IDI, Гл. ред. Urban Ladislav. Praha 1976.
74. Пат. US8007608 от 2009 г.
75. Ф.П.Мадьякин. Компоненты и продукты сгорания пиротехнических составов. Т.1. Основные понятия о пиротехнических составах и компонентах. Низкомолекулярные вещества. Учебное пособие. – Казань: Изд-во КГТУ, 2006.
76. Материалы Интернет-ресурса [www.pyrotechnics.net.ru/](http://www.pyrotechnics.net.ru/) Материалы лекций Дудырева А.С., «Разработка пиротехнических составов». Переработка и оформление Е. Мисоночкиной и Королева Д.В.
77. Пат. RU2149341 от 1998 г.
78. Пат. RU2281456 от 2004 г.
79. K.L. And B.J. Kosanke, and C. Jennings-White. Lecture Notes for Pyrotechnic Chemistry. Journal of Pyrotechnics, Inc. 2004.
80. PATR 2700. Encyclopedia of Explosives and Related Items./ Seymour M. Kaye & Henry L. Herman. Vol 10 – Piccatiny Arsenal Dover, New Jersey, USA – 1983.
81. Japanese Tracers. US Naval Technical Mission to Japan. January 1946. USNTMJ-200E-0447-0464 Report 0-22.
82. Technical Manual. Ordnance Data for Toxic Hazards Associated with Pyrotechnic Items. NAVSEA SW050-AC-ORD-010. 2005.
83. Conkling J.A. Chemistry of Pyrotechnics. Basic Principles and Theory. NY. 1985.
84. C.J. Smith. The Development of a Range of Non-lethal Anti-riot Weapons. ARDE Memorandum MX 71/60. 1960.
85. <http://www.acc.af.mil/shared/media/document/AFD-070802-066.pdf>.
86. Кушнарев Д.М. Использование энергии взрыва в строительстве. М., Стройиздат, 1973.

## Глава 6. Замедлительные составы

Замедлительными составами называют пиротехнические смеси, предназначенные для снаряжения дистанционных трубок, запалов, огнепроводных шнуров. Сгорая с постоянной скоростью, они обеспечивают временную задержку в срабатывании боеприпаса, пиротехнического изделия или какого-либо элемента автоматики. В англоязычной литературе обозначаются как «delay compositions».

### Различают:

- замедлительные составы, образующие при сгорании газы;
- малогазовые (безгазовые) замедлительные составы (МГС).

С появлением черного пороха, первых пороховых бомб, гранат и ракет возникла необходимость обеспечения задержки срабатывания этих изделий. Задержка была необходима для того, чтобы успеть удалиться на безопасное расстояние, метнуть изделие в сторону противника либо осуществить подрыв заряда в нужный момент. Для обеспечения продолжительной задержки использовались простейшие фитили – куски бечевки, пропитанные раствором калиевой селитры. Такой фитиль горел со скоростью 1-2 см/мин, был ненадежен в сырую погоду. В гранатах и бомбах использовали трубки, набитые дымным порохом – прообразы современных огнепроводных шнуров. А в увеселительных целях для воспламенения пиротехнических изделий использовались и до сих пор используются стопины – быстрогорящие огнепроводные шнуры.

Дымный порох в качестве замедлителя имеет как определенные преимущества, так и недостатки. Он сочетает хорошую технологичность, повторяемость свойств от партии к партии, легкость в воспламенении, доступность компонентов. В то же время его существенными недостатками являются гигроскопичность и образование при сгорании значительного количества газов. Образование газов приводит к установлению сильной зависимости скорости горения от давления, что вынуждает использовать открытые замедлительные узлы для удаления газообразных продуктов сгорания. Вращение снарядов при полете также приводит к неустойчивости горения и требует огромных экспериментальных работ по подгонке свойств замедлителей для каждого конкретного случая [2].

Впрочем, ввиду отсутствия реальной альтернативы дымному пороху, с его недостатками долгое время мирились, и лишь после Первой мировой войны (середина 20-х годов 20 века) в Германии и Англии начались работы по созданию малогазовых замедлительных составов (в США – в 1926 г.).

В 1930 г. немцы предложили свой первый малогазовый состав на основе перманганата калия и железа [90]. С начала 30-х годов 20 века немцы начали снаряжать свои пиротехнические замедлители малогазовой смесью перманганата калия и сурьмы, преимущественно в соотношении 64/36. В конце Второй мировой войны во многих германских боеприпасах вошли в обиход смеси свинцового сурика и кремния, связанные нитроцеллюлозой в соотношении 72,0/25,3/2,7, и т.н. «смесь 121», состоящая из 50% хромата свинца, 25% перхлората калия, 25% кремния и 0,8% нитроцеллюлозы (сверх 100%) [3].

### **Примечание.**

*В отношении малогазовых замедлительных смесей распространен также термин «безгазовые» составы. Действительно, при составлении теоретического уравнения процесса сгорания таких составов продуктами горения являются лишь конденсированные вещества. В реальных же условиях в определенном количестве выделяются пары металлов, окислов, адсорбированные в компонентах газы и др. В качестве вспомогательных компонентов применяются органические вещества, дающие при сгорании газообразные продукты. Поэтому более правильным было бы называть эти составы малогазовыми, нежели безгазовыми.*

Первый американский малогазовый состав появился в 1931 г., он состоял из 84% свинцового сурика, 15% кремния и 1% глицерина. Смесью сгорала достаточно быстро, поэтому вскоре (в 1932 г.) был разработан медленногорящий состав из 89% хромата свинца, 10% кремния и 1% олифы, который довольно успешно использовался в замедлителях авиабомб времен Второй мировой войны [2, 4]. В американском патенте [68] также предложен быстрогорящий вариант, содержащий 44% оксида свинца, 16% ферросилиция, 39% хромата свинца и 1% олифы.

В 1934 г. в США была запатентована замедлительная смесь на основе перекиси бария и халькогенидов (селена и теллура), которая до сих пор используется в коммерческих электродетонаторах.

Японцы начали работы по малогазовым смесям в 1937 г., учитывая достижения американцев. Первые японские малогазовые составы, испытанные в 1943 г., содержали перекись бария и горючее (серу или селен). Составы с перекисью бария оказались не слишком удачными для использования в нарезной артиллерии, т.к. давали большой разброс замедления из-за образования при горении жидких шлаков. Вдобавок эти составы плохо хранились во влажной атмосфере. Наиболее удачной следует признать японскую смесь «П-4» для снаряжения артиллерийских взрывателей «тип 3», содержащую 10% свинцового сурика, 20% кремния, 60% хромата свинца и 10% фосфида меди, покрытого каучуком. Также в 1944 г. японцы скопировали ряд американских смесей на основе свинцового сурика, ферросилиция и хромата свинца. При соотношении этих компонентов, как 25/25/50, скорость горения составляла 3-4 мм/сек [79]. При соотношении 16/38/46 скорость горения составляла 4,5 мм/сек. Последняя рецептура была внедрена незадолго до окончания Второй мировой для снаряжения взрывателей «Тип АА» и в 5-секундных взрывателей для глубинных бомб.

В СССР на малогазовые замедлительные композиции обратили внимание в середине 30-х годов 20 века. Первый отечественный малогазовый состав марки «БЛ» был разработан Ф.А. Баумом и Н.А. Левковичем в Артиллерийской академии им. Ф.Э. Дзержинского. Он содержал свинцовый сурик, ферросилиций и сплав FeSiCrAl с добавкой небольшого кол-ва нитроцеллюлозы в качестве связующего. В ходе испытаний выявился существенный недостаток новой смеси – повышенная зависимость скорости горения от начальной температуры. Разница во времени замедления в зимних и летних условиях составила порядка 10 сек., что

было совершенно недопустимым. Поэтому вместо «БЛ» в 1942 г. на вооружение был принят малогазовый состав «МК», разработанный в 1937-1940 гг. Р.В. Мусселиусом и С.Н. Королевым, а также очень похожий «высотный» состав «19Ц» (авторы Ф.А. Баум, Н.А. Левкович, В.А. Ждановский). «МК» широко использовали в армии и на флоте во взрывателях МГ-8, К-3 и АВ-1, тогда как «19Ц» нашел применение в зенитной артиллерии из-за способности устойчиво сгорать на высоте, превышающей 10-11 км. Состав «МК» оказался настолько удачным, что еще довольно долго находился на вооружении Советской Армии и армий стран Восточной Европы [10].

Хотя американцы являются пионерами в разработке малогазовых композиций, усиленно заниматься малогазовыми составами они начали только с 1942 г. В эти годы была создана композиция из 74-77% хромата бария, 20-22% марганца и 3-4% серы (из-за плохой термостойкости впоследствии замененная другими составами) [4]. По контракту с ВМС США разрабатывалась известная впоследствии смесь циркония, никеля, хромата бария и перхлората калия.

Переоснащение армий замедлителями на основе малогазовых составов проходило достаточно вяло; таким образом, в начале Второй мировой войны в большинстве стран продолжали применять черный порох.

В послевоенное время нашли применение в качестве горючего ранее мало-доступные бор и вольфрам, а смесь порошков циркония и никеля заменили более дешевым и безопасным сплавом этих металлов.

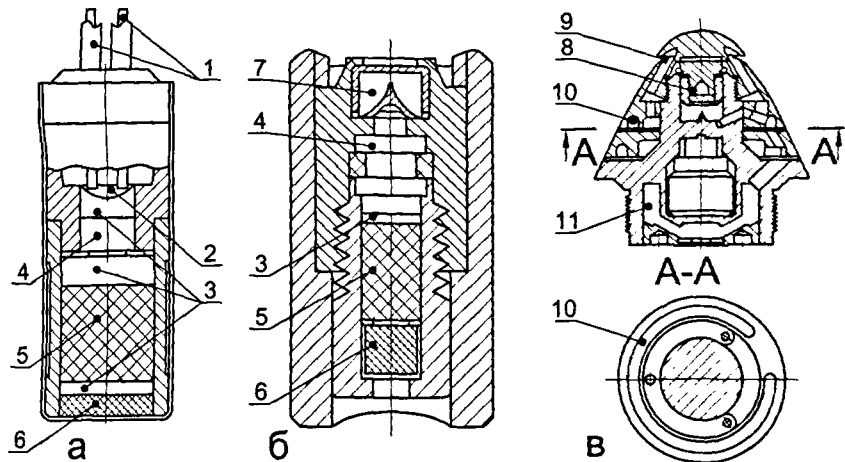


Рис. 6.1. Схемы основных типов замедлительных устройств [2].

а) – герметичный электродетонатор замедленного действия Mk-148, б) – герметичная цепь замедления T2E1, в) – кольцевой замедлитель открытого типа (артиллерийский воспламенитель);

1 – электрические провода, 2 – мостик накаливания, покрытый теплочувствительным составом, 3 – воспламенительный состав, 4 – расширительная камера, 5 – малогазовый замедлительный состав, 6 – инициирующее ВВ, 7 – ударный капсюль-воспламенитель, 8 – накольный капсюль-воспламенитель, 9 – выхлопные отверстия, 10 – замедлительные элементы из черного пороха, 11 – навеска черного пороха.

В отечественных композициях используются наиболее дешевые и доступные горючие – сера, сульфиды сурьмы, ферросилиций, ферросиликохром, кремний и т.п. [57, 74].

В качестве добавок малогазовые составы могут содержать замедлители и стабилизаторы горения (гексафторсиликат бария, криолит, диатомит), агенты, снижающие восприимчивость к механическим воздействиям (дисульфид молибдена), связующие (нитроцеллюлоза, фторкаучук).

Для расширения температурных диапазонов устойчивого горения в состав часто добавляют небольшое количество дополнительного окислителя типа перхлората калия [5].

К настоящему времени большинство перечисленных композиций осталось в употреблении в несколько модифицированном виде, в некоторых случаях токсичный хромат свинца был заменен хроматом висмута.

Такие связующие, как нитроцеллюлоза, обладают полезным свойством уменьшать температуру воспламенения малогазовых смесей. Так, например, добавка всего 3% нитроцеллюлозы к смеси 30% ферросиликохрома и 70% свинцового сурика снижает температуру вспышки с 597 до 357°C [6].

Многие замедлительные составы недостаточно восприимчивы к первичным средствам воспламенения типа капсюля-воспламенителя и надежно воспламеняются лишь от специальных воспламенительных малогазовых смесей. В целях повышения надежности срабатывания замедлительной цепи, по возможности лучше использовать самые легковоспламеняющиеся составы.

Сами замедлители могут быть как открытыми (с возможностью истечения газообразных продуктов сгорания в атмосферу), так и закрытыми (герметичными). Естественно, герметичным отдается предпочтение.

Хотя существует большое количество смесей, при сгорании не образующих газов, в действительности лишь немногие из них могут быть использованы в качестве замедлителей из-за следующих требований [1]:

- стабильное, не прерывистое горение;
- способность сгорать в сравнительно небольших диаметрах;
- малая зависимость скорости горения от температуры (небольшой температурный коэффициент);
- устойчивость горения при низких температурах;
- отсутствие гигроскопичности;
- возможность продолжительного хранения с минимальными отклонениями параметров;
- доступность компонентов;
- малая зависимость скорости горения от давления;
- безотказность срабатывания в разреженной атмосфере;
- образование твердых, нетекучих шлаков (требование для замедлителей в нарезной артиллерии).

Особенностью малогазовых замедлительных композиций является наличие в их составе сравнительно малоактивных окислителей и горючих, поэтому энергетика и температура горения в них сравнительно невелики. Низкая температура способствует уменьшению количества выделяющихся при сгорании газообразных продуктов. Как правило, при сгорании 1 г малогазового замедлительного состава выделяется 5-10 мл газообразных веществ, которые могут влиять на время замедления. Поэтому в герметичных замедлителях всегда присутствует небольшая расширительная камера, компенсирующая влияние выделяющихся газов на процесс горения состава [70].

#### Характеристики малогазовых составов:

- **Скорость горения** – отношение длины столбика замедлительного состава к времени, за которое он сгорает. В зарубежной литературе пользуются обратной величиной – т.н. «временем горения». На скорость горения в большой степени оказывают влияние: размер частиц компонентов, количество примесей, точность отмеривания компонентов, степень запрессовки и диаметр замедлительной трубки, в которую запрессован состав. Все эти параметры должны воспроизводиться с очень большой точностью, чтобы минимизировать отклонения в параметрах от партии к партии. Изготовление замедлительных смесей и самих замедлительных устройств требует самой высокой культуры производства в военной пиротехнической отрасли. Обычно замедлительные составы различаются по скорости (времени) горения на быстрогорящие, составы со средней скоростью горения и медленногорящие (Табл. 6.1). Применяющиеся на практике замедлительные смеси имеют скорость горения 0,6-2500 мм/сек. Существуют практические ограничения на размеры столбика замедлителя, поэтому хорошо воспроизводимых результатов можно добиться для диапазона замедления от 5 мс до 5 минут. При необходимости микросекундной задержки используют смеси на основе иницирующих ВВ в комбинации с активными пиротехническими компонентами, например, можно указать на смесь циркония, свинцового сурика и азидо серебра [5, 96]. Задержки более 5 минут создаются за счет замедлительных устройств, основанных на других физических и химических принципах [5]. На Рис. 6.2 и Рис. 6.3 показан характер изменения скорости горения газообразующих смесей, по сравнению с малогазовыми, в зависимости от содержания окислителя.

**Табл. 6.1. Замедлительные составы по времени задержки в изделиях [1]**

Составы по времени задержки	Скорость горения, мм/сек	Примеры составов
миллисекунды	более 30-50	$PbO_2/Zr$ , $PbO_2/Si$ , $KClO_4/Mo$ , $BaCrO_4/PbO_2/B$ , $Pb_3O_4/Fe-Si-Cr$ , $PbO_4/Fe-Si-Cr$ , $CuO/Si$ , $Pb_3O_4/Ca-Si$ , $Pb_3O_4/Fe-Si$
несколько секунд	3-30	черный порох, $BaO_2/Se$ , $KMnO_4/Fe$ , $KMnO_4/Sb$ , $BaCrO_4/B$ , $BaCrO_4/PbCrO_4/Mn$ , $BaCrO_4/KClO_4/сплав\ Zr-Ni$ , $Pb_3O_4/Si$
десяtkи и сотни секунд	менее 2-3	$BaCrO_4/KClO_4/W/диатомит$ , $BaCrO_4/KClO_4/Sb_2S_3/HCl$ , $PbCrO_4/Fe-Si/Sb_2S_3/HCl$



Рис. 6.2. Зависимость скоростей горения смесей разных металлов с нитратом калия от содержания металла в смеси [6].



Рис. 6.3. Зависимость скорости горения смеси 40% ферросилиция + 60% хромата свинца от содержания в ней окислителя – ПХК [6].

- *Критический диаметр горения* – это минимальный диаметр столбика пиротехнического состава, в котором не происходит затухания при сгорании замедлительной смеси. Существование критического диаметра обусловлено теплоотдачей в окружающую среду, или точнее – на стенки трубки, в которую запрессован замедлительный состав. Если теплоотдача превышает энергию, которую необходимо затратить на воспламенение последующих слоев смеси, то состав попросту перестает гореть. Следовательно, критический диаметр будет зависеть от коэффициентов теплопроводности и теплоемкости материала корпуса, куда запрессован заряд. Соответственно, чем больше скорость горения состава, тем, в общем случае, будет меньше критический диаметр, т.к. тепло не будет успевать передаваться стенкам корпуса. Критический диаметр горения изменяется от 2,5 мм для смесей  $\text{KMnO}_4/\text{Sb}$  до >5 мм для смеси 20% ферросилиция, 30%  $\text{PbCrO}_4$  и 50%  $\text{KClO}_4$  [6].
- Другой важной характеристикой замедлительных составов является *температурный коэффициент*. Он показывает, на сколько возрастает скорость горения в процентах при увеличении температуры на 1 градус. Это весьма важный параметр, в конечном счете определяющий, насколько задержка срабатывания боеприпаса будет отличаться в условиях пониженной и повышенной температуры окружающей среды. Для большинства смесей он составляет доли процента на 1 градус. В массовых американских изделиях с временем замедления до 20 сек. разброс срабатывания составляет как минимум  $\pm 12\%$  при изменении температуры от -65F до 165F (от -54°C до +74°C). Для больших времен замедления или использования замедлителей в неблагоприятных условиях температурный разброс срабатывания может составлять до  $\pm 30\%$  [70]. Температурный разброс современных отечественных изделий составляет 10-11,5% для быстрогорящих составов и 11,7-19% для медленногорящих (в диапазоне температур  $\pm 60^\circ\text{C}$ ) [94].

## 6.1. Замедлительные составы, выделяющие при сгорании газы

В настоящее время газообразующие замедлительные составы служат для изготовления массовых дешевых средств замедления типа огнепроводных шнуров, когда необходима продолжительная задержка с возможностью её оперативного регулирования путем изменения длины этого самого шнура. Горение этих составов более восприимчиво к внешним условиям, поэтому газообразующие замедлительные композиции используют, когда нет нужды в особой точности временной задержки [1].

С древних времен вплоть до начала Второй мировой войны практически единственным замедлительным составом был трубочный дымный порох. По сути, он ничем не отличался от обычного дымного пороха, имел тот же самый состав и ту же самую технологию изготовления. Однако измельчение компонентов проводили более тщательно, а также использовались компоненты более высокой чистоты. С начала 20 века, в связи с резким повышением дальности артиллерии, вызванного принятием на вооружение бездымных порохов, оказалось, что скорость горения обычных трубочных порохов в штатных дистанционных трубках слишком велика. Понижения скорости горения до 5-7 мм/сек (у обычных трубочных порохов – 8-10 мм/сек) удалось добиться за счет введения связующих (шеллак, канифоль, парафин) или наполнителей (1-6% сульфата бария). Такие пороха получили название «медленногорящие трубочные пороха» (МГП). Стоит отметить, что порох с добавкой 2% шеллака завозился в Россию из Франции с 1909 г. и до конца Первой мировой войны: отечественным специалистам так и не удалось наладить производство отечественного аналога.

После войны был создан отечественный МГП марки «О», содержащий 1,5% канифоли. Дальнейшие попытки снизить горение трубочных порохов путем наращивания количества связующего не привели к успеху, т.к. при этом резко падала стабильность горения и наблюдались затухания. Вторым, как оказалось, более эффективным способом снижения скорости горения пороха стало использование специальных сортов древесного угля с пониженным содержанием углерода [69]. Таким образом, в 1938-39 гг. в СССР был разработан МГП марки «Кр-75», уже в 1940 г. принятый на вооружение. Он состоял из 75% калиевой селитры, 10,1% серы, 10,9% угля из крушины с содержанием углерода 60% и 4% угля из коры ивы с содержанием углерода 72%. В дистанционной трубке Т-3 (УГ) МГП «Кр-75» давал замедление, равное 75 сек. Также он использовался во взрывателях Т-5 и Д-1.

В Японии с 1920-х годов применялся трубочный порох «Mk3» с добавкой шеллака: 75% нитрата калия, 14,5% древесного угля, 10% серы и 0,5% шеллака. С 1943 г. для снаряжения взрывателей «тип 89 АА» использовали МГП с повышенным содержанием серы: 55% калиевой селитры, 15% древесного угля и 30% серы. Скорость горения Mk3 и Mk4 в диапазоне давлений 300-760 мм рт. ст. составляла 5-10 и 2,9-3,3 мм/сек, соответственно [79].

Трубочные пороха плохо подходят для применения в снарядах высокобойной артиллерии: уже на высотах 5-6 км наблюдаются частые отказы в виде затухания. Специальной конструкцией взрывателя (например, взрыватель Т-3) можно увеличить порог по высоте до 7,5 км, но реальным решением этой проблемы является только переход к малогазовым составам [10].

Газовые составы в значительной степени вытеснены МГС, однако производство трубочных порохов в ряде стран не остановлено, более того, выпускаются несколько марок порохов этого типа.

Хотя среди газовых замедлительных составов на практике обычно применяется дымный порох, существуют и исключения. Многие английские замедлители снаряжались смесями на основе тетранитрокарбазола или тетранитрооксанилида в паре с окислителем. В частности, композиция SR-74 содержит 60% нитрата бария и 40% тетранитрооксанилида [11].

Также известны другие устаревшие композиции: SR-214 (60% нитрата калия и 40% лактозы) [12], RM1A1 (76% нитрата калия, 10% серы и 14% синтетической смолы DDP 5081) [13] и RD202 для кольцевых замедлителей: ПХА – 74,2%, древесный уголь – 23%, крахмал – 2,8%.

Не так давно французский концерн GIAT предложил [39] медленногорящие замедлительные смеси на основе перхлората аммония и антрацена. Например, смесь 88% ПХА, 7% антрацена и 5% воска, запрессованная в 3,1 мм трубку имеет скорость горения 0,94-0,97 мм/с в диапазоне температур от –32 до +44°C.

Китайские огнепроводные шнуры «зеленый виско», использующиеся в развлекательной пиротехнике, содержат смесь перхлората и терефталата калия с добавкой графита.

Для передачи огневого импульса в некоторых фейерверочных изделиях и в пиропирометрии требуются быстрогорящие огнепроводные шнуры.

В России широко используется композиция, содержащая 55-80% титана, 24-42% перхлората калия и модификаторы – целлюлоза, метилцеллюлоза, каучук СКН-40НХ. В ПВХ оболочке скорость горения состава достигает 5 м/с [75, 76, 77].

В [78] предложены эластичные шнуры на основе металлических горючих и фторкаучуков со скоростями горения 10-100 мм/сек.

В Российском патенте [40] предложен быстрогорящий эластичный пиротехнический материал для передачи огневого импульса, он может содержать: перхлорат калия – 12%, хромат бария – 48%, титан – 32%, фторопласт – 5%, асбест – 3%. Скорость горения – 3-4 м/с, газовыделение – 40-50 см<sup>3</sup>/г, теплота сгорания – 3,77 МДж/кг.

Для инициирования пожаротушающих аэрозольных генераторов применяются гибкие безоболоченные шнуры с профильным каналом, изготавливаемые методом экструзии. Такие шнуры обычно базируются на основе нитроцеллюлозы, пластифицированной энергонасыщенным пластификатором – нитроэфиром или 2,4-диазидо-6-азидотоксисимметричным триазином (вещество «МАДА»), и сгорают в беспламенном режиме. Благодаря низкой температуре воспламенения эти шнуры также служат теплочувствительными датчиками пожара [76, 77].

## 6.2. Малогазовые составы, обеспечивающие миллисекундную задержку

Наиболее универсальные и известные малогазовые составы для миллисекундной задержки в большинстве стран обычно базируются на смеси циркония или кремния с оксидами свинца. Наилучшими свойствами обладает смесь 28% циркония и 72% двуокиси свинца со скоростью горения около 500 мм/сек [2]. В странах Восточной Европы используется смесь 40% циркония и 60% двуокиси свинца, ее скорость горения – 400 мм/сек. Эта же композиция с добавкой 1-3% нитроцеллюлозы (сверх 100%) выполняет функцию воспламенителя для малогазовых составов [6]. Порошкообразный цирконий способствует легкости воспламенения, однако он весьма чувствителен к статическому электричеству и опасен в обращении. По этой причине в массовых изделиях с миллисекундной задержкой применяется сплав железа, кремния и хрома (ферросиликохром), а также сплав железа, кремния и циркония (ферросиликоцирконий). В качестве окислителя обычно используется свинцовый сурик или двуокись свинца. Для уменьшения скорости горения в состав может вводиться до 10% двуокиси титана [6, 97].

Американские замедлительные элементы T2E1 с задержкой 0,01 и 0,025 сек. базировались на смеси циркония и оксида железа, тогда как времена задержки в 0,12 и 0,24 сек. обеспечиваются составом цирконий/хромат бария [70].

В США и Англии также находят применение быстрогорящие смеси перхлората калия с молибденом. В неуплотненном состоянии они сгорают довольно активно с выбросом раскаленного шлака. Для замедления горения молибденовые композиции могут содержать хромат бария и до 5% диатомита [1, 7].

Табл. 6.2. Миллисекундные композиции

Состав:	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
свинцовый сурик - $Pb_3O_4$	50	85	-	-	-	-	-	70	54	-	-	-	-	-	-	50	-	85	-
двуокись свинца - $PbO_2$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	50	-	-	-	-	-	-
окись висмута - $Bi_2O_3$	-	-	-	67	-	-	-	-	-	90	-	-	-	-	-	-	-	-	50
окись меди - $CuO$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	88	80	-	-	-	-
перхлорат калия - $KClO_4$	-	-	4	-	20	11	10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
перекись бария - $BaO_2$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	40	-	-
хромат бария - $BaCrO_4$	-	-	-	-	-	-	10	-	-	-	-	79	-	-	-	-	-	-	-
сульфат бария - $BaSO_4$	-	-	-	-	-	-	-	-	38	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
окись железа III - $Fe_2O_3$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	75	-	-	-	-	-	-	-	-
молибден - $Mo$	-	-	-	-	80	89	80	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
кремний - $Si$	45	-	28	-	-	-	-	-	7	-	-	-	50	12	20	-	-	-	-
аморфный бор - $B$	-	5	-	-	-	-	-	-	-	10	25	-	-	-	-	-	-	10	-
цирконий - $Zr$	-	9	-	5	-	-	-	-	-	-	-	21	-	-	-	-	-	-	-
вольфрам - $W$	-	-	80	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ферросиликохром	-	-	-	-	-	-	-	30	-	-	-	-	-	-	-	50	60	-	-
ферросиликоцирконий	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	50
титан - $Ti$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5	-
прочее *	5	1	16	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	1	1	2	-
скорость гор. мм/сек	65	-	90	76	2540	635	254	100	45	-	34,5	-	-	-	-	-	-	-	-

1. Согласно чешскому патенту, состав содержит смесь оксидов свинца и до 20% криолита для регулирования скорости горения: \* – криолит [41].
2. Немецкий состав: \* – азросил. Температура вспышки – 180°C. 50 мг образец обеспечивает задержку, в среднем, в 8 мс в 3 мм трубке [42].
3. Французский состав, для применения в шахтах, опасных по газу: \* – марганец [43].
4. Малотоксичный шведский состав фирмы Nitro Nobel AB [44].
- 5 - 7. Американские составы [7].
8. Состав, применяющийся в странах бывшего Варшавского договора [6].
9. Состав по патенту WO2008035289 (2008 г): \* – ПАВ Acrinol 296D [45].
10. Английский состав SR-57 [14].
11. Австралийский состав для 0,2 сек замедлителя [15].
12. Американский состав DP-162 для замедлителя T2E1 [16]. Параметры подобных смесей с цирконием описаны в [27].
- 13 - 17. Отечественные составы для снаряжения ЭД замедленного действия [72, 73].
18. Отечественный термостойкий состав СТВ-3: \* – лак СКФ-260 [87, 88].
19. Современный чешский экологичный состав для неэлектрических КД [93].

Достаточно интересными быстрогорящими замедлителями являются биметаллические проволоки, объединенные названием «Pyrofuze». Первый патент на подобные изделия был получен в США в 1958 г. [67]. Pyrofuze состоят из алюминиевой сердцевины и оболочки, выполненной либо из никеля, либо из сплава палладия с добавкой 2% рутения. При их термическом или электрическом инициировании возникает быстрая тепловая реакция с выделением разогретых до 2800°C интерметаллических продуктов. Биметаллические проволоки используются в особенно ответственных замедлительных системах, работающих в условиях вакуума или широкого температурного диапазона. Они обеспечивают высокую точность задержки с чрезвычайно малой зависимостью скорости горения от температуры. Проволочки выпускаются диаметром 0,0015-0,02 дюйма (0,0381 – 0,508 мм). Скорость горения в зависимости от используемых материалов составляет 240 – 542 мм/сек [7].

### 6.3. Малогазовые составы, обеспечивающие задержку в единицы секунд

Можно выделить следующие виды составов, обеспечивающих задержку в несколько секунд:

- **Свинцовый сурик/кремний.** Достаточно недорогие, устойчивые при хранении смеси, разработанные перед Второй мировой войной. В ответственных изделиях не применяются из-за пониженной надежности, вызванной склонностью к образованию пузырей паров металлического свинца при сгорании в длинных каналах [4, 16]. Хорошо совместимы со смесями хромат бария/бор и могут служить воспламенителями для этих композиций. Плотность снаряжения 2,8-3,8 г/см<sup>3</sup>. Скорость горения в среднем составляет около 16 мм/сек. Для замедления горения могут содержать до 7% диатомита. Исследование процесса сгорания смесей  $Pb_3O_4/Si$  опубликовано в [17]. Составы  $Pb_3O_4/Si/Sb_2S_3$  используются в Китае для миллисекундной задержки [95].
- **Селен/перекись бария.** Замедлительные смеси с селеном были разработаны в США еще до Второй мировой войны и довольно широко применялись до

1970 гг. 20 века. Например, известна композиция из 84% перекиси бария, 16% селена и 0,5% талька (сверх 100%) со скоростью горения 11 мм/сек при плотности 4,4 г/см<sup>3</sup> [8]. Плохо хранятся в присутствии влаги и при сгорании образуют легкоплавкие шлаки, поэтому в настоящее время используются лишь в коммерческих КД американского производства. Замедлительные композиции с другим халькогенидом – теллуром – были запатентованы [46], но в массовых изделиях, похоже, не применялись. Селен и теллур могут быть как горючими, так и окислителями (в смеси с металлом), что использовалось в специальных воспламенительных смесях [2].

- Хромат бария/бор (Т-10).** Наиболее устойчивые при хранении малогазовые составы. Количество бора в реально использующихся смесях составляет 3-15%, а скорость горения изменяется в пределах 3,2-70 мм/сек. Мало чувствительны к удару и детонации. Легко воспламеняются. Их компоненты доступны, а технология производства достаточно проста. Многими специалистами смеси хромат бария/бор считаются лучшим выбором для замедлителей с задержкой в несколько секунд. Из недостатков следует отметить повышенную чувствительность к трению и статическому электричеству, а также необходимость тщательной сушки и герметизации изделий из-за способности аморфного бора к окислению во влажном воздухе. Смеси с кристаллической модификацией бора горят в несколько раз медленнее, чем с аморфной. Известны подобные композиции с добавкой окиси хрома. Однако, в связи с большой зависимостью скорости горения от изменения процентного соотношения компонентов состава, смеси с окисью хрома так и не получили широкого распространения [8].

**Марганец/хромат бария/хромат свинца (D-16).** Были разработаны сразу после Второй мировой войны в США. Смеси марганец/хромат бария/хромат свинца, известные как D-16, очень надежные, дешевые композиции, не слишком чувствительные к тонкостям производства. Единственным существенным их недостатком является необходимость использования герметичных корпусов и тщательной сушки, т.к. под воздействием влаги происходит довольно быстрая коррозия содержащегося в смеси марганца, ведущая к изменению параметров сгорания смеси. При этом предварительная пассивация марганца, по-видимому, не может полностью устранить этот эффект. Скорость горения находится в пределах 1,85-12,5 мм/сек [8, 16, 95].

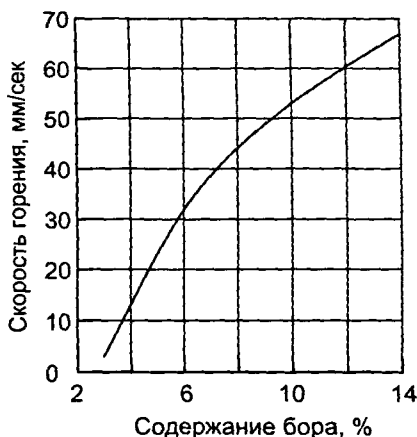


Рис. 6.4. Скорость горения смесей хромат бария + бор в зависимости от содержания бора [18].

- *Сплав цирконий-никель/перхлорат калия/хромат бария (Z-1).* Смеси сплава цирконий-никель/хромат бария обладают широким диапазоном скоростей горения, кроме того, они отлично хранятся, легко воспламеняются, обладают низкой чувствительностью к механическим воздействиям и выделяют наименьшее кол-во газов среди всех известных малогазовых составов. Наилучшие свойства этих смесей проявляются при замедлении в несколько секунд. Широко используются в различных изделиях производства США, например, в запалах ручных гранат.

Первые составы с никелем, разработанные к концу Второй мировой войны в США, содержали отдельно приготовленные порошки никеля и циркония. Однако порошок циркония опасен в обращении и чувствителен к статическому электричеству, а порошок никеля производился весьма дорогим методом испарения ртутной амальгамы. Применение сплава этих металлов в начале 50-х годов 20 века позволило решить эти проблемы [8, 16]. По стандарту США MIL-D-85855(AS) от 1990 г., эти композиции называются Z-1, они содержат 60% хромата бария, 14% перхлората калия, остальное – сплавы цирконий-никель 70/30 и 30/70 в различных соотношениях [19].

- *Молибден/перхлорат калия/хромат бария.* Смеси с широким диапазоном времени замедления от миллисекунд до десятков секунд. Однако в силу ряда причин молибдену отдают предпочтение в составах с миллисекундным временем замедления. Параметры горения составов с молибденом описаны в [4, 20, 21, 95].
- *Сурьма/перманганат калия.* Эта смесь, в соотношении 36/64, была разработана в начале 30-х годов 20 века и широко использовалась в немецких 4- и 7-секундных замедлителях времен Второй мировой войны. Регулировка скорости горения производилась путем изменения дисперсности компонентов. Также находили применение медленнотгорящая композиция 70/30 и быстрогорящая 46/54 [3]. Композиции на основе перманганата калия и сурьмы отличаются довольно низкой стабильностью при хранении и нагревании, однако благодаря доступности и легкой воспламеняемости к этим составам все еще проявляется интерес со стороны горной промышленности. Так, например, в патенте [47] для замедлителей со временем задержки более 150 мс предложена смесь 33-45% сурьмы, 55-65% перманганата калия и 0,1-2,0% кремния. Смесь 60% перманганата калия и 40% цинка применялась для воспламенения пороха «Hydrox» и безопасна по отношению к метано-воздушной смеси. Параметры смесей  $\text{Sb/KMnO}_4$  подробно изучены и описаны в [83, 84, 85].
- *Прочие малогазовые составы.* В американских патентах 60-х годов 20 века встречаются составы на основе хромата бария и металлов типа хрома, ниобия и тантала, они обладают достаточно неплохими свойствами, но, по-видимому, широкого применения в США так и не нашли из-за существования освоенных аналогов и дороговизны таких компонентов, как тантал и ниобий [5]. В малогазовых составах отечественного производства, а также производства стран Восточной Европы и Азии обычно используются дешевые и не дефицитные горючие типа ферросилиция, ферросиликохрома, серы и сульфидов

сурьмы. Следует отметить, что смеси, содержащие сульфиды сурьмы, теряют свои свойства при хранении во влажной атмосфере, поэтому их необходимо хорошо герметизировать [6].

Находят применение малогазовые смеси термитного типа. Они не токсичны и малочувствительны к внешним воздействиям. Из серьезных недостатков следует отметить плохую воспламеняемость подобных смесей и высокий разброс параметров от партии к партии. В патенте [47] описана композиция: 80-60%  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , 20-40% Si. Скорость горения для соотношения компонентов 70/30 – 6,15 мм/сек. В шведском патенте [49] заявлены смеси на основе окиси меди, например спрессованная смесь 60% окиси меди и 40% олова горит со скоростью 10 мм/сек. Нетоксичные шведские составы из [54] содержат  $\text{BaSO}_4$  – 45-70% и Si – 30-55%, и имеют скорость горения 4,28-7,5 мм/сек. Температурный коэффициент 0,059%/K.

Шведский концерн Bofors разработал [50] несколько экологически чистых вариантов смесей с применением оксидов олова и титана: бор – 5%, цирконий – 8%, двуокись титана – 28%, двуокись олова – 56%, хлоркаучук – 3%. Скорость горения в трубке диаметром 3,5 мм составляет 6 мм/сек. Скорость горения для других вариаций состава – 3-20 мм/сек.

В конце 80-х годов 20 века в Англии и Австралии были разработаны нетоксичные композиции на основе окиси железа и бора, способные воспламеняться напрямую от капсюля-воспламенителя. Их скорость горения составляет 2,5-25 мм/сек [22].

В последние годы находят применение нетоксичные малогазовые композиции на основе оксида висмута  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  и бора. При изменении содержания бора от 8% до 3% скорость их горения изменяется в пределах 1,5-4,2 мм/сек [71]. Американцы ведут исследования в области нетоксичных МГС:  $\text{Bi}_2\text{O}_3/\text{Sb}_2\text{O}_3$ /кремний,  $\text{W}/\text{Sb}_2\text{O}_3/\text{KIO}_4$ /связка,  $\text{Ti}/\text{C}-3\text{Ni}/\text{Al}$  [80, 99, 100].

**Табл. 6.3. Смеси на основе свинцовый сурик/кремний**

Состав	1	2	3	4	5	6
свинцовый сурик - $\text{Pb}_3\text{O}_4$	80	85	87,5	90	87	80
кремний - Si	20	15	12,5	10	12,5	16
шеллак	-	-	-	-	0,5	-
фторкаучук - viton A	-	-	-	-	-	4
нитроцеллюлоза, сверх 100%	1,8	1,8	1,8	1,8	-	-
теплота реакции, МДж/кг	1,4	1,37	1,34	1,07	-	-
температура вспышки, °C	671	721	713	765	-	-
объем газов, мл/г	11	10,6	15	14	-	-

1. Delay mixture V. Область применения: замедлители M201A1 для ручных гранат XM54, AN-M14, M6A1, M53 замедлитель для авиабомбы BLU 16/B [16, 23].
2. Delay mixture VII. Область применения: замедлители для мины XM42 (E5) [16, 23].
3. Область применения: замедлители M201A1 с задержкой 3-5 сек для ручных гранат [16].
4. Delay mixture IV. Область применения: бомбы BE 7501b, E153R1, E50, запалы M220, замедлители для плавучих дымовых шашек AN-M7A1 и AN-M7 [16].
5. Смесь для замедления в дымозажигательном патроне DM-34 [51].
6. Широко используется в современных американских изделиях как в качестве замедлительного состава, так и в качестве воспламенительного [82, 86].

Табл. 6.4. Смеси на основе бора и марганца

Состав	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
хромат бария - $\text{BaCrO}_4$	90	95	90	85	81	44	43	45	-	30	37	36	-	-	-
хромат свинца - $\text{PbCrO}_4$	-	-	-	-	-	-	-	26	55	37	30,2	27	-	-	-
оксид висмута - $\text{Bi}_2\text{O}_3$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	63	-	-
оксид хрома - $\text{Cr}_2\text{O}_3$	-	-	-	-	-	41	44	-	-	-	-	-	25	-	-
оксид молибдена - $\text{MoO}_3$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	89	93
бор аморфный - В	10	5	10	15	19	15	13	-	-	-	-	-	12	11	7
марганец - Мп	-	-	-	-	-	-	-	29	45	33	32,8	34	-	-	-
цирконий - Zr	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3	-	-	-
связка «VAAR» - св. 100%	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
теплота реакции, кДж/кг	2,16	1,11	1,94	2,10	1,16	-	-	1,08	1,09	1,07	1,10	-	-	2,36	1,86
температура всп., °C	615	553	560	706	656	-	-	452	336	460	420	-	-	474	587
объем газов, мл/г	3,1	4	29,5	5	12	-	-	12,6	15,4	18,3	11,4	-	-	2,0	3,1
плотность, г/см <sup>3</sup>	2,73	2,89	1,95	2,96	2,95	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

1. Смесь DP906, более известная как смесь Т-10. Область применения: замедлители для фотографической бомбы M112 и сигнального средства M49A1. Аналогичная смесь под индексом RD1365 применяется в Англии [16].
2. Смесь DP587. Область применения: замедлители для фотографической бомбы M112. Скорость горения 10,2 мм/сек. Аналогичная смесь под индексом RD1368 применяется в Англии в замедлителях для ручных гранат [16].
3. Смесь DP973. Область применения: замедлители для сигнальной мины M49A1 [16].
4. Смесь DP523 [16].
5. Смесь DP602 [16].
6. Скорость горения 5,6 мм/сек [9, 24].
7. Скорость горения 3,0 мм/сек [9, 24].
8. Состав D16 по спецификации MIL-M-21383. Применяется в Mk4 Mod 0 [16].
9. Состав D16 type A [16].
10. Состав D16 type B [16].
11. Состав D16 type C [16].
12. Чешская композиция с цирконием. Скорость горения 4 мм/сек [52].
13. Английская композиция. Скорость горения 8,45 мм/с [14].
14. Английская композиция SR-37. Скорость горения 15 мм/с [81].
15. Английская композиция SR-38. Скорость горения 6 мм/с [81].

Табл. 6.5. Смеси на основе сплава цирконий-никель (смеси Z-1) [16, 25, 26] и молибдена [7]

Состав	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
хромат бария - $\text{BaCrO}_4$	31	80	60	60	60	77	80	75	83	40	55	65
перхлорат калия - $\text{KClO}_4$	15	3	14	14	14	-	-	5	-	15	10	5
сплав Zr/Ni 70/30	54	-	26	9	3	-	-	-	-	-	-	-
сплав Zr/Ni 50/50	-	17	-	-	-	23	20	20	17	-	-	-
сплав Zr/Ni 30/70	-	-	-	17	23	-	-	-	-	-	-	-
молибден - Мо	-	-	-	-	-	-	-	-	-	45	35	30
теплота реакции, кДж/кг	1,37	0,84	2,18	-	-	0,85	0,80	0,94	0,71	-	-	-
температура вспышки, °C	335	407	325	-	-	375	351	-	-	-	-	-
объем газов, мл/г	9	0,7	13	-	-	1,0	0,8	1,4	-	-	-	-
скорость горения, мм/сек	10	1,64	12,7	5,1	2,1	-	-	-	-	12,7	4,2	1,4

1. Американский состав. Используется в запалах M112.
2. Американский состав.
3. DP-1415 type I. Замедлители для ручных гранат (M204A2, M206A2 и M205A2).
4. DP-1415 type II.
5. DP-1415 type III.
- 6 - 12. Американские композиции.

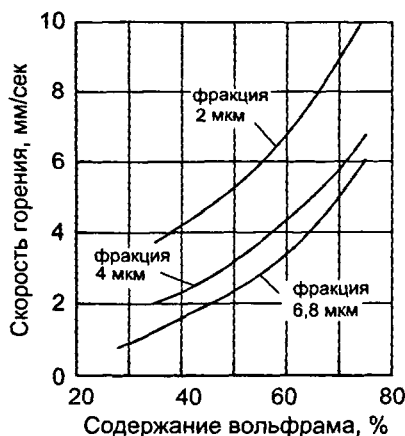
**Табл. 6.6. Прочие замедлительные составы для изделий с задержкой в несколько секунд**

Состав:	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
хромат бария - $\text{BaCrO}_4$	79	82	-	72	-	-	-	11	-	-	-	-	-	-	-	-	3	31
хромат свинца - $\text{PbCrO}_4$	-	-	80	-	-	-	-	-	-	-	-	58	-	-	-	87	53	36
хромат висмута - $(\text{BiO})_2\text{CrO}_4$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	88	-	-	-	-	-
хромат калия - $\text{K}_2\text{CrO}_4$	-	10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
дихромат калия - $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$	-	-	-	-	92	90	91,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
перхлорат калия - $\text{KClO}_4$	10	-	-	8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
свинцовый сурик - $\text{Pb}_3\text{O}_4$	-	-	-	-	-	-	-	59	53	57	61	21	-	85	80	-	-	-
ферросилиций - $\text{FeSi}$	-	-	20	-	-	-	-	-	10	6	2	-	-	-	-	-	-	-
кремний - $\text{Si}$	-	-	-	-	4	6	4	-	-	-	-	19	10	-	8	13	-	-
сера - $\text{S}$	-	8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
антимоний - $\text{Sb}_2\text{S}_3$	-	-	-	20	-	-	-	-	37	37	37	-	-	-	-	-	-	-
сульфид сурьмы V - $\text{Sb}_2\text{S}_5$	11	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
аморфный бор - $\text{B}$	-	-	-	-	4	4	4,5	8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
титан - $\text{Ti}$	-	-	-	-	-	-	-	17	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
магний - $\text{Mg}$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	44	33	-
цирконий - $\text{Zr}$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	15	-	-	-	-
фтористый литий - $\text{LiF}$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	9	-	-	-
прочее *	1	2	-	1	-	-	-	5	-	-	-	2	2	1	3	-	-	-

1. Отечественный высотный состав «19Ц» времен Второй мировой войны: \* – НЦ сверх 100% [10]. Скорость горения 5 мм/сек.
2. Отечественный состав для снаряжения кольцевого замедлителя к парашютной сигнальной ракете: \* – НЦ сверх 100% [53].
3. Состав использовался в изделиях стран Варшавского договора [6]. Скорость горения 10 мм/сек.
4. Индийский состав: \* – НЦ сверх 100% [28]. Скорость горения 4,3 мм/сек.
5. Устаревший английский состав SR-53 [29].
6. Устаревший английский состав SR-58 [30].
7. Устаревший английский состав SR-68 [31].
8. Немецкий состав. \* – НЦ [55].
- 9 - 11. Японские составы для применения в горной промышленности [32].
12. Отечественный термостойкий состав: \* – лак кремнеорганический [56]. Может использоваться как ВС к малогазовым составам. Скорость горения 15 мм/сек.
13. Отечественный состав для запалов гранат: \* – НЦ. Скорость горения 5,3 мм/сек [57].
14. Отечественный состав СЦ-1, заменивший трубочный порох ТО-34 в некоторых изделиях: \* – НЦ [87, 88].
15. Отечественный состав для снаряжения гибких разводов: \* – сополимер тетрафторэтилена с винилиденфторидом. Скорость горения 4,5 мм/сек [98].
16. Китайский состав. Скорость горения 22,1 мм/сек [95].
17. Китайский состав. Скорость горения 3,7 мм/сек [95].
18. Китайский состав. Скорость горения 14,3 мм/сек [95].

## 6.4. Малогазовые составы, обеспечивающие задержку в десятки секунд

В настоящее время к медленногорящим малогазовым смесям проявляется повышенный интерес, т.к. на их основе можно создавать малогабаритные замедлительные узлы пониженной стоимости. С усовершенствованием медленногорящих составов прослеживается тенденция перехода от замедлителей с кольцевыми каналами к простым в производстве замедлительным втулкам [58].



**Рис. 6.5. Зависимость скорости горения составов  $\text{BaCrO}_4/\text{KClO}_4$ /вольфрам/связка от содержания вольфрама в смеси и его фракционного состава [35].**

мм/сек, однако на практике обычно используются самые медленногорящие композиции. Отличаются низкой температурой воспламенения и малым разбросом скоростей горения в зависимости от температуры. В целях уменьшения скорости, повышения устойчивости горения и улучшения прессуемости, в состав вводят диатомит или аэросил, в более поздних модификациях – гексафторсиликат бария или фторид кальция. Инертные добавки также способствуют снижению температурного коэффициента. Исследование сгорания вольфрамовых МГС и зависимость параметров горения от размера частиц приведены в [33, 34].

По одному из последних американских стандартов MIL-D-82710(OS) от 1984 г., подобные смеси состоят из 25-75% вольфрама, 12-62% хромата бария, 7% перхлората калия, 5% диатомита и 1% фторорганического связующего (Viton). В зависимости от времени горения подразделяются на 3 класса (Табл. 6.7).

**Табл. 6.7. Требования к замедлительным составам на основе вольфрама [35]**

Класс	Время горения сек/дюйм при н.у.	Погрешность, %
I	2,5-7,5 (10,2-3,4 мм/сек)	10
II	7,5-12,5 (3,4-2,0 мм/сек)	7
III	12,5-32,5 (2,0-0,8 мм/сек)	5

Смесь, состоящая из 27% вольфрама, 58% хромата бария, 10% перхлората калия, 5% диатомита, имеет самую низкую скорость горения – 0,635 мм/сек, высокую надежность и устойчивость процесса горения, и по сочетанию этих качеств аналогов не имеет (по данным американцев).

Концерном Bofors в патенте [62] был предложен малотоксичный состав: бор – 4%, сурьма – 10%, двуокись титана – 31%, двуокись олова – 50%, перхлорат калия – 5%, полиакриловое связующее – 0,5% (сверх 100%). Скорость горения 2,5 мм/сек в трубке диаметром 3,5 мм.

Созданный в конце 1930-х годов в СССР состав МК хоть формально и назывался медленногорящим, однако уровень скорости горения 2-3 мм/сек достаточно велик и в современных условиях его следует считать «переходным».

Поэтому в период с 1960 по 1972 г. были созданы две композиции со скоростями горения 1,1-1,2 мм/сек, а в период с 1979 по 1989 г. – еще две со скоростями горения 0,5-0,7 мм/сек. Один из составов был предназначен для использования в полужамкнутом объеме (взрыватели), второй – в замкнутом (герметичные средства инициирования) [101].

Современные отечественные медленногорящие композиции в качестве горючих вместо вольфрама содержат менее дефицитные карбиды и бориды металлов, более старые – антимоний и ферросилиций [64, 65, 94].

Не так давно американская фирма Talley разработала прототип малогабаритного пиротехнического замедлительного устройства, основанного на задержке теплопередачи (Heat Transfer Delay) [91, 92]. Устройство имеет диаметр 4,8 мм, длину 25,4 мм и предназначено для использования в компактных узлах самоликвидации, обеспечивая задержку от 74 секунд (при н.у.) до 100 секунд (при -40°C). Устройство разработано по программе модернизации малогабаритной бомбы М-80, используемой в кассетных боеприпасах армии США. Оно содержит столбик теплогенирующего пиротехнического состава (46,67% титана, 23,33 бора и 30% хромата бария) и столбик состава с низкой температурой вспышки (24,75% нитрата гуанидина, 20,4%  $\text{AgNO}_3$ , 14,25%  $\text{KNO}_3$ , 39,6% порошка  $\text{Mo}$  и 1% азросила). Столбики разделены теплопроводящей перегородкой и помещены в трубку из теплоизолирующего материала. При воспламенении теплогенирующего состава тепло медленно передается через перегородку и инициирует воспламенение теплочувствительной композиции, вызывающей срабатывание детонатора.

Табл. 6.8. Смеси на основе хромата бария, вольфрама и перхлората калия

Состав	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
хромат бария - $\text{BaCrO}_4$	24	55	55	10	10	32	36,5	64	60	66	40	47
вольфрам - W	65	30	30	75	64	58	49	24	33	18,9	50	40
перхлорат калия - $\text{KClO}_4$	10	10	10	10	10	10	14,5	12	7	9,4	10	13
связующее «VAAR»	1	-	-	-	1	0,12	1	-	-	-	-	-
диатомит	-	4	5	5	-	-	-	-	-	-	-	-
прочее *	-	1	-	-	15	-	-	6	1	5,7	-	-
теплота реакции, кДж/кг	1,04	-	-	1,10	1,08	-	-	-	1,08	1,42	0,98	1,03
температура вспышки, °C	370	391	388	445	385	-	-	-	-	-	270	305
объем газов, мл/г	7	5,8	6	5,5	6,3	-	-	-	-	15	4,3	4,1

1. Смесь 8269017/8836967. Область применения: замедлители для сигнального средства М49А1 [16].
2. Смесь WS12607. Область применения: замедлители для Mk279 mod 2: \* – Viton A [16].
3. Температурный коэффициент 0,1%/К. Скорость горения 1,36 мм/сек. Плотность снаряжения 4,88 г/см<sup>3</sup> [16].
4. Скорость горения 1,36 мм/сек. Плотность снаряжения 4,88 г/см<sup>3</sup> [16].
5. Смесь DP1448: \* – дехлоран [16].
6. Смесь для снаряжения 48-секундного замедлителя М84А1: \* – VAAР св. 100% [37].
7. Замедлитель для 105 мм американского снаряда М913: \* – VAAР св. 100% [36].
8. Состав фирмы Dynapit Nobel: \* – 4% гексафторсиликата бария и 2% аэросила сверх 100%. Скорость горения при температурах от +71 до -54°C 0,8-0,67 мм/сек. В условиях вращения 1700 об/мин 0,65-0,54 мм/сек. Область применения: замедлители для снарядов [59].
9. Состав концерна GIAT для снаряжения гибких узлов замедления с внутренним диаметром 3,1 мм: \* – аэросил (сверх 100%). Скорость горения 2,0-2,5 мм/сек в диапазоне температур от -50 до +60°C [60].
10. Отечественный состав: \* – 1,9% фторопласта-4 и 3,8% дисульфида молибдена. Скорость горения 2,5 мм/с [61].
- 11 - 12. Американские составы [16].

**Табл. 6.9. Прочие замедлительные составы с малой скоростью горения**

Состав	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
хромат бария - BaCrO <sub>4</sub>	78	-	-	-	84	44	-	-	70	74	-	-
хромат свинца - PbCrO <sub>4</sub>	-	78	88	-	-	-	70	78	-	-	90	85
гидроксихромат висмута - BiОНСгО <sub>4</sub>	-	-	-	72	-	40	-	-	-	-	-	-
перхлорат калия - KClO <sub>4</sub>	10	10	-	8	8	8	2	3	9	-	-	-
оксид свинца - PbO	-	-	-	-	-	-	-	10	-	-	-	-
ферросилиций - FeSi	-	5,5	5,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-
циркония карбид - ZrC	-	-	-	-	-	-	6	-	-	-	-	-
титана карбид - TiC	-	-	-	-	-	-	-	-	7	-	-	-
циркония борид - ZrB <sub>2</sub>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	8	-	-
сера - S	-	-	-	-	8	8	-	-	-	-	-	-
антимоний - Sb <sub>2</sub> S <sub>3</sub>	11	5,5	5,5	20	-	-	-	-	-	-	-	-
поливинилиденфторид - ПВДФ	-	-	-	-	-	-	10	8	-	13	10	-
политетрафторэтилен - ПТФЭ	-	-	-	-	-	-	-	-	12	-	-	14
криолит - Na <sub>4</sub> AlF <sub>6</sub>	-	-	-	-	-	-	6	-	-	-	-	-
прочее*	1	1	1	1	2	2	6	1	2	5	-	1
скорость горения, мм/сек	2,5	2	-	2,3	2,2	1,3	0,59	1,56	0,7	0,8	0,91	0,48

1. Отечественный состав «МК», разработанный в 1937-1940 гг. Применялся в кольцевых замедлителях в странах Варшавского договора: \* – НЦ [6, 10].
- 2 - 3. Составы использовались в изделиях стран Варшавского договора: \* – НЦ [6].
- 4 - 6. Экспериментальные индийские составы: \* – НЦ [28, 38].
7. Отечественный состав: \* – сополимер тетрафторэтилена с винилиденфторидом [58].
8. Промышленный замедлительный состав (один из примеров): \* – НЦ [63].
9. Термостойкий (до 200°C) отечественный состав: \* – НЦ. Состав внедрен в ракетные снаряды системы «Град» и в изделие ВМГ-М «Пламя» [64].
10. Термостойкий (до 270°C) состав, способный сгорать в узких каналах: \* – 2,5% LiF и 2,5% сополимера винилиденфторида с фторэтиленом [65].
11. Отечественный состав [66].
12. Отечественный состав, способный сгорать в узких каналах: \* – алюминий [89].

1. Brassey's World Military Technology. Explosives, Propellants and Pyrotechnics. Series Editor: Colonel R.G. Lee. London. 1989.
2. Engineering Design Handbook. Military Pyrotechnics Series. Part One. Theory and Application. US Army Materiel Command. AMCP 706-185. 1967.
3. Basil T Fedoroff etc. Dictionary of Explosives, Ammunition and Weapons (german section) Dover, New Jersey. 1958.
4. Вспомогательные системы ракетно-космической техники. - Пер. с англ. Н.В. Обезьяева и к.т.н. М.С. Шура. - М.: Мир, 1970.
5. A.P. Hardt. Pyrotechnics. Pyrotechnica Publications. 2001.
6. Brebera Stanislav etc. Specialni Technica. I Dil. Гл. ред. Urban Ladislav. Praha 1976.
7. Ellern H. Military and Civilian Pyrotechnics. Chemical Publishing Company Inc. New York. 1968.
8. PATR 2700. Encyclopedia of Explosives and Related Items./ Basil T. Fedoroff & Oliver E. Sheffield. Vol 4 - Piccattiny Arsenal Dover, New Jersey, USA - 1969.
9. Engineering Design Handbook. Explosive Trains. US Army Materiel Command. AMCP 706-179. 1974.
10. Вернидуб И.И. На передовой линии тыла. - М.: ЦНИИИТКПК. 1993.
11. Def. Standard 13-178. Ministry of Defence. Glasgow 1994.
12. Def. Standard 13-168. Ministry of Defence. Glasgow 1995.
13. Def. Standard 13-127. Ministry of Defence. Glasgow 1993.
14. J. Bentley and P. Elischer. Gasless Pyrotechnic Cap. Proceedings of the Sixth International Pyrotechnics Seminar 12-21 July 1978.
15. P.P. Elischer, G. Cleal and M. Wilson. The Development of a Boron and Iron Oxide Delay System. DSTO. Melbourne, Victoria. 1986.
16. F. L. McIntyre, R.M. Rindner. A Compilation of Hazard and Test Data for Pyrotechnic Compositions. ARLCD-CR-80047. 1980.
17. J. T. Hedger. Factors Influencing the Pyrotechnic Reaction of Silicon and Red Lead. Propellants, Explosives, Pyrotechnics 8, 95-98 (1983).
18. Стандарт США MIL-D-85306A от 1991 г.
19. F.A. Gagliardi, M.J. Berry Developing an Inferential Baseline to Evaluate Alternative Pyrotechnic Fuze Designs for the M67 Hand Grenade. Proceedings of the Thirty-First International Pyrotechnics Seminar. July 11-16, 2004.
20. A. G. Rajendran, C. Ramachandran, and V.V. Babu. A Study of Molybdenum Barium Chromate/Potassium Perchlorate Delay System. Propellants: Explosives, Pyrotechnics 14, 113-117 (1989).
21. Tsai, L. M. , Wang, S. J. and Lin, K. Pressure Effects on Pyrotechnic Delays of the Molybdenum Family, Journal of Energetic Materials, 10: 1, 17 - 41. 1992.
22. Dr. Bernard E. Douda. Survey of Military Pyrotechnics. Prepared for Presentation at the Sixteenth International Pyrotechnics Seminar, Jonkoping, Sweden, 24-28 July 1991. NWSC/CR/RDTR-595. 1991.
23. L. M. Aikman, T. E. Shook, R. M. Lehr, E. Robinson, F. McIntyre. Improved Mixing, Granulation and Drying of Highly Energetic Pyromixtures. Propellants, Explosives, Pyrotechnics 12, 17-25 (1987).
24. Russel N. Broad. Replacement of First Fire Composition in M127A1 Ground Illumination Signal. ARWEC-TR-97002. 1997.
25. Стандарт США MIL-C-13739A от 1965 г.
26. Стандарт США MIL-D-85866AS от 1990 г.
27. Takuo Kuwahara, Chiharu Tohara. Ignition Characteristics of Zr/BaCrO4 Pyrolant. Propellants, Explosives, Pyrotechnics 27, 284-289 (2002).
28. R. G. Sarawadekar; N. G. Swarge; S. Jayaraman; J. P. Agrawal. Use of Bismuth Chromate with Antimony Trisulphide in Delay Compositions. Journal of Energetic Materials. Volume 21, Issue 2, 2003, Pages 97-107.
29. C.J. Smith. The Development of a Range of Non-lethal Anti-riot Weapons. ARDE Memorandum MX 71/60. 1960.
30. Def. Standard 13-159. Ministry of Defence. Glasgow 1994.
31. Def. Standard 13-133. Ministry of Defence. Glasgow 1993.
32. Hidetsugu Nakamura, Hiroyuki Taniguchi, and Yasutake Hara. Effect of Milling on the Burning Rates of Red Lead-Ferrosilicon-Antimony (III) Sulfide Delay Compositions. Propellants, Explosives, Pyrotechnics 20, 87-90. 1995.

33. Elie Shachar, Alon Gany. Investigation of Slow-Propagation Tungsten Delay Mixtures. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics* 22, 207-211. 1997.
34. Kai-Tai Lu, Ching-Chyuan Yang. Investigation of the Burning Properties of Slow-Propagation Tungsten Type Delay Compositions. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics* 33, 219-226. 2008.
35. Стандарт США MIL-D-82710(OS) от 1984 г.
36. Wayne W. Smith. Single Column Pyrotechnic Delay. Tech. Report ARFSD-TR-95006. Picatinny Arsenal. New Jersey. 1996.
37. Стандарт США MIL-C-48141 от 1973 г.
38. R. G. Sarawadekar; S. Jayaraman. *Defence Science Journal*, Vol 32, No 3, 1992 pp 177-181.
39. Пат. US6723191 от 2000 г.
40. Пат. RU2306306 от 2005 г.
41. Пат. CZ283677 от 1996 г.
42. Пат. DE3507399 от 1985 г.
43. Пат. EP0267058 от 1986 г.
44. Пат. EP0599792 от 1992 г.
45. Пат. WO2008035289 от 2008 г.
46. Пат. US3006748 от 1959 г.
47. Пат. GB2070581 от 1980 г.
48. Пат. GB2253207 от 1991 г.
49. Пат. SE130717 от 1944 г.
50. Пат. EP0310581 от 1987 г.
51. Пат. DE2412346 от 1974 г.
52. Пат. CZ285323 от 1994 г.
53. А.с. СССР 201164.
54. Пат. US4419154 от 1981 г.
55. Пат. DE3841690 от 1988 г.
56. Пат. RU2238257 от 2003 г.
57. Пат. RU2193020 от 2000 г.
58. Пат. RU2202525 от 2001 г.
59. Пат. EP0332986 от 1988 г.
60. Пат. FR2706449 от 1993 г.
61. Пат. RU2225385 от 2002 г.
62. Пат. GB2136794 от 1981 г.
63. Пат. RU2200141 от 2001 г.
64. Пат. RU2185355 от 2000 г.
65. Пат. RU2256638 от 2004 г.
66. Пат. RU2376271 от 2008 г.
67. Пат. US2911504 от 1958 г.
68. Пат. US1877127 от 1932 г.
69. Ф.А. Баум. Трубочные пороха и дистанционные составы. — М.: Оборонгиз. 1940.
70. Raymond H. Comyn. *Pyrotechnic Research at DOFL. Part II. Pyrotechnic Delays. TR-1015. Diamond Ordnance Fuze Laboratories. Ordnance corps. Department of the Army. Washington DC. 1962.*
71. Jai Prakash Agrawal. *High Energy Materials, Propellants, Explosives and Pyrotechnics*. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. 2010.
72. Пат. RU2149341 от 1998 г.
73. Пат. RU2281456 от 2004 г.
74. Пат. RU2230725 от 2002 г.
75. Пат. RU2001899 от 1992 г.
76. Русин Д.Л. Основы комплексного модифицирования полимерных композитов, перерабатываемых проходным прессованием: Учеб. пособие. — М.: РХТУ им. Д.И. Менделеева, 2008.
77. Жергов Е.Ф., Милехин Ю.М., Берковская Е.В. Технология порохов и твердых ракетных топлив в приложении к конверсионным программам. — М., 2006.
78. Пат. RU2140409 от 1997 г.
79. Japanese Naval Projectile Fuzes. February 1946. US Naval Technical Mission to Japan. San Francisco, California.
80. Jay C. Poret, Anthony P. Shaw, Lori J. Groven, Gary Chen, Karl D. Oyler. Environmentally Benign Pyrotechnic Delays. *Proceedings of the Thirty-Eighth International Pyrotechnics Seminar, Denver, Colorado, 10-15 June 2012*, p. 494-500.
81. P. Barnes, L. de Yong, J. Domanico, P. Twadawa and F. Valenta. A Comparison Between Several Standard Methods Used to Characterize the Ignition/Ignition Transfer of Pyrotechnic Compositions — A Collaborative Study. Part I: Data. Department of Defence. DSTO, Material Research Laboratories Melbourne, Victoria. Report MRL-R-1043. 1987.
82. Technical Manual. Ordnance Data for Toxic Hazards Associated with Pyrotechnic Items. NAVSEA SW050-AC-ORD-010. 2005.
83. Michael W. Beck, Michael E. Brown. Burning of Antimony/Potassium Permanganate Pyrotechnic Compositions in Closed Systems. *Combustion and Flame* 65: 263-271. 1986.
84. Michael W. Beck, Michael E. Brown. Modification of the Burning Rate of Antimony/Potassium Permanganate Pyrotechnic Delay Compositions. *Combustion and Flame* 66: 67-75. (1986).
85. Michael W. Beck, Michael E. Brown. Thermal Analysis of Antimony/Potassium Permanganate Pyrotechnic Compositions. *Thermochimica Acta*, 65 (1983) 197-212.
86. Пат. US3617403 от 1969 г.

87. Материалы Интернет-ресурса [www.pyrotechnics.net.ru/](http://www.pyrotechnics.net.ru/) Материалы лекций Дудырева А.С., «Разработка пиротехнических составов». Переработка и оформление Е. Мисоночкиковой и Королева Д.В.
88. Коллектив авторов. Специалисты по взрывчатым материалам, пиротехнике и боеприпасам. Биографическая энциклопедия. Научное издание. М.: «АвиаРус-XXI», 2006, с. 165, с. 423.
89. Пат. RU2237646 от 2003 г.
90. Пат. DE572639 от 1930 г.
91. Пат. US6298784 от 1999 г.
92. Christian W. Salafia and Gregory D. Knowlton. Development of a Heat Transfer Delay. Proceedings of the Twenty-Ninth International Pyrotechnics Seminar Westminster, CO. July 14-19, 2002.
93. Пат. CZ20110463 от 2011 г.
94. Д.Б. Демьяненко, А.С. Дудырев, И.Г. Страхов, М.Н. Цынбал. Комплекс новых пиротехнических замедлительных составов для временных устройств пироматериалов и средств инициирования. Известия Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета) № 16(42)/2012. – СПб., – 128 с.
95. Kaimin Wang, Yuquan Wen. Design of Initiators and Pyrotechnics for Weapon Systems. Beijing Shi: Gong fang gong ye chu ban she, 2006 (in Chinese).
96. Пат. CH648012 от 1980 г.
97. Пат. CZ287322 от 1995 г.
98. Пат. RU2202527 от 2001 г.
99. Jay C. Poret, Anthony P. Shaw, Christopher M. Csernica, Karl D. Oyler and Deven P. Estes. Development and Performance of the W/Sb<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/KIO<sub>4</sub>/Lubricant Pyrotechnic Delay in the US Army Hand-Held Signal. Propellants, Explosives, Pyrotechnics 38, 35 - 40 (2013).
100. Eric J. Miklaszewski, Jay C. Poret, Anthony P. Shaw, Steven F. Son and Lori J. Groven. Ti/C-3Ni/Al as a Replacement Time Delay Composition. Propellants, Explosives, Pyrotechnics 39, 138-147 (2014).
101. Взрывчатые вещества, пиротехника, средства инициирования в послевоенный период: Люди. Наука. Производство. Второе издание. /Коллектив авторов. – М.; СПб.: Издательство «Гуманистика». – 936 с., 2002.

## Глава 7. Зажигательные составы

По существующей классификации, зажигательные составы разделяют на 3 группы [3]:

- смеси, сгорающие за счет собственного окислителя:
  - термиты и термитно-зажигательные смеси,
  - составы для снаряжения зажигательных пуль и снарядов малого калибра;
- смеси, сгорающие за счет кислорода воздуха:
  - загущенные огнесмеси,
  - пирогели,
  - самовоспламеняющиеся горючие вещества;
- вещества, являющиеся сильными окислителями и вызывающие самовоспламенение при контакте с горючими и конструкционными материалами:
  - галоидные соединения фтора, хлористый хромил и т.д.

Люди использовали зажигательные средства в военных целях с незапамятных времен. В первую очередь, находили применение легко воспламеняемые доступные вещества – смеси горючих смол, нефти, серы, негашеной извести и т.д. Примитивными зажигательными составами заполняли горшки, специальные бомбы. Ими пропитывали наконечники стрел и шарообразные снаряды, изготовленные из смотанных веревок, соломы и других волокнистых материалов. Крупные зажигательные бомбы и снаряды метали при помощи катапульт.

С 7 века н.э. в морских сражениях греки начали использовать очень эффективный зажигательный состав, так называемый «греческий огонь». При сгорании эта смесь выделяла едкий черный дым, оказывающий сильный психологический эффект на противника. «Греческий огонь» было трудно потушить водой, т.к. вода реагировала с входящей в состав известью, вызывая дополнительный разогрев и расплескивание горящих компонентов. Греки метали бомбы, начиненные этой зажигательной композицией, при помощи катапульт, а впоследствии научились пускать ее при помощи труб – прообразов огнеметов. Рецептуры «греческого огня» начала второго тысячелетия уже содержали окислитель – калиевую селитру, позволяющую развигать более высокие температуры горения. Подобные зажигательные смеси не утратили своей важности до начала массового применения дымного пороха, датированного 15-ым веком, а в отдельных случаях использовались вплоть до конца 18 века. Поздние рецептуры состояли из селитры, серы, смолы, талового масла и сульфида сурьмы.

С появлением огнестрельного оружия и до начала Первой мировой войны использование зажигательных средств носило ограниченный характер из-за увеличения дистанций на полях сражений и с тем, что все меньше военных объектов строилось с применением сгораемых материалов. Однако с появлением авиации в Первую мировую войну зажигательное оружие обрело второе дыхание: стало возможным осуществлять глубокие рейды в тыл противника и применять зажигательные авиабомбы против незащищенных промышленных и гражданских объектов, а также складов. С другой стороны, в целях противодействия авиации и дирижаблям (германским цеппелинам) разрабатывались зажигательные пули и

снаряды малого калибра, которые, попадая в баки с горючим или в оболочку дирижабля, вызывали возгорание.

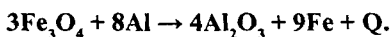
Первые композиции для малокалиберных боеприпасов времен Первой мировой войны состояли из магния с перекисью бария, а также смеси нитрата бария с магнием, скрепленных олифой. Инициировались такие составы от воспламенителя, содержащего свинцовый сурик и магний.

В немецких зажигательных пулях того времени использовалась смесь магния, алюминия, нитрата бария и небольшого количества нитроцеллюлозы в качестве связующего. Ударный воспламенитель этой пули содержал хлорат калия, магний и сульфид сурьмы.

Когда требовалось сочетание зажигательного и разрывного эффекта, англичане снаряжали снаряды «офоритом» (Ophorite) – смесью из 9 ч. магния и 13 ч. перхлората калия [14].

Зажигательные смеси времен Первой мировой войны коренным образом отличались от всего того, что применялось ранее. Распространение получили термитные и термитно-зажигательные составы. Их действие основано на эффекте алюмотермии, который был открыт в России еще в 1865 г. профессором Н.Н. Бекетовым.

Действие термита и термитно-зажигательных смесей основано на реакции:



Продуктами реакции являются жидкие шлаки и расплавленное железо с температурой до 2500°C, обладающие высоким прожигающим и воспламеняющим эффектом.

### **Примечание.**

*Бекетову удалось получить различные металлы путем восстановления их алюминием из оксидов. В то время алюминий был достаточно дорогим элементом и смешивание его с железной окалиной считалось нерациональным. Поэтому на Западе считается, что железоалюминиевый термит был открыт в 1894 г. немцем Гольдшмитом, когда началось промышленное производство алюминия и магния и, соответственно, к этой реакции возник практический интерес.*

До Первой мировой войны термит использовали исключительно для сварки железнодорожных рельсов. В качестве связующего обычно применяли силикаты натрия или калия (жидкое стекло) и серу. При этом силикаты использовали в тех случаях, когда необходимо было спокойное горение с продолжительным прожигающим эффектом. Состав с серой горел активнее, разбрасывая во все стороны капли расплавленного металла. В Германии в качестве связующего получил распространение целлулоид. Подобные термитные смеси поджигались с большим трудом и требовали для своего воспламенения специальных воспламенительных составов с высокой температурой сгорания и повышенным шлакообразованием. Таким воспламенительным составом на ранних этапах развития термитов была стехиометрическая смесь перекиси бария и алюминия.

В Германии во время Первой мировой войны находил применение термит на основе двуокиси марганца и магния.

В конце войны англичане начали использовать «пламенный термит», состоящий из 3 ч. порошка алюминия, 6 ч. нитрата бария и 8 ч. железной окалины. Пламенный термит легче воспламенялся, сгорал с большим тепловым эффектом, образованием жаркого пламени и текучих шлаков. В некоторых случаях для улучшения воспламеняемости в состав вводили небольшое количество перекиси бария. Впоследствии (уже во время Второй мировой войны) подобные смеси, т.н. термитно-зажигательные составы, широко использовались в авиабомбах с корпусом из магниевых сплавов «электрон» и ограниченно – в артиллерийских снарядах [1, 2].

В Первую мировую войну предпринимались многочисленные попытки использовать в качестве зажигательных средств продукты переработки нефти типа бензина и керосина, а также жидкие продукты переработки древесины. Эти вещества использовались достаточно активно, в том числе как зажигательное средство в огнеметах, несмотря на сильное дробление капель в воздухе. Соответственно, более чем на 60-70% состав выгорал в воздухе, не долетая до цели.

Жидкими горючими также снаряжали специальные авиабомбы с перегородкой. В нижней части боеприпаса находился термитный состав, а в верхней – загущенное горючее, представляющее собой смесь масел и летучих углеводородов типа бензина с добавкой загустителей (смола или диатомита). Термит должен был прожигать легкую броню или крышу здания, куда затем попадала спокойно сгорающая углеводородная смесь [1].

С большим успехом применялись пули, начиненные белым фосфором [2, 13]. Они были особенно эффективны против немецких дирижаблей.

Впрочем, начало применения фосфора в виде раствора в сероуглероде датируется еще концом 19 века. При испарении сероуглерода фосфор самовоспламенялся.

Несмотря на то, что температура горения фосфора не превышает 1500°C, фосфор показывал высокую эффективность против таких уязвимых объектов, как дирижабли. К тому же белый фосфор самовоспламеняется на воздухе, а при использовании в разрывных боеприпасах разбрасывает многочисленные брызги, причиняет тяжелые ожоги и оказывает деморализующее действие на личный состав.

До 1915 года в России разработки в области зажигательного оружия носили инициативный характер и, похоже, не воспринимались военными всерьез. Самым первым массовым зажигательным боеприпасом оказался «бензиновый зажигательный снаряд (бутылка) с пиротехническим воспламенителем», созданный в ответ на применение Германией и Австрией боевых отравляющих веществ на Восточном фронте. Предназначалось это средство для уничтожения вызревающего на территории Германии и Австрии урожая, а также складов сена и других легковоспламеняющихся материалов. Снаряд обычно представлял собой водочную бутылку, наполненную паклей, мазутом и керосином. Перед применением в бутылку доливали бензин, плотно закупоривали и приматывали два терочных воспламенителя (через войлочную прокладку).

Такие снаряды сбрасывались вручную с самолетов или дирижаблей. Вскоре, после первого успешного применения подобных «снарядов» были разработаны другие зажигательные бомбы: с фосфором, термитом, различными пиротехническими смесями.

В 20-ые годы 20 века советское военное руководство сосредоточило свое внимание на создании химических боеприпасов и зажигательному оружию практически не уделяло внимание. За это время на вооружение была принята лишь термитная бомба конструкции Н.К. Анчутина, практически ничем не отличавшаяся от зажигательной бомбы, разработанной в 1916 г. полковником Е.Г. Гроновым.

В СССР до середины 30-х годов 20 века отдавалось предпочтение «огнесмесетанию» непосредственно с самолетов, а в боевых действиях предусматривалось широкое использование огнеметов.

До 1940 г. на вооружении Красной Армии состояла огнеметная смесь из 25% бензина, 25% керосина и 50% моторной нефти. Эта смесь обеспечивала дальность огнеметания до 50 м и сгорала преимущественно в воздухе, оказывая слабое действие на цель.

Однако, в связи со значительным развитием ПВО, низколетящий самолет стал представлять собой легкую мишень, и от идеи огнесмесетания с самолетов в УВВС РККА были вынуждены отказаться. Это послужило толчком к развитию отечественных зажигательных бомб и ампул, сбрасываемых с достаточно большой высоты. Первоначально ампулы (т.н. «химические шары»), предназначались для снаряжения боевыми отравляющими веществами, но после соответствующей доработки оказались пригодными для снаряжения зажигательными смесями.

В 1936 г. на испытательном полигоне ВВС РККА были продемонстрированы первые советские зажигательные авиабомбы, корпус которых был изготовлен из магниевого сплава «электрон» [46].

Новым толчком к дальнейшему развитию зажигательных средств послужила Вторая мировая война.

В период Второй мировой войны, кроме обычного фосфорного наполнения, японцы использовали зажигательные снаряды, начиненные резиновыми гранулами, в которые был импрегнирован 88% раствор белого фосфора в сероуглероде. При подрыве центрального заряда из пикриновой кислоты гранулы равномерно разбрасывались, сероуглерод испарялся, и фосфор самовоспламенялся на воздухе. Другим изобретением японцев был модифицированный фосфор, получаемый путем нагревания белого фосфора без доступа воздуха при 270°C в течение 10-20 часов. При этом получался более твердый и хрупкий продукт, который не самовоспламенялся на воздухе при обычной температуре, но легко загорался при ударном воздействии. Американские напалмовые бомбы содержали воспламеняющий заряд из белого фосфора. При срабатывании разрывного заряда фосфор диспергировался и разбрасывался вместе с жидкими зажигательными смесями, инициируя их воспламенение [1].

В 1939 г. в Швейцарии была разработана очень эффективная зажигательная пуля. Швейцарская пуля, снаряженная зажигательной смесью, состоящей из рав-

ных частей нитрата бария и сплава магния с алюминием, поступила на вооружение многих стран. Этот пиротехнический состав, известный под индексами [М-1], смесь №7, SR365 и т.д., оказался настолько удачным, что послужил прототипом всех современных зажигательных композиций для снаряжения малокалиберных боеприпасов. Смесь нитрата бария с порошком алюминиймагниевого сплава отличается плохой технологичностью для массового изготовления зажигательных пуль. Технологичность была улучшена без значительного ухудшения свойств за счет введения небольшого количества таких связующих, как асфальтит, резина, кальция, парафин и т.д. Впоследствии этот состав неоднократно модифицировали добавлением перхлората калия в целях облегчения воспламенения и различных связующих для улучшения механических свойств [1, 2]. Подобные композиции до сих пор являются основными для снаряжения малокалиберных зажигательных боеприпасов.

Для снаряжения авиабомб продолжалось использование термитно-зажигательных смесей. В целях увеличения зажигательного действия, корпуса таких бомб изготавливали из магниевого сплава «электрон», который под действием высоких температур был способен к самостоятельному горению. Горение «электрона» активизировалось при контакте с древесиной и другими кислородсодержащими материалами. Совместное использование сгорающего корпуса боеприпаса вместе с термитным зарядом было предложено немцами еще в 1917 г., однако промышленное производство корпусов из магниевых сплавов началось только с 1939 г.

В отечественных термитных бомбах наряду с классическими термитно-зажигательными смесями, подобными американским ТН-2 и ТН-3, находил применение термит, состоящий из пиролюзита, порошка алюминия и серы [46].

Зажигательные бомбы времен Второй мировой войны применялись как в самостоятельном виде, так и в рассеивающих кассетах. Чтобы максимально затруднить тушение очага возгорания, некоторые термитные бомбы снаряжали зарядом взрывчатого вещества или черного пороха. Через некоторое время после сгорания термита бомба взрывалась, разбрасывая горящие куски термита и корпуса.

Также на вооружении СССР, Англии, США и Германии состояли авиабомбы с комбинированным снаряжением. Кроме заряда термита в корпус из сплава «электрон», они снаряжались твердым углеводородным горючим типа парафина, битума или нафталина. Под действием тепла термита горючее вскипало, его пары воспламенялись, формируя струи пламени. После сгорания основной части термита инициировался заряд пороха, который разбрасывал горящие фрагменты и оказывал деморализующий эффект на пожарные бригады.

По данным И.И. Вернидуба, в период с 1940 по 1945 год было изготовлено 4750 тыс. зажигательных авиабомб, из которых 3190 тыс. составляли ЗАБ-2,5Т [56]. За годы войны только в Советском Союзе было произведено более 128 млн. зажигательных шашек для 20- и 23-мм бронебойно-зажигательных и осколочно-зажигательных снарядов [55].

Термитные артиллерийские зажигательные снаряды во время Второй мировой войны, в отличие от Первой мировой, применялись весьма ограниченно из-за доказанной низкой эффективности против военных объектов. Большое распространение получили лишь разрывные снаряды, снаряженные белым фосфором. Хотя основным их функциональным назначением было создание задымления, а не достижение зажигательного эффекта [1].

Во Второй мировой войне применение жидких зажигательных смесей заметно расширилось. В начале войны определенное распространение получил натуральный каучук, который эффективно загущал жидкие горючие с образованием липкого геля, способного к продолжительному горению, за счет чего к поджигаемому материалу передавалось больше тепла. Затем в США была предпринята попытка использовать в качестве наполнителя зажигательных бомб смеси бензина с дизельным топливом с добавкой 14% отходов от производства хлопковой ваты. Вскоре эти работы были прекращены в связи с внедрением намного более эффективных загустителей.

Немцы в своих зажигательных смесях еще до войны начали применять полистирол, так, например, зажигательная композиция для 50 килограммовых бомб состояла из 87,7% бензина, 11,7% полистирола и 0,5% белого фосфора, придающего способность смеси самовоспламеняться.

В 1941-1942 гг. в США для замены привычного загустителя жидких зажигательных смесей – каучука – был разработан знаменитый «напалм», впрочем, впервые его применили только в июне 1944 г. Дефицит каучука был вызван громадным его потреблением резиновой промышленностью для снабжения покрышками военного транспорта.

В настоящее время слово «напалм» стало нарицательным и зачастую под этим термином подразумевают все виды загущенных зажигательных смесей без окислителей.

Название произошло от слов НАфтеновая и ПАЛМитиновая кислота – основных компонентов нового загустителя для жидких горючих. Загущенные углеводороды типа напалма, хоть и не могли развивать такую высокую температуру, как термитно-зажигательные смеси из-за рассеяния теплоты газообразными продуктами сгорания, тем не менее, они были способны продолжительно гореть, и с их помощью удавалось создавать обширные очаги пожаров. При массовом применении напалма достигается удушающее и сильное психологическое действие.

Загуститель для напалма получил обозначение М1, он состоял на 50% из алюминиевых солей жирных кислот кокосового масла, на 25% – из солей нафтеновой кислоты и на 25% – из солей олеиновой кислоты.

Варьируя соотношением этих компонентов, стало возможным регулировать вязкость и другие механические свойства зажигательной смеси. В зависимости от количества загустителя консистенция готовой смеси может меняться от состояния густого сиропа до студнеобразной массы. Загуститель М1 имел существенный недостаток, связанный с повышенной гигроскопичностью: поглощая влагу, он

вызывал расслоение и потерю необходимых свойств зажигательной смеси; кроме того, состав М1 был подвержен постепенному окислению кислородом воздуха. В целях уменьшения гигроскопичности, в загуститель начали добавлять аэрозоль в количестве до 2% со специальной добавкой, предотвращающей слеживание. Новый продукт получил обозначение М2. Компоненты загустителей М1 и М2 вырабатывались из достаточно дорогого природного источника – кокосового масла, поэтому в целях удешевления и дальнейшего понижения гигроскопичности американцы применили алюминиевую соль изеооктановой кислоты совместно с агентом, предотвращающим слеживание. Таким образом появился загуститель М4, который используется до сих пор и по загущающей способности превосходит М1 в 2 раза. Параллельно с М2 начал применяться другой синтетический загуститель – изобутилметакрилат (полимер АЕ или ІМ), обычно в композициях с другими веществами [1].

Зажигательные бомбы со структурирующими добавками в виде хлопчатобумажных очесов, ветоши и пакли были приняты на вооружение Красной Армии в 1941 г. Пакля уменьшала дробление капель вязкой огнесмеси при разрыве зажигательной авиабомбы и тем самым повышала эффективность [46].

В 1938 г. А.П. Ионов в ВХНИИ (ныне ЦНИИХМ) проводил исследования по загущению жидких горючих, в 1939 г. новый загуститель (нафтенат алюминия, известный под шифром «ОП-2») был испытан и показал высокую эффективность. Таким образом, в 1941 г. началось массовое производство ОП-2 [49].

Это позволило увеличить дальность огнеметания в 2 раза, а на новых огнеметах (ФОГ, АТО-42) – в 3 раза. Вязкая огнесмесь на основе ОП-2 и бензина с большим успехом применялась в огнеметах, зажигательных авиабомбах, противопехотных зажигательных минах, а также в зажигательных мешках [48].

Кроме штатных зажигательных средств, во время острой нехватки боеприпасов, в СССР и ряде других стран широко применялись зажигательные бутылки, снаряженные жидким горючим (прозванные на Западе «коктейлем Молотова»). Бутылка обычно снабжалась ампулой с самовоспламеняющейся смесью либо терочным воспламенителем. При попадании в танк горящая жидкость заклепывала смотровые окна, проникала в щели и в моторный отсек и тем самым инициировала пожар.

Прототипы таких бутылок были взяты на вооружение добровольцами во время гражданской войны в Испании в середине 30-х годов 20 века. Однако воспламенителем в них служила обычная тряпка, вставленная в горловину бутылки. Как было указано ранее, подобные бутылки, снабженные терочными воспламенителями, применялись русской армией и во время Первой мировой войны.

В наиболее тяжелый период Великой Отечественной войны широко применялись т.н. «огневые мешки», изготавливаемые из бензостойкой клеенчатой ткани и снабженные терочным воспламенителем. Снаряжался такой мешок бензином, загущенным порошком ОП-2. Их сбрасывали с самолетов, а во время битвы за Москву из мешков изготавливали огневые фугасы.

На вооружении Красной Армии в начале Великой Отечественной войны находились вязкие зажигательные смеси №1 и №3, представляющие собой автомобильный бензин, загущенный порошком ОП-2. Эти жидкости отличались разным содержанием добавки ОП-2 и, соответственно, вязкостью. Кроме того, на вооружении армии состояли бутылки с самовоспламеняющейся жидкостью «КС» – сплавом фосфора и серы с очень низкой температурой плавления (название дано по первым буквам изобретателей – Кузьмина и Сергеева).

Боец – истребитель танков – обычно снаряжался одной бутылкой со смесью КС и двумя бутылками со смесью №1. По инструкции он должен был сначала метнуть бутылку со смесью КС, тем самым вызвав очаг воспламенения, а потом бросить 2 бутылки с обычной зажигательной смесью. Зажигательные бутылки со смесями №1 и 3 часто снаряжались различными типами воспламенителей – терочными, а также ампулами с веществом, воспламеняющимся при контакте с горючим (хлористый хромил). Кроме того, ограниченно применялись эмульсионные зажигательные смеси, содержащие жидкое горючее, отвержденное казеином. В середине войны для замены ОП-2 был принят более эффективный загуститель ОП-3 (алюмомагниево-кислотные соли нафтенных кислот). Натриевые и калиевые соли жирных кислот были рекомендованы для получения отвержденных горючих на тяжелых видах топлива [48, 49].

В конце Второй мировой войны советские и американские исследователи в целях повышения зажигательного действия загущенных смесей начали добавлять в напалм магний, алюминий и небольшое количество окислителя. Эти композиции, получившие название «пирогелей», отличаются от классических напалмов более активным процессом горения и повышенными температурами, достигающими 1800-2000°C. Таким образом, достигался некий компромисс между составами с окислителями и загущенными смесями без окислителей, выразившийся в сочетании высокой температуры горения с хорошей воспламеняемостью и прилипанием к поражаемым объектам.

### **Примечание.**

*Во Второй мировой войне зажигательные средства, в отличие от других пиротехнических средств, по важности относили к основным типам боеприпасов ввиду их высочайшей эффективности, не уступающей в поражающем действии фугасным снарядам и бомбам. Однако специфика современного зажигательного оружия заключается в том, что оно может быть наиболее эффективно использовано только против гражданских и промышленных объектов.*

В послевоенные годы, в связи с развитием реактивной и высотной авиации, разработка зажигательных смесей и боеприпасов была сосредоточена в области малокалиберных снарядов и пуль, эффективных при использовании на больших высотах. Во время войны в Корее американцами были разработаны фугасно-зажигательные смеси «МОХ» для снаряжения зенитных снарядов малого калибра, которые комбинировали зажигательный эффект с фугасным эффектом.

взрыва. На практике широко использовалась только смесь МОХ-2В, состоящая из 52% алюминия, 35% перхлората аммония, 6% смеси гексоген/воск (97/3), 4% тротила (в виде покрытия на частицах перхлората аммония), 2% стеарата кальция и 1% графита [1].

В 1960-70 гг. 20 века в США было получено значительное количество патентов на смеси белого фосфора и каучука [36, 37, 38, 39, 40]. Из них формировали шарики, которыми начиняли разрывные боеприпасы.

В период войны во Вьетнаме американцы использовали напалм «Б» (para1m В), состоящий из 25% бензола, 50% бензина и 25% полистирола. Опыт загущения жидких горючих полистиролом, видимо, был позаимствован у немцев. Напалм В горел медленнее классического напалма, развивал большую температуру (до 1600°C против 1200°C), отличался лучшей прилипаемостью к поверхностям и отсутствием гигроскопичности. Он труднее воспламенялся, в результате чего было снижено количество несчастных случаев, связанных с курением солдат вблизи емкостей с напалмом.

В дальнейшем развитие зажигательных составов замедлилось. Белый фосфор, ввиду его высокой токсичности и опасности в обращении, начал вытесняться обычными зажигательными смесями, причем в малокалиберных боеприпасах его почти полностью исключили из употребления. В состав новых термитно-зажигательных составов начали вводить фторорганические полимеры и малодоступные ранее металлы – титан и в меньшей степени – цирконий. Тем не менее эти новые составы никогда не являлись массовыми. В целом, современные массовые зажигательные композиции принципиально являются не чем иным, как несколько модифицированными смесями времен Второй мировой войны и послевоенных лет. Например, американская термитно-зажигательная композиция «ТН-3» сохранилась практически в неизменном составе вплоть до наших дней. Кроме того, в настоящее время имеется тенденция замены термитных авиабомб на авиабомбы, снаряженные загущенными огнесмесями и пирогелями. Термитно-зажигательными составами снаряжаются лишь образцы старых авиабомб, производство которых еще не прекращено [1, 3, 4].

В 1980 г. конвенцией ООН по обычным вооружениям (протокол III) напалмовые, а также фосфорные боеприпасы, как и другие зажигательные средства, были запрещены, однако США ратифицировали этот протокол только в 2009 г. Похоже, ратификация носила лишь формальный характер, т.к. США оставили за собой право использовать зажигательные средства против военных объектов. Смеси, подобные напалму, применялись в том числе в начальный период войны в Ираке в 2003 г.

В операции «Литой свинец» 2008-2009 г. Израиль применил в густонаселенной местности фосфорные боеприпасы, поэтому сбрасывать со счетов это оружие было бы преждевременно. Израильские военные оправдывали свои действия попытками поставить дымовые завесы, т.к. фосфорные боеприпасы можно считать дымовыми изделиями с побочным зажигательным эффектом. Соответственно, они не подпадают под конвенцию ООН, которую Израиль подписал и ратифицировал.

### **Примечание.**

Четких критериев для оценки эффективности действия зажигательных составов не существует. Эти критерии могут отличаться не только в зависимости от типа зажигательной смеси, но и от национальной школы какой-либо страны и принятых национальных стандартов. Теплота сгорания и даже развиваемая температура горения в какой-то мере определяют реальную зажигательную способность состава только в пределах группы, к которой принадлежит зажигательный состав. Например, железоалюминиевый термит имеет теплоту горения 3,4 МДж/кг, а загущенные горючие – порядка 40 МДж/кг. Но температура горения термита составляет 2500-3500°C, продуктами сгорания являются жидкие шлаки с хорошей теплоемкостью. В случае загущенных огнесмесей температура горения редко превышает 1500°C, большая же часть тепла уносится продуктами горения. Соответственно, согласно [3], коэффициент полезного использования тепла термита составляет 75%, а жидкого горючего – 15% (испытания путем сжигания в открытой стальной чашечке, помещенной в калориметр). Из-за постоянного уноса тепла за счет испарения и газификации горючего, поверхность, на которой находится горящий напалм, прогревается достаточно слабо. Хорошо прогреваются только предметы, находящиеся в пламени горящего напалма.

В США за критерий эффективности термитного боеприпаса принята способность к прожиганию стальных листов, а также время горения. Проба на прожигание металлического листа условно имитирует уничтожение техники, положенной сверху зажигательной гранатой или термитной шашкой. От состава требуется минимальная теплоотдача излучением и конвекцией, но высокая температура и теплопроводность продуктов горения. Так, например, зажигательная граната AN-M14, содержащая 1,5 фунта зажигательной смеси ТН-3, должна прожигать стальной лист толщиной 1/8 дюйма (3,2 мм) за 40 сек. Хотя конструктивно эта граната предназначена для броска, в армии она используется в основном для стационарного уничтожения техники и имущества.

Зажигательные пули и малокалиберные снаряды предназначены для поджигания горючего, находящегося за легкой броней (при попадании в топливный бак). Поэтому их обычно испытывают на бочках с горючим либо на ветоши, смоченной в дизельном топливе, которые находятся за металлическим листом. Определяют вероятность успешного воспламенения. При воспламенении горючего критичными являются способность состава воспламеняться от удара и гореть некоторое время без доступа воздуха, для того чтобы успела сформироваться топливно-воздушная смесь, способная к самостоятельному горению. Это время для обычных составов с металлами составляет 50-200 мс, для составов с красным фосфором – до 300 мс.

Напалм и подобные ему загущенные огнесмеси предназначены для создания многочисленных очагов пожара. При инициировании напалмового боеприпаса обычно определяют среднее количество устойчивых очагов воспламенения. Типичным объектом поражения боеприпасов, снаряженных загущенными огнесмесями, являются склады и легкие постройки из древесины, поэтому критичным является площадь возгорания и длительность воспламеняющего действия.

## 7.1. Термиты и термитно-зажигательные смеси

Термитами называют смеси оксидов железа, марганца, хрома и других подобных металлов с порошкообразным алюминием или магнием. Вместо оксидов металлов могут быть использованы сульфаты кальция и бария, хотя под словом «термит» обычно подразумевают конкретную смесь из 2,75 частей железной окалины  $Fe_3O_4$  и 1 ч. алюминиевого порошка. В Америке такой термит имеет обозначение «ТН-1», в СССР/России – ТР. При горении термита выделяется 3,33 кДж/кг тепла, смесь расслаивается, сверху остается более легкий шлак, состоящий главным образом из оксида алюминия, а внизу – расплавленное железо с температурой до 2500°C, которое обладает высоким прожигающим действием.

Для повышения эксплуатационных и зажигательных свойств термита, к нему добавляют окислители и связующие. Такие смеси получили название «термитно-зажигательных» (в американской литературе – «Thermate»).

### Примечание.

*Горение термитных смесей сопровождается повышенным тепловым, видимым и УФ-излучением. Не следует смотреть непосредственно на горящий термит, т.к. это может привести к ожогу сетчатки и/или роговицы глаза.*

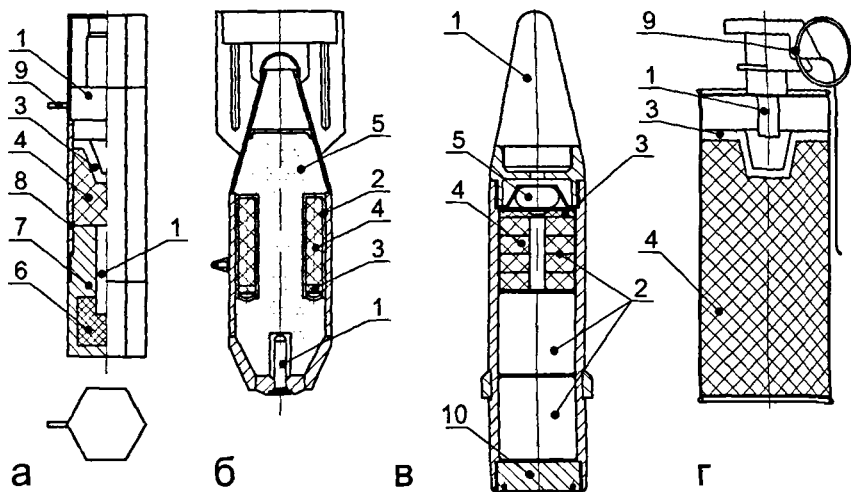


Рис. 7.1. Схемы боеприпасов с использованием термитно-зажигательных смесей [5, 6, 7].

а) – характерная компоновка американских и германских зажигательных бомб гексагонального сечения для использования в кассетах времен Второй мировой войны; б) – более современная схема зажигательных авиабомб, при ее срабатывании разбрасываются зажигательные патроны с термитом, инициируя возгорание; в) – характерная схема артиллерийского снаряда, снаряженного несколькими зажигательными сегментами; г) – схема американской термитной гранаты AN-M14.

1 – воспламеняющее и/или замедляющее устройство, 2 – зажигательный сегмент (патрон), 3 – воспламенительный состав, 4 – термитно-зажигательная смесь, 5 – вышибной заряд, 6 – заряд ВВ, 7 – железная головная часть, 8 – корпус из сплава «электрон», 9 – предохранительная чека, 10 – вышибная крышка.

Самая известная американская термитно-зажигательная смесь ТН-3 (см. табл. 7.1) производилась со времен Второй мировой войны вплоть до настоящего времени. По американской программе исключения тяжелых металлов из пиротехнических составов, сейчас проводится постепенная замена ТН-3 на композицию на основе нитрата стронция:  $\text{Sr}(\text{NO}_3)_2$  – 20,6%, железная окалина – 48%, смесь порошков алюминия – 27,4%, сера – 2%, полиакриловое связующее – 2% [54].

В современных боеприпасах обычно стремятся комбинировать воспламеняющий эффект термитно-зажигательных смесей с какими-либо другими – например, фугасным за счет дополнительного размещения заряда взрывчатого вещества. Были разработаны термитно-зажигательные смеси с повышенным прожигающим действием по металлическим конструкциям. Например: 32% фторфосфатное связующее Zonyl S-13, 12% окись железа, 28% магний, 12% кремний, 16% перхлорат калия [53]. Хотя в целом термитные средства постепенно уступают по важности жидким загущенным огнесмесям.

**Табл. 7.1. Термитно-зажигательные смеси**

Состав	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
термит	-	-	50	-	-	68,7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	57	-
оксиды Fe	61	55,2	-	-	44	-	51	40	-	25	59,2	-	32	-	10	30	50	53,3	-	-
MnO <sub>2</sub>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	14	-	-	-	-	-	-
Al	22,8	25	14,8	35	25	-	22	20	-	20	25,3	40,9	-	-	-	28,6	-	16,0	-	30
Ba(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	15	19,5	11,7	-	29	29	22	35	40	30	-	-	12	2,5	10	-	-	28,3	28	-
NaNO <sub>3</sub>	-	-	14,8	45	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	51
сера	0,9	-	1,6	5	2	2	-	-	-	-	-	1,0	-	-	-	-	-	-	3	9
CaSO <sub>4</sub>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	57,8	-	-	-	-	-	-	-	-
ПАМ	-	-	-	-	-	-	-	-	45	-	-	-	19,2	-	-	-	-	-	9	8
магний	-	-	-	-	-	-	-	-	-	10	-	-	-	-	-	-	25	0,4	-	-
Zr	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	16,8	-	70	-	-	-	-	-
Ti	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	78,5	-	-	-	-	-	-
TiO <sub>2</sub>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	41,4	-	-	-	-
прочее *	0,3	0,3	7,1	15	-	0,3	5	5	15	15	15,3	0,3	20	5	10	-	25	2	3	2

1. Therm-8 – термитно-зажигательная смесь для использования в американских зажигательных гранатах AN-M14 начала Второй мировой войны: \* – касторовое масло [1].
2. Therm-8-2 (Thermate ТН-2): \* – касторовое масло [1].
3. Использовался вместо ТН-2 во время Второй мировой войны в бомбах Е19: \* – мин. масло [51].
4. Использовался в диверсионных зажигательных устройствах «FM sabotage incendiary»: \* – мин. масло [51].
5. Therm-64С – улучшенный Therm-8. Температура горения 2985°C. Использовался в американских зажигательных бомбах М50А2 и М52А1 времен Второй мировой войны [1].
6. Thermate ТН-3 – Therm-64С со связующим. Используется в зажигательных авиабомбах и современных модификациях зажигательной гранаты AN-M14: \* – касторовое масло [8]. Скорость горения 2,75 мм/сек.
7. Thermate ТН-4 – более поздняя модификация американских термитно-зажигательных смесей: \* – ламинак 4116 [8].
8. Английская термитно-зажигательная смесь SR-306 «Cendite» времен Второй мировой войны: \* –  $\text{H}_3\text{BO}_3$ . Борная кислота играет роль стабилизатора, связующего и дополнительного окислителя, т.к. способна сгорать в смесях с алюминием [9].

9. Японская смесь времен Второй мировой войны для снаряжения зажигательных снарядов «Тип 3»: \* – связующее на основе полисульфидного и натурального каучука [52].
10. Японская смесь времен Второй мировой войны для снаряжения зажигательных снарядов «Тип 3» (медленногорящий слой): \* – связующее на основе полисульфидного и натурального каучука [52].
11. Баритовый термит: \* – сульфат бария [1].
12. Термит на основе гипса. Пригоден для технологич. резки металла: \* – касторовое масло [1].
13. Немецкая литейная термитно-зажигательная смесь: \* – акриловый полимер [25].
14. Английский термит SR-877 с титаном: \* – 4% казеинового клея и 1% нитрата калия [20].
15. Немецкий термитно-зажигательный состав: \* – акриловый полимер [26].
16. Французская смесь [27].
17. Состав для снаряжения фугасно-зажигательных боеприпасов: \* – силиконовая резина [28].
18. Отечественная смесь времен Великой Отечественной войны для снаряжения термитных шаров в рассеивающих авиабомбах типа ЗАБ-50ТЩ и ЗАБ-100ТЩ. Состав установлен в результате химического анализа [47].
19. Отечественный состав Ф-45-4: \* – олифа [10].
20. Отечественный состав времен Великой Отечественной войны для снаряжения ЗАБ-2,5: \* – канифоль. Также содержит 2% индустриального масла сверх 100% [50].

## 7.2. Композиции для снаряжения зажигательных пуль и снарядов малого калибра

Термитно-зажигательные смеси горят довольно медленно, а для надежного воспламенения обычно требуют значительного количества мощной воспламеняющей смеси. Их горение неустойчиво в зарядах малого диаметра. Поэтому классические термитно-зажигательные смеси не пригодны для использования в небольших боеприпасах типа зажигательных пуль и снарядов небольшого калибра, где горение инициируется при попадании боеприпаса в цель, а время сгорания смеси составляет доли секунды (для большинства пуль до 200 мс).

**Зажигательные пули бывают трех типов [2, 11]:**

- инициируемые ударом о преграду (за счет резкого динамического сжатия и деформирования);
- зажигательно-пристрелочные (воспламенение происходит за счет срабатывания капсюля-воспламенителя при ударе);
- с комбинированным зажигательно-трассирующим эффектом.

Пули, которые инициируются ударом о преграду обычно содержат смесь нитрата бария, порошка алюминий-магниевого сплава и небольшого количества связующего. Зажигательный заряд располагается в передней части такой пули перед бронебойным сердечником. Недостатком пуль, воспламеняющихся от удара, являются отказы в воспламенении при попадании в недостаточно прочные преграды. Кроме нитрата бария, используются окислители типа перхлората калия, перекиси бария и двуокиси свинца. Последний компонент особенно хорош в тех случаях, когда для сохранения баллистических свойств пули необходимо использовать составы с максимальной плотностью. Составы с перхлоратами, как более чувствительные к удару, обычно размещают отдельно в головной части снаряда для обеспечения надежного срабатывания смеси, а за ним следует уже менее восприимчивый состав на основе нитрата [1].

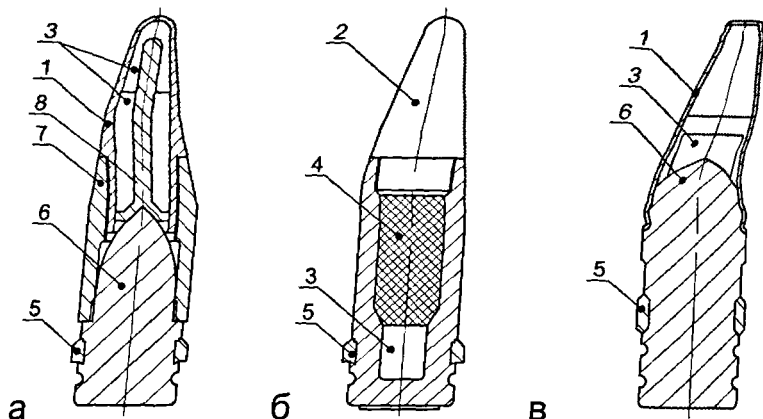
Зажигательно-пристрелочные пули более восприимчивы к удару, но не обладают бронебойным эффектом, к тому же основное их назначение – это пристрелка по дальности и направлению, нежели сгорание с зажигательным действием. Типичный состав для такой пули – это смесь двуокиси свинца с 15% порошка алюминия [9].

Пули с комбинированным зажигательно-трассирующим эффектом инициируются при выстреле, а трассирующий состав играет роль зажигательного средства при попадании в цель. Эти пули в настоящее время вытеснены из обихода пулями первого и второго типов, т.к. расположение зажигательной смеси спереди и частично по бокам бронебойного сердечника с большей вероятностью вызывает воспламенение топлива при попадании в емкость с горючим. Классическое начинение таких пуль – белый фосфор. В немецких комбинированных зажигательно-трассирующих пулях времен Первой мировой войны широко применялся состав, содержащий 75% нитрата стронция, 13% магния, 3% алюминия, 6% железа и 3% связующего.

Во время Второй мировой войны были испробованы композиции с пиропорным цирконием, титаном и мишметаллом. Эти компоненты требуют для своего нормального функционирования совсем небольшого количества окислителя, однако в то время они были довольно дефицитными и для массового производства в военное время считались малопригодными. Например, французская зажигательная пуля калибром 7,5 мм содержала пиропорный состав следующего типа: сплав церий/алюминий – 74,6%, железо – 15%, магний – 3%, никель – 2-3%, перхлорат калия – 1,6% и камфора – 3,3% [13].

Англичанами был предложен медленногорящий состав для инициирования сгорания нефтяной пленки на поверхности воды с целью полного выжигания нефтяного пятна, прежде чем оно достигнет берега [29]. Предполагалось сбрасывать плавучий заряд с вертолетов. Смесь содержит 40-70% перхлората аммония, 10-30% магния или алюминия и 14-22% связующего на основе полибутадиена.

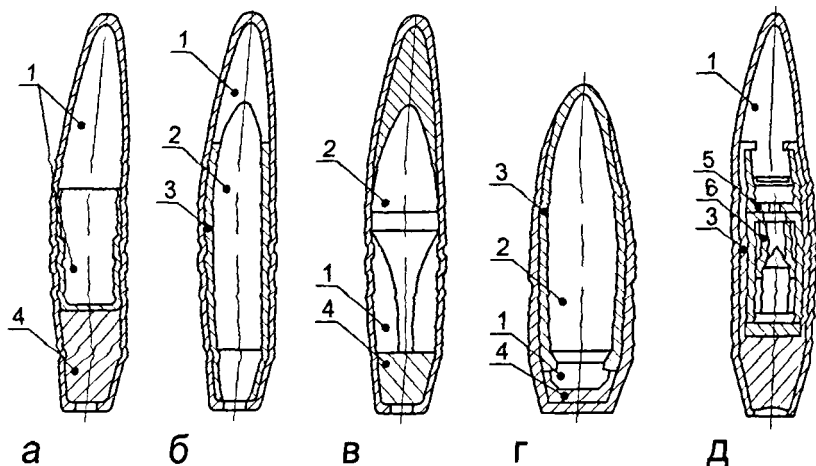
Сравнительно недавно был запатентован ряд зажигательных композиций, в которых горение осуществляется за счет экзотермической реакции между бором и титаном, инициированной ударом [23]. Один из вариантов такой смеси содержит: 60,75% титана, 14,25% бора, 20,0% политетрафторэтилена и 5,0 % бутадиен-акрилового каучука в качестве связующего. Скорость горения: 1 дюйм (25,4 мм) в секунду. Второй вариант содержит 80% порошка титана, полученного из титановой губки, 15% бора и 5% эпоксидной смолы [24]. Предполагается использовать данную смесь в подкалиберных бронебойных снарядах. По сути, указанные бор-титановые термиты являются разновидностью т.н. «реакционных материалов» с ярко выраженным зажигательным эффектом. Стоит отметить, что американцы еще в 70-х годах 20 века уделяли самое пристальное внимание композициям на основе титан-бор, однако использование таких смесей широко не афишировалось [45]. В [31] предложен состав для снаряжения зажигательных пуль, соответствующий концепции реакционных материалов. Он эффективно воспламеняет не только бензин, но и дизельное топливо. Композиция состоит из 22,5% ПАМ-а, 61%  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , 9% фторопласта 32Л, 6,5% смеси окислов никеля и меди, а также графита (сверх 100%).



**Рис. 7.2. Схемы снарядов малого калибра с использованием металлизированных зажигательных смесей [1, 15].**

а) – 20 мм американский бронебойно-зажигательный снаряд 50-х годов 20 века; в головной части содержит заряд зажигательной смеси ИМ-136, непосредственно за которой находится заряд менее восприимчивой к удару смеси ИМ-21; б) – американский осколочно-зажигательный снаряд 50-х годов 20 века; в головной части содержит заряд ВВ (тетрил), при подрыве которого инициируется зажигательная смесь ИМ-11 или ИМ-142. в) – современный бронебойно-зажигательный снаряд.

1 – баллистический обтекатель, 2 – детонатор, 3 – зажигательный состав, 4 – заряд ВВ, 5 – ведущий пояс, 6 – бронебойный сердечник, 7 – стальной адаптер, 8 – жало из алюминиевого сплава.



**Рис. 7.3. Схемы пуль малого калибра с использованием металлизированных зажигательных смесей [1, 5].**

а) – обычная зажигательная пуля; б), в), г) – бронебойно-зажигательные пули с различным расположением навески зажигательного состава; д) – зажигательно-пристрелочная пуля.

1 – зажигательная смесь, 2 – бронебойный сердечник, 3 – рубашка, 4 – поддон, 5 – капсюль-воспламенитель, 6 – ударный механизм.

Табл. 7.2. Теплота сгорания стехиометрических смесей окислитель/металл.

Смесь	МДж/кг	МДж/дм <sup>3</sup>	Смесь	МДж/кг	МДж/дм <sup>3</sup>	Смесь	МДж/кг	МДж/дм <sup>3</sup>
Al+Ba(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	6,71	20,67	Mg+Ba(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	6,72	17,07	Ti+Ba(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	5,05	17,93
Al+KClO <sub>4</sub>	10,64	27,56	Mg+KClO <sub>4</sub>	10,24	21,81	Ti+KClO <sub>4</sub>	8,08	24,89
Al+KNO <sub>3</sub>	7,44	16,81	Mg+KNO <sub>3</sub>	7,39	14,41	Ti+KNO <sub>3</sub>	5,41	14,23
Al+Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,99	16,88	Mg+Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,22	13,59	Ti+Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,56	12,77
Al+Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	3,33	14,42	Mg+Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	3,57	12,07	Ti+Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	2,14	10,66
Al+MnO <sub>2</sub>	4,85	19,45	Mg+MnO <sub>2</sub>	5,04	15,12	Ti+MnO <sub>2</sub>	3,13	15,18
Al+BaO <sub>2</sub>	2,84	13,04	Mg+BaO <sub>2</sub>	2,97	11,97	Ti+BaO <sub>2</sub>	2,30	11,27
Al+PbO <sub>2</sub>	3,05	22,05	Mg+PbO <sub>2</sub>	3,22	17,58	Ti+PbO <sub>2</sub>	2,32	18,84
Al+BaSO <sub>4</sub>	4,05	15,75	Mg+BaSO <sub>4</sub>	4,27	13,11	Ti+BaSO <sub>4</sub>	2,70	12,15
Al+CaSO <sub>4</sub>	6,14	17,68	Mg+CaSO <sub>4</sub>	6,22	14,31	Ti+CaSO <sub>4</sub>	4,01	13,87

Табл. 7.3. Зажигательные составы для снаряжения пуль и снарядов малого калибра

Состав	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Ba(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	50	-	-	48	40	-	-	48,5	50	40	50	-	49	-	10,0	1	-	47	-	48
ПАМ	50	50	45	48	50	50	25	-	47	-	50	-	50	25	-	1	-	10	49	46
магний	-	-	-	-	-	-	-	23	-	-	-	25	-	-	-	-	-	-	-	-
KClO <sub>4</sub>	-	50	55	-	10	-	25	-	-	-	-	-	-	25	-	-	-	-	49	-
кр. фосфор	-	-	-	-	-	50	-	-	-	-	-	-	75	-	-	-	50	40	-	-
тротил	-	-	-	-	-	-	-	-	-	12	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Zr	-	-	-	-	-	-	50	-	-	-	-	-	-	-	-	98	40	-	-	-
Al	-	-	-	-	-	-	-	23	-	45	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
титан	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	50	-	-	-	-	-	-
миш-металл	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	71,3	-	-	-	-	-
связка *	-	-	-	4	-	-	-	3	3	3	13	-	1	-	18,7	-	-	3	2	6
графит	-	-	-	-	-	-	-	2,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ПТФЭ	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	10	-	-	-

1. IM-11 (США), по английской классификации SR-365, аналогичный состав применялся в советских зажигательных пулях (состав №7. С добавкой 3% идитола сверх 100% он называется №7А). Используется со времен Второй мировой войны [1, 13].
2. IM-23. Смесь с большей чувствительностью и активностью [1].
3. Отечественный состав №4А, используется со времен Второй мировой войны. №4Б отличается наличием 5% идитола [13].
4. IM-21А: \* – 3% резината кальция и 1% асфальтита [1].
5. IM-28 Смесь IM-11, с улучшенной воспламеняемостью. Используется в американских 12,5 мм зажигательных пулях. Для нее указаны следующие параметры: температура вспышки 505°С, насыпная плотность 1,16 г/см<sup>3</sup>, объем выделяющихся газообразных продуктов 236 л/кг, теплота сгорания без доступа воздуха 8,7 МДж/кг [1].
6. IM-103. Смесь без окислителя [1].
7. IM-214 и IM-241. Смеси с цирконием, отличаются размером фракций циркония [1].
8. Американский состав дымоблескоусилителя в 40 мм снарядах Mk2 и Mk11: \* – парафин [16].
9. Английский состав SR-379 для снарядов малого калибра: \* – парафин [18].
10. Отечественный зажигательный состав ДУ-5. Используется также в качестве шашки дымоблескоусилителя в фугасно-зажигательных снарядах России/стран бывшего Варшавского договора со времен Великой Отечественной войны: \* – парафин [5, 10].
11. Чешский зажигательный состав: \* – шеллак сверх 100% [5].
12. Немецкий состав В-299. Впоследствии часть магния была заменена алюминием и в состав был

введен стеарат алюминия. Похожая смесь с алюминием вместо магния использовалась в отечественных 7,62 мм зажигательных патронах [21].

13. Отечественный состав №7М: \* – идитол. Содержит графит: 1,0-1,5% сверх 100% [30].
- 14 - 16. Американские смеси: \* – самоотверждающийся акриловый полимер [32, 33, 34].
17. Композиция BS-4 [21].
18. Американская смесь IM-139: \* – стеарат алюминия [21].
19. Американская смесь RS-41 (IM-136). Используется в 20 мм бронебойно-зажигательных разрывных снарядах PGU-28/B и PGU-28A/B: \* – резинат Ca [22].
20. Американская смесь IM-142: \* – 5% резината кальция и 1% асфальтита [1].

### 7.3. Жидкие загущенные огнесмеси

Горючей основой всех жидких и жидко-вязких зажигательных смесей для огнеметов служат как легкие (бензин), так и более тяжелые фракции нефти. Более легкие вводятся в состав в небольшом количестве и обеспечивают легкость воспламенения, тогда как тяжелые обладают большей плотностью и могут быть более эффективно донесены до цели. Вместо легких углеводородов иногда используются другие горючие жидкости, например ацетон [17].

Смеси времен Второй мировой войны загущали алюминиевыми солями высших органических кислот. Более современные жидкие зажигательные композиции обычно загущают негигроскопичными полибутадиеном и полиизобутиленом. Воспламенение жидких смесей типа напалма осуществляется либо специальным воспламенительным составом, либо капсулой с натрием или белым фосфором.

Напалм и загущенные зажигательные смеси без окислителя горят медленнее бензина, выделяя едкий черный дым. При сгорании больших количеств напалма, за счет выделения значительного количества оксида углерода, достигается также удушающий эффект, при этом оказывается сильное психологическое воздействие на врага. Особенно высоким деморализующим действием и эффективностью обладают «супернапалмы». Они содержат добавки веществ, вызывающих самовоспламенение при контакте с воздухом или влагой – фосфор и щелочные металлы. Другими их преимуществами является отсутствие воспламенительных систем и полнота сгорания, за счет чего брызги смеси полностью воспламеняются, расширяя очаг возгорания. Смеси с щелочными металлами воспламеняются во влажном климате, например в условиях джунглей или на снегу [1].

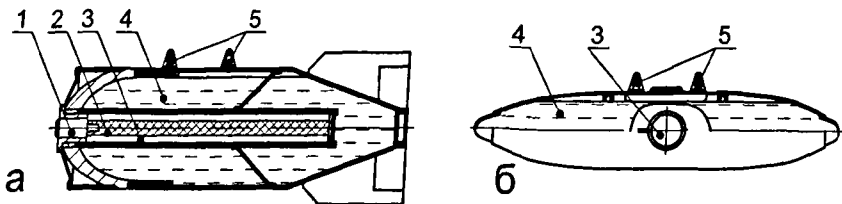


Рис. 7.4. Типичные схемы авиационных боеприпасов с применением загущенных зажигательных смесей [7].

а) – авиабомба с разрывным зарядом, начиненным белым фосфором, б) – авиационный зажигательный бак.

1 – детонатор, 2 – заряд ВВ, 3 – заряд белого фосфора, 4 – загущенная огнесмесь, 5 – узлы подвешивания авиабомб.

Табл. 7.4. Составы некоторых американских и английских гелеобразных зажигательных смесей времен Второй мировой войны [1]

Состав	Напалм	IM 1	IM 2	IM 3	F-1416	F-1429	F-1437	F-1457	SR-400
изобутилметакрилат	-	5,0	5,0	2,0	3,0	3,0	3,0	3,0	-
жирные кислоты	-	3,0	2,5	3,0	1,0	4,0	3,0	4,5	-
нафтеновая кислота	-	-	2,5	3,0	3,0	-	1,0	0,5	-
оксид кальция	-	2,0	-	-	3,1	4,0	3,5	-	-
NaOH (40% p-p)	-	-	3,0	4,5	-	-	-	-	-
NH <sub>4</sub> OH (27% p-p)	-	-	-	-	-	-	-	2,3	-
смесь углеводородов	86,5	88,75	87,0	87,5	87,6	86,5	87,3	89,3	95,0
вода	-	1,25	-	-	2,3	2,5	2,2	-	-
синтетич. каучук	-	-	-	-	-	-	-	-	5,0
загуститель M1	13,5	-	-	-	-	-	-	-	-

## 7.4. Пирогели

Пирогели содержат загущенные жидкие горючие и пиротехнический наполнитель – например, смесь магния и нитрата натрия.

Горение пирогея протекает в 2 этапа: сначала выгорает жидкое горючее, развивая температуру порядка 1200°C, а через некоторое время воспламеняется пиротехнический наполнитель [50].

В ходе ранних экспериментов оказалось, что для загущения пирогелей обычные загустители типа M1 или ОП-2 непригодны, т.к. под действием электролитов, находящихся в пиротехническом наполнителе, наблюдается быстрое разжижение смеси. Поэтому в годы войны для этих целей использовали гл. обр. изобутилметакрилат и каучук [48].

Первые американские пирогели времен Второй мировой в связи с дефицитом магния содержали этот металл в виде так называемой пасты «гоор», представляющей собой побочный продукт при производстве высококачественного металлического магния [1]. Паста «гоор» состояла из магниевой пыли (50-60%), асфальта, битума и различных неактивных примесей. Несколько позже, с расширением производства магния, «гоор» заменили чистым магнием и алюминий-магниевыми сплавами, а в состав некоторых пирогелей начали вводить легковоспламеняющееся горючее – красный фосфор. Композиции, содержащие красный фосфор, кроме зажигательного, обладают значительным дымообразующим действием и применяются для снаряжения дымозажигательных боеприпасов. Они труднее тушатся водой, чем обычные пирогели, благодаря образованию самовоспламеняющихся фосфинов при контакте с влагой. Дымозажигательные композиции, содержащие красный фосфор, в настоящее время смогли потеснить боеприпасы, начиненные ядовитым и опасным в обращении белым фосфором.

Современные отечественные пирогели содержат в своем составе структурирующую добавку – полиэфирную нить, способствующую уменьшению диспергирования пирогея при разрыве боеприпаса. Кроме того, она предотвращает расслоение компонентов при хранении боеприпаса, а при горении формирует сеть каналов, в результате чего происходит горение состава по всему объему [35].

Табл. 7.5. Пирогели

Состав	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
паста «GOOP»	49	30	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
изобутилметакрилат	3	-	-	-	-	-	5,4	4,9	-	-	-	-	-
магний	10	10	30	25	28	-	-	-	10	20	8	-	13,5
алюминий	-	-	-	-	-	10	-	-	-	-	-	20	-
ПАМ	-	-	10	-	-	-	-	-	26	-	-	-	-
NaNO <sub>3</sub> или KNO <sub>3</sub>	5	8	6,5	-	6	27	-	21,7	15	17	12	17	11
Ba(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	-	-	-	20	-	-	-	-	-	-	-	-	-
смесь углеводородов	33	44	47,5	38	60	47,5	27	19	38,4	24,5	25,6	24,5	31
загуститель*	-	8	6	12	5	2,5	-	-	3,6	3	2,4	3	2
S <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub> (св. 100%)	-	0,2	0,2	0,25	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CaSi <sub>2</sub>	-	-	-	-	-	10	-	-	-	-	-	-	-
красный фосфор	-	-	-	-	-	-	67,6	40,8	-	-	52	35	42,5
полиэфир (нити)	-	-	-	-	-	-	-	-	1,3	0,5	1,0	0,5	-
прочее **	-	-	-	5	1	3	-	13,6	7	35	-	-	-

1. Американский пирогель PT-1 времен Второй мировой войны [1].
2. Американский пирогель PT-2 времен Второй мировой войны: \* – каучук GR-S (Buna-S) [1].
3. Американский пирогель PT-3 времен Второй мировой войны: \* – каучук GR-S (Buna-S) [1].
4. Американский пирогель N-5, разработанный во время Второй мировой войны: \* – синтетический каучук GR-S (Buna-S); \*\* – сера [17].
5. Американский пирогель PTV, разработанный в 1960-70 гг. 20 века: \* – полибутадиеновый каучук; \*\* – аминофенол [17].
6. Английский штатный пирогель SR-425 конца Второй мировой войны: \* – каучук; \*\* – борная кислота [18].
7. Современная дымозажигательная смесь, применяющаяся в странах НАТО [44].
8. Современная дымозажигательная смесь, применяющаяся в странах НАТО. Самовоспламеняется при контакте со снегом или влажными поверхностями: \*\* – натрий [44].
9. Отечественный пирогель для снаряжения РПО-З: \* – полиизобутилен; \*\* – идитол [44].
10. Современный отечественный пирогель: \*\* – кремний или его соединения [35].
11. Современный отечественный дымозажигательный пирогель для снаряжения РПО-Д: \* – полиизобутилен [44].
12. Современный отечественный дымозажигательный пирогель: \* – полибутадиен [35].
13. Немецкая дымозажигательная композиция В-300, 70-х годов 20 века: \* – полистирол [21].

## 7.5. Самовоспламеняющиеся вещества и окислители, инициирующие самовоспламенение

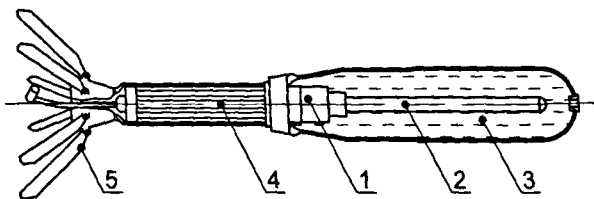
Следует упомянуть зажигательные вещества, способные к самовоспламенению, – в первую очередь, белый фосфор. Зажигательное свойство фосфора имеет второстепенное значение по сравнению с его значительным дымовым и общим поражающим действием. Белый фосфор обладает слишком низкой температурой горения и может инициировать горение лишь самых легко воспламеняемых материалов. Однако он оказывает сильное деморализующее воздействие на противника – при попадании на кожу вызывает серьезные химические и тепловые ожоги, поэтому весьма эффективен при использовании против живой силы. При подрыве разрывного заряда в фосфорных боеприпасах, например в фосфорных гранатах, мельчайшие брызги горящего белого фосфора разбрасываются в округе с выделением большого количества характерного белого дыма.

В настоящее время, в связи с токсичностью белого фосфора и опасностью в обращении, его применение ограничивается разрывными воспламенительными зарядами для напалмовых и пирогелевых бомб, хотя на складах еще остаются довольно значительные запасы фосфорных боеприпасов. Некоторый интерес в качестве зажигательных средств представляют щелочные металлы типа натрия. Они самовоспламеняются при контакте с водой и снегом, хотя, судя по американским данным, недостаточно эффективны в реальных боевых условиях. Поэтому их распространение ограничено добавкой в жидкие зажигательные смеси и пирогели с целью самовоспламенения при контакте с влажными поверхностями.

В некоторых американских реактивных огнеметах (например, в 4-ствольном 66-миллиметровом M202A1 «Flash») со времен войны во Вьетнаме применяется самовоспламеняющаяся смесь – триэтилалюминий, загущенный 6% полиизобутилена (композиция ТРА). Часть триэтилалюминия может быть с успехом заменена бензином или керосином, в этом случае самовоспламенение происходит с задержкой. Вторая модификация огнемета M202 состоит на вооружении армии США и поныне [41, 42, 43].

Галоидные соединения фтора, будучи сверхактивными окислителями, способны воспламенять жидкие горючие и некоторые конструкционные материалы при контакте. После Второй мировой войны эти вещества активно рассматривались в качестве перспективных зажигательных веществ, обладающих выраженным отравляющим действием. Тем не менее эти окислители дороги, очень токсичны и плохо совместимы с обычными конструкционными материалами, поэтому на практике не применяются.

Также существуют смеси и материалы, которые, хоть и сложно в полной мере назвать пиротехническими зажигательными веществами, тем не менее обладают значительным воспламеняющим эффектом. Это гл. обр. кинетические боеприпасы, сердечники и подкалиберные снаряды, а также готовые осколки, изготовленные из сплавов циркония, редкоземельных металлов, обедненного урана (сплав «стаббаллой»), титана и тантала. При попадании в цель, например в танк, они разрушаются на множество осколков. Осколки воспламеняются за счет энергии удара, оказывают значительное зажигательное действие внутри транспортного средства и способны инициировать срабатывание боекомплекта.



**Рис. 7.5.** Схема реактивного снаряда М74 для 66 мм огнемета М202 [19].

1 – детонатор, 2 – центральный разрывной заряд из флегматизированного гексогена, 3 – загущенный триэтилалюминий (ТРА), 4 – ракетный двигатель (полностью срабатывает до выхода из пусковой установки), 5 – стабилизаторы.

1. Engineering Design Handbook. Military Pyrotechnics Series. Part One. Theory and Application. US Army Materiel Command. AMCP 706-185. 1967.
2. PATR 2700. Encyclopedia of Explosives and Related Items./ Basil T. Fedoroff & Oliver E. Sheffield. Vol 7 – Piccatiny Arsenal Dover, New Jersey, USA – 1975.
3. Шидловский А.А. Основы пиротехники. - М.: Машиностроение, 1973.
4. Энергетические конденсированные системы. Краткий энциклопедический словарь. /Под ред. Б.П. Жукова. Изд. 2-е исправл. - М.: Янус К, 2000.
5. Brebera Stanislav etc. Specialni Technica. I Dil. Гл. ред. Urban Ladislav. Praha 1976.
6. FM 3-23,30. Grenades And Pyrotechnic Signals. Headquarters Department of the Army Washington, DC, 1 September 2000.
7. Миропольский Ф.П. Авиационные средства поражения. - М.: Воениздат, 1995.
8. Ellern H. Military and Civilian Pyrotechnics. Chemical Publishing Company Inc. New York. 1968.
9. James Smyth Wallace. Chemical Analysis of Firearms, Ammunition, and Gunshot Residue. CRC Press. Taylor & Francis Group. Boca Raton. 2008.
10. П.Н. Дерябин, М.Н. Краснов. Маркировка боеприпасов артиллерии. – Пенза, 1999.
11. Краткий справочник по патронам стрелкового оружия Красной Армии калибра 7,62, 12,7 и 14,5 мм. - М.: Воениздат НК ВС СССР, 1946.
12. PATR 2700. Encyclopedia of Explosives and Related Items./ Basil T. Fedoroff & Oliver E. Sheffield. Vol 2 – Piccatiny Arsenal Dover, New Jersey, USA – 1962.
13. Н.Г. Меньщиков. Альбом конструкций патронов стрелкового и крупнокалиберного автоматического оружия (от 6,5 до 37 мм). - М.: Артиллер. акад. КА им. Дзержинского, 1946.
14. PATR 2700. Encyclopedia of Explosives and Related Items./ Seymour M. Kaye & Henry L. Herman. Vol 9 – Piccatiny Arsenal Dover, New Jersey, USA – 1980.
15. А.В. Бабкин, В.А. Велданов, Е.Ф. Грязнов и др. Средства поражения и боеприпасы: Учебник. -М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008.
16. PATR 2700. Encyclopedia of Explosives and Related Items./ Basil T. Fedoroff & Oliver E. Sheffield. Vol 4 – Piccatiny Arsenal Dover, New Jersey, USA – 1969.
17. PATR 2700. Encyclopedia of Explosives and Related Items./ Basil T. Fedoroff & Oliver E. Sheffield. Vol 6 – Piccatiny Arsenal Dover, New Jersey, USA – 1974.
18. L.T. Dunnnett. Services Textbook of Explosives. Ministry of Defence. JSP333. 1974.
19. Army Ammunition Data Sheets for Rockets, Rocket Systems, Rocket Fuzes, Rocket Motors. TM 43-0001-30. Headquarters, Department of the Army. December 1981.
20. Def. Standard 13-172. Ministry of Defence. Glasgow 1994.
21. Ernst-Christian Koch. Special Materials in Pyrotechnics: V. Military Applications of Phosphorus and its Compounds. Propellants, Explosives, Pyrotechnics 33, No. 3 165 - 176 (2008).
22. Dr. Trevor T. Griffiths. Alternative for Perchlorates in Incendiary and Pyrotechnic Formulations for Projectiles. SERDP Project WP-1424. 2009.
23. Пат. US6402864 от 2000 г.
24. Пат. US20050230016 от 2005 г.
25. Пат. GB2134097 от 1982 г.
26. Пат. DE3401538 от 1984 г.
27. Пат. FR2633283 от 1980 г.
28. Пат. US4019932 от 1976 г.
29. Пат. CA1134620 от 1980 г.
30. Пат. RU2168488 от 1998 г.
31. Пат. RU2330831 от 2006 г.
32. Пат. US3396060 от 1960 г.
33. Пат. US3809586 от 1969 г.
34. Пат. US3370536 от 1961 г.
35. Пат. RU2213720 от 2002 г.
36. Пат. US3551531 от 1967 г.
37. Пат. US3314836 от 1965 г.
38. Пат. US3431153 от 1967 г.
39. Пат. US3441955 от 1967 г.
40. Пат. US3694278 от 1970 г.
41. Пат. US3634157 от 1967 г.
42. Пат. US3795556 от 1964 г.
43. Пат. US4230509 от 1979 г.
44. Pirospawka 2011 г. Материалы Интернет-ресурса [www.piroman.org](http://www.piroman.org).
45. A.P. Hardt. Incendiary Potential Of Exothermic Intermetallic Reactions. AFATL-TR-71-87. 1971.

46. Пырьев Е.В., Резниченко С.Н. Бомбардировочное вооружение авиации России 1912-1945 гг. - М.: Редакционно-издательский центр Генерального штаба ВС РФ, 2001.
47. USSR Bombs and Fuzes. OP 2009. US Government Printing Office. 1955.
48. Вернидуб И.И. Боеприпасы – фронту. Очерки. - Москва – Сергиев Посад, 2003.
49. Вернидуб И.И. Боеприпасы Победы: Очерки. - М.: ЦНИИИТИКПК, 1998.
50. Материалы Интернет-ресурса [www.pyrotechnics.net.ru/](http://www.pyrotechnics.net.ru/) Материалы лекций Дудырева А.С., «Разработка пиротехнических составов». Переработка и оформление Е. Мисоночниковой и Королева Д.В.
51. V. Bush, J.B. Conant, H.M. Chadwell. Fire Warfare. Incendaries and flame throwers. Summary Technical Report of Division 11, NDRC. Volume 3. Washington D.C. 1946.
52. Japanese Incendiary Mixtures. US Naval Technical Mission to Japan. December 1945. USNTMJ-200E-0584-0594 Report 0-27.
53. Ernst-Christian Koch. Metal-Fluorocarbon Based Energetic Materials. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA. 2012.
54. Пат. US8465606 от 2009 г.
55. Оружие победы/ И.В. Бах, И.И. Вернидуб, Л.И. Демкина и др.; Редкол.: В.Н. Новиков (пред.) и др.; Под общ. ред. В.Н. Новикова. – М.; Машиностроение, 1987. – 512 с.
56. Вернидуб И.И. На передовой линии тыла. - М.: ЦНИИИТИКПК, 1993.

## Глава 8. Реакционные материалы

Реакционные материалы (reactive materials, РМ) – сравнительно новое направление, которое можно отнести к пиротехнике. Оно находится «на стыке» пиротехники, физики взрыва, материаловедения и баллистики, и поэтому обычно рассматривается как отдельная разновидность энергонасыщенных материалов. Реакционные материалы представляют собой композиции, обычно состоящие из двух или более невзрывчатых веществ. При ударном инициировании РМ выделяет химическую энергию, которая значительно повышает разрушительное действие боеприпаса. РМ могут быть использованы в составе оболочки и/или наполнения боеприпаса, поражающих элементов, облицовок кумулятивных зарядов и т.п. [1]. Особенно эффективны они для создания сильного запреградного действия при поражении слабозащищенных целей типа БМП, летательных аппаратов, ракет. Характерной чертой является отсутствие специальных средств инициирования, что заметно упрощает конструкцию и делает более надежным срабатывание в условиях жестких динамических нагрузок.

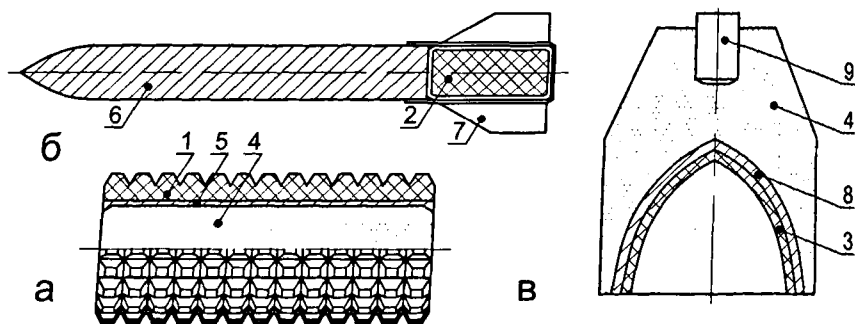


Рис. 8.1. Основные области применения реакционных материалов [2, 12, 15].

а) БЧ с осколочной рубашкой из РМ, б) подкалиберный снаряд с расширенным запреградным действием, в) кумулятивный РМ-перфоратор.

1) – осколочная рубашка из РМ, 2) – разрушаемая капсула с РМ, 3) – внешняя облицовка из РМ, 4) – взрывчатое вещество, 5) – подложка, 6) – кинетический ударник, 7) – стабилизатор, 8) – внутренняя металлическая облицовка, 9) – детонатор.

Большинство РМ спокойно сгорают в обычном состоянии и маловосприимчивы к механическим воздействиям, однако они способны к быстрой экзотермической реакции при очень сильном ударном или ударно-волновом воздействии. Эту быструю экзотермическую реакцию можно охарактеризовать как «взрыв», сопровождающийся заметным фугасным и термобарическим действием. Тем не менее РМ не являются взрывчатыми веществами, а по составу и свойствам больше напоминают пиротехнические составы. Особенностью некоторых типов подобных композиций является высокая прочность, сравнимая с прочностью обычных

конструкционных материалов, что позволяет изготавливать из них нагруженные элементы боеприпасов. Из реакционных материалов изготавливают сердечники бронебойно-зажигательных снарядов, готовые осколочные элементы, облицовки кумулятивных зарядов и т.п. [1].

Возможность создания подобных материалов была продемонстрирована в 1988 г. при обстреле сердечниками из тефлона титановых и алюминиевых преград. В ходе эксперимента было установлено взрывоподобное взаимодействие преграды и материала сердечника, разогнанного до скоростей выше 600 м/с [3, 4]. Имеется информация, что первые эксперименты с использованием «активных» поражающих элементов проводились в начале 80-х или даже в конце 70-х годов 20 века.

Концепция реакционных материалов окончательно сформировалась в конце 90-х годов 20 века, что привело к созданию специальных боеприпасов с повышенным запреградным действием. Несколько позже (с 2003-2005 гг.), оформились требования к кумулятивным зарядам с облицовками из РМ.

**Использование РМ обеспечивает следующие преимущества по сравнению с традиционными материалами [1]:**

- повышение полезной нагрузки боеприпаса (в теории – до полной замены традиционных конструкционных материалов на РМ);
- мощное запреградное действие после проникания в броню за счет собственного энерговыделения РМ;
- способность к срабатыванию без взрывателя (обеспечивает конструктивную простоту и безопасность в обращении);
- безопасность несработавших элементов из РМ по сравнению с традиционными боеприпасами, например, с кассетными бомбами;
- наличие ярко выраженных признаков поражения цели РМ-элементами по сравнению с действием инертных элементов.

**На данный момент РМ используются в следующих областях [5]:**

- кинетические ударники с расширенным запреградным действием;
- боеприпасы с осколочными элементами из РМ;
- инженерные кумулятивные заряды с возможностью регулирования глубины проникания и размера кратера;
- снарядоформирующие элементы из РМ (т.н. РМ-ударные ядра);
- облицовки из РМ (RIMS);
- системы активной защиты (APS);
- боеприпасы с пониженным побочным ущербом (LCD);
- структурные энергонасыщенные материалы;
- специализированные боеприпасы для уничтожения биологического (IED defeat) и химического оружия;
- активная броня [6];
- безопасные средства инициирования боеприпасов [7].

Реакционные материалы содержат окислитель и горючее.

В качестве окислителя в первую очередь выделены фторсодержащие полимеры (ПТФЭ, Viton A, ПВДФ и т.д.), оксиды металлов (Fe, Mn, Ni, Cu, Pb, Mo, W и др.), элементы, способные реагировать с металлами (B, C, Al, Si, S, Ni, и др.), обычные окислители типа нитратов и перхлоратов, а также ВВ.

В качестве горючих используются металлы (B, Mg, Al, Si, Ti, Zr, Hf, Ta, U) и гидриды металлов. Определенное сочетание этих компонентов и особая технология изготовления позволяют формировать материалы с высокими прочностными характеристиками. Для повышения скорости энерговыделения в реакционных материалах используют нанопорошки, механоактивированные сплавы и смеси, а также специальные технологии смешения и спекания.

В ряде случаев (проникающие элементы, кумулятивные облицовки) состав дополнительно модифицируют «тяжелыми» добавками для увеличения плотности. Эти добавки одновременно могут являться как горючими, так и окислителями. Примером состава такого типа является рецептура из [18]: 71,43% вольфрама, 10% перхлората калия, 10% циркония и 8,57% эпоксидной смолы с добавкой аэросила.

Существенными моментами для создания РМ являются выбор связующего и технологии изготовления, обеспечивающие максимальную прочность готового изделия [2].

**По типу использующихся компонентов различают следующие типы РМ:**

- *РМ на основе фторполимеров.*

Наиболее известным составом подобного типа является сочетание активных металлов с фторполимерами наподобие политетрафторэтилена (ПТФЭ), Viton A и THV-220 (термопластичного сополимера тетрафторэтилена, гексафторпропилена и винилиденфторида с Т пл. 120°C) [8, 9, 23]. Продуктами сгорания таких составов являются фториды, которые образуют газовую фазу при гораздо меньших температурах, чем соответствующие оксиды, что обеспечивает ярко выраженный фугасный эффект данных РМ. На основе фторполимеров был изготовлен бинарный РМ для уничтожения биологического и химического оружия, известный как НТИ-J-1000. Первый компонент (термическая основа) содержит 14% бора, 60% титана, 20% ПТФЭ, второй – 70-85% перхлората щелочного металла и 15-30% фторкаучука Viton. При горении выделяются пары фторводорода, хлороводорода, хлор и фтор [23]. Хотя, в действительности, сами продукты горения являются отравляющими веществами. Вероятно, данный РМ предназначен для снаряжения комбинированных средств поражения подземных бункеров с завуалированным отравляющим действием после проникновения.

- *РМ интерметаллидного типа.*

Самый известный состав интерметаллидного типа – это прессованная под высоким давлением смесь порошков алюминия и никеля, а также «нано-фольга» – материал, образованный чередованием напыленных слоев алюминия и никеля. При нагревании композита до 650°C или сильном ударе в нем ини-

цируется экзотермическая реакция с повышением температуры до 2800°C. На данный момент это наиболее удобный и традиционный материал для изготовления боеприпасов, образующих РМ-осколки, РМ-снарядоформирующие элементы и РМ-облицовки кумулятивных зарядов [2].

В [18] испытан модельный состав для формирования готовых осколков, содержащий 42% никеля, 22% алюминия, 20% перхлората калия и 16% эпоксидной смолы. Матрицей для некоторых РМ может служить легкоплавкий интерметаллидный сплав INDALLOY 174, содержащий 57% висмута, 26% индия и 17% олова [18, 19].

Другой тип распространенных интерметаллидных материалов основан на реакции между бором и титаном. Эти РМ обладают ярко выраженным зажигательным эффектом и могут рассматриваться как зажигательные смеси. Типичные представители таких композиций описаны в [10, 11]. В [12] предложен композит, использующийся как зажигательный элемент в кинетических ударниках, содержащий 80% титана, 15% бора и 5% эпоксидной смолы

- *РМ термитного типа.*

РМ термитного типа представляют интерес, как дешевые композиты с широкой сырьевой базой, кроме того, для них существует довольно обширная номенклатура компонентов в сочетании с возможностью создания очень плотных материалов. Одним из наиболее перспективных являются сочетания оксидов железа с алюминием и добавками (т.е. модифицированный термит, например, описанный в [13]) и смесь двуокиси свинца с цирконием. В патенте [14] предложен состав, содержащий 60% магнезия, 28% двуокиси кремния и 12% полибутадиена. Хотя данный композит не является «истинным» РМ, но вполне отражает тенденцию по эволюции зажигательных составов к концепции РМ. В [18] предложен материал термитного типа для изготовления готовых осколков, содержащий 38,5% окиси меди, 45,2% циркония и 16,3% эпоксидной смолы.

- *РМ с окислителем, по составу близкий к ТРТ или к ВВ.*

Этот тип РМ на данный момент представляет значительный интерес из-за широкой номенклатуры возможных сочетаний компонентов. Для снаряжения пуль калибром 12,7 мм была предложена смесь из 27,45% алюминия, 44,56% перхлората калия, 14,29% кремния и 13,7% фторполимера THV-220. Эта рецептура может использоваться как в самостоятельном виде, так и в сочетании с ВВ типа РАХ-2А [19].

В [15] заявлена активная облицовка к кумулятивным перфораторам, состоящая из 80% перхлората калия, 20% порошка алюминия и небольшого количества алюмофосфатного связующего. В [6] израильским концерном «Рафаэл» заявлена активная броня для танков из РМ, содержащего нитрат натрия, силиконовое связующее и добавки оксида железа с микросферами.

В таблице 8.1 приведены плотность –  $\rho$ , теплота взрыва –  $Q_{взр}$ , теплота сгорания в воздухе –  $Q_{сг}$ , работа расширения продуктов взрыва –  $A$  до атмосферного давления некоторых модельных РМ.

Табл. 8.1. Расчетные параметры некоторых основ для РМ [2]

РМ	% металла	$\rho$ , г/см <sup>3</sup>	$Q_{\text{взв}}'$ , МДж/кг	$Q_{\text{в}}'$ , МДж/кг	$A$ , МДж/кг	$Q_{\text{взв}}'$ , МДж/л	$Q_{\text{в}}'$ , МДж/л	$A$ , МДж/л
<i>Стехиометрические составы с ПТФЭ</i>								
Al+тефлон	26	2,34	8,9	14,6	3,2	20,7	34,2	7,9
B+тефлон	13	2,24	6,2	13,1	3,3	13,9	29,3	7,4
Mg+тефлон	33	2,04	9,7	15,0	3,0	19,8	30,6	6,2
Ti+тефлон	32	2,67	5,7	11,0	2,2	15,1	29,3	5,7
Hf+тефлон	64	4,78	4,0	6,9	1,2	19,2	32,8	5,9
W+тефлон	55	4,35	1,5	5,1	0,5	6,6	22,0	2,1
<i>Интерметаллидные составы</i>								
Ti+2B	100	3,5	4,8	31,7	-	16,8	111	-
Al+Ni	100	5,2	1,7	12,6	-	8,6	65	-
<i>Термиты</i>								
Al+Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	25	4,1	4,0	7,7	-	16,4	31	-
Al+MoO <sub>3</sub>	27	3,9	4,7	8,4	-	18,4	32	-
Al+CuO	19	5,1	4,1	5,9	1,1	20,9	24	5,7
Al+PbO <sub>2</sub>	13	7,2	3,1	3,8	1,1	22,1	27	7,9
<i>Пиротехнические составы и ВВ</i>								
Al-ПХК	34	2,6	10,6	10,6	3,2	27,4	27,4	8,3
ТНТ	-	1,64	4,2	14,5	3,6	6,9	23,8	5,8
Октоген/Al	20	2,04	7,6	13,3	6,1	14,5	27,2	12,4

**Примечание.**

Не стоит полагать, что реакционные материалы – это внезапно появившийся вид принципиально новых пиротехнических композиций. В действительности, РМ плавно эволюционировали из зажигательных составов и в конце концов сформировались в обособленный тип композиций пиротехнического типа. Примеры наиболее распространенных основ для РМ приведены в [19, 20, 21, 22].

Действительно, типичные зажигательные составы для малокалиберных боеприпасов имеют многие признаки РМ: они тоже инициируются ударом и спокойно сгорают в свободном состоянии. Однако эти типы зажигательных материалов лишены ряда специфических для РМ признаков, например высокой прочности.

Более того, многие военные специалисты полагают, что термин «реакционные материалы» является неким «брэндом», обеспечивающим в США выделение значительных финансовых средств на исследования. Действительно, РМ не являются чем-то принципиально новым, а объединяют уже существующие технологии и типы пиротехнических составов в новой области применения. Эту точку зрения подтверждает тот факт, что практически все освоенные на данный момент РМ были известны еще задолго до развития самой концепции РМ. Так, например, зажигательные композиты из смеси гафния и ПТФЭ были заявлены еще в 1978 г. [16], а фольга, составленная из слоев алюминия и палладия, известна с 50-х годов [17]. Безусловно, эти материалы были подвергнуты определенной модификации позволяющей им соответствовать концепции РМ, тем не менее основа осталась той же.

## Литература

1. Advanced Energetic Materials. Natonal Research Council of the National Academies. The National Academies Press. Washington D.C. 2004.
2. Н.А. Имховик, А.В. Свидинский. Применение реакционных материалов в боеприпасах. Термодинамические оценки потенциальных возможностей составов с фторполимерами: Сборник материалов научной конференции Волжского регионального центра РАН «Современные методы проектирования и отработки ракетно-артиллерийского вооружения», Саров, РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2011.
3. Селиванов В.В., Имховик Н.А., Лашков В.Н., Селезнев А.А. Исследование процесса физико-химической деструкции ПТФЭ и композиций ПТФЭ – металл при термических и ударно-волновых воздействиях.- ХФ, 2001, 8, 80.
4. Стыров А.В., Селиванов В.В., Осипов А.И., Хмельников Е.А. Электрофизика горения: Тез. докл. XIII Всесоюз. семинара. Чебоксары, 1990. С. 63.
5. Mr. Steven Nicolich Chief, Presented by: Dr. Rao Surapaneni, Energetic Materials to Meet Warfighter Requirements: An Overview of Selected US Army RDECOM-ARDEC Energetic Materials Programs, 42nd Annual Armament Systems: Gun and Missile Systems Conference.
6. Пат. RU2398175 от 2006 г.
7. Пат. US7587978 от 2007 г.
8. Пат. US6962634 от 2005 г.
9. Пат. US7307117 от 2007 г.
10. Пат. US6409854 от 2000 г.
11. Пат. US6485586 от 2000 г.
12. Пат. DE10140600 от 2001 г.
13. Пат. US5035756 от 1989 г.
14. Пат. US4402774 от 1981 г.
15. Пат. RU2347065 от 2005 г.
16. Пат. US4131498 от 1978 г.
17. Пат. US2911504 от 1958 г.
18. Пат. US7614348 от 2009 г.
19. Пат. US2008/0229963 от 2008 г.
20. Пат. US7977420 от 2007 г.
21. Пат. US8122833 от 2006 г.
22. Пат. DE102009041366 от 2009 г.
23. Ernst-Christian Koch. Metal-Fluorocarbon Based Energetic Materials. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA. 2012.

## Глава 9. Теплогенерирующие составы

Теплогенерирующие составы предназначены для выработки тепла в полевых условиях, это тепло используется для различных технических и бытовых нужд.

### Различают:

- составы для сварки и пайки металлов в полевых условиях;
- составы для резки металлов в полевых условиях;
- составы для разогревания пищи в полевых условиях;
- составы для разогревания электролита в электрических батареях;
- теплогенерирующие составы для снаряжения элементов пироавтоматики;
- прочие теплогенерирующие составы (пиротехнические изделия для вулканизации резины, уничтожения бумажных документов и т.д.).

### 9.1. Составы для сварки и пайки металлов в полевых условиях

Как известно, сваркой называют создание неразъемного соединения, когда в процессе нагрева материалы свариваемых деталей взаимно проникают друг в друга за счет диффузии. Пайка же отличается от сварки тем, что спаиваемые детали соединяются промежуточным материалом – припоем, который при охлаждении образует адгезионную связь с поверхностью деталей.

Термитная сварка металлов широко применяется при ремонте трамвайных и железнодорожных путей, стыковке электрических проводов и тросов в полевых условиях, а также при ремонте крупногабаритных металлических изделий. Основным ее преимуществом является высокое качество приварки, сочетающееся с автономностью, т.е. отсутствует необходимость в подведении электричества или наличии газосварочного оборудования.

Основой любого термитного состава для сварки сталей является обыкновенный железо-алюминиевый термит, содержащий железную окалину или трехокись железа и алюминий, а также специальные легирующие присадки для формирования нужного состава плавкого материала. Кроме легирующих присадок, для интенсификации процесса горения в состав могут вводиться окислители (перхлорат калия), восстановители (силицид кальция), а также добавки флюсов (плавиковый шпат, криолит). Флюсы способствуют рафинированию сварного металла, защите его от окисления кислородом воздуха, более полному разделению шлаковой и металлической фаз, а также удалению растворенного в металле водорода.

Железная окалина  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  является побочным продуктом металлопроката и применяется чаще по экономическим соображениям. Трехокись железа  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  содержит больше кислорода, чем окалина, поэтому она является более активным окислителем. Трехокись железа нарабатывают путем нагревания окалины в токе воздуха, только тогда она приобретает необходимые свойства и в ней увеличивается содержание кислорода.

Алюминиевые термиты используют для сварки сталей и чугуна, при этом свариваемые детали заформовывают огнеупорным материалом и подогревают,

место сварки заливают расплавленными продуктами сгорания термитной смеси. На качество сварного соединения сильно влияет чистота компонентов смеси, так, например, при использовании алюминия 99% чистоты процент стыков, лопнувших в течение года, составляет 0,14%, тогда как с алюминием 91% чистоты – 2,13%. Для получения качественного сварного соединения железная окалина должна содержать минимальное количество кремния, серы и фосфора.

Термиты на основе магния применяют главным образом для сварки проводов. В отличие от алюминиевых термитов, магниевые термиты при сгорании не образуют жидких шлаков. Из термитной смеси формируют цилиндрическую шашку с осевым каналом для проводов и гнездом под воспламенитель, провода вводят в канал шашки, термит зажигают, а провода осаживают специальными клещами.

В Москве термитная сварка рельсовых стыков была осуществлена в 1915 г. импортным термитом, а в 1925 г. было налажено собственное термитное производство.

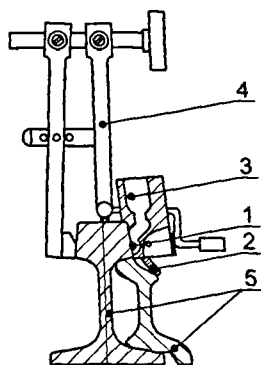
В Московском метрополитене стыки рельсов также свариваются термитом.

В середине Великой Отечественной войны термитная сварка обрела второе дыхание. На освобожденных территориях возникла необходимость в оперативном восстановлении инфраструктуры, и термитная сварка хорошо себя зарекомендовала при ремонте линий электропередач и железнодорожных рельсов. Применение термита в гражданских нуждах в послевоенные годы постоянно увеличивалось, превратившись в целую технологическую отрасль.

**Для начала термитной реакции необходимы следующие условия [1]:**

- термитная шихта должна быть рассчитана таким образом, чтобы при сгорании выделилось тепло, достаточное для расплавления и перегрева конечных продуктов термитной реакции;
- компоненты термитной шихты должны быть тщательно измельчены и перемешаны;
- для начала реакции горения необходим мощный тепловой импульс в любой точке термитной массы с температурой не менее 1350°C.

В результате термитной реакции образуется расплавленный металл в количестве около 50% от исходной массы и расплавленный шлак, который всплывает на поверхность металла. После остывания шлак подлежит удалению механическим способом.



**Рис. 9.1. Схема тигля для приваривания стыковых соединителей к рельсам [14].**

1 – графитовый тигль, 2 – стыковое соединение, 3 – гнездо под термитную шашку, 4 – фиксирующий механизм, 5 – рельс.

В процессе реакции часть тепла расходуется на разогрев стенок тигля, тепловое излучение и т.д. Для получения стали нужного химического состава в шихту вводят в измельченном состоянии легирующие добавки: ферромарганец, феррованадий, ферросилиций, ферротитан, ферромolibден, феррохром и т.д. Эти элементы легируют сталь, раскисляют и рафинируют ее, кроме того, они частично теряются – испаряются и переходят в шлак. Длительность термитной сварки от ее начала до полного отделения металла от шлака зависит от количества сжигаемого материала и составляет от 15 до 40-50 сек.

Скорость и устойчивость реакции сильно зависит от размера частиц термитной шихты. Более крупная фракция компонентов используется при крупных загрузках шихты, тогда как мелкая фракция – при малых загрузках [1].

**Условно сварочные термиты можно разделить на следующие типы:**

- Элементарная термитная смесь – железная окалина/алюминиевый порошок в стехиометрических количествах (77:23). Применяется для составления термитных смесей и сварки труб высокого давления.
- Термит для сварки рельсовых стыков и термитной наплавки рельсов – в элементарную термитную смесь вводится наполнитель в виде мелких кусочков малоуглеродистой стальной проволоки или стружки, а также ферромарганец и графит. Различают следующие виды термитной сварки рельсов: кузнечная, сварка промежуточного литья, комбинированного литья, дуплекс. Наибольшее распространение получила сварка промежуточного литья. Термитная реакция проходит в тигле, а из него уже разливается расплавленный металл. Принцип подбора термитной шихты подробно рассмотрен в [1].
- Термит для сварки легированных сталей. В качестве присадок используются ферротитан, феррованадий, ферромolibден и др.
- Термит для сварки чугуна – содержит большое количество ферросилиция при отсутствии марганца. Высокое содержание кремния способствует выделению графита в сварочной и переходной зонах и обеспечивает получение достаточно прочных сварных соединений.
- Термит для сварки высокомарганцовистых сталей – содержат большое количество марганца и углерода в виде добавок ферромарганца и чугунной стружки.
- Термиты для приварки элементов заземления к металлоконструкциям, например к газовым трубам, – состоят из железо-алюминиевой шихты с добавкой магнезия и ферромарганца.
- Термиты для стального литья – позволяют получать из термитной стали всевозможные отливки сложной конфигурации. Например, в патенте [15] предложена композиция для литья стали, содержащая 84 ч. ферросилиция (75% Si), 16 ч. ферросилиция (50% Si), 22,5 ч. нитрата стронция, 2,5 ч. нитрата натрия и 0,62 ч. жидкого стекла.
- Специальные пиротехнические термиты для наварки пода в металлургических печах, уменьшения усадочных раковин в слитках, вторичного дробления минералов и руд, и т.п. В целях уменьшения усадочных раковин при разливе

стали в изложницы, поверх жидкого металла засыпают пиротехнический состав, содержащий 70% ферросилиция ФС-75, 10% алюминия и 20% нитрата натрия [2]. При литье стали с целью улучшения качества отливок и предупреждения образования раковин необходимо обеспечивать медленное охлаждение расплавленного металла. Этого можно достичь за счет выкладки литевой формы слоем малоактивного термитного состава (называемого экзотермической облицовкой формы). Так, например, в патенте [49] предложена смесь, состоящая из 20% алюминия, 13% нитрата натрия, 3% порошка железа, 5% кремния, 3% связующего и 56% речного песка. В патенте [19] описана экзотермическая облицовка из 40-60% железной окалины, 15-25% магнезия МПФ-1, 10-37% обожженного магнезита и 5-8% натриевого жидкого стекла в качестве связующего.

Также в металлургическом производстве в целях компенсации падения температуры, вызванного добавлением легирующих компонентов в сталь, в состав присадок вводят термитоподобные добавки. Например, в патенте [50] описана смесь из 5-15% нитрата натрия, 2-8% алюминия, до 10% активатора реакции в смеси с флюсом, и ферросплав – остальное.

- Термиты для приварки стыковых соединителей к рельсам. Такой термит обычно содержит оксиды меди, сплав алюминия с медью и ферромарганец. При его сгорании образуется марганцовистая бронза, которая приваривает стыковой соединитель к рельсу.

- Термиты для сварки алюминиевых и медных проводов. Часто применяют смесь 75% железной окалины и 25% металлического магнезия. Для сварки алюминия также пригодна смесь, состоящая из 68,5% никеля и 31,5% алюминия.

**Табл. 9.1. Сварочные составы на основе железного термита**

Состав	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
железная окалина	72,45	754	40	71	71	6,2	72	72,5	76	60	65	65-75	45-55	-	44
FeO	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	48	-
оксиды марганца	-	-	-	-	0,3	-	0,45	-	-	-	-	-	-	20	16,5
окись никеля	-	-	-	-	0,3	23,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-
окись хрома	-	-	-	-	0,3	32,2	-	-	-	-	-	-	-	-	-
алюминий	19,7	244	30	21,2	24	24,7	24	18	-	-	-	15-25	30-40	16	20
магний	-	-	10	-	-	-	-	4,5	24	25	25	-	-	-	-
стальная стружка	4,85	134	-	-	1,3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	13,3
ферромарганец	2,56	124	-	0,5	-	-	-	5	-	-	-	-	-	-	-
ферросилиций	0,44	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
графит	-	-	-	0,3	0,3	-	0,25	-	-	-	-	12-15	-	0,6	0,7
сода и кварц	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,5-3	-	-
лак НЦ551 (св. 100%)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	14	-	-	-	-	-
магнезит	-	-	-	-	-	-	-	-	-	7	-	-	-	-	-
жидкое стекло	-	-	-	5,0	-	-	-	-	-	8	5	-	-	-	-
фторопласт-4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5	-	-	-	-
плавиковый шпат	-	-	-	2,0	2,5	5,1	3,3	-	-	-	-	-	-	15,4	5,5
перхлорат калия	-	-	-	-	-	8,3	-	-	-	-	-	-	-	-	-
нитрат бария	-	-	20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

1. Состав для сварки рельсовых стыков [1].
2. Базовый сварочный термит по немецкому патенту [16].
3. Состав для сварки многожильных проводов (шашка АС-40) [56].
4. Состав для изготовления сварочных стержней (сварка стали-3) [18].
5. Состав для сварки рельсов [19].
6. Состав для сварки ферронихрома [19].
7. Состав для сварки бессемеровской рельсовой стали [19].
8. Состав для приварки заземляющих проводников к металлическим конструкциям [2].
9. Состав для сварки проводов по ГОСТ 18493-79 [17].
10. Состав для сварки проводов [17].
- 11 - 13. Отечественные сварочные составы [17].
- 14 - 15. Составы для сварки марганцовистой стали [19].

**Табл. 9.2. Составы для приварки медных и алюминиевых деталей**

Состав	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
оксид меди	45ч	40ч	71,83	-	-	45	64	67,2	90-95,5	68	66,7
сплав Cu/Al	17,5ч	17ч	20,41	-	-	-	20	32,8	-	-	-
силикокальций	-	-	2,04	-	-	4,5	-	-	-	-	-
окись олова	1ч	1ч	-	46,8	56	-	-	-	-	-	-
окись цинка	0,5ч	-	0,68	-	-	-	-	-	-	-	-
двуокись марганца	-	0,5ч	-	-	-	-	-	-	-	-	-
плавиковый шпат	-	-	2,04	3,7	3,0	-	-	-	-	-	-
серебро	-	-	3,00	-	-	-	-	-	-	-	-
медь (порошок)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	11,6
алюминий	-	-	-	42,2	39,4	15	-	-	-	-	8,4
закись меди	-	-	-	7,3	-	-	-	-	-	-	-
криолит	-	-	-	-	1,6	-	-	-	-	-	-
окалина	-	-	-	-	-	40	-	-	-	-	-
ферромарганец	-	-	-	-	-	2	16	-	-	-	13
графит	-	-	-	-	-	0,2	-	-	-	-	-
аморфный бор	-	-	-	-	-	-	-	-	4-9,9	12	-
нитрат натрия	-	-	-	-	-	-	-	-	-	20	-
связующее	-	-	-	-	-	-	-	+	0,1-0,5	+	-

- 1 - 3. Состав для приварки стыковых соединителей к рельсам [14, 20, 21].
- 4 - 5. Состав для сварки алюминиевых проводов [22, 23].
6. Состав для приварки медных проводов к рельсам и сварки деталей из меди [24].
7. Отечественный состав для приварки стыковых соединителей к рельсам [2].
8. Состав для сварки меди (термитные стержни). Связующее: поливинилацетат св. 100% [25].
9. Состав для сварки меди (термитные стержни). Связующее: коллоксиллин [25].
10. Состав для сварки меди (термитные стержни). Связующее св. 100% [25].
11. Состав для приварки выводов электрохимической защиты к газопроводам [61].

Пайка металлов при помощи специальных пиротехнических составов, формирующихся при сгорании расплавленный припой, применяется довольно редко и лишь в отдельных областях спецтехнологии, когда пайка обычными методами в силу ряда причин затруднена. В качестве примера можно привести пастообразный состав для пайки нержавеющей стали из патента [26]: 0,06 г бора, 0,69 г оксида меди, 0,14 г перхлората полиэтиленполиамин, 0,08 г этиленгликоля, 0,03 г фторида натрия. В полевых же условиях чаще применяют обычные паяльники, разогрев которых осуществляется шашкой термита.

Соединение разнородных материалов, например керамики и металла, удобно осуществлять путем термитного сплавления. Этот метод также называется СВС-сваркой или наплавкой под давлением. Например, в одной из технологий припайки алмаза к металлу используется нагревающий элемент в виде таблетки из смеси углерода с порошком титана.

## 9.2. Составы для резки металлов

Для резки металлических изделий типа труб, арматуры, стальных листов в полевых условиях могут быть использованы пироструйные резаки. Такой резак представляет собой стержень из спрессованной пиротехнической смеси, помещенный в корпус и снабженный графитовым соплом. При горении термитной компоненты происходит формирование микрокапель металла, которые передают тепло разрезаемому материалу, вызывая его плавление, а газообразные продукты сгорания уносят расплавленное вещество [27]. Для интенсификации процесса сгорания и образования нагретых газов в состав вводят окислители и органические соединения, а для улучшения адгезии металлических капель к разрезаемому материалу – модификаторы. Смеси для резки металлов обычно подбираются таким образом, чтобы в составе продуктов сгорания был свободный кислород, который дополнительно вызывает выгорание разрезаемого материала.

Следует отметить, что пироструйные резаки могут быть с успехом использованы как для резки, так и для сварки металлических изделий, в том числе и под водой. При горении под водой вокруг разрезаемой детали образуется парогазовый пузырь, который защищает разрезаемый материал от преждевременного охлаждения водной средой.

Другой областью применения составов для резки металлов является уничтожение неразорвавшихся боеприпасов. Для этого небольшую пиротехническую шашку устанавливают на специальной подставке торцом к боеприпасу в наиболее удаленной от детонатора точке и воспламеняют. Под действием высокотемпературной струи происходит точечная разгерметизация металла корпуса боеприпаса и выгорание большей части взрывчатого вещества без перехода в детонацию. Смеси для уничтожения боеприпасов обычно содержат добавки цинка или других металлов, которые оказывают каталитическое действие на выгорание взрывчатого вещества.

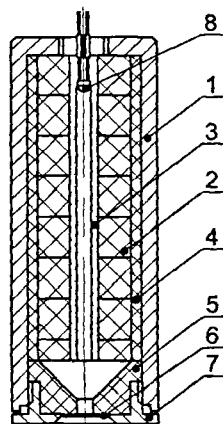
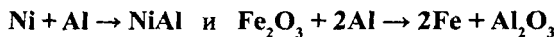


Рис. 9.2. Схема устройства пироструйного резака [28].

1 – металлический корпус, 2 – таблетки термитного состава, 3 – воспламенительный состав, 4 – тепловая изоляция, 5 – графитовое сопло, 6 – заглушка, 7 – гайка, 8 – электровоспламенитель.

Хотя идея резки металла термитом выдвигалась еще в начале 20 века, первым действительно эффективным факелом термитной резки был разработанный в США в конце 60-х начале 70-х годов 20 века пиротехнический резак, известный под торговой маркой «Pyrogon». Такие резаки обеспечивали прожигание листов из магния, алюминия, титана, стали и обедненного урана, толщиной от 0,5 до 7,6 см за время от 0,2 секунды.

Смесь «Pyrogon» состоит из порошка окиси железа, никеля, алюминия и полнотетрафторэтилена в различных пропорциях. Его сгорание характеризуется двумя параллельно протекающими реакциями:



Первая реакция начинается при 660°C и обеспечивает легкость воспламенения смеси, после чего инициируется процесс горения железо-алюминиевой термитной смеси. Политетрафторэтилен является источником газов, добавкой, облегчающей прессование, и дополнительным окислителем. Продукты сгорания пиронола – расплавленные NiAl, железо и фторсодержащие шлаки.

**Табл. 9.3. Составы для резки металлов**

Состав	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
окись железа III - $\text{Fe}_2\text{O}_3$	-	-	35	34,4	59,5	-	-	73	-	-	-	51	-
окись меди - $\text{CuO}$	-	-	-	-	-	79,5	-	-	-	44	-	-	-
нитрат бария - $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$	30,54	1304	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
хлорат натрия - $\text{NaClO}_3$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	11	-	-	-
хлорат калия - $\text{KClO}_3$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	66	-	-
перхлорат калия - $\text{KClO}_4$	-	-	-	-	-	-	-	-	54	-	-	19	56,5
алюминий - $\text{Al}$	9,84	154	28	27,4	25,5	17,5	46,5	19	27,5	10	29	27	26,1
магний - $\text{Mg}$	9,84	204	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
никель - $\text{Ni}$	-	-	32	31,2	-	-	-	-	-	-	-	-	-
политетрафторэтилен (ПТФЭ)	-	-	5	7	15	-	5	-	-	-	-	3	8,7
графит	1,04	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
связующее*	1,84	904	-	-	-	-	2	8	2	6	5	-	-
гипс	-	-	-	-	-	-	46,5	-	-	-	-	-	-
стекло (порошок)	-	-	-	-	-	-	-	-	4,5	-	-	-	-
карбид кремния - $\text{SiC}$	-	-	-	-	-	3	-	-	-	-	-	-	-
железо - $\text{Fe}$	-	-	-	-	-	-	-	-	12	-	-	-	-
закись меди - $\text{Cu}_2\text{O}$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	29	-	-	-
цинк - $\text{Zn}$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	8,7

1. Состав для резки металла: \* – НЦ [29].
2. Состав для расснаряжения боеприпасов: \* – эпоксидная смола [29].
3. «Pyrogon» вариант 1 [27].
4. «Pyrogon» вариант 2 [30].
- 5 - 6. Американские составы [31, 33].
7. Американский состав: \* – сера [32].
8. Модифицированный состав для резака Mk2 mod 0: \* – Viton A [34].
9. Американский состав: \* – НЦ [27].
10. Американский состав: \* – эпоксидная смола [35].
11. Отечественный состав: \* – олифа [36].
12. Отечественный состав [59].
13. Американский состав для уничтожения боеприпасов [7].

### 9.3. Составы для разогревания пищи в полевых условиях

Для снабжения солдат спецподразделений горячей пищей в полевых условиях со времен Второй мировой войны в некоторых странах используются специальные саморазогревающиеся консервные банки. Такие консервы содержат полость в виде канала, расположенного по оси банки. В полость помещается заряд малогазово́й смеси, состоящей из 50% оксида железа и 50% ферросилиция. Этот состав сгорает, выделяя сравнительно небольшое количество тепла, и не изменяется в форме. Для обеспечения плавности нагрева полость выкладывается асбестом или подобным ему материалом. В качестве воспламенителя применялась композиция, содержащая силицид кальция, свинцовый сурик и мездровый клей, поверх которой находилась терочная головка [3].

В патенте [37] для этих целей предложена композиция, состоящая из 30% ферросилиция, 30%  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  и 40% магнетита.

### 9.4. Составы для разогревания электролита в электрических батареях

Нормальное функционирование современных управляемых боеприпасов невозможно без бортового источника электрической энергии. Этот источник энергии может представлять собой миниатюрный генератор, снабженный турбинкой, которая раскручивается за счет горения специального газогенерирующего состава. Схема с генератором обеспечивает высокую энерговооруженность системы, но из-за сложности конструкции используется лишь в крупных управляемых ракетах. Массовые управляемые боеприпасы вместо генераторов снабжаются специальными термически активируемыми батареями (тепловыми источниками тока – ТИТ). Такие батареи обычно содержат в качестве электролита эвтектическую смесь хлоридов калия и лития. Анодом служит пластина из металлического кальция, а катодом – смесь хромата кальция с твердым электролитом [2, 4]. Пока эвтектика твердая, батарея может храниться очень продолжительное время без саморазряда (более 20 лет), однако при расплавлении электролита батарея активируется и начинает вырабатывать электрический ток. Активация батареи происходит за счет сгорания специального пиротехнического состава внутри самого источника электроэнергии. Сформированные заряды в виде пластинок из такого состава называются *пиронагревателями*. Сборка из последовательно уложенных слоев пиронагревателя, анода, твердого электролита и катода представляет собой элементарную электрохимическую ячейку. Послойно уложенные ячейки объединяют в батарею.

Продукты сгорания разных теплогенерирующих составов бывают электропроводящими или не проводящими, в последнем случае банки с электролитом замыкаются перемычками, что ведет к изменению конструкции батареи. В последние годы наибольшее распространение получили батареи без перемычек.

Рабочий диапазон температур для термических батарей в зависимости от типа электролита составляет 250–600°C. Время активации – 0,01–2,5 сек. Время генерирования электроэнергии – от 0,5 сек. до 5 минут [4].

## Основные требования, предъявляемые к пиронагревателям для термически активируемых батарей [8, 9]:

- Горение без выделения газообразных продуктов, т.к. батареи герметичны. К тому же образование газов заметно увеличивает теплопроводность изоляции батареи.
- Ячейки батареи и, соответственно, шлак сгоревшего состава должны сохранять свою первоначальную форму.
- Реакция горения должна инициироваться и распространяться очень быстро в целях обеспечения максимально быстрого запуска бортовой энергосистемы.
- Выделение строго дозированного количества тепла на единицу площади состава, что достигается варьированием соотношений и тщательным подбором фракций компонентов. Тепла должно быть достаточно для того, чтобы расплавить электролит, но не перегреть другие конструкционные элементы батареи.

Самой первой композицией, примененной в таких батареях, была смесь хромата бария с цирконием, импрегнированная в стекловолокну или асбест (смесь Z-2 или т.н. «термическая бумага»). Первый образец батареи с использованием этого пиронагревателя был запущен в производство в 1946 году в США фирмой Catalyst Research Corporation. Термическая бумага используется и поныне в некоторых термических батареях. Продукты сгорания этого материала не обладают заметной электрической проводимостью, и поэтому такая батарея требует наличия перемычек, замыкающих банки с электролитом. С 1959 года начали эксплуатироваться батареи второго поколения без перемычек и отдельного слоя электролита, снаряженные смесью перхлората калия и избытка порошка железа [4].

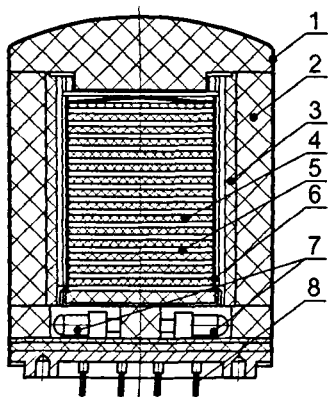


Рис. 9.3. Схема термически активируемой батареи [38].

1 – внешний стальной корпус, 2 – внешняя теплоизоляция, 3 – внутренняя теплоизоляция, 4 – слой пиротехнического состава, 5 – слой твердого электролита, 6 – цепь воспламенения слоев пиротехнического состава, 7 – электровоспламенители, 8 – электроды.

оказываются пригодными для составления термогенерирующих смесей с перхлоратом калия, что явилось причиной появления многочисленных исследований и

научных публикаций [8, 9]. В отечественных термобатареях, кроме смеси хромата бария и циркония, в зависимости от требуемого тепловыделения, применяются сочетания циркония с хроматами кальция и стронция [56].

В начале 90-х годов 20 века в НИИПХ были созданы термобатареи третьего поколения, объединенные термином «пиротехнический источник тока» (ПИТ) и позволяющие генерировать ток в режиме горения. В отличие от классических ТИТ, катод и анод элементарной ячейки выполняются из быстрогорящих пиротехнических составов с большим избытком окислителя и восстановителя соответственно. Катод и анод разделены сепаратором из смеси твердого электролита и наполнителя (асбест, двуокись циркония). Такие батареи имеют ряд преимуществ над классическими термобатареями и характеризуются следующими параметрами: диаметр – 14-70 мм, высота – 10-100 мм, напряжение – 6-40 В, ток в нагрузке – до 10 А, время работы – до 300 сек. (отдельные образцы – до 900 сек.) [62, 63]. Все три поколения термически активируемых батарей имеют свои преимущества и находят применение как в гражданских, так и в военных изделиях.

**Табл. 9.4. Составы для снаряжения термически активируемых батарей**

Состав	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
BaCrO <sub>4</sub>	85-50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	55-65	65-70	47,2
WO <sub>3</sub>	-	-	-	42,5ч	-	-	-	-	-	66-76	-	-	-	-
KClO <sub>4</sub>	-	-	-	-	2,5	-	6-8	12	10-18	-	7,1-10	1-5	-	21,3
CuO	-	16-20	78-86	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
бор	-	-	-	-	-	12-14	-	-	-	-	1-4,3	-	-	-
цирконий	15-50	75-81	12-16	19ч	-	-	-	-	-	-	-	20-30	-	27,3
железо	-	-	-	-	-	-	-	88	67-85	-	-	-	-	-
иттрий	-	-	-	-	97,5	55-62	-	-	-	-	-	-	-	-
титан	-	-	-	-	-	26-31	82-92	-	-	19-30	73,3-81	-	30-35	-
алюминий	-	-	-	-	-	-	2-10	-	-	-	-	-	-	-
молибден	-	-	-	-	-	-	-	-	5-15	-	-	-	-	-
стекловата	-	-	-	6,5ч	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
асбест	+	3-5	3-5	6,5ч	-	-	-	-	-	-	-	3-10	-	2,5

1. Американская смесь Z-2 [5].
2. Материал анода ПИТ по отечественному патенту [39].
3. Материал катода ПИТ по отечественному патенту [39].
4. Американская смесь [40].
- 5-6. Отечественные составы [41, 44].
7. Отечественный состав. Теплота сгорания 1,47-2,01 МДж/кг. Температура горения 2000°C [42].
8. Основной американский состав для термически активируемых батарей [10].
9. Отечественная смесь для миниатюрных термобатарей [43].
10. Отечественный состав [45]. Также содержит дисульфид молибдена 3-5%.
11. Отечественный состав [46]. Также содержит криолит 9-15,6%.
12. Модернизированная смесь Z-2 по румынскому патенту [47]. Также содержит аэросил 1-5%.
13. Состав для разогрева Na-S батарей в электрических торпедах [11].
14. Отечественная «термобумага» с повышенной гибкостью и скоростью горения (более 2500 мм/сек). Также содержит латекс – 1,6% и лигносульфонат – 0,1% [57].

## 9.5. Теплогенерирующие составы для снаряжения элементов пироавтоматики

В системах пироавтоматики, в некоторых изделиях специального назначения для быстрого вскрытия мембран, перекрывающих резервуары с жидкостями или газовыми емкостями высокого давления, применяют специальные пиротехнические энергодатчики, снаряженные быстрогорящими термитными смесями. Подобные композиции также используются в конструкциях автомобильных подушек безопасности гибридного типа (в которых газогенератор заменен на баллон высокого давления, наполненный инертным газом). Основными требованиями к подобным составам является безотказность в воспламенении и высокая скорость горения, сочетающиеся с образованием сильно нагретых конденсированных продуктов сгорания.

В патенте [48] предложен состав для пережигания мембраны баллона высокого давления, содержащий 27,35% алюминия, 57,65% окиси железа, 2% перхлората калия и 10% гипса.

Основанные на принципе расплавления паяного соединения термозамки (пироболты) снаряжаются смесью на основе 40% циркония, 25% окиси железа и 26% окиси хрома [6].

Существует несколько видов устройств, где термитные составы используются для перегрева воды и генерации пара.

В системах пироавтоматики для включения различных узлов в электрическую цепь часто используют т.н. *пироконтактные* составы. При сжигании они формируют электропроводное соединение в виде спеченной металлической губки. Один из австралийских пиротехнических переключателей снаряжается смесью 85% железной окалины и 15% бора [12].

### Отечественные пироконтактные составы [56]:

1. Ниобий – 30%, оксид меди – 70%, связующее – фторкаучук св. 100%.
2. Кремний – 20%, оксид меди – 80%, связующее – НЦ св. 100%.
3. Ниобий – 35%, двуокись свинца – 65%, связующее – фторкаучук св. 100%.

## 9.6. Прочие теплогенерирующие составы

1. Для контроля процессов термообработки производились специальные термокарандаши. Термокарандаши позволяют получить на нагретом металле след, который ярко вспыхивает при определенной температуре. Это дает возможность определить нужную температуру раскаленного металла. Для фиксации температуры  $710 \pm 10^\circ\text{C}$  использовали термокарандаши состава: нитрат калия 21,0-23,4%, нитрат бария 42,0-46,5%, бихромат калия 2,10-2,34%, метасиликат натрия 6,35-7,00%, шеллак 24,4-25,5%. Для фиксации температуры  $860 \pm 10^\circ\text{C}$  использовали термокарандаши состава: нитрат бария 84,5-93,0%, бихромат калия 4,20-4,65%, шеллак 5,50-5,95% [58].
2. В патенте [51] описана универсальная нагревательная композиция, которая может использоваться как для термообработки материалов, так и для сварки

- пластмасс, пайки металлов, вулканизации резины и нагрева пищи. Она состоит из 20-40% доломита, 80-60% титана и небольшого кол-ва асбеста и/или полимера.
3. Для вулканизации резины в полевых условиях выпускаются специальные нагревательные брикеты, представляющие собой спрессованную бумажную основу, пропитанную раствором нитрата калия.
  4. Согласно патенту [52], для обогрева сливной арматуры железнодорожных цистерн можно использовать смесь угля с 3-10% нитрата калия, 3-10% натриевой соли КМЦ или лигносульфоната.
  5. Для термообработки сварных швов трубопроводов в полевых условиях выпускается термитная смесь, состоящая из 19,4% алюминия, 8,6% фенольной смолы, 34% красного оксида железа, 1,7% криолита и 36,3% измельченного огнеупорного кирпича [53].
  6. Для изготовления гибкого мата для термообработки используют смесь из 43-70% железной окалины, 26-50% магния и 4-7% бутадиеннитрильного каучука [53].
  7. В американском устройстве уничтожения документов МЗ применяется смесь из 47% нитрата натрия, 47% сахарозы и 6% древесного угля [13].
  8. В немецком устройстве уничтожения компакт-дисков применяется смесь из 13% Al, 21% Zr, 20% Fe, 46% оксидов Mn и связки (св. 100%) [60].
  9. Состав медицинских стержней для рефлексотерапии содержит: древесный уголь – 45-59%,  $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$  – 25-35%,  $\text{CaO}$  – 8-12%,  $\text{MnO}_2$  – 8-12% [54].
  10. Наконец, в целях обогрева людей со времен Второй мировой войны производятся специальные беспламенные обогревающие пакеты, основанные на экзотермической реакции между твердыми компонентами и отдельно хранящейся водой. Пакеты инициируются при раздавливании ампулы с водой, расположенной внутри оболочки. И хотя такие пакеты нельзя назвать полноценным пиротехническим изделием, тем не менее их разработкой занимаются пиротехнические компании и НИИ. Из патента [55] известны 2 нагревательных состава: 1) 12% алюминиевой пудры и 88% хлористой меди; 2) алюминий – 30-35%, нитрат натрия – 1,4-3,0%, оксид кальция – 0,7-1,5%, остальное – вода. Ампулизованные смеси порошка магния с раствором хлористой меди использовались для подогрева мобильных приборов по определению отравляющих веществ в зимнее время.

## Литература

1. Б.В. Малкин, А.А. Воробьев. Термитная сварка. – М.: Изд-во Мин. коммун. хоз-ва РСФСР, 1963.
2. Шидловский А.А. Основы пиротехники. – М.: Машиностроение, 1973.
3. Brassey's World Military Technology. Explosives, Propellants and Pyrotechnics. Series Editor: Colonel. R.G. Lee. London. 1989.
4. Кромптон Т. Первичные источники тока. Пер. с англ. - М.: Мир, 1986.
5. Ellern H. Military and Civilian Pyrotechnics. Chemical Publishing Company Inc. New York. 1968.
6. В.Н. Дик. Взрывчатые вещества, пороха и боеприпасы отечественного производства. Ч.1. - Минск: Охотконтакт, 2009.

7. Allen J. Tulis etc. Chemical And Physical Aspects Of A Pyrotechnic Torch In Penetrating And Non-Detonatively Neutralizing All Uxo. Proceedings of the Twenty-Eighth International Pyrotechnics Seminar. November 2001. Adelaide.
8. J. Callaway, N. Davies. M. Stringer. Pyrotechnic Heater Compositions for Use in Thermal Batteries. Proceedings of Twenty-Eighth International Pyrotechnics Seminar. Adelaide, South Australia. 2001.
9. Ronald A. Guidotti, Judy Odinek, and Frederick W. Reinhardt. Characterization of Fe/KClO<sub>4</sub> Heat Powders for Thermal Batteries. Proceedings of the Twenty-Ninth International Pyrotechnics Seminar Westminster, CO. July 14-19, 2002.
10. Heckes A. Montoya, Proc. of the Seventh Int. Pyrotechnics Seminar, 14-18, July 1980, Chicago, Illinois, p.178-192.
11. Abdolsamad Z. Moghaddam and Gwilym J. Rees. Pyrotechnic Reaction of Titanium and Barium Chromate: Heats of Reaction and Rates of Burning. Fuel. Volume 59, Issue 1, January 1980, pp. 42-44.
12. G.D. Holt. Pyrotechnic Switch. MRL-TN-467. 1982.
13. F. L. McIntyre, R.M. Rindner. A Compilation of Hazard and Test Data for Pyrotechnic Compositions. ARLCD-CR-80047. 1980.
14. Пат. US2229045 от 1938 г.
15. Пат. US2610911 от 1945 г.
16. Пат. DE29721823 от 1997 г.
17. Пат. SU1779514 от 1991 г.
18. Пат. RU2169066 от 1997 г.
19. Пат. SU1232440 от 1986 г.
20. Пат. US2355627 от 1941 г.
21. Пат. US2801914 от 1953 г.
22. Пат. US2831760 от 1955 г.
23. Пат. US2870498 от 1955 г.
24. Пат. US3902891 от 1974 г.
25. Пат. RU2135340 от 1998 г.
26. Пат. RU2054347 от 1993 г.
27. Пат. US4000022 от 1974 г.
28. Пат. US3713636 от 1970 г.
29. Пат. US3724372 от 1963 г.
30. Пат. US3695951 от 1970 г.
31. Пат. US4424086 от 1982 г.
32. Пат. US4349396 от 1980 г.
33. Пат. US4963203 от 1990 г.
34. Пат. US4432816 от 1982 г.
35. Пат. WO03093402 от 2003 г.
36. Пат. RU2169065 от 1997 г.
37. Пат. US5220908 от 1992 г.
38. Пат. RU2413341 от 2009 г.
39. Пат. RU2364989 от 2008 г.
40. Пат. US4053337 от 1967 г.
41. Пат. SU1811687 от 1990 г.
42. Пат. RU2091359 от 1993 г.
43. Пат. RU2091917 от 1984 г.
44. Пат. RU2135438 от 1997 г.
45. Пат. RU2225250 от 2001 г.
46. Пат. RU2286325 от 2005 г.
47. Пат. RO117615 от 1998 г.
48. Пат. US5700974 от 1997 г.
49. Пат. US3025153 от 1960 г.
50. Пат. US2836486 от 1954 г.
51. Пат. SU1736972 от 1989 г.
52. Пат. RU2022953 от 1991 г.
53. Пат. SU1776522 от 1990 г.
54. Пат. RU2005462 от 1991 г.
55. Пат. SU1736971 от 1989 г.
56. Материалы Интернет-ресурса [www.pyrotechnics.net.ru/](http://www.pyrotechnics.net.ru/) Материалы лекций Дудырева А.С., «Разработка пиротехнических составов». Переработка и оформление Е. Мисоночкиной и Королева Д.В.
57. Пат. RU2461099 от 2010 г.
58. А.с. СССР 508689 от 1974 г.
59. Иванов Д.А. Горение пиротехнических составов для устройств разрушающего воздействия на конструкционные материалы: Автореферат дисс. канд. техн. наук. - Москва, 2010. [www.ism.ac.ru/struct/qualify/ivanov.pdf](http://www.ism.ac.ru/struct/qualify/ivanov.pdf)
60. Ernst-Christian Koch. Metal-Fluorocarbon Based Energetic Materials. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA. 2012.
61. Пат. RU2490104 от 2011 г.
62. Пат. RU2088558 от 1994 г.
63. В.В. Просянюк, И.С. Суворов, Г.И. Сигейкин, А.В. Куликов. Пиротехнические источники тока - новый класс устройств резервной электроэнергетики. Рос. хим. ж. (Ж. Рос. хим. об-ва им. Д.И. Менделеева), 2006, т. 1, № 5.

## **Глава 10. Системы самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС)**

Самораспространяющимся высокотемпературным синтезом называют процесс теплового горения в твердых телах, приводящий к образованию тугоплавких материалов, которые можно использовать в технике. При помощи СВС получают карбиды, бориды, силициды, алюминиды, селениды и специальные керамики. В технике существует альтернатива этому процессу – спекание веществ в особых печах, однако в этом случае требуется дорогое специальное оборудование. Традиционное спекание является продолжительным процессом, т.к. частицы реагирующих веществ покрываются тонким слоем продуктов взаимодействия, препятствующих дальнейшему распространению реакции. Методы СВС позволяют нарабатывать эти же материалы в волне горения за короткий период времени. Полученные материалы отличаются высоким качеством и конкурентной способностью [1].

Помимо порошкообразных смесей в реакциях можно использовать газы и жидкости (например, при синтезе нитридов). При СВС-синтезе развиваются температуры 800-4000°C, линейная скорость горения составляет 1-150 мм/сек. Реакцию обычно проводят в графитовых тиглях. В целом, высокотемпературный синтез в волне горения аналогичен термитным процессам, описанным в предыдущей главе, так что иногда между ними сложно обнаружить различия.

При СВС-синтезе обычно развиваются температуры, близкие к температурам плавления конечного продукта. Тем не менее качественного спекания не наблюдается (за редким исключением). Это происходит из-за того, что примеси газов в компонентах реакций и в окисных пленках при высоких температурах начинают быстро удаляться и тем самым препятствовать спеканию. При этом выделяющиеся газы существенного влияния на полноту синтеза не оказывают, но сильно изменяют конечную структуру продукта. По окончании реакции обычно получается пористая, плохо спеченная губка, занимающая больший объем по сравнению с начальными размерами. Примесное газовыделение является полезным процессом при получении порошков, т.к. продукт реакции легко измельчается, и вредным, если необходимо получить компактный материал.

Принципы СВС были разработаны в конце 60-х годов 20 века в СССР академиком Мержановым, и почти сразу этот метод получил промышленное применение. В конце 70-х – начале 80-х годов 20 века технологии СВС начали активно развиваться в Японии и США, а в последнее десятилетие – в Китае. В настоящее время существуют промышленные установки с производительностью до 100 кг/сутки [12].

Области применения материалов, полученных по СВС-технологии: алмазно-абразивный инструмент, твердые сплавы, наплавочные материалы, высокотемпературные нагреватели, испарительные элементы, смазочно-охлаждающие жидкости, твердые смазки, жаростойкие покрытия, огнеупорные материалы [6, 7], конденсированные источники водорода, катализаторы [4], сверхпроводящие керамики ( $YBa_{2-x}Na_xCu_3O_{7-y}$ ) [8] и др. Методы СВС также применимы для иммобилизации радиоактивных отходов перед захоронением [2, 9].

**Регулировка непрерывности СВС-реакций и параметров исходного материала осуществляют путем:**

- увеличения начальной температуры смеси за счет внешнего нагрева;
- уменьшения температуры горения за счет разбавления смеси конечным продуктом реакции, синтезированным заранее;
- изменения давления газа (если горение протекает в газовой среде);
- изменения скорости реакции за счет увеличения или понижения площади поверхности реагирующих компонентов;
- изменения скорости реакции за счет регулирования дисперсности компонентов;
- приложения различных давлений прессования;
- введения легирующих добавок в целях изменения микроструктуры конечного продукта.

**Условно различают 4 типа СВС-реакций [3]:**

- Реакция «металл (*Ti, Zr, Hf, V, Nb, Ta, Mo, W* и т.д.) + металлоид (*B, C, Si, S, Se, Te, P, N, H*)». Результатом таких реакций являются, соответственно, бориды, карбиды, силициды, сульфиды, селениды, теллуриды, фосфиды, нитриды и гидриды.

Например:  $Ti + C \rightarrow TiC$ .

**Табл. 10.1. Параметры реакций «металл + металлоид»**

Реакция	Т пл. продукта, К	Температура СВС-реакции в аргоне, К
$Nb + C \rightarrow NbC$	3750	2650
$2Ta + C \rightarrow Ta_2C$	3770	2250
$Ti + 2B \rightarrow TiB_2$	3190	3190
$Mo + B \rightarrow MoB$	2820	2100
$Ti + Si \rightarrow TiSi$	2190	1850
$Mo + 2Si \rightarrow MoSi_2$	2360	1920

- Взаимодействие более активного металла (*Al, Ti*) с менее активным металлом (*Ni, Co, Cu, Fe*). Результатом реакции является интерметаллическое соединение.

Например:  $Ti + Ni \rightarrow NiTi$ .

**Табл. 10.2. Параметры реакций «металл + металл»**

Реакция	Тпл. продукта, К	Температура СВС-реакции в аргоне, К
$Ni + Al \rightarrow NiAl$	1910	1910
$Co + Al \rightarrow CoAl$	1900	1880

- Реакция «металлоид (*B, Si*) + металлоид (*C, N*)». Результатом реакции являются карбиды и нитриды.

Например:  $3Si + 2N_2 \rightarrow Si_3N_4$ .

- Термитные трехкомпонентные взаимодействия по схеме:  $\lambda X O_m + \mu Y + \nu Z \rightarrow X_\lambda Z_\nu + Y_\mu O_{\lambda m}$ , где Y – восстановитель металла X. В подобных реакциях из-за окисления восстановителя выделяется так много тепла, что позволяет синтезировать вещества с низкой теплотой образования. Причем синтез сопровождается плавлением. В зависимости от взятых веществ возможны 2 варианта протекания процесса: с расслоением продуктов реакции, подобно термитному литью, либо спеканию в однородный керамический материал.

Табл. 10.3. Термитные двух- и трехкомпонентные реакции [3, 5]

Реакция	Тпл. продукта, К	Расчетная температура СВС-реакции, К*
$3CrO_3 + 6Al + 2C \rightarrow Cr_7C_3 + 3Al_2O_3$	2168	6500
$WO_3 + 2Al + C \rightarrow WC + Al_2O_3$	3058	3860
$2MoO_3 + 4Al + C \rightarrow Mo_2C + 2Al_2O_3$	2653	4800
$3V_2O_5 + 4Al + C \rightarrow 6VC + Al_2O_3$	3160	3600
$MoO_3 + 2Al + B \rightarrow MoB + Al_2O_3$	2820	4000
$CrO_3 + 2Al + 2B \rightarrow CrB_2 + Al_2O_3$	2470	4100
$MoO_3 + 2Al + 2Si \rightarrow MoSi_2 + Al_2O_3$	2320	3300
$CrO_3 + 2Al + 2Si \rightarrow CrSi_2 + Al_2O_3$	1820	3800
$3V_2O_5 + 10Al + 3N_2 \rightarrow 6VN + 5Al_2O_3$	2320	4800
$TiO_2 + 2Mg + C \rightarrow TiC + 2MgO$	3413	-
$3Cu + 2BaO_2 + 0,5Y_2O_3 + (0,75-x)O_2 \rightarrow YBa_2Cu_3O_{7-x}$	-	-
$B_2O_3 + N_2 + 3Mg \rightarrow 2BN + 3MgO$	3273	-
$3Ti + NaN_3 \rightarrow 3TiN + Na$	3478	3150

\* – не учтены плавление и сублимация продуктов, поэтому величины завышены.

Различают следующие основные типы СВС-технологий [1, 3, 12]:

1. Получение пористых материалов. СВС проводят в герметичных реакторах, почти при полном заполнении объема исходной шихтой. Из-за герметичности реактора разрыхления продукта не наблюдается. Таким образом, получают пористый губчатый материал, пригодный, например, для изготовления специальных фильтров либо измельчения в порошок на дробилках. В настоящее время освоено производство губчатых карбидов титана и циркония. Проведение процесса в вакууме позволяет получать заготовки тугоплавких соединений для зонной плавки. Заготовки характеризуются удобной формой и высокой чистотой. Этим способом также производят специальные интерметаллидные сплавы, которые в силу ряда причин сложно изготавливать традиционными методами, например в производстве нитинола (NiTi – материала с эффектом памяти формы), TiAl или FeAl. В первом случае традиционное сплавление встречает трудности из-за сильного различия плотностей никеля и титана, а во втором случае – из-за разницы между температурами плавления титана и алюминия приблизительно в 2 раза. При сжигании получают пористый материал, который затем подвергают горячему изостатическому прессованию в слитки. В Японии налажено поточное производство интерметаллидных сплавов подобным СВС-методом.

2. СВС-спекание под давлением газа. СВС проводится под высоким (до 5000 атм.) давлением реагирующего или инертного газа. Удельный объем выделяющихся газов невелик, и они не оказывают влияния на разрыхление материала. Технология применяется при изготовлении тиглей для испарения никеля и электродов, предназначенных для электролиза агрессивных сред. Этим способом также производятся изделия из нитрида титана.
3. СВС-синтез с приложением внешнего давления. После прохождения волны горения продукт подвергают прессованию. Возможности технологии продемонстрированы на получении твердых сплавов, не содержащих вольфрама.
4. СВС-синтез с пропиткой. Осуществляется пропиткой пористой шихты расплавом требуемых элементов. В одном из вариантов процесса на заготовку из пористого графита помещают кусок кремния; к кремнию подводится электрод и зажигается электрическая дуга, кремний плавится, пропитывая заготовку из графита, после чего самопроизвольно начинается экзотермическая реакция с образованием столбика из карбида кремния.
5. СВС-литье для изготовления наплавочных материалов и абразивного инструмента. При проведении СВС-процессов, сопровождающихся превышением температуры горения над температурой плавления конечного продукта, возможно изготовление литых материалов. Подобным образом получают аналог твердого материала ВК-15. При этом протекает реакция:  $0,43\text{WO}_3 + 0,26\text{CoO} + \text{Al} + 0,42\text{C} \rightarrow 0,43\text{WC} + 0,26\text{Co} + 0,5\text{Al}_2\text{O}_3$ . Конечный материал имеет более высокую твердость, чем полученный по промышленной технологии, и на 25% большую износостойкость.
6. Центробежное СВС-литье для нанесения керамики на внутреннюю поверхность металлических труб. Для этого на внутреннюю поверхность трубы наносят смесь на основе железо-алюминиевого термита. Трубу раскручивают на специальном станке и инициируют реакцию. При реакции железо и оксидная керамика расслаиваются, в результате получается керамическое покрытие с прослойкой из стали. Прослойка обеспечивает адгезию керамики к материалу трубы. Таким образом, процесс представляет собой центробежное литье в сочетании с термитной сваркой. При помощи этой технологии в Японии, США и Китае производят трубы для транспортировки сыпучих материалов. Керамическая поверхность таких труб отличается высокой стойкостью к истиранию.
7. Получение функционально-градиентных материалов методом СВС осуществляется на специальных автоматизированных установках. Функционально-градиентные материалы представляют собой металлокомпозиты с плавно изменяющимся составом по толщине изделия. Это новый тип материалов, способных выдерживать значительные перепады температур в условиях механического нагружения. На их основе производятся теплозащитные пластины для космической техники и ядерных реакторов. Изготовление заготовок происходит путем автоматической дозировки и послойной засыпки исходных порошков. Затем заготовка нагревается под вакуумом и герметизируется, после чего осуществляется сжигание совместно с холодным гидростатиче-

- ским прессованием. В Японии этим методом изготавливают материалы на основе системы  $TiB_2-Cu$ .
8. Получение керамических покрытий на металлических подложках осуществляется запрессовкой СВС-состава между керамической и металлической пластиной. Сжигание проводят совместно с приложением давления к соединяемым поверхностям. Принципиально метод схож с термитной сваркой, однако в процессе не происходит расслоения компонентов, а соединяющий материал представляет собой металлокерамику.
  9. Иммобилизация радиоактивных отходов за счет остекловывания капсулы с радиоактивными материалами продуктами реакции специальных топлив. В [2] приводятся примеры подобных топлив: ССК-30Ш содержит 30% силикокальция, 70% – свинцового сурика и 50% (св. 100%) – стеклообразующей добавки. МСК-30с содержит 50% силикокальция, 25% – перманганата калия, 25% – пятиокиси ванадия (снижает поверхностное натяжение в расплаве), стеклообразующая добавка составляет 50% (свыше 100%). Для иммобилизации органических радиоактивных отходов наподобие специальных ионообменных смол используются топлива типа СКТКД, содержащие 48% ПАМ-4, 48% силикокальция и 4% нитрата калия.
  10. Заслуживает внимание возможность получения алмазного порошка при помощи термитных СВС-композиций. Так, например 52 г смеси состава:  $Mg$  – 20%,  $Al$  – 50%, окись хрома – 10%, окись никеля – 10%, оксид железа – 2%, оксид марганца – 3%,  $Zr$  – 0,1%, церий – 0,9%, графит – 4%, помещают в тигель и инициируют реакцию. Образовавшийся королек массой 15 г растворяют в царской водке. При фильтровании раствора получили несколько сотен кристаллов алмаза с размерами 10-500 мкм в количестве 0,45 карата [10].
  11. Катализатор для восстановления оксидов азота, получаемый методом СВС и разработанный специалистами Казанского ГТУ содержит (расчет):  $FeO$  – 45%,  $Cr_2O_3$  – 25%,  $Fe_3O_4$  – 5%,  $NiO$  – 3%,  $Mg_2SiO_4$  – 3%,  $MgO$  – 19%. Получается он сжиганием термитной композиции из 70% железномагниевого термита, 26% оксида хрома и 4% оксида никеля. Данный состав горит со скоростью 2,5-2,6 мм/с в режиме многоголового спина [11].
  12. Изготовление сверхтвердых материалов из слабоэкзотермического целевого СВС-состава ( $B/C/Ti$ ) с обкладкой из высокотемпературного состава ( $Ti-2B$ ). При воспламенении обкладки инициируется горение целевого состава с образованием заготовки из композита на основе карбида бора [13].

## Литература

1. Химия синтеза сжиганием. /Под ред. М. Коидзуми. Пер. с японск. - М.: Мир, 1998.
2. Г.А. Петров, И.А. Соболев, С.А. Дмитриев, Е.М. Тимофеев, С.В. Стефановский, А.Г. Петров. Сколкообразные металлизированные топлива для технологий переработки радиоактивных отходов. Ч.1. - М.: Наука, 2003.
3. Н.Г.Зарипов. Технологические основы порошковой металлургии. Учебное пособие для студентов специальности 1208 «Материаловедение в машиностроении» Уфимского государственного авиационно-технического университета. <http://nayilz.narod.ru>

4. Э.А. Григорян, А.Г. Мержанов. Катализаторы XXI века. //Наука – производству.- 1998, №3 (5).
5. Д.В. Королев, И.А. Панов, А.К. Суворов, К.А. Суворов. Получение тугоплавких соединений титана в режиме самораспространяющегося высокотемпературного синтеза, СПбГТУ, pyrotechnics@narod.ru
6. Пат. RU2062771 от 1996 г.
7. Пат. RU2370472 от 2008 г.
8. Пат. RU2064911 от 1994 г.
9. Пат. RU2176416 от 2000 г.
10. Уракаев Ф.Х, Шевченко В.С., Нартиков В.Д. Самораспространяющиеся реакции горения термитных составов (МТ, СВС и МСР) с использованием минерального сырья. // Вестник Отделения наук о Земле РАН. - № 1(20), 2002.
11. Новцов А.М., Хацринов А.И., Котелова Ю.А. Закономерности синтеза оксидосодержащих катализаторов конверсии некоторых газов СВС методом. Материалы Всероссийской конференции «Энергетические конденсированные системы». - Черноголовка, 2002. С. 79.
12. Концепция развития СВС как области научно-технического прогресса. /Под ред. А.Г. Мержанова. - Черноголовка: «Территория», 2003.
13. Пат. RU2209799 от 2001 г.

## Глава 11. Газогенерирующие составы

Строго говоря, почти все пиротехнические композиции при сгорании выделяют газообразные продукты, однако в данном случае термин «газогенерирующие» предусматривает, что основным назначением этих составов является именно образование газов, используемых для тех или иных нужд, а также совершения механической работы.

Условно газогенерирующие составы можно разделить на 7 основных типов:

- дымный порох;
- составы для вышибных зарядов и разрывных изделий в гражданской пиротехнике;
- составы для снаряжения пиропатронов и элементов импульсной пироавтоматики;
- составы для наддува автомобильных подушек безопасности и т.п. изделий;
- составы для генерирования чистых газов;
- пиротехнические ракетные топлива;
- твердые топлива специального назначения (лазерные и плазменные пороха, твердые топлива для раскрутки турбин, гидрореагирующие топлива).

Многие газогенерирующие смеси по своему назначению и составу очень близки к обыкновенным порохам и твердым ракетным топливам, иногда разница между ними носит лишь формальный характер. Как и пороха, газогенерирующие композиции предназначены для устойчивого сгорания в широком диапазоне давлений, но область их применения более разнообразна.

### Примечание.

*Хотя дисциплины, изучающие пороха, ракетные топлива, взрывчатые вещества и пиротехнические составы, отделены друг от друга, безусловно, они имеют общие термохимические основы и зачастую пересекаются в некоторых областях. Наука и техника применения порохов и твердых ракетных топлив – это отдельная область, рассматривающая энергонасыщенные композиции как источники энергии для приведения в движение боеприпасов и ракет, но при этом к пиротехнике продолжают относить использование тех же порохов и ракетных топлив во вспомогательных целях.*

### 11.1. Дымный (черный) порох

Хотя важность дымного пороха постепенно угасает в связи с появлением все более и более совершенных составов, эту смесь пока еще можно считать основой всей пиротехники не только с исторической, но и с практической точки зрения.

В настоящее время дымный порох считают и взрывчатым веществом, и металльным, и универсальным пиротехническим составом одновременно. Действительно, при помощи пороха ведется добыча штучного камня, т.к. его взрыв, в отличие от взрыва современных ВВ, почти не обладает дробящим эффектом. Дымный

порох используется в качестве метательного и вышибного заряда практически всех типов пиротехнических устройств, а также образцов старого/антикварного оружия. Наконец, он является основой многих пиротехнических составов фейерверочного типа, по доступности и дешевизне оставляющих позади любые современные смеси.

История открытия дымного пороха уходит в глубину веков, в настоящее время даже среди историков нет однозначного мнения по поводу хотя бы приблизительной даты появления дымного пороха. Старые летописи и манускрипты, особенно китайского происхождения, были зачастую написаны иносказательным, образным языком, трудным для восприятия современного исследователя истории. Еще больше ситуацию усложняет тот факт, что многие рецепты древних мастеров хранились в глубокой тайне и передавались из поколения в поколение в устной форме.

На сегодняшний день существуют две основные, принципиально различающиеся версии даты открытия состава черного пороха.

Существует версия [2], что черный порох появился в Китае в 1-2 веке до нашей эры.

В одной из летописей, датированной 220-122 годом до н.э., сообщалось, что несколько китайских алхимиков во время отделения серебра от золота смешали в котле золотые слитки с селитрой и серой, забыв добавить уголь. Чтобы исправить свою ошибку, они добавили уголь на последней стадии, в результате чего прогремел взрыв. Таким образом, калиевая селитра, сера и древесный уголь – основные компоненты дымного пороха – были открыты еще в те времена, и было известно, что они могут взрываться. В старой книге Роберта Нортонa, датированной 1628 годом, указывается, что «согласно источнику, заслуживающему уважение», дымный порох был изобретен в 1 веке до нашей эры во времена правления китайского императора Ву Тай и использовался в военных сражениях [2]. Согласно Гринеру, Юлий Африканский описывал «стреляющий порошок» в 275 году н.э. Возможно, это уже был прообраз современного дымного пороха. В 690 г. Марк Грек приводил пример взрывчатой смеси, состоящей из 6 частей селитры, 2 частей древесного угля и 1 ч. серы. Однако, согласно [1, 2], этот рецепт был дописан к манускрипту между 1280-1300 гг. Вероятно, это действительно имело место быть, т.к. рецепт Марка Грека соответствовал типичным рецептурам 14 века.

По второй, более обоснованной версии [1], появление черного пороха датируется концом X века н.э. в начале династии Сун. В 9 веке китайцы упоминают о том, что смесь селитры, серы и угля способна сильно взрываться. В 969 г. некий Юэ Ифан был награжден шелком за разработку новой зажигательной стрелы, которая, возможно, и есть т.н. «огненная стрела». Огненные стрелы являлись прообразами современных ракет и представляли собой бамбуковую трубку, набитую порохом, снабженную реечным стабилизатором и железным наконечником. По другим данным, изобретателем огненных стрел был некий Тун Фу приблизительно в 1000 г. нашей эры, таким образом, уже к 1083 г. китайцы изготавливали пороховые огненные стрелы десятками тысяч.

В средневековом тексте, датированном приблизительно 1110 годом, описывается фейерверк, который китайские военные устроили в честь императора. Уже к 1150 г. китайские мастера порохового дела умели добывать селитру искусственным путем. К 1231 г. состав пороха был усовершенствован так, что им уже можно было начинять железные бомбы, которые использовались при обороне Кайфына. Тогда же появились огненные копья – копья, позади наконечников которых была привязана трубка с пороховым составом. Состав зажигали, и копьё начинало извергать сноп искр и огня. В 13-14 веке китайцы уже метали железные бомбы при помощи катапульт и даже ракет. К середине 13 столетия огненные копья снаряжались смесью пороха с фарфоровыми черепками; под действием реактивной силы черепки выбрасывались и ранили врага. К концу 13 столетия в Китае появился прообраз первой пушки, стреляющей каменными и железными ядрами. В описании битвы под Ханчжоу, датированной 1359 годом, применение артиллерии описывается, как совершенно обычное явление.

В середине 13 века технологию получения пороха получили арабы, а затем знание о порохе проникло в Европу.

Первое достоверное европейское письменное упоминание «De nullitate, etc.» о порохе принадлежит англичанину Роджеру Бэкону и датируется 1267-1269 годом. В библиотеке Эскориала хранится свиток, датированный 1249 г., из которого Бэкон подчеркнул свои знания о порохе. Предположительно этот свиток остался на территории современной Испании после освобождения ее от мавров. При этом порох рассматривается Бэконом как некое удивительное средство развлечения, а не как средство ведения войны. Арабский след происхождения пороха подтверждает один из экспонатов французской крепости «Шато де Куси». В этой крепости сохранилась примитивная пушка с надписью на арабском и датой «6 марта 1258 г.». Также упоминается о существовании примитивной артиллерии в Тулузе во время ее осады крестоносцами в 1218 г., а также о том, что пушки, стреляющие каменными ядрами, применялись маврами при обороне Севильи в 1247 г. [2].

### **Примечание.**

*Многие историки находят черную кошку в темной комнате, где ее, возможно, никогда не было. Каждое знаковое изобретение становится со временем все «древнее», историки хотят найти его следы чуть ли не в каменном веке. Даже наше время пестрит свежими мистификациями и легендами, возникшими либо из корыстных побуждений, либо «потому что так интереснее». В этом отношении история пороха не исключение. В средневековье изобретение считали европейским, в крайнем случае – арабским, но после налаживания прямых торговых связей с Китаем, когда миссионеры стали знакомиться с местными «архивами», приоритет множества открытий, в т.ч. пороха, перебрался на Восток, причем со временем эти открытия удавалось «загонять» в глубь веков все дальше и дальше. Подлинность исторических свидетельств невозможно проверить, да и заинтересованных в этом нет. Стучай «плагиата», когда китайцев ловили на попытке присвоить себе приоритет чужих изобретений, известны. Например, скандал с таблицами логарифмов, которые «нашли» в древних китайских руко-*

писях и которые оказались переводом печатного европейского издания [128]. Подлог был выявлен путем сверки опечаток из книги и рукописей. А сколько раз подобные фальсификации оставались незамеченными? Манипуляции с историческими фактами также известны и в европейской, и в российской истории.

Зададимся простым вопросом: сколько нужно было времени, чтобы такое открытие, как порох, распространилось от Китая до Европы? Торговые связи между ними существовали издавна – хотя и через посредников. В отличие от фарфора, производство которого было весьма ограничено и которое можно было «засекретить» (да и, по большому счету, не являлось чем-то жизненно необходимым), порох можно было держать в секрете лишь несколько сражений, затем чудопорошок становился известным неприятелю. Захватив образец или «языка», состав порошка вычислить было не так и сложно – все компоненты были знакомы людям издревле. Оценка такая – лет сто, максимум двести до появления пороха в Европе. Во всяком случае, европейские изобретения путешествовали до Японии, Китая гораздо быстрее. Поэтому вероятнее всего, что «древней» истории у пороха нет: как только стало ясно его военное значение, он распространился по свету вместе с торговцами, и случилось это не более тысячи лет назад. Во всяком случае, в крестовых походах, когда в одном месте собирались войска со всех концов Европы, ни они, ни арабы порох не применяли.

Против версии о появлении пороха в Китае и широкого его использования во времена, когда европейская цивилизация еще не сформировалась, работает простая логика: почему, если так развита была пороховая индустрия в Китае, то европейцы не нашли ее позднее? Почему пушки и ружья европейцев оказались намного лучше, чем у тех, кто их «придумал» на несколько веков раньше?

В истории пороха много и других «белых пятен», например – его состав. Известны прописи, по которым порох изготавливали, но под словом «селитра» каждый понимал свое. Природные месторождения селитры разнятся по химическому составу и содержат в разных пропорциях нитраты натрия, калия, кальция, магния вместе с другими солями. Аналогично дело обстояло с селитрой, получаемой искусственно. В те времена основы химии только зарождались, соответственно, когда научились получать чистую калиевую селитру и использовали ли именно ее на заре порохового дела – большой вопрос [129].

Первое детальное описание пороха, относящееся приблизительно к 1320 г., обычно приписывается немецкому монаху Бертольду Шварцу. Для своих исследований он использовал материалы по пороху, собранные Роджером Бэконом. Многие немецкие историки утверждают, что Шварц был изобретателем пушки. Хотя в последнее время исследователи сомневаются, что Бертольд Шварц действительно существовал, возможно, это был всего лишь собирательный образ, за которым скрывалось несколько мастеров и экспериментаторов.

Согласно [3], первое применение пушки в Центральной Европе (Германия) датируется 1314 годом. В 1346 году английский король Эдуард III использовал пушки в битве с французами.

На Руси применение пушек описывается в Гатчинской летописи (1389 год).

Огнестрельное оружие получило значительное распространение только к концу 15 века, когда порох начали производить в значительных количествах. На Руси селитра была дорогим привозным продуктом, и лишь во времена Ивана Грозного ее начали производить на отечественных селитряницах.

Для достижения равномерного сгорания пороха его начали подвергать грануляции. Первое упоминание о грануляции датировано 1425 годом.

К 16 веку черный порох по составу уже не отличался от современного, однако уступал ему по технологическим и баллистическим свойствам.

В 1572 году в Англии был проведен первый в Европе крупномасштабный фейерверк в честь посещения королевой Елизаветой замка графа Уорика [4].

В 1689 г. порох начали использовать при добыче угля взрывным способом в Англии. В те же времена царь Петр I провел грандиозную реформу армии, и производство российского пороха достигло мирового уровня как по качеству, так и количеству. Также Петр ввел в России обычай проводить фейерверки и салюты.

В 1857 г. в США появились дымные пороха, в которых калиевая селитра была заменена дешевой натриевой селитрой. Этот порох горел медленнее, чем традиционный состав, был более гигроскопичным, обладал меньшей силой и поэтому широкого распространения не получил. Его компонентами были натриевая селитра – 72%, древесный уголь – 16% и сера – 12%.

В 1882 г. в Германии был изобретен т.н. «шоколадный» порох, состоящий из 79% калиевой селитры, 18% древесного угля и 3% серы. Для его изготовления использовался специальный «шоколадный» уголь, полученный при неполном пиролизе древесины. Этот уголь, в отличие от обычного древесного угля, обладал цементирующим свойством, что позволяло прессовать порох в шашки при малом содержании серы.

Шоколадный порох отличался меньшей скоростью горения, чем традиционные пороха и был пригоден для использования в орудиях самого крупного калибра.

Несколько позже появился шоколадный дымный порох, совсем не содержащий серы, он состоял из 70% селитры и 30% угля, полученного неполным пиролизом древесины [5].

В Англии до сих пор производится несколько сортов шоколадного пороха типа SFG и SMP, содержащих 70,5% нитрата калия и 29,5% древесного угля и использующихся в ряде пиротехнических устройств [13].

**Табл. 11.1. Французские дымные пороха в период между Первой и Второй мировыми войнами [6]**

Состав	Калиевая селитра	Уголь	Сера
армейский порох	75	12,5	12,5
сильный порох для горной пром-ти	75	15	10
стандартный порох для горной пром-ти	62	18	20
ослабленный порох для горной пром-ти	40	30	30
спортивный порох	78	12	10
коричневый армейский порох	78	19	3

В 80-х годах 20 века в Германии производилось около 60 сортов дымного пороха, различающихся преимущественно по фракциям и составу [13].

**Табл. 11.2. Немецкие дымные пороха**

Состав	KNO <sub>3</sub>	Уголь	Сера	NaNO <sub>2</sub>
пиротехнический порох	80	20	-	-
порох для горной пром-ти, пороховая мякоть, спортивный порох и т.д.	75	15	10	-
порох для зажигательного шнура	75	18	7	-
медленногорящий порох для огнепроводных шнуров	68	6	26	-
порох на нитрате натрия	-	15	10	75
мелкий порох для мортир, порох для антикварного оружия, порох для горной пром-ти и т.д.	70	18	12	-

В 1995 г. в Чехии фирмой «Synthesia» выпускалось 18 сортов дымного пороха. Все они перечислены в следующей таблице [114].

**Табл. 11.3. Современные чешские дымные пороха**

Состав	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
KNO <sub>3</sub>	75	75	75	75	70	75	75	75	75	75	75	68	68	68	68	68	75	70
сера	10	10	10	10	14	10	10	10	10	10	10	16,5	16,5	17	17	17	10	11,5
др. уголь	15	15	15	15	16	15	15	15	15	15	15	13	13	12	12	12	15	18,5
из бука %	50	50	50	100	75	50	50	50	30	50	50	30	30	30	80	20	50	100
из ольхи %	50	50	50	-	25	50	50	50	70	50	50	70	70	70	20	80	50	-
графит внутр.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2,5	2,5	3	3	3	-	-
графит поверхн.	-	0,3	-	-	-	-	0,3	-	0,3	0,3	-	0,25	0,25	0,3	0,3	0,3	-	-
V мм/с средняя*	-	-	-	16,7	14,3	13,3	7,1	7,1	6,1	10	13,3	7,7	7,7	6,8	10,9	5,6	8	20
фракция, меш	-	9	5	-	75	20	60	60	60	28	28	75	75	60	60	60	-	28
сито, min	60	3	3	-	16	10	28	28	50	16	16	32	72	36	40	40	-	9
сито, max	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

\* – тест по Вагнеру.

1. Порох «PM-75» для пиротехники (пороховая мякоть).
2. Порох «ТНН» для пиротехники (пороховая мякоть для изготовления воспламенительных таблеток).
3. Порох «ТНН-1» для пиротехники (пороховая мякоть для изготовления воспламенительных таблеток).
4. Порох «ТН» для взрывных работ (добыча штучного камня).
5. Порох «Torpedo», медленногорящий для пиротехнических изделий специального назначения.
6. Порох «Т 1-2», неграфитизированный для воспламенительных элементов с повышенной чувствительностью к пламени.
7. Порох «V», быстрогорящий мелкозернистый охотничий порох.
8. Порох «Vg», быстрогорящий мелкозернистый охотничий порох, также используется в пиротехнике.
9. Порох «Vz», мелкозернистый охотничий порох с одинаковым размером зерна.
10. Порох «А» для средств взрывания (воспламенительные элементы).
11. Порох «А-1» для средств взрывания (воспламенительные элементы).
12. Порох «BZ» для замедлителей.
13. Порох «BZZ» для замедлителей.
14. Порох «vz. 25» для замедлительных трубок (средняя скорость горения). Для регулировки скорости горения допускается введение до 3% нитрата бария. Содержание углерода в угле 55-60%.

15. Порох «vz. 26» для замедлительных трубок (высокая скорость горения). Содержание углерода в угле 65-82%.
16. Порох «vz. 28» для замедлительных трубок (малая скорость горения). Для регулировки скорости горения допускается введение до 8% нитрата бария. Содержание углерода в угле 52-55%.
17. Порох «LC (V)» быстрогорящий мелкозернистый охотничий порох.
18. Порох «PbF» для пиротехнических изделий специального назначения.

С конца 19 века дымный порох начал вытесняться более мощными бездымными порохами и синтетическими взрывчатыми веществами. Таким образом, уже к Первой мировой войне дымный порох, который на протяжении тысячелетия был единственным взрывчатым и метательным веществом, окончательно уступил свои позиции более прогрессивным веществам и смесям.

Во второй половине 20 века в США появились «заменители» дымного пороха, предназначенные для использования в старом и коллекционном огнестрельном оружии. Несомненно, их появление продиктовано скорее патентными соображениями и стремлением создать «новый» продукт, нежели попыткой получить порох с повышенными эксплуатационными характеристиками.

Из них следует отметить:

порох «Pyrodex», согласно патенту [36], состоит из 45% нитрата калия, 9% древесного угля твердых пород, 6% серы, 19% перхлората калия, 11% бензоата натрия, 6% дициандиамида и 4% декстрина;

«Canyon Powder», согласно патенту [37], состоит из 62% нитрата калия, 37% аскорбиновой кислоты и 1% декстрина.

Для снаряжения пиротехнических изделий гражданского назначения на Западе производят разновидность сферического черного пороха под названием «грубый порох», или «Polverone» [9]. Он перерабатывается по безопасной «мокрой» технологии и содержит 64,5-67% нитрата калия, 16% древесного угля, 11-13% серы и 6-6,5% декстрина. «Грубый порох» уступает в силе и скорости горения обычному дымному пороху, но прекрасно подходит для снаряжения некоторых разрывных изделий в гражданской пиротехнике.

Итак, дымные пороха – **Табл. 11.4. Гигроскопичность дымного пороха**

это смесевые пороха, содержащие окислитель –  $\text{KNO}_3$ , горючее – древесный уголь и серу. Сера улучшает воспламеняемость и понижает гигро-

Температура, °C	Отн. влажность, %	Поглощение влаги, %
26	75	0,75
25	90	1,91
30	90	2,51

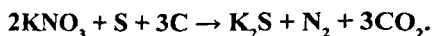
скопичность, способствуя увеличению скорости сгорания. Во влажной атмосфере дымный порох впитывает влагу и при двухпроцентном содержании влаги уже трудно воспламеняется. В сухой атмосфере хранится неограниченно долго.

Наиболее распространенные сорта дымного пороха отечественного производства содержат  $\text{KNO}_3$  75±1%, древесный уголь 15±1%, серу 10±1%. Шнуровой состоит из  $\text{KNO}_3$  – 77±2%, древесного угля – 11±1,5% и серы – 12±1,5%.

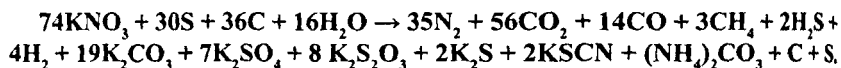
К порохам, предназначенным для изготовления огнепроводных шнуров и трубок, предъявляются особые требования по постоянству состава и воспроизводимости свойств от партии к партии.

ДП легко воспламеняется под действием искры, однако его чувствительность к удару и трению сравнительно невысока. Температура вспышки 270-310°C. Теплота сгорания 2,9 МДж/кг.

Формально горение происходит по следующему уравнению:



Реальный же состав продуктов сгорания ДП намного сложнее и сильно зависит от плотности заряда и давления. При атмосферном давлении приблизительно он может быть описан уравнением:



Чувствительность к удару составляет 70-100 см для груза 2 кг (тротил – 80 см). Объем продуктов сгорания для стандартного состава до 280 л/кг. Плотность различных составов отечественного ДП 1,5-1,85 г/см<sup>3</sup>, зарубежного ДП 1,45-1,95 г/см<sup>3</sup>. Плотность насыпного ДП 0,9-0,98 г/см<sup>3</sup>, прессованного под давлением 5000 кг/см<sup>3</sup> – 1,88 г/см<sup>3</sup>. Удельный импульс 120-125 сек при степени расширения 40:1 (для сравнения: удельный импульс штатных ракетных топлив составляет 200-270 сек.). Температура горения 1900-2100К. Сила дымного пороха до 40000 кгм/кг (для сравнения, у бездымного – до 110000 кгм/кг). Работоспособность в бомбе Трауцля при инициировании детонатором – 30 мл (тротил – 285 мл, гексоген – 490 мл). Скорость горения, при атмосферном давлении, обычных запрессованных ДП – 8-10 мм/сек [6]. При инициировании ДП с помощью штатного капсюля-детонатора возникает процесс с устойчивой скоростью порядка 400 м/с (в трубе диаметром 40 мм). При тонком измельчении пороха, наличии прочной оболочки и воздействии более мощного детонационного импульса скорость распространения взрывного процесса может достичь величины 1100-1300 м/с [133].

При влажности менее 0,2% совместим со всеми конструкционными материалами.

Следует отметить, что в ДП обычно используется древесный уголь, получаемый в процессе неполного пиролиза мягких пород древесины. Такая древесина не содержит смолистых веществ, которые в процессе сухой перегонки могут забивать поры, приводя к вылету искр несгоревшего угля из ствола огнестрельного оружия. Наиболее употребительным сырьем является уголь, полученный пиролизом древесины ивы, ольхи, бузины и т.д. Лучшим традиционно считается уголь из виноградной лозы.

В пороховых композициях, предназначенных для снаряжения фейерверочных изделий, напротив, используют уголь, полученный пиролизом твердых и смолистых пород, например сосны. Такой уголь обеспечивает более зрелищное сгорание пиротехнических смесей, сопровождающееся интенсивным искрением. Дымный порох в виде тонкого порошка называется пороховой мякотью (ПМ). ПМ находит применение как составляющая часть некоторых пиротехнических смесей и изделий.

Дымный порох применяется в ружейных патронах, различных запальных приспособлениях (огнепроводный шнур, огнепроводные трубки), в качестве вышибных зарядов в пиротехнических изделиях, а также в качестве ракетного топлива в любительской пиротехнике. Имеется информация, что до сих пор производится для снаряжения береговых орудий сверхбольшого калибра, оставшихся в арсеналах некоторых стран со времен Первой и Второй мировых войн.

**В промышленности различают 3 способа изготовления ДП – традиционный, водно-суспензионный, с применением струйных мельниц [7].**

- *Традиционный процесс* изготовления черного пороха включает: тщательное измельчение исходных компонентов, их смешение, уплотнение на прессах и зернение смеси, полирование и сортировку. На первом этапе ивовый или ольховый уголь смешивается с порошком серы, увлажняется до 2-3% и хорошо перемалывается в барабанной мельнице. При перемалывании частички серы внедряются в поры частиц древесного угля, уменьшая его гигроскопичность. Совместное измельчение серы и угля также позволяет устранить электризацию и налипание серы на стенки мельницы. Полученная масса перемешивается с расчетным количеством увлажненной калиевой селитры, а затем измельчается в течение нескольких часов в специальном барабане, обшитом кожей, при помощи пластмассовых или деревянных шаров. Во время измельчения продукта периодически добавляется вода для увлажнения. Смесь прессуется в плитки под давлением около  $450 \text{ кг/см}^2$ , которые затем пропускаются между вальцов. Полученные фракции сортируют на ситах и сушат горячим воздухом при температуре около  $60^\circ\text{C}$ .

После пропускания между вальцами, пороховые гранулы имеют неровную поверхность и плохую сыпучесть и, как следствие, низкую насыпную плотность. Поэтому перед сушкой обычно проводят полировку зерен пороха вращением в барабанной мельнице, после чего порох еще раз просеивается. Во время полировки иногда добавляют тонко помолотый графит в количестве до 0,5%. В ряде стран после смешения компонентов тройную смесь обрабатывают на бегунах. Это положительно сказывается на качестве изготавливаемого пороха, однако увеличивает опасность изготовления ДП.

Ввиду большой опасности порохового производства, традиционный метод изготовления ДП в разных странах имеет свои характерные особенности. Он является основным при производстве ДП во всех странах мира.

- *Водно-суспензионный способ* изготовления включает: измельчение серы и угля в водной среде в барабанной мельнице, затем проводится тонкое измельчение сероугольной смеси в бисерной мельнице. Тройную смесь получают растворением в суспензии нитрата калия (при нагревании). Полученная суспензия подается в аппарат с псевдоожиженным слоем на грануляцию. В потоке горячего воздуха происходит формирование сферических гранул и их сушка. Полученные гранулы отправляются на сортировку, при этом мелкие фракции возвращаются в псевдоожиженный слой на доразмывание. Преиму-

щества этого способа – возможность получения сферического ДП, непрерывный технологический процесс и повышенная безопасность пр-ва, однако процесс требует больших энергозатрат на испарение воды.

- Процесс с применением струйных мельниц впервые был внедрен в начале 70-х годов на заводе фирмы «Dyno Industrier A.S.» в Норвегии. Процесс в целом аналогичен традиционному, только измельчение компонентов и их смешение осуществляется в одну стадию в струйной мельнице под давлением сжатого воздуха. Мельница не содержит подвижных частей, что благотворно сказывается на безопасности производства. Метод имеет ряд преимуществ: интенсификация процесса (стадия измельчения и смешения проводится в одном здании), автоматизация производства, в процессе участвует сравнительно небольшое количество тройной смеси, а за счет изменения режима работы мельницы можно регулировать размеры частиц в широких пределах. В 1976 году на этом производстве прогремел взрыв. Тем не менее, согласно [64], взрыв произошел вне производственного помещения и не был связан с работой струйной мельницы.

## **11.2. Составы для вышибных зарядов и разрывных изделий в гражданской пиротехнике**

Составы для вышибных зарядов – это смеси, которые при сгорании образуют нагретые газы, выполняющие механическую работу для обеспечения нормального функционирования пиротехнических и прочих изделий.

Применяются в виде навесок, размещенных в элементах пиротехнического устройства. Кроме выполнения механической работы, являются элементами цепей воспламенения и передатчиком теплового импульса другим пиротехническим элементам, например звездкам. В качестве вышибных составов используют, в первую очередь, дымный порох и подобные ему пороховые смеси. В отечественных изделиях традиционно используется дымный ружейный порох марки ДРП-2 [17]. В немецком дымозажигательном патроне DM-34 в качестве ВРЗ использована смесь из 24,5% магнезии, 74,5% двуокиси свинца и 1% аэросила [38]. В американском авиационном сигнальном средстве Mk24 Mod3 и 4 применен довольно необычный вышибной состав FEC-5, содержащий 24,5% тетранитрокарбазола, 64% перхлората калия, 6,5% дихромата аммония и 5% нейлона [132].

В изделиях гражданского назначения для разрыва люсткугелей (люсткугель – шарообразный фейерверочный заряд, выстреливаемый вверх) наряду с дымным порохом крупной грануляции часто применяют составы на основе перхлората калия, которые обладают более выраженным воспламенительным эффектом. В таких изделиях также используют прием нанесения разведенной в воде пороховой массы на рыхлую основу типа рисовой шелухи или семян хлопка в количествах 20 и 48% соответственно. Это значительно развивает поверхность горения пороховой смеси, в результате порох срабатывает почти мгновенно с максимальным воспламенительным и умеренным разрывным эффектами.

Табл. 11.5. Разрывные смеси для снаряжения люсткугелей

Состав	1	2	3	4	5	6	7	8	9
хлорат калия - $\text{KClO}_3$	-	-	77	-	-	-	-	73,5	-
перхлорат калия - $\text{KClO}_4$	70	70	-	-	68	40	49	-	68,5
нитрат калия - $\text{KNO}_3$	-	-	-	-	2	-	-	-	-
пороховая мякоть 75:15:10	-	-	-	100	-	-	30	-	-
уголь из конопля	18	25	23	-	30	-	-	24,5	17,5
ламповая сажа	-	5	-	-	-	-	-	-	-
сера - S	12	-	-	-	-	20	-	-	12
ПАМ	-	-	-	-	-	25	-	-	-
алюминий - Al	-	-	-	-	-	15	-	-	-
бензоат натрия	-	-	-	-	-	-	21	-	-
бихромат калия св. 100%	-	5	-	-	-	-	-	-	-
рисовый крахмал св. 100%	2	2	2	2	3	-	-	2	2
теплота сгорания, кДж/кг	2,89	-	2,68	-	-	-	-	-	-
развиваемая температура, °C	3000	-	3100	1800	-	-	-	-	-
чувствительность к удару *	37	60	-	85	-	-	-	-	-

\* – чувствительность пикриновой кислоты оценена в 23 см.

1. Классический перхлоратный состав. Используется уже более 30 лет [8].
2. Более безопасный вариант смеси №1 [8].
3. Традиционный японский состав. Опасен в обращении [8].
4. Наиболее безопасный и часто используемый вариант на основе дымного пороха [8].
5. Разрывной заряд для снаряжения дневных люсткугелей [8].
6. Классический китайский состав [16].
7. Достаточно новая смесь типа «benzolith», используется как в качестве вышибного заряда, так и в качестве разрывного в люсткугелях. Довольно чувствительна к трению, поэтому изготавливается мокрым способом [110].
- 8-9. Любительские составы [9].

### 11.3. Составы для снаряжения элементов импульсной пиропирометрики и пиропатронов

Элементы пиропирометрики, принцип действия которых основан на термическом или механическом воздействии, возникающем при сгорании пиротехнических составов, обычно объединяют общим термином – пиротехнический энергодатчик (*пирознергодатчик*). К пирознергодатчикам относят: пиронагреватели, пироболты, пирорезаки, пиропатроны, пироклапаны и пр.

#### Примечание.

В американской терминологии пиропатроны называют «Impulse cartridge», для небольших пиропатронов также распространен термин «Squib». В настоящее время термин «Squib» также относится к капельным электровоспламенителям (Electric squib) и даже к обычным петардам. Пирознергодатчики, приводимые в действие пиропатронами (пирорезаки, пироклапаны и т.д.), принято обозначать как «Cartridge Actuated Devices» (CAD), тогда как пирознергодатчики, используемые в системах катапультирования – «Propellant Actuated Devices» (PAD).

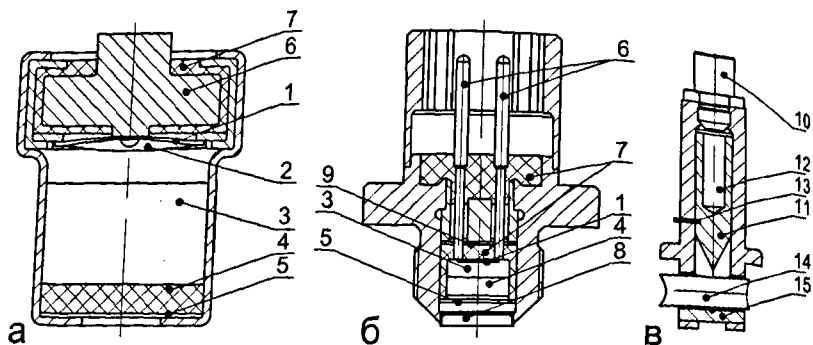


Рис. 11.1. Схемы пирознергодатчиков [17, 142].

а) – пиропатрон с коаксиальным расположением электродов, б) – двухэлектродный EBW-пиропатрон (NSI), в) – пирорезак.

1 – проводящий мостик, 2 – электровоспламенительный состав, 3 – передаточный состав, 4 – рабочий состав, 5 – мембрана, 6 – электрод, 7 – изоляция из эпоксидного компаунда, 8 – вышибный диск, 9 – разрядный промежуток, 10 – пиропатрон, 11 – нож, 12 – расширительный объем, 13 – стопорный штифт, 14 – перерезаемый кабель или трос, 15 – наковальня.

Пиропатроны представляют собой выполненные в одном узле электровоспламенитель, заряд воспламенительного состава и/или заряд пороха. Обычно пиропатроны выполняют функцию мощного воспламенителя порохового, твердотопливного или какого-либо другого заряда, поэтому состав должен обладать хорошими воспламеняющими свойствами. Пиропатроны специального назначения могут совершать работу по отстрелу отработавших элементов конструкции космических и летательных аппаратов, осуществлять прорыв различных мембран, приводить в действие исполнительные механизмы. Все пиропатроны срабатывают в режиме «выстрела» нагретых продуктов сгорания из корпуса.

Обычно пиропатрон содержит два или три состава [27, 137]:

- Электровоспламенительный (наносится на мостик накаливания или примыкает к нему – см. раздел 4.3. «Электровоспламенительные составы»). Для повышения надежности срабатывания практически все пиропатроны содержат два электропроводящих мостика.
- Передаточный (развивает тепловой импульс и передает его основному составу).
- Основной или рабочий (осуществляет механическую работу за счет расширения продуктов сгорания или воспламеняет основной заряд).

Передаточный состав может выполнять функцию рабочего или даже электровоспламенительного (в EBW-пиропатронах с взрывающимся мостиком).

Пирорезак (pyroswitch) – изделие, содержащее специальный пиропатрон для создания высокого импульса давления, приводящего в действие отсекающий механизм (например, для отсечки кабелей при разделении ступеней ракет или перерубания строп парашюта). В последние годы пирорезаки начали применять

в системах безопасности автомобилей для отсечки аккумуляторной батареи от электрической цепи при аварии. В качестве источника энергии для приведения в движение специального ножа используются пиропатроны. Регулировку усилия, которое оказывает нож на перерезаемый кабель или стропу, осуществляют путем подбора расширительной полости в задней части ножа, в которую попадают газы от сработавшего пиропатрона.

**В истории развития специальных составов для американских пиропатронов прослеживается 4 поколения:**

- *До 1950-х:* первые передаточные составы базировались на смеси окислитель + горючее, к которым добавляли 20-30% азида свинца. Они имели ряд недостатков, связанных прежде всего с пониженной надежностью срабатывания.
- *1950-ые:* второе поколение содержало окислитель типа перхлоратов калия или аммония и металлическое горючее (обычно порошок титана, алюминия или циркония).
- *1960-ые:* для уменьшения восприимчивости составов второго поколения к статическому электричеству и механическим воздействиям порошки металлов заменили на их гидриды.
- *1980-ые:* началось снаряжение пиропатронов дешевыми смесями нитрат калия/бор. В 2000-х годах, в связи с развертыванием американцами программы по исключению перхлоратов из пиротехнических изделий (по экологическим соображениям), эти составы стали еще более актуальными.

В настоящее время американцы используют устройства, снаряженные смесями второго, третьего и четвертого поколений. Одними из самых надежных являются комбинации  $\text{KClO}_4/\text{Zr}$  (передаточный состав ZPP),  $\text{KClO}_4/\text{TiH}_2$  (передаточный и рабочий состав THPP), формирующие высокий импульс давления совместно с сильным воспламеняющим эффектом. Если отсутствуют требования по надежности срабатывания в экстремальных условиях, то в качестве рабочих составов часто используют обычные бездымные или дымные пороха. Также см. раздел 5.7. «Воспламенители порохов и твердых ракетных топлив».

В отечественных пиропатронах часто применяются составы на основе перхлората калия и железосинеродистого свинца (ЖСС) [27, 39].

Для использования в области микроавтоматики для изготовления малогабаритных газогенераторов предложена газогенерирующая композиция с малым критическим диаметром горения, содержащая полиглицидилазид с молярной массой около 2000 – 57%, сшивающий агент – 9,5%, триацетин – 3,5% и ПХА – 30% [94].

В системе отделения боеголовки WDU-4A/A авиационной ракеты «Hydra-70» используется состав: порошок М9 – 71,8%, черный порошок – 7%, связующее «Nitracel» – 14,2%, хлорат калия/бор 82,82/17,18 – 7% [15].

Следует отметить, что продукты сгорания некоторых рабочих составов – конденсированные вещества. Однако при высоких температурах эти продукты находятся в парообразном состоянии и способны совершать работу при сохранении целостности корпуса пирознергодатчика.

Составы для снаряжения пирознергодатчиков должны обеспечивать минимальную задержку между подачей электрического импульса на электровоспламенитель и раскрытием мембраны пиропатрона. Характеристика, определяющая скорость нарастания давления в корпусе пиропатрона, называется *импульсом давления*.

Кроме того, имеет значение *сила состава*, которая определяет способность выполнять работу при расширении.

Табл. 11.6. Сила различных ПТС и импульс давления [10, 19, 40, 137, 142, 150]

Состав	Сила, кгс·см <sup>3</sup> /г	Состав	Импульс давления, кгс/сек·см <sup>2</sup>
дымный порошок	2100-2800	дымный порошок	0,021·10 <sup>6</sup>
бездымный порошок	8900-9950	пироксилиновый порошок	0,196·10 <sup>6</sup>
ПХА + связка	9350	EBW состав NH <sub>4</sub> ClO <sub>4</sub> /Zr	4,2·10 <sup>6</sup>
порошок Hi-temp	10500	ЭВ состав 50/25/25	1,33·10 <sup>6</sup>
смесь ZPP	3030	KClO <sub>4</sub> /AlH <sub>3</sub> 63/37	13,5·10 <sup>6</sup>
смесь THPP	3160	смесь ZPP	0,29·10 <sup>6</sup>
смесь KNO <sub>3</sub> /B	2670	УВС Sinoxid в штатном КВ	8,0·10 <sup>6</sup>

### Примечание.

Импульс давления не является строгой константой. Он может измениться почти на порядок, в зависимости от гранулометрического состава, размера навески и вида корпуса, в котором происходит испытание. Например, импульс давления THPP только в одной из статей изменяется в пределах от 0,04·10<sup>6</sup> до 0,13·10<sup>6</sup> кгс/сек·см<sup>2</sup> [149]. Поэтому величины из таблицы 11.6 следует считать оценочными.

Табл. 11.7. Составы для снаряжения пиропатронов

Состав	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
азид свинца	27,2	30	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
KClO <sub>4</sub>	-	9,8	42	52,5	36	61	74-67	65	-	30,5	-	-	20-55	63,2	54	55	63	55	50	-
NH <sub>4</sub> ClO <sub>4</sub>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	72	-	-	-	-	-	-	-	85
KNO <sub>3</sub>	-	-	-	-	-	-	-	-	80	15,3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Ba(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	64	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
BaCrO <sub>4</sub>	-	42	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
алюминий	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3-10	-	44	-	-	-	-	-
ЖСС	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	45	-	45	40	-
ЖСК	-	-	-	-	-	39	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
милори	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	36,8	-	-	-	-	-	-
цирконий	-	-	52	46,5	38	-	-	-	-	-	-	-	20-50	-	-	-	-	-	-	-
AlH <sub>3</sub>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	37	-	-	-
TiH <sub>1,65</sub>	-	-	-	-	-	-	26-33	30	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
НЦ	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	20	-	-	-	2	-	-	-	2,5
гексоген	-	-	-	-	-	-	-	-	-	38,2	80	-	-	-	-	-	-	-	-	-
бор	8,8	-	-	-	-	-	-	-	20	3,9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
фторкаучук	-	-	5	-	-	-	-	5	-	7,5	-	-	3-10	-	-	-	-	3	-	-
диатомит	-	-	-	-	3,3	-	-	-	-	4,6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
прочее*	-	18,2	1	1	22	-	-	-	-	-	-	28	10-30	1	-	2	-	-	10	15

1. Американский состав для снаряжения пиропатронов CCU-51/A и CCU-61/A в системах отсечения строп парашюта и катапультирования пилота [10].
2. Американский состав «211» для снаряжения пирорезака Mk18 mod 0: \* – сплав Zr/Ni [130].
3. Американский состав ZPP с начала 60-х годов и вплоть до настоящего времени является стандартным для снаряжения изделий космической пиропироматерики (например, инициатора NSI): \* – графит [138].
4. Американский передаточный состав ZPP для снаряжения пиропатронов CCU-107/B: \* – графит. Также используется в пиропатронах для подушек безопасности автомобилей [139].
5. Передаточный состав для пиропатрона CCU-138/A (отстрел мишеней-ловушек). Воспламеняет заряд бездымного пороха марки Red Dot: \* – перекись бария [143].
6. Американский состав для снаряжения пиропатронов. ЖСК – железосинеродистый калий [42].
7. Термостойкий состав THPP для снаряжения пиропатронов стран НАТО [18, 41].
8. Универсальный термостойкий состав THPP для снаряжения пиропатронов [43].
9. Передаточные составы для воспламенения заряда бездымного пороха в американских пиропатронах M796 и BBV-36/B (используются для отстрела мишеней-ловушек и пассивных помех) [131].
10. Рабочий заряд в пиропатроне BBV-35/B для постановщика помех RR-188: \* – диатомит [131].
11. Рабочий состав «Hi-Temp» фирмы «Hercules». До сих пор используется во многих американских пиропатронах военного назначения, например, в пирорезаках ракеты «Tomahawk» [141].
12. Рабочий состав для снаряжения пирорезака R13200: \* – сополимер полибутадиена и акриловой кислоты [137].
13. Передаточный состав для японских автомобильных пиропатронов NKPL-1 и NKPL-2: \* – основной нитрат меди. Рабочий состав пиропатрона содержит смесь перхлората калия, антимония, пикрамата натрия и фторкаучука Viton B, в альтернативном варианте пиропатрона используется смесь THPP [144, 145, 147].
14. Американский состав для автомобильного пиропатрона: \* – гидроксипропилцеллюлоза и увлажняющий агент св. 100% [44].
15. Отечественный состав для снаряжения пиропатрона ПП-9РС [17].
16. Состав С8Гр 55/45/2 для снаряжения пиропатронов ППС, УДП и пр.: \* – канифоль св. 100% [17, 39].
17. Отечественный состав [40].
18. Отечественный термостойкий состав ЖСПКФК для снаряжения пиропатронов ПДО [27, 39].
19. Индийский состав для снаряжения пиропатронов: \* – силицид кальция. НЦ – св. 100% [148].
20. Отечественный термостойкий состав повышенной силы для снаряжения пиропатронов, используемых в системах принудительного отделения боеприпасов от балочных держателей: \* – сополимер бутадиена, акрилонитрила и фенолформальдегидной смолы [153]. Известен аналогичный термостойкий состав с перхлоратом калия вместо перхлората аммония [39].

## 11.4. Газогенерирующие составы для наддува подушек безопасности и топливных баков

### Различают:

- газогенерирующие составы для наддува автомобильных подушек безопасности;
- составы для наддува различных изделий, выдавливания жидкости из резервуаров и т.п.

**К составам для наддува автомобильных подушек безопасности предъявляются следующие требования:**

- быстрое и равномерное сгорание составов при низких давлениях;
- отсутствие токсичных продуктов сгорания типа окиси углерода, окиси азота и т.д.;
- отсутствие дыма, который оказывает сильное психологическое действие. Достигается за счет образования монолитного шлака, способствующего удержанию частиц дыма;
- легкость воспламенения и полноты сгорания составов;
- взрывобезопасность в случае пожара в автомобиле;
- низкая чувствительность к механическим воздействиям;
- чтобы избежать возможных ожогов или разрушения эластичного материала подушки, такие составы должны сгорать, выделяя сравнительно небольшое количество тепла.

**Составы для наполнения емкостей и вытеснения жидкостей из резервуаров должны обладать следующими свойствами:**

- равномерно сгорать с постоянной скоростью;
- выделять мало тепла, иначе требуется использование теплообменников для охлаждения выделяющегося газа;
- в продуктах сгорания желательно отсутствие паров воды, т.к. при охлаждении вода конденсируется на стенках емкостей, что приводит либо к изменению количества газообразных продуктов, либо к появлению воды в различных механизмах и устройствах. Это совершенно недопустимо, если газогенераторы используются для наддува топливных баков;
- желательно, чтобы образующийся газ был относительно инертным (например, азот).

Пиротехнический заряд для автомобильных подушек безопасности должен выделять в среднем около 80 литров холодного газа под давлением 0,2 МПа за время 20-60 мс.

Некое подобие автомобильных подушек безопасности применялось в 40-х годах в самолетах на случай вынужденной посадки. Автомобильные устройства такого типа были запатентованы в 50-х годах 20 века. Несмотря на это, первым серийным автомобилем, оснащенным подушкой, был выпущенный в 1972 г в США – «Олдсмобил Торнадо». В середине 80-х годов подушки безопасности вошли в стандартную комплектацию американских автомобилей [21].

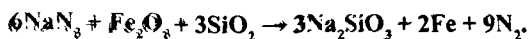
Составы для подушек безопасности, которые появились в конце 60-х годов 20 века, базировались на основе дымного пороха с низким содержанием серы и дымного пороха с добавкой оксалата аммония. В начале 70-х годов 20 века были созданы композиции на основе хлората калия и углеводов. Все эти смеси обладали рядом таких отрицательных свойств, как образование большого количества дыма, высокой температурой горения и низким удельным газообразованием. Поэтому вскоре они были заменены более эффективными композициями первого поколения на основе азиды натрия. Азид натрия в самостоятельном виде не способен к

устойчивому горению, к тому же продуктом его разложения является металлический натрий, который необходимо связывать в шлак. Для этого в состав часто вводят окислители либо хлориды менее активных металлов, способные реагировать с азидом в режиме горения:



Наибольшее распространение получили смеси азидата натрия, окислителя (окиси железа, нитрата калия или перманганата калия) и аэросила, который служит образователем монолитного шлака и одновременно технической добавкой, облегчающей прессование в таблетки.

Реакция сгорания протекает следующим образом:



Из преимуществ подобных композиций следует отметить практически полное отсутствие в продуктах разложения других газов, кроме азота, и довольно низкая температура горения.

Указанные преимущества стали решающими при выборе этого типа смесей в качестве основных составов для наддува баков жидкостных ракет и различных изделий.

Однако существенными недостатками азидсодержащих композиций являются возможность выброса не полностью прореагировавшего азидата натрия, который является токсичным веществом, его высокая стоимость, а также не слишком высокий выход газа с единицы массы состава.

Эти недостатки привели к постепенной утрате значения азидсодержащих композиций применительно к автомобильным подушкам безопасности.

Поэтому параллельно велись разработки составов второго поколения, которые обычно базировались на сочетании окислителя типа перхлората калия в смеси с горючим, богатым азотом (например, азодикарбонамидом).

В конце 80-х годов 20 века получила распространение другая концепция, предусматривающая «гибридную» конструкцию систем наддува подушек безопасности в виде баллона высокого давления со сжатым инертным газом, мембрана которого прорывалась пиропатроном. Такая система отличалась повышенной безопасностью и простотой конструк-

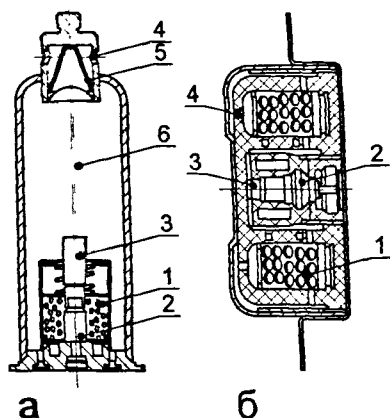


Рис. 11.2. Газогенераторы к автомобильным подушкам безопасности [48].

а) – газогенератор со стороны пассажира, б) – газогенератор со стороны водителя (встроенный в руль).

1 – таблетки газогенирующего состава, 2 – электровоспламенитель, 3 – заряд воспламенительного состава, 4 – выходные сопла, 5 – газораспределитель (сопло), 6 – свободный объем.

ции, но уступала по массогабаритным характеристикам пиротехническим газогенераторам.

В середине 90-х годов в результате конкурентной борьбы повысились требования к компактности автомобильных газогенераторов, что привело к возвращению в строй пиротехнических газогенераторов, снаряженных газогенерирующими составами на основе соединений, богатых азотом. Они обеспечивали высокий выход газа с единицы массы состава, почти не образовывали при сгорании шлака, чем улучшали массогабаритные характеристики газогенераторов. В ряде стран промышленно производятся такие типичные высокоазотные компоненты для автомобильных газогенераторов, как: 5,5-дитетразолат бигуанидина (GZT), нитрат триаминогуанидина (TAGN), 5-аминотетразолат гуанидина (GA), динитрамид гуанилмочевины (GUDN) [125]. Известно об использовании в автомобильных газогенераторах обычных бездымных порохов на основе нитроцеллюлозы.

Параллельно разрабатывались композиции на основе быстрогорящих металлических комплексов, например, в патенте [47] описана композиция, состоящая из 95% тринитротриамминокобальта III и 5% сополимера винилацетата и винилового спирта.

Недавно были разработаны специальные газогенерирующие составы для плавного повышения давления при штамповке [24].

**Газогенерирующие составы для наддува можно разделить на 5 типов:**

- составы на основе азидов натрия;
- составы на основе окислителей – солей калия и горючего;
- составы на основе комплексных соединений;
- бездымные и бесшлаковые составы на основе высокоазотных соединений;
- обычные бездымные пороха на основе нитроцеллюлозы.

**Табл. 11.8. Основные компоненты газогенерирующих составов**

Компонент	Наименование
окислитель	перхлораты и нитраты калия, натрия и аммония, оксиды железа и меди
горючее-газообразователь	нитрат гуанидина, нитрогуанидин, азид натрия, азодикарбонамид
горючее	бор, каучуки, смолы, ДЦДА
охладитель (пламегаситель)	карбонаты магния, лития, соли аммония
шлакообразователь/связующее	аэросил, окись алюминия, минеральные волокна
добавки-модификаторы	соли меди, железа, сажа, пластификаторы

Основные характеристики газогенерирующих составов – это *удельная газопроизводительность*, показывающая, сколько литров газа (при нормальных условиях) выделилось при сгорании 1 кг состава. Для современных газогенерирующих смесей эта величина изменяется от 300 л/кг для азидсодержащих композиций до 1000 л/кг для бездымных высокоазотных смесей. Если же состав предназначен для наддува емкостей, также обретает важность другая характеристика – чистота выделяемого газа (как правило, азота). Для использования в изделиях смеси подвергают грануляции либо изготавливают перфорированные заряды по типу пороховых шашек.

**Табл. 11.9. Составы на основе азида натрия для снаряжения пиропатронов к автомобильным подушкам безопасности, а также бортовых газогенераторов**

Состав	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
азид натрия	60	77	70	40	62	61,9	70	64	61	65	62	28	75,5
хлорид калия	-	18	-	-	-	-	-	-	-	-	-	20,4	-
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	-	-	-	18	33,1	-	-	16	30,4	25	27,5	-	-
$\text{SiO}_2$ - аэросил	5,6	-	-	-	-	22,9	8	-	-	10	6	-	-
$\text{KNO}_3$	-	-	-	-	4,4	-	-	-	-	-	4	18	-
$\text{KClO}_4$	40	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
графит	-	-	-	-	0,5	-	-	-	-	-	0,5	-	-
$\text{CoO}$	-	-	-	-	-	-	-	20	-	-	-	-	-
$\text{Na}_2\text{CO}_3$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3,0
$\text{LiF}$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	16,5
связка*	-	5	-	-	-	15,2	-	-	4,8	-	-	33,6	5,0
прочее**	-	-	30	42	-	-	22	-	3,8	-	-	-	-

- Французский состав [49].
- Отечественный состав. Газовыделение 414 л/кг: \* – идитол [50].
- Отечественный состав: \*\* – треокись вольфрама. Газовыделение 352 л/кг [51].
- Отечественный состав: \*\* – двуокись титана [52].
- Американский состав [53].
- Немецкий состав. Газовыделение 320 л/кг: \* – сера [54].
- 7 - 8. Японские составы: \*\* – сульфат алюминия [55, 56].
- Японский состав: \* – минеральное волокно; \*\* – нитрит натрия [56].
- Канадский состав [57].
- Немецкий состав [58].
- Отечественный состав: \* – N-метилаллил-5-винилтетразол, пластифицированный ДМФА [59].
- Современный отечественный состав: \* – поливинилтетразолат натрия. Скорость горения 7 мм/сек. Удельная газопроизводительность 420 л/кг. Чистота выделяемого азота 98,9–99,5% [123].

**Табл. 11.10. Составы на основе перхлоратов и нитратов для снаряжения пиропатронов к автомобильным подушкам безопасности**

Состав	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
$\text{KClO}_3$	60	50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
$\text{KClO}_4$	-	-	86,7	-	12	-	55,4	35	36	-	-	-	-	53	30	-
$\text{NaNO}_3$	-	-	-	75,2	-	-	-	-	-	71,5	-	-	18	-	-	-
$\text{KNO}_3$	-	-	-	-	43	-	-	-	2	-	-	-	-	-	-	-
$\text{Sr}(\text{NO}_3)_2$	-	-	-	-	-	54,3	-	-	-	-	48,0	5	37,6	-	-	-
$\text{CuO}$	-	-	-	-	-	-	10,4	-	-	-	12,7	-	-	-	-	-
Na-ДЦДА	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	20,7	-	-	-	-	-
ДЦДА	-	-	-	24,8	-	12,4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
нитрогуанидин	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5,5	-	50	-	-	-	-
5-аминотетразол	-	-	-	-	45	-	-	-	-	-	-	-	34,4	-	-	-
нитрат гуанидина	-	-	-	-	-	-	-	65	40	-	11,7	-	-	-	65	52
$\text{Cu}[(\text{C}_2\text{H}_5\text{N}_3)_2](\text{NO}_3)_2$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	35,5	-	-
$\text{Cu}(\text{NO}_3)_2 \cdot 3\text{Cu}(\text{OH})_2$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	45	-	-	-	44
сажа	-	6	0,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
$\text{MgCO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	20	44	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
связка*	-	-	9,8	-	-	4,8	1,654	-	2	23	-	-	10	9,8	-	-
прочее **	20	-	3,0	-	-	28,5	45,4	-	20	-	6,9	-	-	1,7	5	4

1. Устаревший американский состав: \*\* – сахароза [60].
2. Устаревший американский состав [61].
3. Устаревший французский состав: \* – ацетилцеллюлоза; \*\* – трикрезилфосфат [62].
- 4-5. Американские составы [63, 66].
6. Японский состав: \* – мин. волокно; \*\* – Mg карбогидразид. Скорость горения 15 мм/сек [56].
7. Японский состав: \* – 1,1 ч. аэросила, 0,55 ч. крахмала; \*\* – азодикарбонамид [25, 65].
8. Американский состав ARCAIR-104 [48].
9. Американский состав: \* – ПВА; \*\* – нитрат аминоксидина [48].
10. Немецкий состав: \* – полиглицидилазид [67].
11. Американский состав: \*\* –  $\text{Li}_2\text{CO}_3$  [68].
12. Немецкий модельный состав [26].
13. Американский состав: \* – аэросил [70].
14. Чешский состав на основе комплекса метилбигуанида с нитратом меди: \*\* – окись железа, графит и виниловый полимер [134].
15. Французский состав: \*\* – окись хрома или меди [135].
16. Французский состав: \*\* – окись хрома и/или титанат стронция [136].

**Табл. 11.11. Составы на основе высокоазотных соединений для снаряжения газогенераторов и пиропатронов к подушкам безопасности**

Состав	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
нитрат гуанидина	98	-	46,65	-	94,5	85	-	47	-	46,8	-	-	30	5,5	57	-
нитрат аммония	-	-	45,35	78,5	-	-	67	40,8	-	-	68	-	60	-	-	-
нитрогуанидин	-	80	-	-	-	-	5	-	8	-	-	-	-	-	-	-
GUDN	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	35	-	-	-	-
нитрат калия	-	-	8	9	-	-	8,8	-	-	-	-	20	5	-	-	-
бор	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3	5	-	-	-	-
нитротриазолон	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	40	-	-	-	-
GZT	-	-	-	-	-	-	19,2	-	-	-	-	-	-	-	-	54
диаммино динитрат Cu	-	-	-	-	-	-	-	7,2	-	-	-	-	-	-	-	104
2,4-динитрорезорцин	-	-	-	-	-	15	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ПХА	-	-	-	-	-	-	-	-	42,6	18,8	-	-	-	-	79,9	23,2
$\text{NaNO}_3$	-	-	-	-	-	-	-	-	32,4	14,2	-	-	-	-	16,8	174
$(\text{NH}_4)_2\text{Cr}_2\text{O}_7$	-	20	-	5,6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
связующее*	-	-	-	0,7	-	-	-	5	4	0,2	4	-	5	6,2	3	34
прочее**	2	-	-	6,9	5,5	-	-	-	13	20	25	-	-	8,4	-	0,54

1. Американский состав: \*\* – CuCl [71].
2. Американский состав для газогенераторов [72].
3. Американский состав. Скорость горения при 70 атм. – 6,5 мм/сек [73].
4. Американский состав для стартового газогенератора, запускающего двигатель внутреннего сгорания (50-ые годы 20 века): \* – шеллак св. 100%; \*\* – оксалат аммония, который является горючим и оказывает промотирующее действие на катализатор разложения нитрата аммония [11].
5. Американский состав для стартового газогенератора, запускающего винтовой двигатель (50-ые годы 20 века): \*\* – 5,0% CuCl, 0,5%  $\text{V}_2\text{O}_5$  [113].
6. Американский состав для стартового газогенератора, запускающего двигатель автобуса (50-ые годы 20 века) [113].
7. Американский состав [73].
8. Американский состав. Скорость горения при 70 атм. – 7,6 мм/сек: \* – аэросил [74].
9. Французский состав: \* – эпоксидная смола; \*\* – CuO [75].
10. Американский состав: \* – аэросил; \*\* – меди оксалат гемигидрат [76].

11. Французский состав: \* – эпоксидная смола; \*\* – перхлорат калия [77].
12. Шведский состав [78].
13. Американский состав: \* – VAAR [79].
14. Французский состав: \* – акриловый эластомер; \*\* – 6,4% дибутоксиэтоксипентилглютарата, 1% – винил-трис-(2-метоксипентоксисилана, 1% оксида железа [80].
15. Американский состав: \* – QPAC-40 [28].
16. Чешский состав: \* – Na-KMЦ; \*\* – поливинилацетат [126].

## 11.5. Составы для генерирования чистых газов

Пиротехнические композиции, сгорающие с выделением определенных газов, используются для технических нужд, составления дыхательных смесей в аварийных условиях на подводных лодках, космических кораблях и т.п.

Наиболее распространены составы, выделяющие при своем сгорании кислород, азот и водород. Они должны медленно сгорать, выделяя максимальное количество максимально чистого газа [12]. Также существуют специфические смеси, при сгорании которых образуются фтор, фтороводород, дейтерий и др., они применяются гл. обр. для накачки газодинамических лазеров.

### Описание основных типов составов для генерирования чистых газов:

1. Составы для получения кислорода обычно содержат 4 основных компонента, перечисленных в табл. 11.12.

**Табл. 11.12. Основные компоненты кислородных составов**

Компонент	Наименование
окислитель/генератор кислорода	хлораты натрия, лития, перхлораты натрия, калия
горючее	железо, сталь, марганец
поглотители хлора/ катализаторы	неорганические пероксиды и надпероксиды, MgO, CaO
шлакообразователь/связующее	стекловолокно, минеральные волокна, асбест

Иногда необходимо, чтобы количество выделяемого при сгорании кислорода изменялось по времени, в этом случае в изделие запрессовывается несколько составов с разной скоростью газовыделения.

Так, например, в патенте [81] предложена конструкция газогенератора, содержащая 5 слоев различных составов, при этом самая быстрогорящая смесь содержит: 74,5% хлората натрия, 12,5% порошка железа, 9% оксида кобальта и 4% стекловолокна, а самая медленногорящая – состоит из 94,0% хлората натрия, 2,3% порошка железа, 0,2% оксида кобальта, 1% оксида магния и 2,5% стекловолокна.

Установлено, что наиболее эффективными катализаторами разложения перхлоратов являются оксиды, пероксиды и надпероксиды щелочных металлов. В ряде случаев возможно самоподдерживающееся горение смесей перхлорат + надпероксид. Например, перхлораты лития или кальция в смеси с пероксидом и надпероксидом натрия горят с выделением 342–406 см<sup>3</sup>/г кислорода с температурой до 600°C [115].

Табл. 11.13. Составы для получения кислорода

Состав	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
хлорат натрия - $\text{NaClO}_3$	74-80	92	-	89	-	-	81	87-94	-	-	89	-
перхлорат натрия - $\text{NaClO}_4$	-	-	-	-	-	14	-	-	-	-	-	70-80
перхлорат лития - $\text{LiClO}_4$	-	-	84,9	-	66	-	-	-	-	-	-	-
перхлорат калия - $\text{KClO}_4$	-	-	-	-	-	-	-	-	90	92	-	-
перекись бария - $\text{BaO}_2$	4	4	-	4	33	-	-	-	-	-	-	-
перекись лития - $\text{Li}_2\text{O}_2$	-	-	4,2	-	-	-	-	-	-	-	-	-
перекись кальция - $\text{CaO}_2$	-	-	-	-	-	0,2-0,24	16	-	-	-	-	-
(над) перекись натрия - $\text{Na}_2\text{O}_2/\text{NaO}_2$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	ост.
двуокись марганца - $\text{MnO}_2$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,3	-
стекловолокно	12-6	-	-	1	1	-	-	-	-	-	-	-
стальная вата	-	4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
железо - Fe	10	-	-	6	-	-	-	-	-	-	2,5	-
марганец - Mn	-	-	10,9	-	-	-	-	-	-	-	-	-
магний - Mg	-	-	-	-	-	0,04-0,07	3	-	-	-	-	-
сульфид меди I - $\text{Cu}_2\text{S}$	-	-	-	-	-	-	-	6-13	-	-	-	-
бор аморфный - B	-	-	-	-	-	-	-	-	3	-	-	-
кремний - Si	-	-	-	-	-	-	-	-	7	-	-	1-2,5
молибден - Mo	-	-	-	-	-	-	-	-	-	8	-	-
наполнители	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	7,2	-
литература	12	12	12	12	12	82	83	84	85	86	87	116

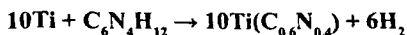
- Смеси, предназначенные для генерации чистого азота, используемого в дыхательных аппаратах, описаны в патентах [88, 89]. В первом предложена смесь азиды натрия с 10,5-18,0% хлорида кобальта, а во втором – смесь 50-70% азиды натрия и 30-50% асбеста хризотилового, который является поглотителем вредных газов, охладителем и основой, которая формирует шлак.
- Композиции для генерирования водорода обычно содержат гидриды и боргидриды и основаны на вытеснении водорода из его соединений более активным элементом. Применяются в качестве порохов для специальных пушек, создания активной среды в лазерах (лазерные топлива) и для газового усиления ядерных зарядов. Например, в заявке [90] предложен состав: 60% натрия борогидрида, 10% серы и 30% нитрата стронция. Температура его горения 853K. При сгорании 100 г смеси выделяется 6,4 г водорода, причем весь азот связывается в виде нитрида бора.

В другом патенте [91] предложена смесь 2 моля гидрида алюминия и 1 моля оксида железа. Состав предназначен, в первую очередь, для создания активной среды в лазерах.

В [105] описан топливо-генератор водорода на основе азиды аммония и гидрида титана для использования в качестве артиллерийского пороха, выделяющего большое количество легких газов. Это позволяет добиваться сверхвысоких скоростей артиллерийских снарядов в специальных ствольных системах.

В патенте [92] предложена смесь уротропина и титана.

Горение состава происходит по схеме:



Из патентной литературы [104] также известно использование диаммиаката боргидрида магния (MBDA) в смеси с нитратом лития и ПТФЭ (85/7,5/7,5). Состав обеспечивает высокий выход и чистоту выделяемого водорода, необходимые для наиболее эффективных химических лазеров.

Большой выход водорода (близкий к теоретическому) дает комбинация аммиоборанов (напр.  $\text{NH}_3\text{BH}_3$ ) с разогревающей основой – смесью алюминия и никеля [117] или перхлората калия с железом [118].

- Композиции для генерирования фторсодержащих газов бывают двух типов – первые генерируют газообразные соединения фтора ( $\text{N}_2\text{F}_m$ ,  $\text{HAlF}_x$ ,  $\text{SF}_x$  и т.п.), которые затем используются в качестве окислителей [95]. Второй тип генерирует при своем сгорании непосредственно фтор. Поскольку фтор не вытесняется другими элементами из соединений и для всех конденсированных соединений фтора распад эндотермичен, единственный возможный принцип компоновки состава заключается в использовании соединения – донора фтора с термической основой. Фтор реагирует с оксидами, галогенидами и прочими веществами, поэтому термической основой тоже является соединение фтора в смеси с металлическим горючим. Примером реакции с выделением фтора является горение  $\text{LiMnF}_6$  с магнием [69] и взаимодействие  $\text{K}_2\text{NiF}_6$  с  $\text{BiF}_3$  [119], причем быстрое выделение этого газа наблюдается уже при 60°C. Также следует упомянуть составы с  $(\text{NF})_2\text{TiF}_6$  [120, 121].
- Для генерации хлора обычно используют пиротехнические смеси, содержащие высшие хлориды металлов, способные выделять хлор в процессе горения, например при сгорании смеси порошка железа, перхлората лития и хлоридов алюминия или ниобия. Связующим служат волокнистые материалы типа стекловолокна или асбеста [122]. Основная область применения подобных газогенерирующих составов – уничтожение бактериологического оружия.
- Для генерирования окиси серы, которая применяется для обработки теплиц и овощехранилищ с целью уничтожения вредных насекомых используют бескорпусные серные шашки, содержащие серу – 75%, нитрат калия – 17%, диатомит – 8% [12].

## 11.6. Пиротехнические ракетные топлива

Пиротехнические ракетные топлива – пиротехнические смеси, используемые в качестве твердого ракетного топлива для приведения в движение пиротехнических и модельных ракет. Эти составы развивают всего лишь 20-30% удельного импульса классических твердых ракетных топлив. Такой низкий удельный импульс связан с тем, что дальность полета пиротехнических ракет и ракет-моделей редко превышает несколько сотен метров. Поэтому главными требованиями к таким топливам являются доступность и способность устойчиво сгорать при низких давлениях в неблагоприятных режимах, а не эффективность топлива с точки зрения достижения максимальной удельной тяги. Кроме того, конструктивная реализация простейших ракетных двигателей далека от совершенства,

и давления, развиваемые в них, намного ниже, чем у обычных ракет. Поэтому такие композиции традиционно причисляются к пиротехническим составам, а не к твердым ракетным топливам.

В настоящее время среди энтузиастов ракетного моделирования наибольшее распространение получило т.н. «карамельное топливо». Оно состоит из калиевой селитры и сорбита. Безводный сорбит плавится при 112°C, а затвердевает при меньших температурах и по прошествии некоторого времени. Это позволяет заливать топливо в камеру в расплавленном состоянии, где оно потом застывает в монолитную массу [20]. Сорбит может быть заменен сахарозой, однако в этом случае увеличивается скорость горения. Расплавлять такую смесь очень опасно в связи с близостью температуры плавления сахара и температуры воспламенения топлива, поэтому ее прессуют либо изготавливают шашки влажным способом при помощи растворителей. Уравнение горения «карамельного топлива» может быть записано, как:

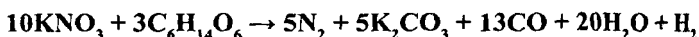


Табл. 11.14. Пиротехнические ракетные топлива

Состав	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
перхлорат калия - $\text{KClO}_4$	-	81	68	-	-	-	-	-	-	72,7	-
нитрат калия - $\text{KNO}_3$	63-66	-	-	60-70	61	-	0,2	70	-	-	67,2
нитрат гуанидина	-	-	-	-	-	79	91	-	-	-	-
древесный уголь	-	-	-	15-20	34	-	-	-	-	5,4	14,2
сера - S	-	-	-	15-20	5	-	-	-	33	-	9,4
сорбит и/или сахароза	34-37	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
бензоат калия	-	-	18	-	-	-	-	-	-	10,9	-
тринитро- или динитрорезорцин	-	-	-	-	-	20	8	-	-	-	-
эпоксидная смола	-	17,7	-	-	-	-	-	-	-	9,6	-
идитол или смола 211	-	-	5	-	-	-	-	10	-	-	-
магний - Mg	-	1,3	-	-	-	-	-	20	-	-	-
алюминий - Al	-	-	9	-	-	-	-	-	-	-	-
цинк - Zn	-	-	-	-	-	-	-	-	67	-	-
окись ванадия - $\text{V}_2\text{O}_5$	-	-	-	-	-	-	0,5	-	-	-	-
окись меди - CuO	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,4	-
мел - $\text{CaCO}_3$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	9,2
асбест	-	-	-	-	-	1	0,3	-	-	-	-

1. «Карамельное» топливо. Часто используется энтузиастами ракетного моделирования [20].
2. Отечественный состав [45].
3. Искрофорсовый состав для летающих пиротехнических игрушек [46].
4. Ракетные пороха по Ланкастеру [8].
5. Медленногорящий порох по Ланкастеру для ракеты внутренним диаметром 19 мм с центральным каналом. Уголь: 20%, проходит через сито 140 меш и 14% – через сито 40 меш [8].
6. Топливо для английских микродвигателей «Jetex» [98].
7. Топливо для английских микродвигателей «Jetex». Ранний вариант [99].
8. Топливо для отечественных двигателей ДБ-51-С-10 [100].
9. Безопасное топливо [98].
10. Современное перхлоратное топливо для фейерверочных ракет [109].
11. Топливо для американских сигнальных ракет М127А1, М125 и т.д. [15].

## 11.7. Топлива специального назначения

Топлива специального назначения представляют собой пороха смесового или баллистического типа, предназначенные для решения различных прикладных задач, не связанных с работой по метанию боеприпасов, и не являющиеся источником движущей силы реактивных двигателей, за исключением тех, которые используют окислитель и рабочее тело, подводимые извне.

### Различают:

- Газогенерирующие топлива для раскрутки турбин, приводящих в движение электрические генераторы или гироскопы в системах наведения боеприпасов.
- Плазменные топлива (пороха) – составы, продукты сгорания которых обладают повышенной электрической проводимостью (низкотемпературная плазма). Эти составы, также называемые «МГД-топливами», используются в твердотопливных магнетогидродинамических генераторах.
- Лазерные топлива (пороха) – составы, способные создавать активную среду и осуществлять накачку специальных лазеров.
- Топлива для скважинных аппаратов – составы для прострелки и стимуляции нефтяных скважин с целью интенсификации нефтедобычи и т.д.
- Гидрореагирующие топлива – составы для снаряжения торпед, использующих в качестве окислителя и рабочего тела заборную воду.
- Газогенерирующие топлива для прямоточных реактивных двигателей – смесовые топлива с большим избытком горючих элементов, использующих в качестве окислителя и рабочего тела воздух. Применяются в некоторых противокорабельных, зенитных и т.п. ракетах.

### Описание основных типов специальных топлив:

1. Газогенерирующие топлива для раскрутки небольших турбин, используемых в системах управления и энергообеспечения ракет, должны обладать невысокой скоростью и температурой горения, устойчиво сгорать в диапазоне давлений 30-70 атм., обладать малым разбросом свойств от партии к партии. При горении таких топлив должно выделяться большое количество газообразных продуктов сгорания, обладающих низкой коррозионной активностью и не содержащих большого количества твердых частиц. Этим требованиям удовлетворяют твердые топлива на основе нитрата аммония и полимерного связующего, однако на практике подобные композиции обладают такими существенными недостатками, как возможность фазовых переходов в кристаллическом нитрате аммония и его высокая гигроскопичность. В качестве примера можно привести следующий газогенерирующий состав: нитрат аммония – 68%, полипропиленгликольадипинат – 17,91%, эпоксидная смола – 12,05%, октоат хрома – 0,04%, графит – 1%, барбитурат натрия – 1% [29]. Недостатков, связанных с гигроскопичностью окислителя, лишены низкотемпературные двухосновные топлива на нитрате целлюлозы, содержащие присадку, которая разлагается в конденсированной фазе с эндотермическим

эффектом. Составы подобных топлив приведены в [7]. Известны довольно экзотические составы для раскрутки турбин, например: 92% бисборана гидразина ( $N_2H_4 \cdot 2BN_3$ ), скрепленного 8% эпоксидной смолы. При сгорании смесь образует большое количество водорода и твердого нитрида бора в виде компактной массы, остающейся внутри газогенератора [101]. В последние годы находят применение газогенерирующие топливные смеси пониженной уязвимости на основе триаминогуанидиннитрата, скрепленного полимерной связкой. Их температура горения составляет всего 1200–1600К, а баллистические параметры превосходят традиционные смеси на нитратах целлюлозы [30].

2. Плазменные топлива представляют собой высокоэнергетические баллистические пороха, содержащие в своем составе добавку легко ионизируемых компонентов – соединений калия, рубидия и цезия. Эти элементы, как правило, вводятся в виде солей-нитратов, хотя перспективным считается применение солей динитроазовой кислоты (динитрамидов). Для достижения как можно большей электрической проводимости такие топлива должны давать максимально высокую температуру горения. Топлива используются в импульсных МГД-генераторах, которые применяют для сейсморазведки и в научных целях. Удельная проводимость продуктов сгорания современных МГД топлив приблизительно в 10000 раз выше удельной проводимости продуктов сгорания обычных ракетных топлив [7, 31]. Свойства, методика подбора плазмообразующих топлив и результаты испытаний МГД-генераторов приведены в [127].

**Табл. 11.15. Типичные составы отечественных плазменных топлив [7]**

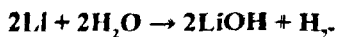
Состав	БП-10	БП-10Ф	БП-10Л	БП-11	СП-11	СПК-5Ф	СПК-10Ф	БП-15Ц
коллоксилин «Н»	35	32,5	35	9,0	33,2	30,4	29,2	30,2
пироксилин №1	-	-	-	27,6	-	-	-	-
нитроглицерин	31	30,5	31	29,6	31,8	30,5	29,2	30,2
нитрат цезия	10	11,0	10	-	11,0	-	-	15,0
нитрат калия	-	-	-	-	-	10,0	12,0	-
гексанитрокобальтат цезия	-	-	-	11,0	-	-	-	-
АМДЛ-5	-	22,5	22	-	-	27,0	-	22,5
АМД-10	22	-	-	20,0	22,0	-	27,5	-
добавки	2	3,5	2	2,8	2,0	2,1	2,1	2,1
температура горения, К	3722	3780	3747	3714	3745	3863	3858	3838
электропроводность, См/м	59,3	76,8	73,8	48,7	69,1	69,1	64,4	106,8

3. Лазерные топлива сгорают с образованием высокой концентрации активной среды  $CO_2$  или других газов (например, фтора,  $HF$ ,  $DF$ ,  $HCl$ ,  $CO$ ), способной в некоторых условиях генерировать когерентное электромагнитное излучение с определенной длиной волны. Основным требованием к ним является создание оптимальной температуры горения в сочетании с определенным составом продуктов сгорания. Обычно в состав продуктов сгорания таких топлив входят 2-3 компонента, но активным излучателем является только один тип моле-

кул. Создание активной среды (инверсии населенности) пиротехническими методами встречает ряд существенных трудностей. Концентрация молекул в возбужденном состоянии должна быть значительно выше концентрации неактивных молекул, что может быть получено в довольно узком диапазоне параметров. Оптимальными параметрами активной среды для газодинамических  $\text{CO}_2$ -лазеров является температура в пределах 1800-2000°C и определенный газовый состав: 8%  $\text{CO}_2$ , 3% паров воды, остальное – азот. Наличие конденсированной фазы не допускается. Очевидно, что для создания такой среды обычные бездымные пороха непригодны и в качестве компонентов следует использовать высокоазотистые соединения, содержащие мало водорода. Максимальный выход энергии лазерного излучения с 1 кг лазерного топлива для типичных рецептур составляет до 100-110 кДж [7]. В [102] описано топливо для химического лазера на основе водорода или дейтерия. В качестве примера можно привести смесь 3 ч. оксида железа и 1 ч. боргидрида (или бордейтерида) натрия. В [103] приведено топливо-генератор дейтерия, состоящее из 60% дейтерида алюминий-лития, 27,5% дейтероаммония хлорида, 12,5% оксида железа и 4% связующего (сверх 100%).

4. В качестве топлив для скважинных аппаратов, при температурах окружающей среды до 100°C, используют штатные бездымные ракетные топлива, а для крупных и термостойких изделий – смесевые топлива на основе перхлората аммония или калия. Для снаряжения пулевых перфораторов хорошо себя зарекомендовали пироксилиновый порошок ПП 4/7 и нитроглицериновый порошок НБ Пл 14-10. В пороховых аккумуляторах давления, предназначенных для стимуляции нефтяных скважин, – штатные бездымные ракетные топлива типа РСИ-12, РСИ-60, РНДСИ-5И, ДГ. А также смесевые топлива, например топливо, состоящее из 72% перхлората аммония, 18,8% сополимера полибутилена и акриловой кислоты, 9% алюминия и 0,2% оксида магния. Глубокие скважины характеризуются повышенными давлением и температурой до 250°C, что требует применения специальных термостойких топлив. Например, из патента [96] известен состав следующего типа: ПХА/ПХК 4:1 – 76%, смесь термоэластопласта ДСТ-30 и полистирола – 22,5%, N,N'-дифенил-п-фенилендиамин – 0,45%, аммоний фосфорнокислый однозамещенный – 1,05%. Сила этого пороха составляет 1007 кДж/кг. В другом патенте [97] предложена композиция, содержащая: ПХК – 80%, этиленпропиленовый каучук – 5%, масло ВНИИНП – 13%, лецитин – 0,2%, эпоксидную смолу – 0,5%, хинолиновый эфир или пара-динитробензол – 0,8%, трибутилкрезол или третичный бутилфенол – 0,5%. Плотность заряда – 1,83 г/см<sup>3</sup>. В скважинном аппарате для перерезания труб, установленных непосредственно в нефтяной скважине (американская фирма Chammass Cutters, Inc), применяется термостойкое пластизольное топливо TP-J-3006, состоящее из 70% ПХА, 25% пластизола на основе ПВХ/диоктиладипината, 4,8% оксамида и 0,2% газовой сажи [146].

3. Гидрореагирующие топлива применяются в двигателях реактивных торпед, в которых окислителем и рабочим телом является заборная вода. Подобное топливо реализовано, например, в изделии «Шквал» [32]. По зарубежным источникам, представляют собой пиротехнические топлива на основе перхлората аммония и (или) нитратов с очень высоким содержанием сплавов легких тугоплавких металлов типа лития и магния. Литий способен сгорать при определенных условиях под водой с выделением водорода по схеме:



При выходе части продуктов сгорания через головной обтекатель торпеды вокруг корпуса образуется парогазовый пузырь, движение в котором сопровождается резким снижением сил лобового и тангенциального сопротивления. В результате торпеда может разогнаться под водой до скоростей порядка 100 м/с. Сила сопротивления торпеды является функцией ее объема (для ракет - функцией массы), поэтому все агрегаты и механизмы торпеды должны занимать минимальный объем, а удельный импульс рассчитывается не на единицу массы топлива, а на единицу объема [151].

Двигательные установки таких торпед бывают 3-х типов [33]:

- Содержат заряд топлива в виде профилированной металлической болванки. Обеспечивает лучшие массогабаритные показатели, но имеет существенные недостатки, связанные с трудностью воспламенения и сжигания монолитного металлического заряда в водной среде и сопутствующими проблемами с регулированием скорости горения.
- Осуществляют распыление и воспламенение частиц металлического топлива в газовой фазе и подачу этой металлогазовой смеси в поток воды. Этот метод позволяет легко регулировать тягу двигателя, но имеет недостатки, связанные со сложностью и громоздкостью двигательной установки торпеды.
- Содержат заряд пиротехнического топлива, которое при сгорании образует нагретую газовую фазу с большим количеством раскаленных частиц активного металла, которые догорают в струе воды. Этот метод наиболее легко осуществим, конструкция двигателя проста и процесс сгорания отличается стабильностью. В состав таких топлив обычно входят (в массовых долях) 0,6-0,8 металлических горючих, 0,15-0,2 окислителей и до 0,5 технологических и специальных добавок. Количество связующего должно быть минимальным для достижения нужных механических свойств, т.к. углеводородные связки реагировать с водой не могут и, по сути, являются балластом для такого топлива. Поэтому предпочтение отдается активным связкам, которые содержат окислительные элементы в своем составе [111, 151]. В [152] приводится пример гидрореагирующего топлива: перхлорат аммония - 20%, магний - 65%, связующее на основе полибутадиена - 12%, добавки - 3%.

**Табл. 11.16. Основные характеристики гидрореагирующих топлив  
пиротехнического типа [111]**

Основа топлива	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Теплота сгорания, МДж/дм <sup>3</sup>	Удельный импульс, кг тяги на дм <sup>3</sup> топлива	Выход газа, м <sup>3</sup> /дм <sup>3</sup>	Скорость горения, мм/с при 10 МПа
Mg + нитраты	1,6-1,8	14-19	850	1,3-1,6	10-60
Mg + Al + нитраты	1,8-2,2	19-27	1200	1,3-1,6	10-40
ПАМ + перхлораты	1,7-2,0	14-16	-	1,6-2,0	4-10

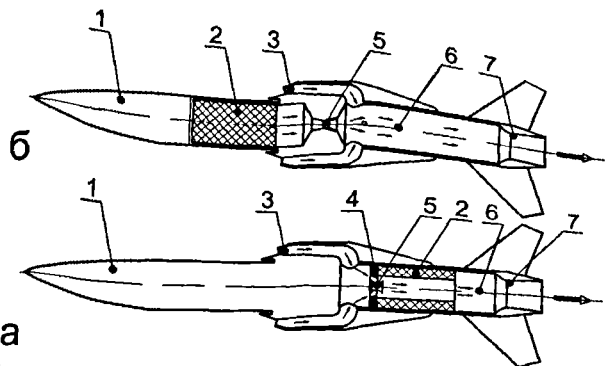
В американской торпеде Mk50, запущенной в производство в 1991 г., задействована оригинальная схема двигателя. В специальную камеру, содержащую металлический литий, из отдельно хранящегося баллона впрыскивается гексафторид серы, извне подается морская вода. В результате реакции между литием и гексафторидом серы выделяется большое количество тепла, за счет которого вода превращается в пар. Парогазовая смесь раскручивает турбину, и торпеда приводится в движение. Дальность хода торпеды составляет 15 км.

6. Топлива классических ракетных двигателей твердого топлива (РДТТ) содержат все необходимые окислительные и горючие элементы, обеспечивающие максимальный удельный импульс, обычно не превышающий 2600-2700 м/с. Если же использовать в качестве окислителя кислород воздуха, то удастся повысить экономичность таких двигателей в 2-4 раза, что положительно сказывается на увеличении дальности полета (в 1,5-2 раза при тех же габаритно-массовых хар-ках). Такие двигатели называют прямоточными воздушно-реактивными двигателями твердого топлива (ПВРДТ, solid fuel ramjet engine). Промежуточным типом между РДТТ и ПВРДТ является ракетно-прямоточный двигатель твердого топлива (РПДТ, solid fuel rocket ramjet engine). Этот тип двигательной установки еще называют «ПВРД с газогенератором».

**Табл. 11.17. Сравнение РДТТ, ПВРДТ, РПДТ [112, 140]**

Характеристика	РДТТ	РПДТ	ПВРДТ
удельный импульс тяги, м/с	2000-2700	7500-14000	—
теплота сгорания топлива, МДж/кг	3,5-7,0	19-33	до 46
высота полета, км	любая	0-35	0-20 (оценка)
эффективная скорость полета, М	любая	1-5	2-5
влияние внешних условий на процесс сгорания топлива	низкое	среднее	высокое

В камере сгорания ПВРДТ и РПДТ происходит смешивание парогазовой горючей фазы с воздушной средой и доокисление продуктов сгорания набегающим потоком воздуха. Воздухозаборники этих двигательных установок выполнены в виде диффузоров, позволяющих трансформировать скорость набегающего потока воздуха в давление.



**Рис. 11.3. Схемы проточных реактивных двигателей на твердом топливе.**

а) — схема ПВРДТ, б) — схема РПДТ.

1 — головная часть, 2 — заряд топлива, 3 — воздухозаборник (диффузор), 4 — стабилизатор пламени, 5 — дозирующее устройство (инжектор), 6 — камера сгорания, 7 — сопло.

ПВРДТ не могут нормально функционировать при небольших или нулевых скоростях. РПДТ теоретически может запускаться и при нулевой скорости, но в таких режимах он работает неэффективно. Поэтому разгон аппаратов с этими двигательными установками осуществляется либо с самолета, либо при помощи стартового ускорителя. Если стартовый ускоритель располагается в камере сгорания РПДТ или в канале топливного заряда ПВРДТ, то такие двигательные установки называют «интегрированными».

Твердые топлива для РПДТ представляют собой смесевые топлива на основе окислителя (до 50%), содержащие в своем составе повышенное (до 70%) количество органического и/или металлического горючего типа магния, алюминия, бора, карборанов, а также их сплавов и смесей [34, 140].

Очевидно, что состав таких топлив должен быть подобран таким образом, чтобы, с одной стороны, количество окислителя было достаточным для обеспечения устойчивости горения-газификации такого топлива, с другой стороны — основная часть горючего должна воспламеняться с задержкой, чтобы его горение происходило после выхода из газогенератора за счет кислорода воздуха, а не окислителя. Свойством воспламеняться с задержкой обладают некоторые сорта алюминия и интерметаллидов, порошкообразный бор, бориды алюминия.

Простейшие топлива такого типа представляют собой сочетания термической основы из нитрата натрия и магния (1:1) и нафталина (60%). Термическая основа испаряет нафталин, который затем догорает в потоке набегающего воздуха [124, 140]. Известно об использовании систем магний/ПТФЭ в ряде ракет «земля-воздух» (см. рис 16.2). Некоторые освоенные рецептуры топлив РПДТ приведены в [140].

Топлива ПВРДТ могут вообще не содержать окислителя и поэтому обычно не способны к самостоятельному горению без внешнего подвода тепла, а орга-

низация процесса устойчивого сгорания и возможность его регулирования представляют собой довольно сложную задачу. Они обычно базируются на высокоплотных углеводородах типа антрацена, бинора-S, вещества ДАМСТ, полистирола, полиэтилена, полибутадиеновых каучуков и т.д. Для повышения энергетических характеристик могут содержать бор, карбораны, а для обеспечения устойчивости горения – небольшие количества окислителей. Известны комбинированные схемы ПВРДТ и РПДТ.

РПДТ, несмотря на несколько худшие энергетические характеристики, с точки зрения практической реализации выглядят более предпочтительными, т.к. процессы в газогенераторе являются автономными и практически не зависят от внешних условий. Также РПДТ отличаются от ПВРДТ меньшим расходом воздуха на единицу массы топлива. Это позволяет уменьшить габариты воздухозаборников и камеры сгорания.

РПДТ и ПВРДТ используются в двигательных установках многих типов ракет, предназначенных для полета в атмосфере. Особенно активно применяются в зенитных ракетах, противокорабельных системах, а также в ракетах-мишенях. Сдерживающим фактором более широкого распространения подобных систем является их повышенная сложность и стоимость, в сравнении с аналогичными РДТТ.

#### **Примечание.**

*Интересно отметить, что если для большинства пиротехнических составов и ракетных топлив высокая зависимость скорости горения от давления является нежелательной, то для пиротехнических топлив, предназначенных для снаряжения РПДТ, наоборот, такая зависимость необходима (показатель  $\nu = 0,5-0,7$ ). Это позволяет оперативно регулировать параметры двигателя путем изменения набегающего воздушного потока [112].*

Высокометаллизированные топлива имеют теплотворную способность 19-40 МДж/кг, стехиометрический коэффициент 2,8-4,0, что соответствует величине импульсного полета тяги, для высоты полета 10 км, скорости 2М и расхода воздуха 10 кг/с, от 7500 до 9000 м/с. Представляются возможности для увеличения эффективности таких топлив на 20%.

Теплотворная способность углеводородных топлив соответствует примерно 30 МДж/кг, стехиометрический коэффициент 6-8,5 и импульс 9400 м/с.

В случае применения производных бора теплотворная способность составляет около 33 МДж/кг и импульс порядка 10000-14000 м/с.

Теплота сгорания перспективных топлив может достигать 50 МДж/кг и даже более [112, 140].

**В качестве примеров топлив ПВРДТ и РПДТ можно привести:**

- Топливо из патента [106]: фторполимер с гидроксильными концевыми группами – 13%, сшивающий агент – 16%, полибутадиен с гидроксильными концевыми группами – 48%, алюминий – 23%. Содержание в смеси фтора способствует разрушению защитной пленки алюминия и тем самым

повышает его способность к окислению кислородом воздуха. Там же приведены примеры с горючим – цирконием.

- Топливо из патента [107] заслуживает особого внимания в связи с тем, что патент опубликован в 2004 г., тогда как заявка датирована 1977 г., что указывает на практическое использование изобретения. Топливо содержит 22% ПХА, 34% полибутадиена с карбоксильными концевыми группами, 1% оксида железа, 3% катоцена, 35% гранул полистирола и 5% гранул, содержащих перфторуглерод и алюминий.
- Топливо из патента [108] содержит ВВ типа ТЭН-а в количестве 20-30%, скрепленного полибутадиеновым связующим, причем по эффективности оно превосходит аналогичное топливо на основе ПХА и полибутадиена. Вместо ТЭН-а можно использовать другие ВВ – гексоген и октоген.
- Модельное топливо, содержащее бор: ПХА – 20%, бор – 35%, полиглицидилазид – 25%, энергоемкий пластификатор – 12%, октоген – 5%, окись железа – 1%, добавки – 2% [35].

## Литература

1. Келли Дж. Порох. От алхимии до артиллерии: история вещества, которое изменило мир. - Пер. с англ. А. Турова. - М.: Колибри, 2005.
2. W.W. Greener. The Gun and its Development, Bonanza Books. NY, 9-th Edn. 1910.
3. Col H.W.L. Hime. The Origin of Artillery. Longmans, Green & Co, London & NY. 1915.
4. H. Brock. Pyrotechnics: The History and Art of Firework Making. London 1922.
5. PATR 2700. Encyclopedia of Explosives and Related Items./ Basil T. Fedoroff & Oliver E. Sheffield. Vol 7 – Piccattiny Arsenal Dover, New Jersey, USA – 1975.
6. PATR 2700. Encyclopedia of Explosives and Related Items./ Basil T. Fedoroff & Oliver E. Sheffield. Vol 2 – Piccattiny Arsenal Dover, New Jersey, USA – 1962.
7. Энергетические конденсированные системы. Краткий энциклопедический словарь. /Под ред. Б.П. Жукова. Изд. 2-е исправл. - М.: Янус К, 2000.
8. Ronald Lancaster. Fireworks. Principles and Practice. 3rd Edition. Chemical Publishing Co., Inc. New York, N.Y. 1998.
9. A.P. Hardt. Pyrotechnics. Pyrotechnica Publications. 2001.
10. Вспомогательные системы ракетно-космической техники. Пер. с англ. Н.В. Обезьяева и к.т.н. М.С. Шура. - М.: Мир, 1970.
11. Ellern H. Military and Civilian Pyrotechnics. Chemical Publishing Company Inc. New York. 1968.
12. Шидловский А.А. Основы пиротехники. - М.: Машиностроение, 1973.
13. H. Hahn. Safety and Technological Aspects of Black Powder. Propellants and Explosives 5, 129-134 (1980).
14. Def. Standard 13-166. Ministry of Defence. Glasgow 1994.
15. F. L. McIntyre, R.M. Rindner. A Compilation of Hazard and Test Data for Pyrotechnic Compositions. ARLCD-CR-80047. 1980.
16. Материалы Интернет-ресурса [www.pirotehnika.ruhelp.com](http://www.pirotehnika.ruhelp.com).
17. Материалы Интернет-ресурса [dzromon.narod.ru](http://dzromon.narod.ru).
18. Dr. Bernard E. Douda. Survey of Military Pyrotechnics. Prepared for Presentation at the Sixteenth International Pyrotechnics Seminar, Jonkoping, Sweden, 24-28 July 1991. NWSC/CR/RDTR-595. 1991.
19. P. Conley. Space Vehicle Mechanisms: Elements of Successful Design. John Wiley & Sons. New York. 1996.
20. Материалы Интернет-ресурса <http://www.nakka-rocketry.net/>
21. Материалы Интернет-ресурса <http://ru.wikipedia.org>, статья «Подушки безопасности».
22. В.В. Алешин, Г.Н. Широкова. Пиротехнические составы для получения азота на основе азидов. //Хим. Физика. - 1999. -Т. 18, №2.- С. 72-79.

23. Norimasa Hirata, Naoki Matsuda, Naminosuke Kubota. Combustion of NaN<sub>3</sub> Based Energetic Pyrolants. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics* 25, 217 - 219 (2000).
24. Jochen Neutz, Hans Ebeling, Wolfgang Hill, Andreas König, Lutz Klose and Albrecht Müller. Gas Generators for Deep Drawing Applications. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics* 27, 175 - 178 (2002).
25. Kazuo Hara and Tadao Yoshida. Concept and Performance of a Non-Azide Propellant for Automotive Airbag Inflators. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics* 23, 28-33 (1998).
26. Helmut Schmid and Norbert Eisenreich. Investigation of a Two-Stage Airbag Module with Azide-Free Gas Generators. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics* 25, 230-235 (2000).
27. В.А. Медведев, А.С. Крюков. История создания пиротехнических источников энергии для дистанционного управления агрегатами автоматики ракетно-космических комплексов. – М.; ЦЭИ «Химмаш», 2001.
28. Norman H. Lundstrom, Aaron J. Greso, Robert S. Scheffee. Azodicarbonamide Dinitrate – A High Nitrogen Self-deflagrating Fuel for Use in Pyrotechnic Gas Generators and Propellants. *Proceedings of the Twenty-Ninth International Pyrotechnics Seminar Westminster, CO. July 14-19, 2002.*
29. R. Reed etc. Castable Gas Generant Compositions. *Proceedings of the Sixth International Pyrotechnics Seminar. 12-21 July 1978.*
30. Siegfried Eisele, Fred Volk, and Klaus Menke. Gas Generator Materials Consisting of TAGN and Polymeric Binders. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics* 17, 155-160 (1992).
31. Victor A. Novikov, Vladimir A. Zeigarnik, Vladimir I. Okunev & Victor Yu. Rickman. Selection of Advanced Propellants for Pulsed MHD Power Systems. *Proceedings of the 2007 International Autumn Seminar on Propellants, Explosives and Pyrotechnics. Xi'an, Shaanxi, China, October 23-26, 2007. P.370.*
32. Материалы Интернет-ресурса <http://flot.com/science/sor8.htm>.
33. Ju hyen SIM, Seung-vin LIM etc. Characteristics of Combustion Metal Contained Propellant with Water Oxidizer. *Proceedings of the 2007 International Autumn Seminar on Propellants, Explosives and Pyrotechnics. Xi'an, Shaanxi, China, October 23-26, 2007. p327.*
34. Abraham Shalom. Flammability Limits and Ballistic Properties of Fuel-Rich Propellants. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics* 16, 59-64 (1991).
35. Norbert Eisenreich, Horst H. Krause, Achim Pfeil, and Klaus Menke. Burning Behaviour of Gas Generators with High Boron Content. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics* 17, 161-163 (1992).
36. Пат. US4128443 от 1975 г.
37. Пат. US4997496 от 1989 г.
38. Пат. DE2412346 от 1974 г.
39. Пат. RU2005706 от 1991 г.
40. Пат. RU2335484 от 2006 г.
41. Пат. US3960083 от 1975 г.
42. Пат. US3793100 от 1972 г.
43. Пат. US3203843 от 1962 г.
44. Пат. WO03040063 от 2001 г.
45. А.с. СССР 205662.
46. Пат. RU2305675 от 2006 г.
47. Пат. US5725699 от 1995 г.
48. Пат. US5997666 от 1996 г.
49. Пат. FR2228043 от 1972 г.
50. Пат. RU2105750 от 1996 г.
51. Пат. RU2151753 от 1998 г.
52. Пат. RU2243959 от 2003 г.
53. Пат. US4931111 от 1989 г.
54. Пат. US5064483 от 1990 г.
55. Пат. US5178696 от 1991 г.
56. Пат. US5780767 от 1995 г.
57. Пат. GB2278840 от 1993 г.
58. Пат. US5542997 от 1994 г.
59. Пат. RU2379274 от 2006 г.
60. Пат. US3862866 от 1971 г.
61. Пат. US3897285 от 1973 г.
62. Пат. GB1488178 от 1974 г.
63. Пат. US4386979 от 1980 г.
64. G.S. Biasutti. History of Accidents in the Explosives Industry. Vevey, Switzerland. 1980.
65. Пат. US5883330 от 1995 г.
66. Пат. US6328830 от 1997 г.
67. Пат. DE19821010 от 1998 г.
68. Пат. EP0661253 от 1994 г.
69. C.E. Fogle, J.D. Breazeale. Solid Reactants for Fluorine Gas Generators. United Technologies Corporation. 1976. AD-A022099.
70. Пат. WO98/06683 от 1997 г.
71. Пат. US2604391 от 1949 г.
72. Пат. US2653086 от 1949 г.
73. Пат. US6306232 от 1997 г.
74. Пат. US6383318 от 2000 г.
75. Пат. US6533878 от 1998 г.

76. Пат. US2003/0089883 от 2003 г.
77. Пат. EP0816307 от 1997 г.
78. Пат. EP1885668 от 2006 г.
79. Пат. WO97/46502 от 1996 г.
80. Пат. WO2008/145935 от 2008 г.
81. Пат. US6264896 от 2000 г.
82. Пат. RU2052283 от 1993 г.
83. Пат. RU2056341 от 1993 г.
84. Пат. RU2056342 от 1993 г.
85. Пат. RU2142401 от 1998 г.
86. Пат. RU2151735 от 1998 г.
87. Пат. WO2008/094490 от 2008 г.
88. Пат. SU1208740 от 1983 г.
89. Пат. RU2257930 от 2004 г.
90. Заявка US2009/0057609.
91. Пат. US3948700 от 1976 г.
92. Пат. RU2178093 от 2000 г.
93. Пат. RU2261852 от 2004 г.
94. Пат. US6080248 от 1999 г.
95. Пат. US3980509 от 1975 г.
96. Пат. RU2281932 от 2005 г.
97. Пат. RU2182147 от 2000 г.
98. П. Эльштейн. Конструктору моделей ракет. - М.: Мир, 1978.
99. Пат. GB645897 от 1949 г.
100. Е.Л. Букш. Основы ракетного моделизма. М.: ДОСААФ, 1972.
101. Пат. US3170283 от 1963 г.
102. Пат. US3948699 от 1974 г.
103. Пат. US4021362 от 1975 г.
104. Пат. US4673528 от 1985 г.
105. Пат. US5487798 от 1992 г.
106. Пат. US4392895 от 1981 г.
107. Пат. US6736912 от 1977 г.
108. Пат. US5085717 от 1980 г.
109. Michael S. Russell. The Chemistry of Fireworks. 2-nd Edition. RSC Publishing. 2009.
110. Материалы Интернет-ресурса [www.pyroguide.com](http://www.pyroguide.com).
111. Булатов Е.А., Вареных Н.М., Сарабьев В.И. Гидрореагирующие твердые пиротехнические топлива и их применение в энергосиловых установках. Материалы Всероссийской конференции «Энергетические конденсированные системы».- Черноголовка, 2002. С. 58.
112. Емельянов В.Н., Конюхов Б.Н., Сарабьев В.И. Основные характеристики твердых пиротехнических топлив для воздушно-реактивных двигателей. Материалы Всероссийской конференции «Энергетические конденсированные системы».- Черноголовка, 2002. С. 60.
113. J.Taylor. Solid Propellants and Exothermic Compositions, Newnes, London, 1959.
114. Cerne Prachy Vyrabelne Synthesia a.s. Zavod Exposia. Материалы фирмы Synthesia. 1995.
115. В.Я. Росоловский, З.К. Никитина, С.М.Синельников. Взаимодействие перхлората лития и перхлората кальция с сульфидом и надпероксидом натрия.// Журнал неорганической химии. -1995. Т.40, №1. С. 6.
116. Пат. RU2149136 от 1998 г.
117. Пат. US4315786 от 1980 г.
118. Пат. US7261748 от 2000 г.
119. Пат. US4711680 от 1983 г.
120. Пат. US4152406 от 1976 г.
121. Пат. US4410377 от 1982 г.
122. Пат. US7300625 от 2004 г.
123. Пат. RU2435638 от 2010 г.
124. Материалы Интернет-ресурса [www.pyrotechnics.net.ru/](http://www.pyrotechnics.net.ru/) Материалы лекций Дудырева А.С., «Разработка пиротехнических составов». Переработка и оформление Е. Мисоночниковой и Королева Д.В.
125. Материалы Интернет-ресурса [www.exposia.cz/](http://www.exposia.cz/) Каталог продукции.
126. Пат. CZ301335 от 2005 г.
127. Жегров Е.Ф., Милёхин Ю.М., Берковская Е.В. Технология порохов и твердых ракетных топлив в приложении к конверсионным программам. — М., 2006.
128. Морозов Н.А. Новый взгляд на историю Русского государства. Отв. ред. проф. А. Ф. Замалеев, - СПб.: Изд-во С.-Петерб. ун-та, 2007.
129. Материалы Интернет-ресурса <http://balanseeker.livejournal.com/31164.html>. Любопытное. Порох и история.
130. Frank J. Valenta. Understanding the Function of Chemical Ingredients in CADs When Pursuing «Green» Replacement Materials. National Capital Region Energetics Symposium. April 27-28. 2009.
131. <http://www.acc.af.mil/shared/media/document/AFD-070802-066.pdf>.
132. Technical Manual. Ordnance Data for Toxic Hazards Associated with Pyrotechnic Items. NAVSEA SW050-AC-ORD-010. 2005.
133. Б.С. Ермолаев, А.А. Беляев, С.Б. Викторов, К.А. Слепцов, С.Ю. Жарикова. Неидеальные режимы дефлаграции и детонации дымного пороха. Химическая физика, 2010, том 29, №5, с. 1-13.

134. Пат. CZ22613 от 2011 г.
135. Пат. FR2964656 от 2010 г.
136. Пат. FR2975097 от 2011 г.
137. Second NASA Aerospace Pyrotechnic Systems Workshop. Compiled by William W. St. Cyr. 1994.
138. Carl Hohmann, Bill Tipton Jr., Maureen Dutton. Propellant for the NASA Standard Initiator. NASA/TP-2000-210186. October 2000.
139. Appeals of Hanley Industries, Inc. Under Contract No. N00104-01-C-K109. 2008.
140. Интегральные прямоточные воздушно-реактивные двигатели на твердых топливах (Основы теории и расчета) / В.Н. Александров, В.М. Быцкевич, В.К. Верховоломов и др. – М.: «Академкнига», 2006.
141. Laurence J. Bement, Morry L. Schimmel. A Manual for Pyrotechnic Design, Development and Qualification. NASA Technical Memorandum 110172. 1995.
142. Donald H. Barrett. Solid Rocket Motor Igniters. /ed. Russell B. Keller. NASA SP-8051. 1971.
143. MSDS for Impulse Cartridge CCU-136A/A and CCU-138/A. Chemring, Australia. 2011.
144. MSDS for Micro Gas Generator Type NKPL-1. Nippon Kayaku Co., Ltd. 2005.
145. MSDS for Micro Gas Generator Type NKPL-2. Nippon Kayaku Co., Ltd. 2008.
146. MSDS for Propellant TP-J-3006 – Gas Generator Grain. Chammas Cutters, Inc. 2009.
147. Пат. EP1731383 от 2005 г.
148. Deshmukh S.M., Ghatak C.K., Arya P.R., Somayajulu M.R. and Rao A. Subhananda. Electrothermal Response and Functional Characteristics of Barium Ferrocyanide-Based Squibs, Journal of Energetic Materials, 24: 4, 2006.
149. John W. Fronabarger, Michael D. Williams, William B. Sanborn, Damon A. Parrish, Magdy Bichay. KDNF – A Lead Free Replacement for Lead Styphnate. Propellants, Explosives, Pyrotechnics. 36, 459-470 (2011).
150. Adam L. Collins and William G. Proud. Properties of Lead-free Primers – Development of a Testing Facility at the Cavendish Laboratory. Proc. of Eleventh seminar «New trends in research of energetic materials» Pardubice, 2008.
151. Цуцуран В.И., Петрухин Н.В., Гусев С.А. Военно-технический анализ состояния и перспективы развития ракетных топлив: Учеб. – М.: МО РФ, 1999.
152. Hai-Tao Huang, Mei-Shuai Zou, Xiao-Yan Gio, Rong-Jie Yang and Peng Zhang. Analysis of the Solid Combustion Products of a Mg-Based Fuel-Rich Propellant used for Water Ramjet Engines. Propellants, Explosives, Pyrotechnics 37, 407 - 412 (2012).
153. Пат. RU2394800 от 2008 г.

## **Глава 12. Составы маскирующих дымов**

Составами маскирующих дымов называют смеси, образующие при сгорании или распылении устойчивые дымы и туманы. В военном деле маскирующие дымы применяют как для сокрытия передвижения войск, так и для ослепления противника с целью сковывания его действий. В отдельных случаях маскировочные дымы могут быть использованы для сигнализации и «выкуривания» противника из убежищ.

**Обычно различают следующие типы дымовых составов [1]:**

- составы, в которых дымообразующие вещества находятся в готовом виде, а дым или туман образуется при возгонке этих веществ в результате сгорания теплогенерирующей основы:
  - малотоксичные дымовые составы термовозгоночного типа;
- смеси или индивидуальные компоненты, продукты сгорания которых являются дымообразующими веществами:
  - дымовые составы металлохлоридные,
  - дымовые составы для маскировки в инфракрасном и СВЧ-диапазонах,
  - дымовые составы на основе фосфора;
- вещества или смеси, сами по себе являющиеся дымообразователями. Дымы или туманы возникают при механическом распылении этих веществ:
  - жидкие дымообразующие вещества.

В истории известны случаи, когда естественный туман или пороховой смог играли решающую роль в достижении победы в отдельных битвах. Первое детальное описание практического использования маскирующего дыма датируется 1700 годом, когда войска шведского короля Карла XII переправлялись через Западную Двину под прикрытием дымовой завесы, созданной за счет сжигания мокрой соломы.

Во время гражданской войны в США, черную дымовую завесу получали сжиганием смолистой древесины. Впрочем, эффективность подобных дымовых средств была сравнительно невелика, и задача обеспечения войск надежными дымообразующими средствами не была решена до 1906 г., когда немцы оснастили свой военный флот дымовыми генераторами, работающими на смеси серного ангидрида и хлорсульфоновой кислоты. Приблизительно в то же время ведущие мировые державы начали интенсивно разрабатывать дымовые пиротехнические составы, и к началу Первой мировой войны на вооружении всех развитых стран уже состояли вполне эффективные дымовые средства. В российской армии широко использовались дымовые шапки, начиненные смесью Ершова, в Англии – смесью «тип S», во Франции – смесью Берже. Смесью Берже послужила прототипом для создания американцами в 1917 г. несколько более эффективной металлохлоридной смеси «ВМ». Широкое применение получил белый фосфор – самое эффективное из известных дымообразующих веществ.

Жидкие дымообразующие вещества типа олеума или четыреххлористого титана использовались с меньшим размахом.

В Первую мировую дымовые средства зачастую применялись совместно с боевыми отравляющими веществами, придерживаясь довольно изощренной тактики. Например, создавалась дымовая завеса, солдаты союзников надевали противогазы, полагая, что это газовая атака, чем затруднялись их действия. Иногда вслед за дымовой завесой создавалось облако отравляющего вещества. Во время прохождения облака дыма солдаты надевали противогазы; когда обнаруживалось, что это обычный дым, солдаты снимали противогазы и оказывались подверженными идущему вслед облаку отравляющего вещества [2, 3].

К началу Второй мировой войны маскирующие дымовые средства были в значительной степени улучшены, так, например, в Америке и Германии смеси, содержащие четыреххлористый углерод и цинк, заменили составами типа НС на основе гексахлорэтана и цинка. В Англии и США появились термогенераторы для создания дыма на основе паров нефтяных масел, к концу войны эволюционировавшие в дымовые генераторы типа Вентури. Продолжалось использование жидких дымовых смесей и белого фосфора, при этом интенсивность применения дымовых средств значительно превосходила масштабы времен Первой мировой войны.

Красная Армия регулярно снабжалась дымовыми шашками, минами и снарядами, расход которых в отдельных операциях исчислялся сотнями тонн. При прорыве сильно укрепленной обороны противника в августе 1944 г. на реке Днестр общая длина задымления достигала 60 км, на что было израсходовано порядка 150 тыс. единиц дымовых изделий общей массой до 500 тонн. Продолжительность задымления на отдельных участках боев составляла до 6 часов. Ослепленные огневые точки противника не могли вести эффективный прицельный огонь – и потери Красной Армии в значительной степени снижались. Широкомасштабно использовались армейские дымовые шашки и гранаты, в гораздо меньшей степени – дымовые мины и снаряды [88]. Первая советская дымовая авиабомба ДАБ-25, снаряженная 17 кг белого фосфора, была принята на вооружение только в 1941 г., уже успев к этому моменту устареть. В годы войны также использовалась более мощная ДАБ-100 образца 1941 г., хотя можно указать, что применение дымовых авиабомб во время Второй мировой войны не носило массового характера [87].

В послевоенные годы арсенал отечественных дымовых средств пополнился изделиями на основе более эффективных металлохлоридных дымовых составов [88]. В ряде стран до сих пор сохранились в употреблении некоторые наиболее удачные дымовые композиции, например металлохлоридная смесь НС «тип С», белый фосфор и модифицированные смеси Ершова.

Попадание влаги в металлохлоридные композиции типа НС на основе цинка инициирует реакцию разложения, сопровождающуюся разогревом и даже самовоспламенением. Например, известны случаи самовозгорания дымовых средств на американских складах, вызванные протекающей крышей и попаданием воды на емкости с составом. Поэтому цинк был постепенно исключен из американских металлохлоридных смесей. Позже в дымовые составы начали вводить фтор- и хлорорганические полимеры – связующие, уже содержащие в своем составе дымообразующие элементы типа галогенов.

С конца Второй мировой войны получили развитие очень эффективные дымовые средства на основе красного фосфора (в первую очередь, светодымящие бун), впоследствии значительно потеснившие в арсеналах дымовые изделия, начиненные белым фосфором.

В связи с разработкой приборов ночного видения, инфракрасных прицелов и систем лазерного наведения, особое внимание начали уделять составам, маскирующим в инфракрасном спектре. Кроме того, в 70-80-х годах 20 века в США были проведены значительные работы по определению токсичности дыма существующих составов, которые привели к созданию нетоксичных маскирующих дымовых смесей на основе терефталевой кислоты. И хотя эти композиции по эффективности не могут сравниться с традиционными металлохлоридными или фосфорными составами, их использование на войсковых маневрах позволяет избегать случайных отравлений.

В целом, судя по отдельным публикациям и патентной литературе, можно считать, что пик эффективности дымовых составов на основе современного сырья уже давно достигнут и основное внимание в настоящее время уделяется разработке более совершенных смесей для маскировки против ИК-средств и радаров.

**Табл. 12.1. Оптико-электронные средства и типичные дымовые составы их подавления [10]**

Спектральный диапазон	Оптико-электронное средство	Тип дымовой смеси
видимый 0,40-0,75 мкм	оптические прицелы, фотоэлектронные приборы, бинокли, системы ТВ и оптического наведения, просветленная и ночная оптика обычного типа	все типы
ближний ИК 0,75-4,00 мкм	индивидуальные ИК-очки и ИК-прицелы, боеприпасы с лазерным наведением, лазерные дальномеры и лазерные сканирующие устройства	все типы
средний ИК 4-14 мкм	пассивные тепловые прицелы	фосфорные дымы, графит, металлические аэрозоли
дальний ИК 14-100 мкм	бортовые тепловизоры, ракеты с ИК головками самонаведения	фосфорные дымы, графит, металлические аэрозоли
миллиметровые волны >100 мкм	радары и СВЧ-устройства	графит

Аэрозолями называют системы, в которых одновременно присутствует непрерывная газовая среда, насыщенная дисперсной фазой – микроскопическими частицами жидкости или твердых веществ. В зависимости от дисперсности и агрегатного состояния частиц аэрозоли подразделяются на дымы, туманы, пыль и т.п. При этом в зарубежной литературе туманом называют аэрозоль независимо от того, жидкость это или твердые частицы с характерным размером  $10^{-3}$ - $10^{-5}$  см, для дыма этот размер составляет  $10^{-5}$ - $10^{-7}$  см.

В отечественной литературе туманом называют взвесь капелек жидкости, а дымом – взвесь твердых частиц.

В военной технике обычно не делается различий между дымами и туманами, и весь спектр применяемых аэрозолей называют дымами.

Частицы дыма постоянно находятся под действием силы притяжения земли и броуновского (хаотического) движения. Более крупные частицы быстро оседают под действием силы земного притяжения, тогда как мелкие, напротив, за счет броуновского движения могут находиться в атмосфере очень продолжительное время. Сам по себе дым является неустойчивой субстанцией: частицы постоянно испытывают взаимодействие с окружающей атмосферой, приводящее к их рассеиванию, оседанию, слипанию и т.д.

Наиболее благоприятными условиями для формирования устойчивой дымовой завесы является скорость ветра 3-5 м/с. При скоростях ветра более 9 м/с наблюдается усиленное рассеивание и унос дыма, тогда как при скоростях менее 1,5 м/с дым концентрируется в одном месте и перестает образовывать протяженную завесу. Теплый дым от сгорания дымовых шашек в спокойную погоду склонен подниматься вверх, тогда как дым, распыляемый механическим путем, наоборот – вниз. Поведение дымовой завесы также определяется временем суток и атмосферными явлениями, связанными с распределением теплых и холодных слоев воздуха вблизи земной поверхности.

Маскирующие свойства дыма основываются на двух физических явлениях: рассеянии света и его поглощении.

Рассеянием света называется отклонение дымовыми частицами в разные стороны лучей, проходящих через дымовое облако. Рассеяние возникает благодаря эффектам отражения, преломления и дифракции светового потока на частицах дыма.

Поглощение сопровождается переходом световой энергии в какой-либо другой ее вид – тепловой, электрический, химический и т.д.

Белые дымы преимущественно рассеивают свет, черные – поглощают. Разные длины волн одним и тем же видом дыма рассеиваются неодинаково: чем ближе средний размер частиц к длине волны света, тем эффективнее происходит рассеяние. ИК-излучение имеет длины волн заметно большие, чем размеры частиц обычного дыма, поэтому смеси белого дыма хуже маскируют в ИК области, чем в видимом спектре.

Для маскировки в ИК-спектре более эффективны фосфорные дымы, образующие достаточно крупные частицы тумана, либо смеси черного дыма, маскирующее действие которых базируется не на рассеянии излучения, а на его поглощении.

### **Характеристики дымовых составов:**

Из характеристик дымового состава различают *маскирующую способность* и *дымообразующую способность*.

- *Маскирующей способностью* называют коэффициент ослабления света дымового облака, полученного при введении 1 г дымообразователя в 1 м<sup>3</sup> воздуха. Еще ее называют коэффициентом экстинкции.

Маскирующая способность определяется отношением произведения экспериментально полученного коэффициента ослабления света  $K$  и коэффициента использования  $K_{\text{н}}$  к концентрации дымообразователя:

$$E = \frac{K \cdot K_{\text{н}}}{q}$$

Табл. 12.2. Маскирующая способность дымовых смесей [2, 4]

Вещество	Е, м <sup>2</sup> /г
фосфор белый	13,6
серный ангидрид - SO <sub>3</sub>	12,6
четырёххлористый титан - TiCl <sub>4</sub>	6
смеси HC	4,4-4,8
раствор SO <sub>3</sub> в HClO <sub>3</sub> (FM)	2,8-3,7
смесь Берже	2,0
смеси типа Ершова	1,9

В США вместо маскирующей способности пользуются величиной *суммарной кроющей способности* – «ТОР».

Эта величина определяет отношение объема дыма в м<sup>3</sup>, полученного из 1 кг дымовой смеси к дальности видимости в метрах, определяемой при помощи стандартной 40-ваттной лампы.

Табл. 12.3. Суммарная кроющая способность дымовых смесей (Total Obscuring Power – TOP) [2]

Вещество	ТОР, м <sup>2</sup> /кг	Вещество	ТОР, м <sup>2</sup> /кг
белый фосфор	940	HClO <sub>3</sub> + NH <sub>3</sub> *	325
TiCl <sub>4</sub> + NH <sub>3</sub> *	620	SiCl <sub>4</sub> *	305
SO <sub>3</sub> *	615	HClO <sub>3</sub> *	285
FS (45% HClO <sub>3</sub> и 55% SO <sub>3</sub> )*	520	смесь «ВМ»	285
HCl+NH <sub>3</sub> *	510	смесь Берже	255
смесь «HC»	430	FM + дихлорэтан*	250
SiCl <sub>4</sub> + NH <sub>3</sub> *	400	SO <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub> *	245
FM (TiCl <sub>4</sub> ) *	390	смесь Ершова	240
олеум*	385	Cl <sub>2</sub> + NH <sub>3</sub> *	155
SnCl <sub>4</sub> *	380	смесь «S»	95
PCl <sub>3</sub> + NH <sub>3</sub> *	325	минеральное масло*	40

\* – смеси для механического распыления (не пиротехнического типа).

- Дымообразующей способностью «Yf» называют величину, которая показывает, какая часть массы дымообразователя переходит в дым. Иными словами, это отношение массы дисперсной части дыма к массе дымообразователя. В пиротехнических составах эта величина тем больше, чем меньше шлаков остается в корпусе дымовой шашки и чем больше частицы дыма поглощают влагу из воздуха.

Дымовые составы, в которых дымообразующее вещество образуется при сгорании, более эффективны, чем смеси с готовым дымообразователем. Они бывают металлохлоридными (основа – хлорорганическое соединение + металл) и фосфорными (белый фосфор или смеси на основе красного фосфора). Кроме того, существуют экзотические композиции, например, смесь 58% сульфаминовой кислоты и 42% перхлората аммония [39].

Причина высокой эффективности таких составов заключается в способности дымообразующего вещества поглощать влагу воздуха с образованием продуктов гидролиза хлоридов металлов либо взвеси фосфорной кислоты.

В результате частички дыма укрупняются, формируя густой туман, который рассеивается очень медленно из-за постоянно протекающего процесса поглощения влаги из воздуха. Дымообразующая способность «Yf» приведена в таблицах 12.4 и 12.5. Она зависит, в первую очередь, от относительной влажности воздуха и способности дымового вещества поглощать влагу из воздушной среды.

**Табл. 12.4. Количество дыма, образующегося на единицу массы дымообразующего вещества при относительной влажности 75% (за счет поглощения воды из воздуха) [2]**

Вещество	Кол-во (Yf)
фосфор	7,11
хлорид алюминия	5,0
хлорид железа III	3,1
хлорид цинка	2,5
минеральное масло	1,0*

\* – воду не поглощает.

**Табл. 12.5. Сравнение эффективности фосфорных и металлохлоридных смесей при различной влажности воздуха [11]**

Параметр	Фосфор кр.	Фосфор кр./NaNO <sub>3</sub> /связка	Смесь НС
Yf, 20% влажности	3,73	2,99	1,25
Yf, 50% влажности	4,32	3,45	1,58
Yf, 80% влажности	5,77	4,61	2,77
E, м <sup>2</sup> /г, 20% влажности	3,5	3,5	3,5
E, м <sup>2</sup> /г, 50% влажности	4,2	4,2	3,9
E, м <sup>2</sup> /г, 80% влажности	3,8	3,8	2,9

## 12.1. Малотоксичные дымовые составы термовозгонного типа

Дымовые составы, в которых дымообразователь находится в готовом виде, еще называют смесями термовозгонного типа. Как правило, они содержат тройную композицию окислителя, горючего и дымообразователя. Окислителем в них обычно является хлорат калия, горючим служит легкоокисляемое вещество типа древесного угля или сахарозы, а дымообразователем – хлорид аммония, нафталин (или предпочтительнее – менее летучий антрацен), терефталевая кислота. При сгорании смеси окислитель/горючее выделяется тепло, за счет которого испаряется дымообразователь, формирующий в атмосфере дымовую завесу.

Следует отметить, что дымовые смеси, содержащие одновременно хлорат калия, хлорид аммония и антрацен (нафталин), не столь опасны при хранении, как это может показаться, исходя из свойств хлората калия. Технический антрацен обволакивает частицы хлората калия и тем самым способствует торможению вредных обменных процессов, происходящих в смеси. Тем не менее изделия, снаряженные такими смесями, должны быть утилизированы после окончания срока хранения, т.к. наблюдались случаи самопроизвольного воспламенения или раз-

Стоит отметить, что идея использования хлоридов натрия и калия в качестве дымообразователя не нова. Еще в конце 60-х годов на американском флоте широко испытывались подобные смеси под названием «Salty Dog» и «Salty Frog». Аэрозоль хлоридов калия и натрия на перенасыщенном влагой морском воздухе формировал устойчивый туман.

Стандартный состав типа «Salty Dog» содержал: магний – 5%, перхлорат калия – 65%, хлорид натрия – 10%, карбонат лития – 2%, связующее – 18% [13].

В болгарском патенте [41] для тренировочных целей и специальных эффектов предложена дешевая смесь из 500 г древесных опилок, 390 г нитрата аммония и 150 мл отработанного машинного масла. По технологии нитрат аммония растворяют в 500 мл воды при 50°C, пропитывают этим раствором опилки, испаряют воду и добавляют масло. Вместо масла смесь может содержать органические красители или раздражающие вещества, а вместо нитрата аммония – нитраты калия и натрия.

В 1999 г. французским концерном «Lacroix» [42] для сигнальных и учебных целей была предложена нетоксичная и не оставляющая нагара смесь белого дыма с использованием в качестве дымообразователя глицеринового эфира канифоли.

Теплоты сгорания термической основы окислитель/горючее в смесях термовозгонного типа должно хватать для возгонки дымообразователя. При этом температура горения должна быть достаточно низкой, чтобы не вызвать самовоспламенение паров дымообразователя на выходе в окружающую атмосферу. Для этого в состав добавляют различные пламегасители, которые поглощают часть тепла на свое разложение и одновременно выделяют неактивные газы, затрудняющие воспламенение дымообразователя. Кроме того, заряд дымовой смеси часто запрессовывают в контейнер из металлической сетки, который, в свою очередь, помещают в корпус дымовой шашки – металлический цилиндр с выхлопными отверстиями. Несмотря на принимаемые меры, иногда все же происходит воспламенение дымообразователя. При этом общее количество дыма резко уменьшается и его цвет становится серым из-за выделяющейся сажи.

Хотя американские тренировочные дымовые гранаты типа «Вентури» в настоящее время заменены более удобными и простыми гранатами типа M83 (снаряжены составом на основе терефталевой кислоты), они заслуживают внимания из-за оригинальной конструкции (см. рис. 12.2 (б)). Граната содержит запрессовку газогенерирующей смеси на основе нитрата аммония и специальный контейнер с расположенным по центру соплом Лавала (трубкой Вентури). Контейнер заполнен минеральным маслом. В поверхности сопла находятся отверстия, заполненные сплавом Вуда. При срабатывании воспламенителя зажигается термическая основа, от потока нагретых газов сплав Вуда размягчается и отверстия освобождаются. Масло начинает уноситься газами, формируя нетоксичную масляную завесу. После Второй мировой войны на вооружении ВМС США также состояли плавучие дымовые шашки на подобном принципе работы.

В качестве термической основы для шашек «Вентури» обычно использовались топливные смеси, предназначенные для возгонки химикатов и описанные в Главе 14.

рыва просроченных изделий типа гранат РДГ-2Б. Интересно отметить, что в США композиции, содержащие одновременно соли аммония и хлорат калия, запрещены законодательно, тогда как в России и в странах Восточной Европы они довольно успешно применяются на протяжении уже почти 100 лет.

После Второй мировой войны металлохлоридные композиции и смеси на основе красного фосфора начали вытеснять термовозгоночные композиции ввиду гораздо большей эффективности. Однако полной замены не произошло из-за наличия у термовозгоночных композиций существенного преимущества – малое раздражающее действие на органы дыхания и низкой токсичности дыма. Это определяет их широкое использование для тренировочных целей и маскировки собственных войск без необходимости применения средств индивидуальной защиты типа противогазов.

Ввиду отсутствия весомой альтернативы нетоксичным смесям типа «Ершова» во время Второй мировой войны американцами были разработаны тренировочные дымовые шашки типа «Вентури» с отдельным снаряжением термической основы и дымообразователя (минерального масла) [1, 2]. Схема дымовой гранаты на этом принципе показана на Рис. 12.2, б. В то время американцы еще не были готовы к внедрению дымовых гранат и шашек типа «Вентури», поэтому массовое производство таких изделий началось только после войны.

Несколько позже – в конце 70-х, начале 80-х годов 20 века в Америке были созданы составы на основе органических кислот, из которых лучшими были признаны композиции с терефталевой кислотой. Толчком к внедрению нетоксичных смесей в США послужил несчастный случай с множественными отравлениями солдат продуктами сгорания металлохлоридных дымовых шашек в 1988 г. [78]. В начале 90-х годов в составы с терефталевой кислотой начали вводить пентаэритрит, одновременно выполняющий функцию пламегасителя и дымообразователя. В настоящее время подобные дымовые средства находятся на вооружении армии США наряду с металлохлоридными композициями и смесями на основе красного фосфора. В Англии в 1993 г. была принята на вооружение тренировочная дымовая граната L72A1, снаряженная смесью PN868 на основе коричной кислоты [78].

Не так давно немцами для тренировочных целей были разработаны составы нетоксичного дыма с хлоридами калия и натрия в качестве дымообразователей (смеси «КМ»). Хлориды щелочных металлов сублимируются при температурах около 1500°C, поэтому состав содержит компоненты, позволяющие достигнуть таких температур, и вещество-газогенератор для увеличения полноты выхода дыма. Согласно [5, 12, 40], различные варианты состава «КМ» могут содержать:

1. Магний – 20%, нитрат калия – 20%, перхлорат калия – 8%, гидрокарбонат калия – 12%, хлорид калия – 15%, хлорид натрия – 15%, ДЦДА – 10%.
2. Магний – 15%, нитрат калия – 30%, карбонат кальция – 15%, хлорид калия – 32%, азодикарбонамид – 8%.
3. Магний – 8%, нитрат калия – 27%, перхлорат калия – 5%, хлорид калия – 44%, азодикарбонамид – 16%.

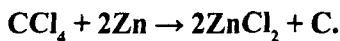
**Табл. 12.6. Дымовые составы, в которых дымообразователь находится в готовом виде (термовозгончного типа)**

Состав	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
хлорат калия	-	20	20	51	-	40-43	32	44	-	-	26,7	23	22,4	19,5	23	29
нитрат калия	40	-	10	-	46	-	-	-	-	30	-	-	-	-	-	-
перхлорат аммония	-	-	-	-	14	-	-	-	-	62	-	-	-	-	-	-
нафталин	-	20	20	41	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
антрацен	-	-	-	-	35	12-16	45	-	-	-	-	-	-	-	-	-
хлорид аммония	-	50	40	-	-	43-45	23	36	20	60	-	-	-	56	-	-
древесный уголь	9	10	10	8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
сахароза	-	-	-	-	5	-	-	-	-	-	18,7	14	13,6	15	6	12
терефталевая к-та	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	57	36,3	-	-	-
коричная к-та	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	50	48
карбонат магния	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	21,3	3	7,5	-	-	-
бикарбонат натрия	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,2	-	-	7
прочее*	51	-	-	-	-	-	-	20	18	10	33,3	3	19	9,5	21	4

1. Британская смесь «тип S», широко применялась в Первую мировую войну: \* – 8% буры, 14% серы, 29% каменноугольной смолы. Обладает очень низкой эффективностью [3].
2. Смесь Ершова. Широко применялась в Первую мировую войну [4].
3. Смесь Ершова, быстрогорящий вариант. Широко применялась в Первую мировую войну [4].
4. Смесь Санникова. Применялась в начале Первой мировой войны [4].
5. Польский состав начала Второй мировой войны [4].
6. Эти составы были разработаны в СССР в 1938-1939 гг, как модификация смеси Ершова. Идентичной композицией до сих пор снаряжается отечественная дымовая граната РДГ-2Б. В Болгарии смесь известна под шифром А-13 [14, 41, 82].
7. Состав белого дыма в посадочной шашке ПШ-М (для сигнализации) [14].
8. Нетоксичный дымовой состав для использования внутри помещений при съемках кино: \* – 16% канифоли или монтан-воска, 4% мела [6].
9. Экспериментальный американский дымовой состав С-28: \* – полибутадиен [15].
10. Дымовой состав из английского патента: \* – красный фосфор [43].
11. Американская композиция: \* – микрокапсулированное минеральное масло [44].
12. Современный американский дымовой состав на основе терефталевой кислоты. Используется в дымовых гранатах М83 и шашках М8: \* – стеариновая кислота. Также содержит поливиниловый спирт – 1% (сверх 100%, добавляется в виде 4% водного раствора) [16].
13. Современный американский дымовой состав на основе терефталевой кислоты и пентаэритрита. Используется в дымовых гранатах М83-РЕ: \* – 18% пентаэритрита, 1% стеарина, поливиниловый спирт – 0,9% (сверх 100%, добавляется в виде 4% водного раствора) [17].
14. Датский состав: \* – канифоль [45].
15. Канадский состав: \* – 20% полибутадиена, 1% оксида железа [12].
16. Американский состав: \* – диатомит. Также содержит 2-5% НЦ сверх 100% [79].

## 12.2. Дымовые составы металлохлоридные

Металлохлоридный состав, известный как «смесь Берже», впервые был применен французами в Первой мировой войне. Он содержал: четыреххлористый углерод (ЧХУ, тетрахлорметан) – 50%, цинковую пыль – 25%, окись цинка – 20%, кизельгур – 5%. Окись цинка и кизельгур несут функцию поглощения и удерживания жидкого четыреххлористого углерода. Дым образуется по реакции:



На воздухе хлористый цинк охлаждается и конденсируется, впитывает влагу из воздуха, образуя стойкий туман, имеющий сероватый цвет из-за примеси сажи.

Усовершенствованная смесь Берже под индексом «ВМ» была вскоре (в 1917 г.) поставлена на вооружение американцами. Она состояла из четыреххлористого углерода – 41,1%, цинковой пыли – 32,2%, хлората натрия – 14,6%, хлорида аммония – 8,8% и углекислого магния – 3,3%. Введение окислителя – хлората натрия – позволяло дожигать выделяющуюся сажу и получать дым белого цвета. Другая, быстрогорящая модификация этой смеси, вместо хлорида аммония содержала нитрат калия [4].

Аналогичный состав был разработан в Великобритании, где был известен под индексом SR-234. Он содержал 45% четыреххлористого углерода, 20% цинка, 28% оксида цинка и 7% кизельгура [7].

Четыреххлористый углерод обладает рядом недостатков. Во-первых, он представляет собой тяжелую летучую жидкость, способную вытекать при нарушении герметичности дымового изделия. Во-вторых, при горении дымовой смеси значительная часть четыреххлористого углерода испаряется, не успев вступить в реакцию горения, в результате маскирующая способность оказывается заметно хуже расчетной. Соответственно, эффективность таких составов лишь незначительно превышает эффективность смесей Ершова.

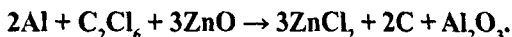
#### *Примечание.*

*Некоторые дымовые смеси на основе четыреххлористого углерода при иницировании капсюлем-детонатором способны дефлажировать со скоростью 400-1100 м/с [18].*

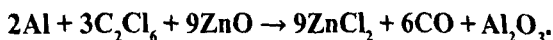
Существенно лучшими свойствами обладают дымовые составы на основе твердого гексахлорэтана, предложенные вскоре после окончания Первой мировой войны [46]. В Америке подобные смеси массово начали использовать во Второй мировой войне наряду с составами на основе четыреххлористого углерода.

Наиболее известная из таких смесей – смесь «НС» (тип «С») до сих пор используется в США в дымовых бомбах XMN-6, BLU-16B, 105 и 155 мм дымовых шашках M1 и M2, в шашках M5 и M4A2, дымовых гранатах AN-M8. Она содержит приблизительно эквивалентное по массе количество гексахлорэтана и окиси цинка с добавкой 5,5-9,0% порошкообразного алюминия (обычно около 7,0%) [19]. Кроме алюминия, современные композиции могут содержать несколько процентов связующего и замедлителя горения – карбоната или более эффективного бората цинка. Скорость горения смесей НС также можно регулировать степенью измельчения компонентов состава и содержанием алюминия.

Суммарно уравнение горения смеси НС выглядит следующим образом:



При уменьшении количества алюминия количество сажи в дыме уменьшается, и дым становится белее:



Однако, если алюминия содержится менее 5,0%, смесь НС «тип С» горит неустойчиво и плохо воспламеняется. Температура воспламенения состава с 9% алюминия составляет 167°C. Теплота сгорания при увеличении содержания алюминия с 3,6% до 10,1% вырастает с 1,5 МДж/кг до 3,0 МДж/кг. В изделия состав запрессовывается до плотности 1,6-1,9 г/см<sup>3</sup>.

**Табл. 12.7. Время горения гранаты AN-M8, снаряженной смесью НС, в зависимости от содержания алюминия в смеси [2]**

Кол-во алюминия, %	Время горения, сек.
9,0	55
8,4	64
8,0	65
7,5	71
7,0	84
6,5	96
6,0	107
5,5	147
5,0	200

Зачастую в шашку запрессовывают несколько слоев металлохлоридной смеси с разным содержанием алюминия. При этом горение начинается в слое с большим количеством алюминия, обладающим лучшей воспламеняемостью и большей скоростью горения, а заканчивается в слое с меньшим его содержанием.

Штатные английские и французские металлохлоридные смеси, в зависимости от необходимой скорости горения, обычно содержат 46-51% гексахлорэтана, 29-47% оксида цинка, 7-25% силицида кальция, добавку 2-3% бихромата или нитрата калия и

до 4% связующего [20]. В новых изделиях производства Великобритании вместо силицида кальция используют более стойкий силумин [21]: гексахлорэтан 45%, оксид цинка 35-50%, силумин 5-20%. Снятие с производства силицида кальция было обусловлено его химической активностью и пожароопасностью.

В шведских составах содержится металлический цинк (с добавкой бихромата калия в целях продления сроков хранения таких композиций). Обычно они состоят из 40-48% цинка, 48-56% гексахлорэтана, 3% оксида магния и 1% бихромата калия [20].

Продукты сгорания металлохлоридных композиций, содержащих соединения титана, имеют низкую точку конденсации, что выгодно отличает такие дымы в случае попадания гранаты в снег или применения в холодном климате. Дым также обладает хорошей маскирующей способностью в ИК диапазоне [49]

Разработаны литьевые и пластизольные составы, предназначенные для изготовления бескорпусных дымовых гранат, например, смесь из американского патента [47] содержит 35% оксида цинка, 27% перхлората аммония и 8% хлорида аммония, остальное – эквивалентная смесь поливинилхлорида и диоктилфталата. Компоненты смешивают до состояния пасты в течение 15 минут, затем ekstrудируют в корпус, который нагревают до 150°C и выдерживают 2 часа. После охлаждения эластичную шашку вынимают из формы. Линейная скорость ее горения – 1,7 мм/сек.

Впрочем, пластизольные и литьевые дымовые составы из-за повышенных затрат на изготовление в реальных изделиях распространения не получили и представляют лишь теоретический интерес.

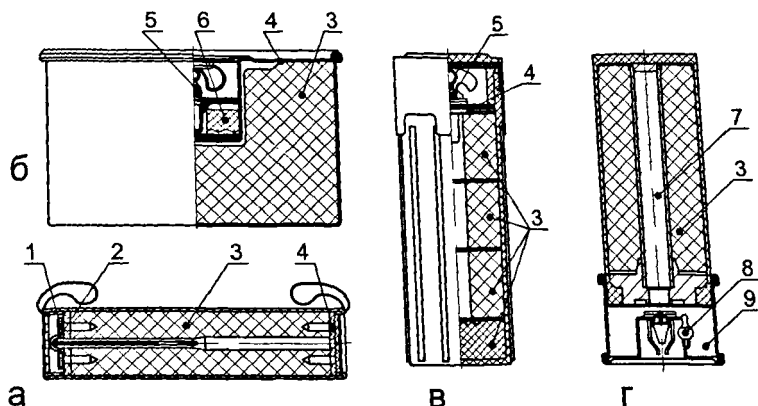


Рис. 12.1. Обычные дымовые средства [14, 29].

а) – ручная дымовая граната (РДГ-26), б) – шашка дымовая малая модернизированная (ШД-ММ), в) – ручная дымовая граната (РДГ-П), г) – разрывная дымовая граната Л8А1, служащая для маскировки транспортных средств (снаряжается красным фосфором с добавкой связующего).

1 – терка, 2 – запал-спичка, 3 – дымовой состав, 4 – выхлопные отверстия, 5 – вытяжной воспламенитель, 6 – шашка воспламенительного состава, 7 – воспламенительно-разрывной заряд из дымного пороха (ВРЗ), 8 – электровоспламенитель, 9 – вышибной заряд.

В послевоенные годы вместо гексахлорэтана начали применять менее летучие гексахлорбензол и дехлоран, однако к 90-ым годам 20 века производство этих веществ в большинстве стран было приостановлено ввиду высокой токсичности, и гексахлорэтан опять вошел в обращение [22].

Металлохлоридные составы могут содержать окислители типа перхлоратов аммония и калия. Введение окислителя позволяет не только получать белый дым, свободный от частиц сажи, но и улучшать воспламеняемость смесей. Вдобавок окислитель повышает полноту выхода дыма за счет уменьшения количества остаточного шлака, генерации газов и более активного сгорания состава.

Металлохлоридные смеси выгодно отличаются от смесей с готовым дымообразователем отсутствием необходимости добавлять пламегаситель и использовать шашки специальных конструкций, т.к. дым является конечным продуктом сгорания и не подвержен вторичному воспламенению.

Металлохлоридные дымы раздражающе действуют на верхние дыхательные пути, могут вызывать отравления даже со смертельным исходом и поэтому требуют наличия у солдат средств индивидуальной защиты. При малом содержании металла в составе дымовой смеси, сочетающегося с низкой температурой горения, при сгорании может выделяться высокотоксичный фосген [20].

Металлизированные смеси НС испытывают слабое самопроизвольное разложение при хранении, вызванное наличием в составе следов влаги. В процессе разложения остаточная влага не расходуется, а вновь принимает участие в реакции

разложения. Поэтому снижение эффективности дымообразования носит постоянный характер и составляет в среднем 1,9% в год, но может быть частично компенсировано при помощи добавок бихромата или нитрата калия [23].

К началу 80-х годов 20 века производство гексахлорэтана в США было полностью приостановлено, а производимые металлохлоридные составы базировались на импортном гексахлорэтано [83]. К настоящему времени американцы почти полностью перешли на нетоксичные термовозгоночные композиции и составы на основе красного фосфора, хотя изделия на основе металлохлоридных составов еще можно встретить на складах.

Табл. 12.8. Металлохлоридные дымовые смеси

Состав	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
ГХЭ	47,5	65	50	-	45,5	49	46	44	-	65	-	-	67	62,5	61	66	43	-	63	48	-	45
ГХБ	-	-	-	-	-	-	-	-	12	-	26	72	-	-	-	-	-	70	-	-	-	-
ЧХУ	-	-	-	45,9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ПХК	-	-	-	-	-	-	-	-	19	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Al	-	-	-	5,6	-	-	-	-	-	7	-	-	10	7	6	-	-	-	4	-	6	-
ПАМ-3,4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	14	-	-	-	6	-	15	-	-	-	10
CaSi <sub>2</sub>	-	-	-	-	9,0	20	19	22-7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
цинк	47,5	35	40	-	-	-	-	-	69	-	-	-	-	-	-	-	52	-	-	48	-	-
ZnO	-	-	10	48,5	45,5	26	30	47-32	-	-	47	9	20	-	30	24	-	12	30	-	34	30
TiO <sub>2</sub>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	28	-	-	-	25	-	-	-	-	-	-	-	-
прочее*	5	-	-	-	-	5	5	2	-	-	27	5	3	5,5	3	4	5	3	3	4	60	15

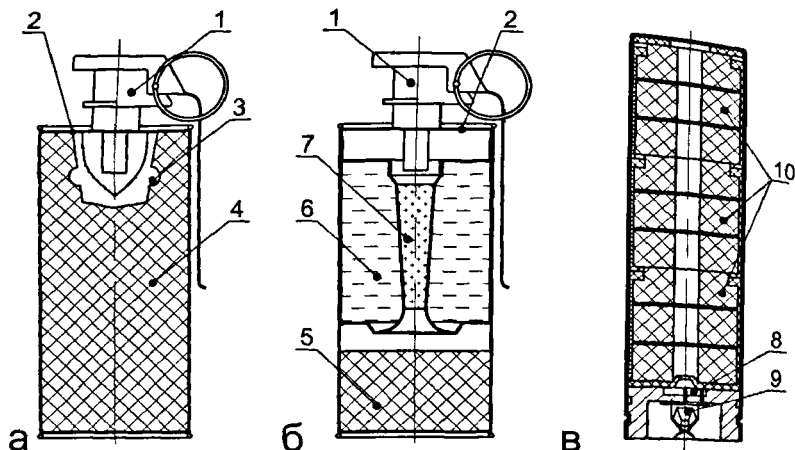
1. Немецкий быстрогорящий дымовой состав, применявшийся во время Второй мировой войны в шашках NbK 539B: \* – нитрат бария [8].
2. Немецкий медленногорящий дымовой состав, применявшийся во время Второй мировой войны в шашках NbK 142B. Также содержит нитрат бария 0,75–1,5% (сверх 100%) [8].
3. Более новый немецкий дымовой состав, применявшийся в конце Второй мировой войны [8].
4. Американская смесь HC «тип Е». Использовалась во время Второй мировой войны в дымовых гранатах AN-M8 [2].
5. Американская смесь HC «тип В». Была создана для замены смеси «тип А», содержащей перхлорат аммония, который завозился из Франции. Использовалась во время Второй мировой войны в дымовых гранатах AN-M8 и к концу войны была заменена более стабильной смесью HC «тип С». Аналогичный состав с 10% кальция силицида, эквивалентным количеством гексахлорэтана и окиси цинка использовался в Великобритании под индексом SR-264A. Для продления сроков хранения смесь содержала 2-3% хромата или нитрата калия (сверх 100%) [2, 7].
6. Французская послевоенная композиция: \* – 3% нитрата калия, 2% фенолформальдегидной смолы. Скорость горения около 1 мм/сек [48].
7. Более новая французская смесь, в качестве связующего содержит поливинилхлорид: \* – ПВХ. Скорость горения 0,44 мм/сек [48].
8. Английская смесь PN800: \* – нитрат калия [78].
9. Американская послевоенная металлохлоридная смесь белого дыма для использования в сигнальных целях и для целеуказания [2].
10. Немецкий состав для снаряжения дымовой гранаты. Переходный состав для воспламенения основного состава содержит: 59,5% ГХЭ, 15% порошка алюминия и 25,5% TiO<sub>2</sub> [49].
11. Американская литевая композиция: \* – 13% магнезия, 8,68% полиэфирной смолы QX-3812 и 5,32% эпоксидной смолы DER-732 [50].
12. Отечественный состав для снаряжения гранаты ЗДБ (исп. для защиты транспортных средств и танков): \* – лак ЛИ-50 [14].
13. Отечественный состав 52-09-1 для снаряжения ЗДП-МХ и РДГ-П: \* – смола СКФ-32-25 [14].

14. Отечественный состав для снаряжения РДГ-2Х: \* – 5% колчедана серного, 0,5% масла индустриального [14].
15. Отечественный состав 52-08П для снаряжения РДГ-П. В Болгарии используется для снаряжения дымовых мин: \* – смола СКФ-32-25 или идитол [14, 51].
16. Отечественный состав 52-16 для снаряжения ШД-ММ: \* – идитол [14].
17. Финский штатный состав: \* – тротил [24].
18. Отечественный состав: \* – идитол. Эффективность 4,5 м<sup>2</sup>/г. В ближнем ИК – 1,2 м<sup>2</sup>/г. Скорость горения 1,2 мм/сек [52].
19. Отечественный состав: \* – фторкаучук СКФ-32. Эффективность 5 м<sup>2</sup>/г. Скорость горения 0,12 мм/сек [53].
20. Шведский состав для дымовых шашек: \* – 2,75% MgO, 1% K<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub>, 0,25% KNO<sub>3</sub> [25].
21. Отечественный современный литевой состав: \* – 45% хлорпарафина ХП-1100, 15% хлорпарафина ХП-470 [65].
22. Современный польский состав: \* – 10% ХПВХ, 5% хлорида аммония [54].

**Табл. 12.9. Металлохлоридные смеси с добавкой окислителя**

Состав	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
поливинилхлорид	-	-	-	-	-	-	-	-	18	-	11	-	-	17,7	-	-
гексахлорэтан	-	-	46,7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	31	-	20	30,5
гексахлорбензол	34,4	-	-	-	-	-	40	68	-	-	-	-	-	-	-	-
дехлоран	-	33,9	-	30,7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
перхлорат калия	-	-	-	-	20	36	-	18,4	-	-	-	-	16	-	20	-
перхлорат аммония	24,0	20,5	6,0	27,6	-	-	-	-	36	34	36,3	50	-	36,1	-	27
алюминий	-	-	-	3,6	20	36	-	-	-	-	-	8	-	-	25	4
цинк	6,2	-	39,6	-	40	28	-	-	-	-	-	-	31	-	-	-
окись цинка	27,6	37,4	-	34,6	-	-	29	-	22	31,3	16,0	15	12	31,7	27	31,5
хлорид аммония	-	-	6,0	-	-	-	3	-	-	10,3	11,0	14	-	12,5	-	-
прочее*	7,8	8,2	1,7	3,5	20	-	28	13,6	24	24,4	26,2	13	10	2,0	8	7

- 1-2. Американская послевоенная металлохлоридная смесь белого дыма для использования в снарядах: \* – ламинак [2].
3. Американская смесь для снаряжения дым. шашек Mk3 Mod0; \* – 1,5% MgCO<sub>3</sub> и 0,2% CaCO<sub>3</sub> [84].
4. Американская модификация смеси НС. Имеет обозначение SW253. Применялась как в маскировочных, так и в сигнальных целях: \* – VAAR. Температура воспламенения 314°C. Теплота сгорания 4,94 МДж/кг [19].
5. Современный американский тренировочный дымовой состав SW522 для применения в разрывных дымообразующих боеприпасах: \* – нитрат калия [26, 81].
6. Современный американский тренировочный дымовой состав SW592 для применения в разрывных дымообразующих боеприпасах M880 [86].
7. Польский штатный состав: \* – 19% хлората калия, 5% ферросилиция, 4% вазелина [54].
8. Польский штатный состав: \* – 6,6% ПАМ-а, 7% связующего [54].
9. Немецкий состав: \* – 22% хлорида диамина цинка Zn[NH<sub>2</sub>]<sub>2</sub>Cl<sub>2</sub>, 2% НЦ [55].
10. Немецкий состав с пониженной коррозионной активностью продуктов сгорания: \* – 15,0% полихлоризопрена (марка PERGUT), 9,4% диоктилфталата [56].
11. Немецкий состав: \* – 13,2% тиомочевины, 13,0% эластомера [57].
12. Немецкий состав: \* – 3% магнезия, 10% эластомера [57].
13. Французский состав: \* – неопрен. Скорость горения 1,03 мм/с (6 мм/с в шашке при рабочем давлении). Температура воспламенения 425°C [58].
14. Швейцарский состав для дымовой гранаты [59]: \* – 0,1% парафина, 1,9% НЦ. Аналогичный состав с ХПВХ вместо ПВХ и связующего известен в Польше [27].
15. Отечественный состав: \* – 5% хлорнаирита, 2% ДБС, 1% аэросила. Маскирующая способность 4,5 м<sup>2</sup>/г. Скорость горения 1,9 мм/сек [60].
16. Экспериментальный американский состав: \* – 3,5% ламинака, 3,5% полистирола [28].



**Рис. 12.2. Дымовые гранаты армии США [2, 29].**

а) – ручная дымовая граната AN-M8 HC, б) – тренировочная ручная дымовая граната типа «Вентури», в) – 66 мм граната M90, служащая для маскировки транспортных средств (снаряжается смесью на основе терефталевой кислоты).

1 – Запал M203, 2 – выхлопные отверстия, 3 – воспламенительный состав, 4 – дымовой состав, 5 – топливный состав, 6 – контейнер с минеральным маслом, 7 – трубка Вентури, 8 – вышибной состав, 9 – электровоспламенитель, 10 – три кассеты с тремя таблетками дымового состава в каждом.

### **12.3. Дымовые составы для маскировки в инфракрасном диапазоне (составы черного дыма)**

Металлохлоридные и термовозгоночные смеси хорошо маскируют в видимом диапазоне, однако в инфракрасном диапазоне классические дымовые составы недостаточно эффективны.

Для противодействия управляемому оружию с системами ИК, лазерного и даже радиолокационного наведения созданы специальные дымовые композиции, подобные по составу металлохлоридным дымовым смесям. При их сгорании выделяются продукты, интенсивно поглощающие в ИК-диапазоне (гл. обр. сажи). Из-за большого количества сажи такие дымы имеют интенсивный черный цвет. Во Второй мировой войне смеси черного дыма активно применялись для имитации возгорания военной техники и для сигнализации. Обычно они содержат антрацен или нафталин, только в отличие от смесей с готовым дымообразователем, композиции черного дыма развивают большие температуры. В них происходит уже не возгонка антрацена, а его неполное сгорание с выделением большого количества сажи, сопровождающееся появлением пламени [1]. Смесей черного дыма обычно содержат т.н. «сырой», или технический антрацен – субстанцию темного цвета с содержанием антрацена не более 50%, остальное – его изомеры и остаточная смола. Это вызвано высокой ценой на чистый кристаллический антрацен, хотя в последнее время составы стремятся компоновать очищенным продуктом.

Современные составы черного дыма зачастую создаются на основе политетрафторэтилена, магния, антрацена и связующего [85].

**Табл. 12.10. Модельные металлохлоридные составы черного дыма для маскировки в ИК-диапазоне [30]**

Состав	1	2	3	4	5	6
магний - Mg	25	25	25	25	25	25
политерафторэтилен - ПТФЭ	10	10	10	10	10	10
гексахлорэтан - ГХЭ	-	41	-	41	-	41
гексахлорбензол - ГХБ	50	-	50	-	50	-
полистирол	15	24	-	-	-	-
нафталин	-	-	15	24	-	-
бифенил	-	-	-	-	15	24
теплота сгорания, МДж/кг	4,83	4,68	4,87	4,87	4,80	4,75
E, м <sup>2</sup> /г при 0,6 г/м <sup>3</sup> и λ=1,06 мкм	2,18	1,54	2,27	1,85	2,18	1,59

**Табл. 12.11. Смеси черного дыма**

Состав:	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
гексахлорэтан	62	61,5	28	25	-	-	-	-	-	30	52	-	-	60	-	-
гексахлорбензол	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	66,7	-	-	-	-
хлорпарафин	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	10	-	-	5
ПТФЭ	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	24	-	50	-
антрацен	19	8,0	33	30	48-52	45	33	53	-	30	31	8,3	-	-	-	-
нафталин	-	12,0	-	-	-	-	-	-	28	-	-	-	-	-	-	-
антрахинон	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	48	-	-	48
полистирол	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	20	-	-
хлорат калия	-	-	38	45	48-52	45	52	47	-	-	-	-	-	-	-	-
перхлорат калия	-	-	-	-	-	-	-	-	62	40	-	-	-	-	-	-
магний	19	18,5	-	-	-	-	-	-	-	-	12	16,7	18	10	-	20
ПАМ	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	30	-
прочее*	-	-	1	-	-	10	15	-	10	-	5	8,3	-	10	20	27

- Одна из самых первых пиротехнических смесей черного дыма конца Первой мировой войны. Американская сигнальная композиция [46].
- Немецкая смесь, аналогичная предыдущей. Применялась во время Второй мировой войны [8].
- Немецкая смесь, времен Второй мировой, применявшаяся в шашке NbK L 425X (шашка содержит 12-13 кг смеси и сгорает в течение 10-15 минут): \* – кизельгур [8].
- Немецкая смесь, времен Второй мировой, применявшаяся в шашке NbK S (авиаци. маркер) [8].
- Смесь черного дыма, широко использовавшаяся СССР и США со времен Второй мировой войны и до наших дней. В СССР ей снаряжали дымовые гранаты РДГ-24. Эта композиция недостаточно эффективна, но дешева. При продолжительном хранении реология состава изменяется и снаряженные изделия становятся склонными к разрывам [9, 14].
- Отечественный модифицированный состав: \* – газогенерирующая композиция на основе нитрата аммония. Следует учитывать, что добавление хорошо растворимых солей аммония к составам на хлоратах резко снижает сроки хранения пиротехнических изделий [61].
- Модифицированная газогенерирующими компонентами стандартная смесь черного дыма: \* – 10% тиюмочевины, 5% идиотола [62].
- Состав черного дыма в посадочной шашке ПШ-М (для сигнализации) [14].
- Американский состав черного дыма для снаряжения имитатора поражения цели M26. Проводятся работы по его замене смесями на основе красителей: \* – ламинак [31].
- Английская композиция [63].
- Отечественный состав: \* – фторкаучук СКФ-32. Скорость горения уплотненного состава 0,59 мм/с, маскирующая способность 4,82 м<sup>2</sup>/г [64].

12. Французский ИК-состав: \* – поливинилиденфторид. Скорость горения 0,57 мм/сек [58].
13. Высокоэффективный немецкий ИК-состав [66].
14. Модельный польский состав: \* – силицид кальция [27].
15. Отечественный состав для защиты от поражения с воздуха: \* – фторкаучук [82].
16. Немецкий ИК-состав: \* – поливинилиденфторид [85].

В последние годы, в связи с массовым применением систем ИК и радиолокационного наведения, были разработаны составы, предназначенные для маскировки преимущественно в ИК и СВЧ-диапазоне. Они, как правило, содержат быстрогорящую газогенерирующую основу, диспергирующую специальный наполнитель – тонкий порошок графита или металла. Так, например, из патента [67] известна следующая французская смесь: латунь – 23%, графит – 48%, нитрат гуанидина – 8%, перхлорат аммония – 11%, азодикарбонамид – 10%.

Кроме того, для защиты транспортных средств используются специальные разрывные гранаты, снаряженные порошком латуни, например, принятая на вооружение в 1985 г. американская граната М76 для защиты в ИК и видимом диапазонах. Более новая, принятая на вооружение в 1995 г., американская граната М81 для защиты в ИК, видимом и миллиметровом диапазонах, снаряжается смесью порошка латуни с углеродным волокном.

Подобные гранаты эффективны непродолжительное время (до 20-40 сек.) ввиду быстрого рассеяния и оседания частиц металла или графита. Однако этого времени более чем достаточно, чтобы сбить с курса боеприпас с ИК, лазерным или радиолокационным наведением, тем более, запуск таких гранат осуществляется автоматически от бортовой ЭВМ [32].

**Табл. 12.12. Массовые и объемные коэффициенты экстинкции в ИК-диапазоне для механически распыляемых твердых дымообразователей [33]**

Состав	Плотность укладки, г/см <sup>3</sup>	E, м <sup>2</sup> /г 3-5 мкм	E, м <sup>2</sup> /г 8-12 мкм	E <sub>v</sub> , м <sup>2</sup> /см <sup>3</sup> 3-5 мкм	E <sub>v</sub> , м <sup>2</sup> /см <sup>3</sup> 8-12 мкм
графит (1-2 мкм)	0,35	0,74	0,73	0,29	0,28
графит (до 45 мкм)	0,74	0,23	0,24	0,17	0,18
латунь	1,5	0,34	0,33	0,51	0,49
двуокись титана	1,2	0,13	0,06	0,16	0,07

## 12.4. Дымовые составы на основе фосфора

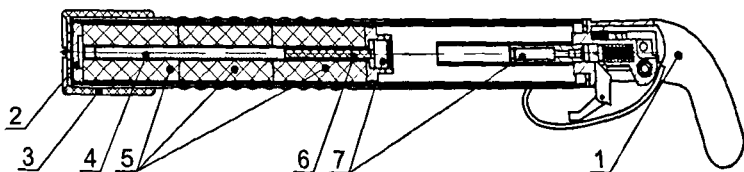
Наиболее эффективным дымообразующим веществом является белый фосфор. Во второй половине 20 века его использовали, как правило, с добавкой связующих компонентов. Так, например, смесь «РWP» (пластифицированный белый фосфор) применялась в дымовых боеприпасах комплексного поражающего действия (гл. обр. минометные снаряды). Она состояла из 65% белого фосфора и 35% полимерного связующего, содержащего 100 ч. неопренового каучука, 75 ч. сажи, 44 ч. полимера «Zylene», 15 ч. окиси свинца [2]. В американских 155 мм снарядах М825 применен материал, представляющий из себя 80% белого фосфора, импрегнированного в войлочную основу. Особенностью белого фосфора является наличие комбинированного поражающего действия – зажигательного и психологиче-

ского, чем зачастую пользуются военные при применении фосфорных дымовых боеприпасов в целях ослепления противника.

К настоящему времени дымообразующие боеприпасы, начиненные белым фосфором, имеют тенденцию к замене более удобными и безопасными смесями на основе стабилизированного красного фосфора. Эти смеси содержат красный фосфор с добавкой некоторого количества термической основы и связующего. Термическая основа при сгорании испаряет красный фосфор, пары которого воспламеняются на воздухе, образуя объемистое желтоватое пламя и густой белый дым. В качестве добавок используют карбонаты и некоторые оксиды металлов, которые нейтрализуют кислоты, выделяющиеся при медленном окислении красного фосфора на влажном воздухе. Первоначально такие композиции использовались только в сигнальных целях (маркеры на море). Современные варианты составов пригодны для маскировки, а также снаряжения ручных дымозажигательных патронов, т.к., в отличие от металлохлоридных смесей, обладают значительным воспламеняющим эффектом.

На Рис. 12.3 представлена схема немецкого одноразового дымозажигательного патрона DM-34 «Нафла». В патроне используется смесь, состоящая из: красный фосфор – 70 ч., магний – 20 ч., окись железа – 12 ч., хлоропарафин жидкий – 6 ч., хлоропарафин твердый – 4 ч. Воспламенительно-разрывной заряд состоит из 24,4% магния, 74,5% двуокиси свинца, 1,0% аэросила [11].

Фосфорные дымы более эффективно маскируют в ИК-спектре, чем классические металлохлоридные композиции. Согласно шведским исследователям, эта эффективность обусловлена не столько поглощением и преломлением излучения частицами дыма, сколько созданием собственного теплового излучения за счет тепла, выделяемого при гидролизе частиц оксида фосфора во влажном воздухе [35]. Вдобавок, пламя от сгорания фосфорных дымовых составов формирует ложные тепловые цели и действует подобно специальным ИК-составам. Недостатками фосфорных дымов являются высокая коррозионная активность дыма и раздражающее действие на органы дыхания. В настоящее время в некоторых патентах предлагается использовать в дымовых составах черный фосфор вместо красного. Черный фосфор более стабилен на влажном воздухе, обладает большей плотностью, но в то же время менее реакционноспособен.



**Рис. 12.3. Схема немецкого дымозажигательного патрона DM-34 [68].**

1 – пусковое устройство, 2 – дымозажигательный патрон, 3 – резиновая заглушка, 4 – воспламенительно-разрывной заряд (ВРЗ), 5 – таблетки дымозажигательного состава, 6 – замедлитель, 7 – вышибные заряды.

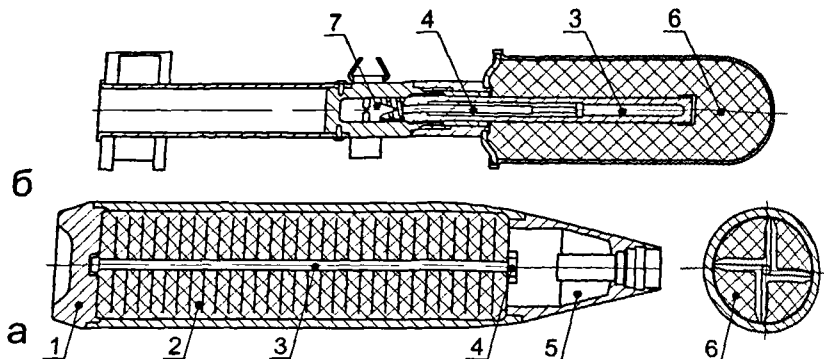


Рис. 12.4. Боеприпасы с белым фосфором [29, 34].

а) – 155 мм касетный артиллерийский снаряд М825А1 (без головного взрывателя), б) – выж. точная граната М19А1.

1 – днище, 2 – тонкостенная стальная кассета с зарядами фосфора, 3 – центральный разрывной заряд (ЦРЗ) из флегматизированного гексогена, 4 – замедлительное устройство, 5 – вышибной заряд (выталкивает кассету из корпуса снаряда), 6 – заряд белого фосфора, 7 – ударное устройство.

Табл. 12.13. Смеси на основе красного фосфора

Состав	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
кр. фосфор	51	46	95	80	66	50	70	71	89	60	66	50	77	75	68	60	58,5	60	65	66,5	78,7	50,00
NaNO <sub>3</sub>	-	-	-	-	-	35	10	15	-	10	-	-	9	-	-	-	-	-	-	4	13,9	-
KNO <sub>3</sub>	-	-	-	-	16	-	-	-	-	-	11	-	-	-	-	-	21,1	20	-	-	-	-
Ba(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	-	-	-	20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ПТФЭ	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	17	-	-	-	10	6	-	20,25
CaSO <sub>4</sub>	-	51	-	-	-	-	-	-	-	-	-	44	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
MnO <sub>2</sub>	35	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	28	-	-	-	0,5	-	-
магний	8	-	-	-	12	5	3	-	-	20	17	-	8	11	9	6	-	10	-	-	-	22,5
алюминий	-	-	-	-	-	-	-	8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ПАМ	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	15	16	-	-
прочее*	6	3	5	-	6	10	17	6	11	10	6	6	6	14	6	6	20,4	10	10	7	7,4	6,5

1. Один из самых первых американских составов на основе красного фосфора. Широко использовался для сигнализации на флоте: \* – 3% ZnO и 3% олифы. Скорость горения 2,42 мм/сек [11].
2. Английский дымовой состав SR-622 для сигнализации на флоте: \* – щавелевая кислота (поглотитель влаги и газообразующий агент). При сгорании выделяются сульфиды фосфора, воспламеняющиеся на воздухе по схеме:  $15CaSO_4 + 38P \rightarrow 3Ca(PO_3)_2 + 6Ca_2P_2O_7 + 5P_2S_5$  [37].
3. Состав используется в LAV, LAB-2, L8A1 (маскировочная граната, метаемая с транспортного средства. Год начала производства – 1976) и L8A3: \* – бутылкачук (вводится в виде раствора в метилхлориде, на 67% фосфора берется 33% этого раствора). Температура воспламенения 460°C. Запрессовывается до плотности 1,9-2,2 г/см³ [19].
4. Американский дымовой состав. Температура воспламенения 402°C [19].
5. Немецкий состав для дымовой гранаты, метаемой с транспортного средства: \* – 6% ПВА [69].
6. Чешская композиция с пониженной чувствительностью к удару, маскирующая в видимом и ИК диапазоне: \* – 2% минерального масла, 8% эпоксидной смолы с отвердителем [70].
7. Чешская композиция с улучшенными маскирующими свойствами в ИК диапазоне: \* – 10% нитрата цезия, 7% эпоксидной смолы с отвердителем. Маскирующая способность в видимом диапазоне 11 м²/г, в ИК диапазоне с длиной волны 3-5 и 8-14 мкм – 0,6-0,7 м²/г [71].

8. Канадский состав С-55, используется в светодымящем бое [12]: \* – 1% карбоната кальция, 4% полибутадиена и 1% отвердителя [72].
9. Отечественный состав (предположительно 51-42), применяется в дымовых гранатах к подствольным гранатометам. В качестве воспламенительно-разрывного заряда используется ВВ – флегматизированный гексоген: \* – 9% фторкаучука, 2% графита [22, 73]. В целях улучшения воспламеняемости на гранулы дымового состава предлагается наносить дымный порошок, связанный поливиниловым спиртом [80].
10. Отечественный состав: \* – гексахлорбензол. Скорость горения 0,6 мм/сек [74].
11. Состав №3 из украинского патента. Отличается повышенной маскирующей способностью в ИК диапазоне: \* – фторкаучук СКФ-32 [74].
12. Американский состав: \* – 3% бора и 3% фторкаучука (Viton A) [75].
13. Штатный американский состав JXS-10: \* – 3,0% смола EPON 828 и 3,0% упрочнителя Versamid V140. В качестве добавки содержит 1,25% аэросила сверх 100% [76].
14. Состав, использующийся в немецких дымовых гранатах DM-35 для маскировки транспортных средств: \* – 10% окиси меди II, 4% – связующего [11].
15. Шведский состав Z-97: \* – полихлоропренового связующего [11].
16. Английский состав SR-414 для снаряжения сигнального буга Mk3: \* – силицид кальция [11].
17. Современный состав для снаряжения дымовых гранат, с повышенной маскирующей способностью в ИК-диапазоне: \* – 4,7% циркония, 4,7% кремния, 4,7% бора, 6,3% хлоропренового каучука [11].
18. Отечественный состав 51-17-1 для ЗДП-МФ и ЗДП: \* – 5% смолы СКФ-32-25, 5% лака бакелитового АБС-1 [14].
19. Отечественный состав 53-02 для ЗДП: \* – смола СКФ-32-35 [14].
20. Отечественный состав: \* – 5% тиокола, 1% ДБФ, 1% графита. Маскирующая способность: видимый диапазон – 8-9 м<sup>2</sup>/г, ближний ИК – 2,0-2,3 м<sup>2</sup>/г, средний ИК – 0,7-0,75 м<sup>2</sup>/г, дальний ИК – 0,8-0,9 м<sup>2</sup>/г. Термостоек до 280°C [77].
21. Состав для снаряжения американской дымовой минометной мины М819: \* – 3,7% смолы Epon 828, 3,7% Versamid 140 [38].
22. Польский состав: \* – 3,25% ПВХ, 3,25% полистирола [85].

**Табл. 12.14. Маскирующая способность в ИК-диапазоне для фосфорных дымов, облучаемых лазером [36]**

Длина волны	$\lambda=0,63$ мкм	$\lambda=1,15$ мкм	$\lambda=3,39$ мкм	$\lambda=10,6$ мкм
белый фосфор	-	6,708	0,906	0,860
красный фосфор	-	3,408	0,522	0,414
кр. фосфор/ $\text{NaNO}_3$ /связка/Mg: 55/28/12/5	3,552	3,468	0,837	0,710

## 12.5. Жидкие дымообразующие вещества

Механически распыляемые дымообразователи используются либо в разрывных дымовых боеприпасах, либо в специальных дымогенераторах для постановки дымовых завес. Подавляющая часть производимых дымообразователей, предназначенных для распыления механическим путем, – это смесь хлорсульфоновой кислоты и трехоксида серы. Меньшее распространение имеют тетрахлориды титана и олова. Широко применяются минеральные масла. Масло впрыскивают в выхлопную систему двигателей внутреннего сгорания либо используют специальные масляные дымогенераторы.

Эти композиции могут эффективно использоваться только в условиях крупномасштабных боевых действий, поэтому в эпоху локальных войн со временем уступают более простым в использовании пиротехническим дымовым смесям [3].

1. Шидловский А.А. Основы пиротехники. - М.: Машиностроение, 1973.
2. Engineering Design Handbook. Military Pyrotechnics Series. Part One. Theory and Application. US Army Materiel Command. AMCP 706-185. 1967.
3. Г.С. Зайцев, А.Я. Кузнецов. Дымовые средства и дымообразующие вещества. - М.: Изд-во МО СССР, 1961.
4. Ю.И. Вейцер, Г.П. Лучинский. Маскирующие дымы. - М., 1947.
5. Jai Prakash Agrawal. High Energy Materials. Propellants, Explosives and Pyrotechnics. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. 2010.
6. Лихачев В.А. Пиротехника в кино. - М.: Искусство, 1963.
7. L.T. Dunnett. Services Textbook of Explosives. Ministry of Defence. JSP333. 1974.
8. Basil T Fedoroff etc. Dictionary of Explosives, Ammunition and Weapons (german section) Dover, New Jersey. 1958.
9. Engineering Design Handbook. Military Pyrotechnics Series. Part Two. Safety, Procedures And Glossary. US Army Materiel Command. AMCP 706-186. 1963.
10. William E. King IV. Chemical Corps Smoke: Is There a Future in the Army of the Twenty First Century. Master's Thesis, 1997-1998.
11. Ernst-Christian Koch. Special Materials in Pyrotechnics: V. Military Applications of Phosphorus and its Compounds. Propellants, Explosives, Pyrotechnics 33, No. 3 165 - 176 (2008).
12. Dr. Bernard E. Douda. Survey of Military Pyrotechnics. Prepared for Presentation at the Sixteenth International Pyrotechnics Seminar, Jonkoping, Sweden, 24-28 July 1991. NWSC/CR/RDTR-595. 1991.
13. J.T. Hanley and E.J. Mack. A Laboratory Investigation for Aerosol and Extinction Characteristics for Salty Dog, NWC 29 4ND NWC 78 Pyrotechnics. Calspan Report No. 6665-M-1 1980.
14. Материалы Интернет-ресурса dzromon.narod.ru.
15. James C. Eaton etc. Chemical and Physical Characterization of an Experimental White Smoke Formed from Combustion of Ammonium Perchlorate, Ammonium Chloride, and Carboxy-Terminated Polybutadiene. TR-9213. US ABRDL. Fort Detrick, Frederick, ND. 1992.
16. J. Steven Anthony, Charles L. Crouse etc. Characterization of Pyrotechnically Disseminated Terephthalic Acid as Released from the M8 Smoke Pot. ERDEC-TR-288. 1995.
17. J. Steven Anthony, Mark V. Haley etc. Chemical Characterisation of the Pyrotechnically Disseminated M83-PE Smoke Grenades. ECBC-TR-299. 2003.
18. M. Syczewski. Explosive Properties of the Compositions  $\text{CCl}_4/\text{Al}/\text{ZnO}$ . Propellants, Explosives, Pyrotechnics 19, 87-89 (1994).
19. F. L. McIntyre, R.M. Rindner. A Compilation of Hazard and Test Data for Pyrotechnic Compositions. ARLCD-CR-80047. 1980.
20. James C. Eaton, Richard J. Lopinto, Winifred G. Palmer. Health Effects of Hexachloroethane (HC) Smoke. Tech. Report 9402. US Army Biomedical Research & Development Laboratory. Fort Detrick. 1994.
21. F. R. Hartley, S. G. Murray and M. R. Williams. Smoke Generators. II. The Ignition of Pyrotechnic White Smoke Compositions Containing Hexachloroethane, Silumin and Zinc Oxide Using a Heated Metal Surface. Propellants, Explosives, Pyrotechnics 9, 1-6 (1984).
22. В.Н. Емельянов, З.А. Захарова, А.П. Озеренский. Разработка аэрозолеобразующего снаряжения для выстреливаемых гранат и подствольным гранатометам ГП-25 и ГП-30. //Известия РАРАН. - 2004. №2. С. 106.
23. Burghard Döscher. A Dynamic Performance Test of Military Screening Smokes. 35th International Annual Conference of ICT. Karlsruhe. 2004.
24. Matti Hemmil, Maija Hihkio, Kaija Linnainmaa. Evaluation of the Acute Toxicity and Genotoxicity of Orange, Red, Violet and Yellow Pyrotechnic Smokes In Vitro. Propellants, Explosives, Pyrotechnics 32, No. 5 (2007).
25. Tomas Carlsson, Martin Johansson and Joakim Hägval. Destruction of Smoke Grenades Under Water. Proceedings of the Twenty-Ninth International Pyrotechnics Seminar Westminster, CO. July 14-19, 2002.
26. L. M. Aikman, T. E. Shook, R. M. Lehr, E. Robinson, F. McIntyre. Improved Mixing, Granulation and Drying of Highly Energetic Pyromixtures. Propellants, Explosives, Pyrotechnics 12, 17-25 (1987).

27. Stanislaw Cudzilo. Studies of IR-screening Smoke Clouds. Propellants, Explosives, Pyrotechnics 26, 12-16 (2001).
28. L. A. Salvador, Survey of Recent Investigations of Plastic-Bonded and Castable Smoke Compositions, Atlantic Research Corp., for U.S. Army Chemical R&D. Laboratories, Contract DA- 18-108-AMC-40A, 1963.
29. Army Ammunition Data Sheets for Grenades. TM 43-0001-29. Headquarters Department of the Army. Washington, DC, 30 June 1994.
30. Stanislaw Cudzilo and Andrzej Paplinski. An Influence of the Chemical Structure of Smoke-Generating Mixtures on Laser Radiation Attenuation at 1,06-mm and 10,6-mm Wavelengths. Propellants, Explosives, Pyrotechnics 24, 242-245 (1997).
31. Gary Chen, Shawna Showalter, Gretel Raibeck, James Wejsa. Environmentally Benign Battlefield Effects Black Smoke Simulator. U.S. Army RDECOM-ARDEC Picatinny, NJ 07806-5000.
32. William G. Rouse, Raymond J. Malecki. History or Current U.S. Rapid Obscuration Systems (ROS). ERDEC-TR-441. 1997.
33. J.C. Owruksy etc. Obscurants for Infrared Countermeasures II. NRL/FR/6110-00-9945. 2000.
34. Army Ammunition Data Sheets Artillery Ammunition Guns, Howitzers, Mortars, Recoilless Rifles, Grenade Launchers and Artillery Fuzes. TM 43-0001-28. Headquarters Department of the Army. Washington, DC, 27 October 2003.
35. Hopfgarten F., and Collvin P., Studies of IR- and Visible Screening Smoke. Proceedings of the Sixteenth International Annual Conference of ICT. Karlsruhe. 1985.
36. Ladislav Klusacek, and P. Navratil. The Use and Application of Red-Phosphorous Pyrotechnic Composition for Camouflage in the Infrared Region of Radiation. Propellants, Explosives, Pyrotechnics 22, 74-77 (1997).
37. Dr. N. Davis. Red Phosphorus for Use in Screening Smoke Compositions. Royal Military College of Science Cranfield University Shrivenham. 1999.
38. Dr. Caroline K. Wilharm & Mr. Francis E Montgomery. M819 Red Phosphorus Smoke Reformulation Study. Proceedings of the Thirty-First International Pyrotechnics Seminar. July 11-16, 2004.
39. Пат. US2842502 от 1952 г.
40. Пат. CA1306112 от 1988 г.
41. Пат. BG64003 от 2000 г.
42. Пат. US6436210 от 1998 г.
43. Пат. GB1008576 от 1965 г.
44. Пат. US3323958 от 1965 г.
45. Пат. NL8400700 от 1983 г.
46. Пат. US1326494 от 1919 г.
47. Пат. US3724382 от 1971 г.
48. Пат. FR2249590 от 1972 г.
49. Пат. GB2056632 от 1980 г.
50. Пат. US3625855 от 1969 г.
51. Пат. BG62132 от 1996 г.
52. Пат. RU2355669 от 2006 г.
53. Пат. RU2369589 от 2006 г.
54. Пат. PL162179 от 1989 г.
55. Пат. EP0860682 от 1997 г.
56. Пат. US4376001 от 1980 г.
57. Пат. US4474715 от 1981 г.
58. Пат. US4697521 от 1983 г.
59. Пат. US4898098 от 1988 г.
60. Пат. RU2353606 от 2007 г.
61. Пат. RU2102689 от 1995 г.
62. Пат. RU2350590 от 2007 г.
63. Пат. GB2188920 от 1980 г.
64. Пат. RU2350589 от 2007 г.
65. Пат. RU2353505 от 2007 г.
66. Пат. US5389308 от 1993 г.
67. Пат. FR2617474 от 1987 г.
68. Пат. US4015355 от 1975 г.
69. Пат. US6612242 от 2001 г.
70. Пат. CZ11795 от 2001 г.
71. Пат. CZ283864 от 1994 г.
72. Пат. GB2206343 от 1988 г.
73. Пат. RU2262064 от 2003 г.
74. Пат. UA22433 от 2006 г.
75. Пат. US4129465 от 1977 г.
76. Пат. USH232 от 1986 г.
77. Пат. RU2369592 от 2008 г.
78. M. Johnston. Low-toxity Hand-thrown Smoke Screening Grenades to Meet the United Kingdom Future Operational and Training Needs. Proceedings of the Twenty-First International Pyrotechnics Seminar. September. 11-15. 1995.
79. Пат. US4032374 от 1976 г.
80. Пат. RU2357945 от 2007 г.
81. Пат. US4438700 от 1982 г.
82. Материалы Интернет-ресурса [www.pyrotechnics.net.ru/](http://www.pyrotechnics.net.ru/) Материалы лекций Дудырева А.С., «Разработка пиротехнических составов». Переработка и оформление Е. Мисоночкиковой и Королева Д.В.

83. Jerome J. Cichowicz. Programmatic Life Cycle Environmental Assessment for Smoke/ Obscurants. Volume 4 of 5 Volumes. Environmental Assessment ARCSL-EA-83007. US Army Armament, Munitions, and Chemical Command Aberdeen Proving Ground, Maryland. 1983.
84. Technical Manual. Ordnance Data for Toxic Hazards Associated with Pyrotechnic Items. NAVSEA SW050-AC-ORD-010. 2005.
85. Ernst-Christian Koch. Metal-Fluorocarbon Based Energetic Materials. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA. 2012.
86. MIDAS database 2007.
87. Пырьев Е.В., Резниченко С.Н. Бомбардировочное вооружение авиации России 1912-1945 гг. - М.: Редакционно-издательский центр Генерального штаба ВС РФ, 2001.
88. Взрывчатые вещества, пиротехника, средства инициирования в послевоенный период: Люди. Наука. Производство. Второе издание. /Коллектив авторов. - М.; СПб.: Издательство «Гуманистика», - 936 с., 2002.

## Глава 13. Составы сигнальных дымов

Составами сигнальных дымов называют пиротехнические смеси, которые при сгорании образуют дымы, окрашенные в различные цвета. Эти дымы применяются для подачи сигналов днем, целеуказания, а также в дневных пиротехнических шоу.

**Образование облака цветного дыма возможно 4-мя способами:**

- механическим распылением порошкообразного пигмента:
  - реализуется при помощи специальных машин и устройств;
- образованием яркоокрашенных соединений при сгорании пиротехнических смесей:
  - составы цветного дыма на основе неорганических пигментов;
- возгонкой органических красителей при помощи пиротехнических композиций:
  - составы цветного дыма на основе органических красителей,
  - составы цветного дыма мгновенной возгонки для целеуказания;
- распылением при помощи разрывного заряда:
  - смеси красителей с наполнителем.

Первый способ активно изучался, но распространения не получил. Механическое распыление пигментов, хоть и возможно теоретически, на практике встречает ряд трудностей. Эти трудности связаны с необходимостью использования специального оборудования, а также сложностью измельчения пигмента до такой степени, чтобы частицы удерживались на воздухе продолжительное время.

Смеси на основе неорганических красителей содержат в своем составе либо летучий неорганический пигмент, либо этот пигмент образуется при сгорании смеси. На подобные композиции получено большое количество патентов, но практического применения в настоящее время они так и не нашли.

Составы на основе органических красителей широко применяются на практике, содержат термогенерирующую смесь, сгорающую с относительно низкой температурой, и органический краситель, способный возгоняться при нагревании. Температура горения таких смесей 450-700°C [1, 2].

Исторически первыми смесями, образующими при сгорании окрашенный дым, были составы на основе неорганических пигментов. На протяжении сотен лет почти единственным подобным пигментом являлись сера и реальгар (сульфид мышьяка). Реальгар способен довольно легко возгоняться при нагревании, а затем конденсироваться в темно-желтый дым, по качеству практически не уступающий дымам на основе органических красителей. В качестве примера можно привести модифицированные составы с серой и реальгаром [4]:

1. Нитрат калия – 48,5%, сера – 48,5%, реальгар – 3%.
2. Нитрат калия – 25%, сера – 16%, реальгар – 59%.
3. Нитрат калия – 43%, сера – 10%, реальгар – 37%, ивовый уголь – 4%, рисовый крахмал – 6%.

Эти композиции до сих пор пользуются популярностью в странах Юго-Восточной Азии, однако производимый ими дым довольно токсичен вследствие частичного сгорания реалгара и образования ядовитого оксида мышьяка.

Из большого количества ярко окрашенных пигментов, которые в обычном состоянии имеют густую окраску, для использования в цветных дымах пригоден весьма ограниченный круг веществ. Поэтому вплоть до начала 20 века поиск пигментов для создания цветных дымов был малорезультативным. Лишь с начала 20 века в связи с бурным развитием химии органических красителей появились новые материалы, пригодные для использования в дымах.

Во время Первой мировой войны возникла потребность в дневных средствах сигнализации. Ночью для этих целей применялись пламенные сигнальные составы, днем же цвет от сигнальных огней было сложно идентифицировать, а яркости свечения зачастую не хватало, чтобы надежно различить сигнал. Первые полноценные сигнальные дымовые средства появились к концу Первой мировой войны, хотя наработать их в необходимых количествах и ассортименте так и не удалось. Эти композиции так же, как современные, состояли из смеси хлората калия, сахара и органического красителя.

**Табл. 13.1. Композиции времен Первой мировой войны [5]**

Состав	Красный	Желтый	Зеленый	Синий
хлорат калия	14	33	33	74
лактоза	14	24	26	54
паранитроанилиновый красный	34	-	-	-
аурамин	-	34	15	-
хризоедин	-	9	-	-
индиго	-	-	26	84

Во время Второй мировой войны началось уже массовое использование цветных сигнальных дымов, наиболее значительного прогресса в этом добились немцы [17].

В России с 1916 г. применялись специальные авиационные сигнальные патроны красного, белого, черного, синего дымов. Чуть позже появился сигнал зеленого дыма. В 20-ые годы изделия, снаряженные цветными сигнальными дымами были фактически забыты.

С начала 30-х годов 20-ого века в службе земного обеспечения самолетовождения (ЗОС) Красной Армии использовали посадочные шашки трех типов (оранжевого, белого и черного дымов), а в авиации – бортовые дымы указанных цветов [45].

Накануне Великой Отечественной войны ассортимент общевойсковых сигнальных средств дневного действия в Советской Армии был представлен лишь одними 26 мм сигнальными патронами на основе цветных пироксилиновых порохов мгновенной возгонки (ЦПП), разработанных в середине 30-х годов. Эти патроны использовались как для сигнализации, так и для целеуказания. Они образовывали окрашенное облачко со временем существования 10-20 сек. Ассорти-

мент был ограничен красным, желтым и голубым цветами в связи с недостаточной развитостью производства красителей в СССР. При этом немцы применяли 34 различных дымовых сигналов с 8 цветами дыма. К 1943 г. номенклатура дымовых сигналов в Советской Армии расширилась до 17, а количество цветов было увеличено до 6. В обиход вошли хлоратные составы курящегося типа [38].

После войны были разработаны литьевые композиции, в состав начали вводить газогенерирующие добавки (нитрат гуанидина), стали более доступными термостойкие антрахиноновые красители.

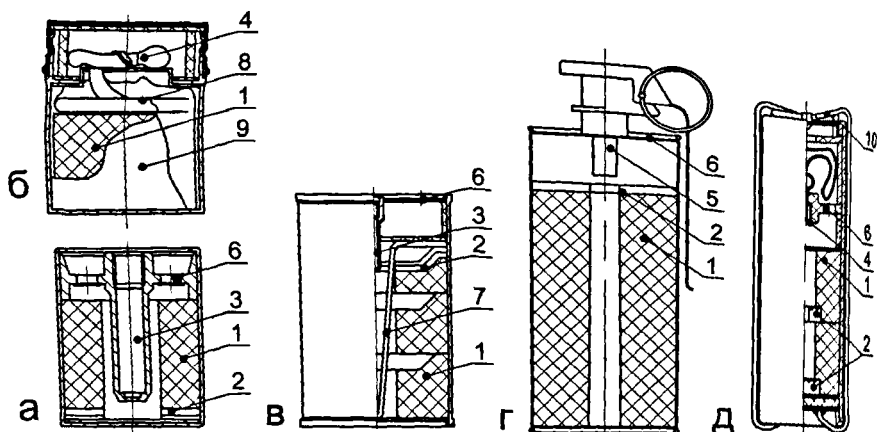
После Второй мировой войны важность дневных сигнальных дымовых средств была подтверждена вооруженными конфликтом на Кипре, во Вьетнаме и Афганистане.

В конце 80-х годов 20 века в американских сигнальных дымовых смесях желтые красители типа бензантрона и Vat Yellow 4, обладающие выраженной канцерогенной активностью, были заменены на менее биологически активный 2-(2'-хинолил)-1,3-индандион (QID). В 90-х годах подлежали замене фиолетовый и красный красители 1,4-диамино-2,3-дигидроксиантрахинон и 1-метиламиноантрахинон. Параллельно из дымовых смесей была исключена сера, что благоприятно сказалось на безопасности производства.

Состав цветных дымов ориентирован на низкотемпературное горение. Температура горения не должна превышать 700-800°C во избежание разложения органического красителя [6]. Этим объясняется некоторая ограниченность ассортимента компонентов для смесей цветного дыма и использование хлората калия в качестве окислителя. Пары красителя являются горючим веществом. Чтобы предотвратить их воспламенение, применяют особую конструкцию дымовых изделий, а в состав вводят пламегаситель.

Если пары красителя все же воспламеняются, то окраска дыма исчезает, у выхлопных отверстий дымовой шашки появляется пламя. Шлак, образующийся при сгорании пиротехнического состава, должен быть пористым, чтобы пары красителя как можно свободнее проходили через него. Любая задержка паров красителя над горячей поверхностью приводит к его разложению и образованию смолистых веществ, отрицательно влияющих на характер сгорания. Иногда для облегчения прохождения паров красителя дымовой состав подвергают грануляции либо шашка состава содержит каналы для облегчения выхода дыма. Установлено, что в современных дымовых изделиях полезно используется до 70-95% красителя, остальная часть разлагается или сгорает [18, 19].

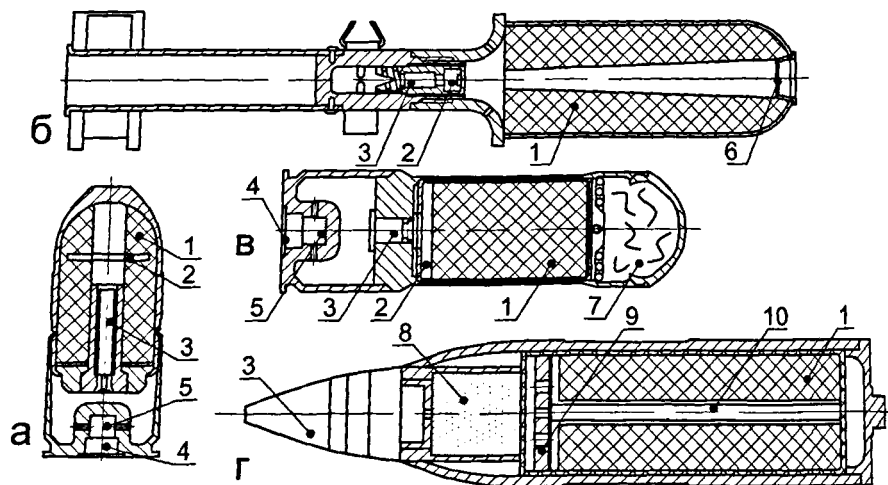
В военной технике для сигнализации обычно используют 5 цветов (расположены по мере легкости распознавания): оранжевый, красный, желтый, зеленый, синий (в американских смесях – фиолетовый). При необходимости для сигнализации могут применяться белые и черные маскирующие дымы. Оранжевый цвет легче других цветов идентифицируется на фоне серого неба или моря, его чаще всего используют в качестве сигнала бедствия [7].



**Рис. 13.1. Сигнальные дымовые изделия [12, 13, 14, 15].**

а) – чешская малогабаритная дымовая шашка DA-25, б) – американская малогабаритная дымовая шашка M166 (M167, M168), в) – чешская дымовая шашка DA-100, г) – американская дымовая граната M18, д) – отечественный наземный сигнальный патрон оранжевого дыма.

1 – состав цветного дыма, 2 – воспламенительный состав, 3 – гнездо под электровоспламенитель, 4 – терочный воспламенитель, 5 – воспламенитель M203, 6 – выхлопные отверстия, 7 – стопин, 8 – огнепроводный шнур, 9 – фольга, 10 – ручки.



**Рис. 13.2. Американские сигнальные дымовые изделия и дымовые маркеры [3, 14, 16].**

а) – 40 мм граната-маркер M716 для подствольного гранатомета, б) – винтовочная граната M22, в) – 40 мм дымовая граната для подствольного гранатомета, г) – снаряд-маркер E75.

1 – состав цветного дыма, 2 – воспламенительный состав, 3 – замедлитель, 4 – капсюль воспламенитель, 5 – метательный заряд, 6 – заглушка, 7 – парашют, 8 – вышибной заряд, 9 – метательная бранша, 10 – стопин.

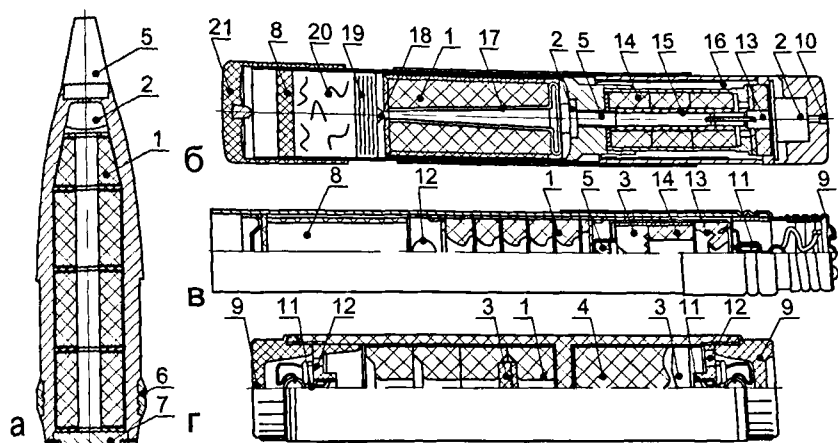


Рис. 13.3. Сигнальные дымовые изделия (продолжение) [12, 13, 16].

а) – 155 мм американский дымовой снаряд, б) – американский ручной реактивный патрон М194 (М128А1, М129А1), в) – отечественный 30 мм ручной реактивный сигнальный патрон, г) – патрон сигнальный ночной дневной (ПСНД).

1 – состав цветного дыма, 2 – вышибной состав, 3 – воспламенительный состав, 4 – пламенный сигнальный состав, 5 – замедлитель, 6 – ведущий пояс, 7 – вышибное днище, 8 – крышка, 9 – колпачок, 10 – ударный капсюль-воспламенитель, 11 – терочный воспламенитель, 12 – выхлопные отверстия, 13 – сопло, 14 – заряд твердого ракетного топлива, 15 – установочный винт, 16 – складные стабилизаторы, 17 – стопин, 18 – узел крепления парашюта, 19 – трос, 20 – парашют, 21 – защитный колпачок с ударником.

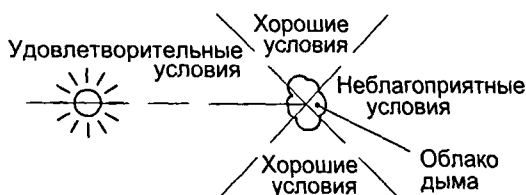


Рис. 13.4. Условия наблюдения окрашенного дымового облака (вид сверху).

Особенностью окрашенных дымов является то, что они воспринимаются неодинаково в зависимости от расположения относительно солнца. При расположении дымового облака на линии между наблюдателем и солнцем цвет кажется белесым и слабо выраженным, если же солнце находится в зените над дымовым облаком, облако воспринимается как темное (Рис. 13.4).

### 13.1. Составы цветного дыма на основе органических красителей

Табл. 13.2. Состав современных сигнальных дымов на основе органических красителей

Компонент	Наименование	Содержание
окислитель	$\text{KClO}_3$ , редко $\text{KNO}_3$	15-50%
газогенерирующая добавка	нитрат гуанидина, бездымный порох, полиглицидилазид	0-50%
горючее	сахароза, лактоза, тиомочевина, дициандиамида, сера, крахмал	9-35%
орг. краситель	любой краситель, способный к возгонке без разложения	20-55%
пламегаситель	мел, бикарбонат натрия, карбонат магния, каолин	0-35%
техническая добавка	легкое индустриальное масло, стеарин, керосин, аэросил, тальк	0,5-5%
связующее	декстрин, поливиниловый спирт, полимеры, нитроцеллюлоза	0-20%

1. *Окислители.* Как правило, в качестве окислителя в составах цветного дыма используют хлорат калия из-за его низкой температуры начала разложения. Цветные сигнальные дымовые смеси – это, пожалуй, единственная область широкого применения данного окислителя в современной военной пиротехнике. Благодаря значительному содержанию инертных компонентов составы цветных дымов сравнительно безопасны в обращении, однако их производство характеризуется наибольшим количеством инцидентов.

Известны составы с применением нитратов в качестве окислителя. Например, в книге Шидловского 1943 года издания приведен следующий состав: нитрат натрия – 25%, древесные опилки – 35%, родамин – 40% [8].

Для приготовления 1 кг дымовой смеси по болгарскому патенту [30] к смеси, состоящей из 41,6% древесных опилок и 58,4% нитрата аммония (опилки пропитываются раствором нитрата аммония, а затем сушатся), добавляют 5% отработанного машинного масла (сверх 100%). Затем 800 г полученной массы размешивают с 200 г синтетического индиго.

Составы на нитратах малоэффективны и гигроскопичны. Они могут быть использованы только в сочетании с самыми термостойкими красителями.

Табл. 13.3. Композиции на основе ПХК [9]

Состав	Красный	Зеленый	Синий
перхлорат калия	5	6	5
антимоний	4	5	4
родаминовый красный	10	-	-
малахитовый зеленый	-	10	-
метиленовый синий	-	-	10
аравийская камедь	1	1	1

Согласно Кларку, определенное распространение перед Второй мировой войной нашли составы на перхлорате калия (ПХК), но вскоре они были вытеснены более дешевыми и удобными хлоратными композициями.

В некоторых экспериментальных композициях присутствует

перхлорат аммония, например, один из составов содержит: 28% ПХА, 15% лактозы и 57% родамина [31]. Этот окислитель хотя и дает неплохие результаты, но совместим лишь с ограниченным числом красителей.

В трассирующих составах цветного дыма, которые отличаются повышенной скоростью горения, используется перекись стронция.

2. *Газогенерирующая добавка.* Некоторые композиции цветного дыма могут содержать в своем составе нитрат гуанидина или бездымный порошок. Эти добавки способствуют лучшему диспергированию органического красителя благодаря образованию большого количества газов. Кроме того, нитрат гуанидина играет роль пламегасителя, способствуя понижению температуры горения и образованию большого количества газообразного азота. Он особенно эффективен в композициях, предназначенных для снаряжения продолжительно горящих изделий. Например, в патенте [32] предложен французский состав: 19% хлората калия, 17% нитрата гуанидина, 35% судана желтого. Литьево связующее состоит из 17,4% полиглицидилового эфира, 5,8% глицерина, 1,93% этаноламина (отвердитель) и 3,87% метилкарбазата (модификатор). Композиция красного дыма по этому же патенту содержит 14% хлората калия, 24% нитрата гуанидина, 38% метиламиноантрахинона, 15% полиглицидилового эфира, 4% этиленгликоля и 5% метилкарбазата. В некоторых случаях бездымный порошок может заменять двойную смесь хлорат калия/горючее. Например, в румынском патенте [33] приведены композиции, содержащие 43-48% красителя, 41-46% нитроцеллюлозы, 2-6% перлита или азросила и 4-10% связующего типа идитола. Хотя в настоящее время составы на основе бездымного пороха распространения не получили из-за повышенной стоимости и сложностей, связанных с созданием изделий курящегося типа.
3. *Горючее.* Горючее в составах сигнальных дымов не должно выделять много энергии при сгорании. Поэтому классическими компонентами в таких смесях являются углеводы – сахароза или менее гигроскопичная лактоза (молочный сахар). При термическом разложении они выделяют много паров воды, чем обеспечивается эффект пламегашения. Китайские праздничные факелы красного дыма содержат крахмал: 30% хлората калия, 40% крахмала, 30% родамина [44]. В старых дымовых композициях американского производства в качестве горючего часто применялась сера. Составы на ее основе в настоящее время не производятся, однако изделия с использованием смесей хлорат калия/сера все еще можно встретить в арсеналах армий некоторых стран. В СССР/России законодательно запрещено использование пищевых продуктов не по целевому назначению, поэтому в НИИПХ, в период с 1965 по 1970 г., была проведена работа по замене сахарозы на дициандиамид (ДЦДА) [46]. Способность к воспламенению и активность горения композиций хлорат калия/ДЦДА уступает смесям хлорат/сахароза, поэтому в состав часто добавляют несколько процентов тиомочевины, где она является катализатором или, вернее, активатором горения. Использование ДЦДА позволяет обходиться без добавления пламегасителей.
4. *Красители.* В цветных дымовых смесях нашли применение, в первую очередь, антрахиноновые, азиновые и ксантроновые органические красители. Впрочем, краситель может быть и другого типа, лишь бы он удовлетворял

требованиям по способности к возгонке при нагревании, термостойкости и доступности. Чтобы добиться требуемого оттенка цвета, применяют смеси красителей. В общем случае считается, что наиболее пригодными являются красители, обладающие молекулярной массой менее 400-450 и не содержащие сульфониевых, оксониевых и четвертичных аммониевых химических групп. Не рекомендуется наличие в молекуле нитрозогрупп, нитрогрупп и гидрохлорида [1].

**В качестве красителей обычно используют [3, 17, 20]:**

**Оранжевый дым:**

- 1-(фенилазо)-2-нафтол (жирорастворимый оранжевый, жироранж, sudan orange R, судан I);
- фталоперинон (orange 1584);
- 1-аминоантрахинон (1-амино-9,10-дигидро-9,10-диоксоантрацен, альфа-антрахинониламмин, fast red A1, rauchorange G);
- ксилол-азо-2-нафтол (solvent orange 7);
- 1-амино-2-метилантрахинон (disperse orange 11).

**Красный дым:**

- хлорид 9-[2-карбоксифенил]-3,6-бис[N,N-диэтиламино]ксантилия (родамин С);
- родамин Б (гидрохлорид родаминина С);
- 1-[(4-нитрофенил)азо]-2-нафтол (паратонер, паранитроанилиновый красный, para red, пигмент красный Ж);
- 1,2-дигидроксиантрахинон (ализарин, mordant red);
- 1,4-дигидроксиантрахинон (хинизарин);
- 1-метиламиноантрахинон (disperse red 9);
- 1,4-диамино-2-метоксиантрахинон (disperse red 11);
- 1-(2-метоксифенилазо)-2-нафтол (solvent red 1, судан красный Ж, жирорастворимый красный С);
- 2-хлоро-2'-метил-4-нитро-4'-N,N-бис(2-гидроксиэтил)азобензол (disperse red 5);
- 1-гидрокси-2-аминоантрахинон (rauchbordeau BN);
- 1-амино-4-гидроксиантрахинон (disperse red 15);
- 1-((2-метил-4-((2-метилфенил)азо)фенил)азо)-2-нафтол (solvent red 24, судан IV);
- 1-[(P-фенилазо)фенилазо]-2-нафтол (solvent red 23, жирорастворимый темно-красный, судан III);
- 1-(2,5-диметил)-4-(2,5-диметилфенилазо)-фенилазо-2-нафтол (solvent red 27, oil red O).

### **Желтый дым:**

- 4,4'-диметилиминобензолиимид гидрохлорид (аурамин О, аурамина гидрохлорид, имидо-тетраметилдиамидодифенилметана гидрохлорид, basic yellow 2);
- 2-(2'-хинолинил)-1,3-индандион (solvent yellow 33, хинолиновый желтый);
- 9,10-дианилидоантрацен (rauhgelb);
- 4-(фенилазо)-1,3-дигидроксibenзол (sudangelb GG, судан желтый ЖЖ);
- 4-(фенилазо)-р-аминобензол (rauchgelb R, sudangelb R, аминоазобензол);
- 7-оксо-7-бензо(d,e)антрахинон (бензантрон, benzan-B, золотисто-желтый G);
- N,N'-диметил-р-фенилазоанилин (4-диметиламиноазобензол, бензилазо-диметиланилин, судан желтый GGA, solvent yellow 2, метиловый желтый, жирорастворимый желтый, butter yellow);
- 2-(4-диметиламиноазофенил)нафталин (N,N-диметил-р-2-(1-нафтилазо-анилин));
- дибензо-(a,h)-пирен-7,14-дион (индантреновый золотисто-желтый, 3,4,8,9-дибензопирен-7,14-дион, кубовый желтый 4, vat yellow 4);
- О-аминоазотолуол (solvent yellow 3, 4-амино-3,2'-диметилазобензол).

### **Зеленый дым:**

- 1,4-ди-(р-толуидино)-9,10-антрахинон (solvent green 3, хинизарин зеленый).

### **Синий дым:**

- 2,2'-бис-индолилиндиг (индиг);
- 3,7-бис(диметиламино)тиазин (метиленовый голубой, метиленовый синий);
- 4-(2-бromo-4,6-динитрофенилазо)-5-ацетиламино-2-этокси-N,N-бис(ацетоксиэтил)анилин (disperse blue 79);
- 1-метиламино-4-толуиленаминоантрахинон (sudanblau G, судан голубой Г);
- 1-амино-2-бром-4-толуиленаминоантрахинон (rauchblau R);
- 1,4-ди(метиламино)антрахинон (fast blue 8, disperse blue 14);
- фталоцианиновый синий (пигмент голубой фталоцианиновый).

### **Фиолетовый дым:**

- смесь 1,5-дитолуиленаминоантрахинона и 1,8-дитолуиленаминоантрахинона (rauchviolet);
- 1,4-диаминоантрахинон (disperse violet 1);
- 1,4-диамино-2,3-дигидроантрахинон (violet A100);
- 1-(р-толиламино)-4-гидроксиантрахинон.

**Табл. 13.4. Эффективный диапазон содержания хлората калия для тройной смеси краситель/хлорат калия/лактоза в небольших дымовых шашках. Содержание лактозы во всех случаях 20% [4]**

Краситель	Max %	Min %	Диапазон
родамин Б	32	20	12
жирорастворимый красный	36	33	3
паранитроанилиновый красный	20	13	7
жирорастворимый оранжевый	30	20	10
аурамин	33	24	9
фталоцианиновый синий	35	30	5
индиго	36	30	6

Существует некоторое оптимальное отношение количества красителя к количеству термической основы. Если красителя больше этого оптимального соотношения, то горение состава становится неустойчивым. Если же количество красителя меньше оптимального, то насыщенность окраски дыма резко падает, и он приобретает белесый цвет вследствие термического разложения красителя. При переходе от малых дымовых шашек к большим количество термической основы должно быть уменьшено с поправкой на аккумулярование тепла крупными изделиями.

Составы, содержащие красители с пониженной термостойкостью (например, азокрасители), рекомендуется гранулировать либо формировать каналы в таблетках, т.к. в случае прессования в крупные таблетки окрашенный дым выделяется только в начале горения, впоследствии он становится белым из-за автокаталитического разложения красителя при прохождении через нагретый шлак [6, 17].

Органические красители малотоксичны, но являются более или менее выраженными канцерогенами, способны накапливаться в организме человека и вызывать раздражения кожи.

Хотя для сигнализации белым цветом принято пользоваться обычными маскирующими дымами, в американской армии существуют сигнальные составы с белым красителем. Например, состав, использующийся в Mk125 Mod0 MSIS, содержит 30% хлората калия, 19,5% сахарозы, 2,5% бикарбоната натрия, 4,5% диатомита и 43,5% 1-хлорантрахинона [43].

5. *Технические добавки.* Аэросил и кизельгур облегчают переработку дымовой композиции, делают смесь более пористой. Зачастую кизельгур добавляли с целью экономии красителя. Тальк облегчает прессование в таблетки. Индустриальные масла, стеарин и керосин предотвращают пыление красителя, что является очень важным моментом в производстве сигнальных дымовых составов, т.к. пыль красителя оседает на всевозможных предметах и вызывает их окрашивание. Особенно сильным красящим свойством отличаются жирорастворимые красители и родамины. Другой важной особенностью масел является способность уменьшать выгорание органического красителя за счет предотвращения прямого контакта частиц красителя и термической основы.

6. *Связующее* обычно добавляют в композиции в количестве 2-3% с целью обеспечения гранулирования (если при переработке предусматривается грануляция). Существуют и применяются сигнальные дымовые составы, перерабатываемые литьем, в этом случае количество связующего может достигать до 20%. Например, канадский состав красного дыма SK-338 содержит 41% 1-метиламиноантрахинона, 25% хлората калия, 6% бикарбоната натрия, 8% серы и 20% полибутадиенового связующего. Его характеристики: теплота реакции – 1,1 МДж/кг, плотность снаряжения – 1,38 г/см<sup>3</sup>, скорость горения – 0,46 мм/сек, температура вспышки – 312°C. Стоит отметить, что использование полибутадиенового полимерного связующего встречает ряд трудностей, например, при контакте красителя с сшивающим агентом активность сшивающего агента резко падает, и необходимо покрытие частиц красителя изолирующим материалом [26, 42].
7. *Пламегасители*. В качестве пламегасителей обычно применяют карбонаты и гидрокарбонаты, которые понижают температуру горения за счет разбавления горючей смеси неактивным компонентом, поглощающим тепло. Вдобавок при нагревании они выделяют углекислый газ, препятствующий воспламенению паров красителя. Во время Великой Отечественной войны на вооружении Советской Армии состояли сигнальные дымовые составы с добавкой хлорида аммония. Хлорид аммония разбавлял пары органического красителя и тем самым способствовал экономии дефицитных в те годы компонентов. Такие составы не подходят для длительного хранения, но их производство в военное время вполне оправдано, т.к. интервал между изготовлением и применением обычно не превышал нескольких месяцев.

**Табл. 13.5. Сигнальные составы цветного дыма времен Великой Отечественной войны, состоящие на вооружении Советской Армии [39]**

Состав	1	2	3	4	5	6	7	8	9
хлорат калия	27	26	28	27	27	30	30	27	30
сахароза	-	19	-	20	20	20	20	20	20
ДЦДА	-	-	15	-	-	-	-	-	-
антрацен	17	-	-	-	-	-	-	-	-
хлорид аммония	16	9	10	13	13	10	10	13	10
жироранж	40	46	47	20	-	20	-	2	2
судан IV	-	-	-	20	-	20	-	-	-
судан III	-	-	-	-	40	-	40	-	-
аминоазотолуол	-	-	-	-	-	-	-	38	38

1. Состав оранжевого дыма для самолетных вымпелов (специальные сигнальные изделия для доставки корреспонденции).
- 2-3. Составы оранжевого дыма для плавучей дымовой шашки.
- 4-5. Составы красного дыма для ленточных 26 мм патронов.
- 6-7. Составы красного дыма для парашютных 26 мм патронов.
8. Состав желтого дыма для ленточных 26 мм патронов.
9. Состав желтого дыма для парашютных 26 мм патронов.

**Табл. 13.6. Сигнальные составы оранжевого дыма**

Состав	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
хлорат калия	29	26	20	29	25	25	19	25	30	24,6	20	20	26	25,30	38	20,6
ДЦДА	-	-	-	-	-	22	20	22	20	28,5	10	10	-	-	-	-
лактоза	13	18	15	18	23	-	-	-	-	-	-	-	25	8,45	12	-
сахароза	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	17,2
фталоперинон	27	12	35	27	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1-аминоантрахинон	16	31	-	16	-	-	-	-	-	-	-	-	-	46	30	14,1
1,4-дигидроксиантрахинон	-	-	-	-	40	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
жироранж	-	-	-	-	-	35	58	50	50	45,8	60	30	-	-	-	-
жирорастворимый красный С	-	-	-	-	-	15	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
9,10-дианилидоантрацен	-	3	24	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
хинолиновый желтый	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	28	-	-	-
1-амино-2-метилантрахинон	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	18	-	-	-
кисл-азо-2-нафтол	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	41,3
тиомочевина	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,1	5	5	-	-	-	-
древесные опилки	5	-	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
табак	10	10	-	10	12	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
антрацен	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5	5	-	-	-	-
NaHCO <sub>3</sub>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2,25	2	-
прочее*	-	-	1	-	-	3	3	3	-	-	-	30	3	18	18	6,8

- Немецкий состав времен Второй мировой войны [17].
- Немецкий состав времен Второй мировой войны, применялся в виде таблеток в средстве для рекогносцировки №80 [17].
- Немецкий состав времен Второй мировой войны, применялся в виде гранул в средстве для рекогносцировки №80 (с сентября 1944 г.): \* – метилцеллюлоза [17].
- Немецкий состав времен Второй мировой войны, применялся в виде таблеток в средстве для рекогносцировки №80 (с ноября 1944 г.) [17].
- Современный финский состав [21].
- Состав для комбинированного сигнального патрона КСП: \* – декстрин [12].
- Состав для наземного сигнального патрона оранжевого дыма и патрона ПСНД: \* – декстрин [12].
- Состав для плавучей дымовой шашки: \* – декстрин [12].
- Состав для посадочной дымовой шашки ПШ-М [12].
- Состав для применения в гражданской пиротехнике [40].
- Отечественный состав по а.с. СССР 252127 (1969 г.) [41].
- Современный отечественный состав: \* – 29% гексахлорэтана и 1% индустриального масла [41].
- Английский состав PN760 для снаряжения сигнальной гранаты L49A1: \* – окись цинка. Теплота реакции – 1,07 МДж/кг. Плотность снаряжения – 1,5 г/см<sup>3</sup>. Скорость горения – 0,34 мм/сек, температура вспышки – 194°C [25, 42].
- Канадский состав SK-354: \* – полибутadiен. Теплота реакции 1,1 МДж/кг. Плотность снаряжения 1,45 г/см<sup>3</sup> [42].
- Канадский состав SK-356: \* – полибутadiен. Теплота реакции 1,72 МДж/кг. Плотность снаряжения 1,41 г/см<sup>3</sup>. Скорость горения 0,23 мм/сек, температура вспышки 336°C [42].
- Американский состав для снаряжения комбинированного сигнального средства Mk124 Mod0: \* – 4,8% диатомита и 2% графита [43].

**Табл. 13.7. Сигнальные составы красного дыма**

Состав	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
хлорат калия	20	22	24,6	17	26	24	35	31	35	29,5	31,3	25,1	21,6	25	28	28	29,7	17,7	21,5	30
сахароза	-	-	-	-	-	-	17	20	26,5	-	-	-	14,2	-	-	-	-	17,7	21,5	-
лактоза	20	18	13,8	10	-	-	-	-	-	18	-	-	-	-	25	20	-	-	-	29
сера	-	-	-	-	9	5	-	-	-	-	12,3	9,4	-	-	-	-	-	-	-	-
тиомочевина	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	19,8	-	-	-
судан кр. Ж	55	55	32,5	34	-	-	-	-	-	-	-	-	31,6	-	-	46	-	34,2	38	-
disperse red 9	-	-	-	-	40	40	45	-	-	-	-	-	-	40	-	-	44,5	-	-	39
парапонер Б	-	-	29,1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
краситель	-	-	-	-	-	-	-	47	36	47,5	40,2	41,2	-	-	-	-	-	-	-	-
родамин Б	-	-	-	12	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	30	-	-	-	-	-
disp. red 11	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	13,9	-	-	-	-	6,8	7	-
ТФК***	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	6,6	-	-	-	-	14	8	-
NaHCO <sub>3</sub>	-	-	-	-	25	17	-	-	1	-	14,3	21,8	3,4	-	-	-	-	-	-	-
MgCO <sub>3</sub>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5	-	-	8,7	-	-	-	-	9,6	4	-
кизельгур	4	5	-	15	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
связка*	1	-	+	12	2	14	-	2	-	-	1,9	2,5	2	-	3	3	1	-	2	-
прочее**	-	-	-	-	0,5	+	3	-	1,5	-	-	-	0,5	10	22	23	5	0,5	0,5	2

1. Немецкий состав времен Второй мировой войны для авиационных сигнальных патронов: \* – метилцеллюлоза [17].
2. Немецкий состав времен Второй мировой войны, использовавшийся в ручных сигнальных патронах образца 1940 г. Снаряжения производилось ручным прессом [17].
3. Немецкий состав для сигнальной ракеты времен Второй мировой войны: \* – цапонлак сверх 100% [17].
4. Состав для немецкого многозвездного сигнального средства времен Второй мировой войны: \* – НЦ [17].
5. Американский состав для снаряжения гранат М18 и авиационных сигнальных патронов XM177: \* – поливиниловый спирт; \*\* – стеарин (св. 100%). Плотность снаряжения 1,46 г/см<sup>3</sup> [22].
6. Американский состав для снаряжения морских дымовых сигналов: \* – полиэфирная смола; \*\* – декстрин (в составе красителя). Плотность снаряжения: 1,3-1,5 г/см<sup>3</sup> [23].
7. Американский состав для снаряжения парашютных сигнальных ракет: \*\* – хинизарин зеленый. Плотность снаряжения: 1,3-1,5 г/см<sup>3</sup> [23].
8. Американский состав для снаряжения винтовочных гранат М62: \* – VAAR. Теплота реакции 1,73 МДж/кг [23].
9. Американский состав: \*\* – асбест. Использовался в сигнальных патронах М129А1. Плотность снаряжения: 1,3-1,5 г/см<sup>3</sup>. Теплота реакции 1,93 МДж/кг [23].
10. Американский состав для снаряжения дымовых шашек М2, М3 и М4. Плотность снаряжения: 1,36-1,59 г/см<sup>3</sup> [23].
11. Американский состав для снаряжения 40 мм дымовых средств: \* – декстрин. Плотность снаряжения 1,26-1,59 г/см<sup>3</sup> [23].
12. Американский состав для снаряжения гранат XM48: \* – НЦ. Плотность снаряжения 1,3-1,6 г/см<sup>3</sup> [23].
13. Новый американский состав для гранат М18: \* – поливиниловый спирт; \*\* – стеарин (св. 100%); \*\*\* – терефталевая кислота [22].
14. Финский состав: \*\* – тальк [21].
15. Состав для дымовых фейерверочных звездок: \* – декстрин (св. 100%); \* – жироранж [4].
16. Состав для снаряжения 30 мм реактивного сигнального патрона дневного действия: \* – тальк + идиол; \*\* – ДЦДА [12].

17. Американский состав для снаряжения шашки М168: \* – VAAR; \*\* – индантеновый желтый [34].
18. Новый американский состав для сигнальной гранаты М18: \*\* – стеарин сверх 100% [24].
19. Новый американский состав для 40 мм сигнального средства: \* – поливиниловый спирт; \*\*, стеарин (св. 100%) [24].
20. Английский состав PN757 для снаряжения сигнальной гранаты L48A1: \* – каолин. Теплота реакции 1,28 МДж/кг. Плотность снаряжения 1,48 г/см<sup>3</sup>. Скорость горения 0,37 мм/сек, температура вспышки 196°С [42].

**Табл. 13.8. Сигнальные составы желтого дыма**

Состав	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
хлорат калия	22	29,0	30,8	32,4	20	25	26	30	30	27	31	22	25	32	24,1	28,4	24,3
сахароза	-	-	-	-	-	-	15	17	20	-	-	15	-	-	16,4	19,3	-
лактоза	23	18,7	24,0	24,2	-	16	-	-	-	14	10,5	-	25	28	-	-	-
сера	-	-	-	-	8,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ДЦДА	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	28
желтый краситель	-	9,3	-	-	14	18	-	-	-	17	46	-	40	40	-	-	46,6
аурамин О	-	29,7	32,5	34,3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
аминоазобензол	50	13,3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
бензантрон	-	-	-	-	24,5	-	18	-	32	31	12,5	-	-	-	-	-	-
vat yellow 4	-	-	-	-	-	-	34	51	15	-	-	-	-	-	-	-	-
solvent yellow 33	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	42	-	-	42	42	-
NaHCO <sub>3</sub>	-	-	-	-	33	32	3	-	3	-	-	-	-	-	-	-	-
MgCO <sub>3</sub>	-	-	-	-	-	9	-	-	-	11	-	21	-	-	17,5	10,3	-
тиомочевина	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,1
кисельгур	5	-	-	-	-	-	4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
связка*	-	-	4,0	-	-	-	-	2	-	-	2	-	-	3	-	2	-
прочее**	-	-	8,7	9,1	-	-	-	-	-	-	-	-	10	-	-	0,5	-

1. Немецкий состав времен Второй мировой войны, использовавшийся в ручных сигнальных патронах. Снаряжение производилось ручным прессом [17].
2. Немецкий состав, использовавшийся в авиационных вымпелах образца 1936 г. Краситель – хризоидин [17].
3. Немецкий состав, использовавшийся в авиационных вымпелах образца 1943 г: \* – стеарин; \*\* – родамин Б/декстрин 1/4 [17].
4. Немецкая посадочная шашка времен Второй мировой войны: \*\* – родамин Б/декстрин 1/4 [17].
5. Устаревший американский состав для снаряжения ручных гранат М18 и авиационных сигнальных патронов ХМ177. Плотность снаряжения 1,33 г/см<sup>3</sup> [23].
6. Американский состав для снаряжения дымовых шашек М3. Плотность снаряжения: 1,22-1,6 г/см<sup>3</sup> [23].
7. Американский состав для снаряжения морских дымовых сигналов Mk118. Плотность снаряжения 1,3-1,5 г/см<sup>3</sup> [23].
8. Американский состав для снаряжения винтовочных гранат М64 и М169: \* – VAAR. Теплота реакции 1,64 МДж/кг [23].
9. Американский состав для снаряжения парашютных сигнальных ракет. Плотность снаряжения 1,3-1,5 г/см<sup>3</sup> [23].
10. Американский состав для снаряжения дымовых шашек М2. Плотность 1,3-1,5 г/см<sup>3</sup> [23].
11. Американский состав для снаряжения гранат ХМ65: \* – НЦ сверх 100% (вводится в виде уксусного раствора) [23].
12. Современный состав для снаряжения американских гранат М18 [23].

13. Финский состав; \*\* – тальк. Используется нетоксичный краситель 4,4'-метилен-бис-3-метил-1-фенил-2-пиразолин-5-он (Thermoplast yellow 104) [18].
14. Состав для дымовых звездок: \* – декстрин сверх 100%. Краситель – судан GGA [4].
15. Новый американский состав для сигнальной гранаты M18 [24].
16. Новый американский состав для 40 мм сигнального средства: \* – поливиниловый спирт; \*\* – стеарин (сверх 100%) [24].
17. Применяется в гражданской пиротехнике. Краситель – жирорастворимый желтый С [40].

**Табл. 13.9. Сигнальные составы зеленого дыма**

Состав	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
хлорат калия	28	27	25,4	28,85	31,5	28	31	31	35	31,8	24,5	33	28,5	25
сахароза	-	-	-	-	-	16	18,5	22	23	-	16,5	-	19	-
сера	-	10,4	10	11,3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
лактоза	25	-	-	-	18	-	-	-	-	16,7	-	27	-	25
аурамин	31,7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
судан голубой Г	12,3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
vat yellow 4	-	4	-	5,65	4,7	5	15,5	10,8	12	-	-	-	-	-
бензантрон	-	8	-	-	9,4	10	-	-	-	-	-	-	-	-
solvent yellow 33	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	12,5	-	12,5	18
фталоцианиновый синий	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	20	-	-
судан GGA	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	20	-	-
хинизарин зеленый	-	28	40	39,45	32,9	33	33	30,7	28	50	29,5	-	29,5	29
NaHCO <sub>3</sub>	-	22,6	24,6	14,75	-	4	-	3	2	-	-	-	-	-
MgCO <sub>3</sub>	-	-	-	-	3,5	-	-	-	-	-	17	-	10,5	-
связка*	-	-	-	-	-	-	2	2	-	1,5	-	3	2	-
прочее**	3	-	-	-	-	4	-	2,5	-	-	-	-	0,5	3

1. Немецкий состав времен Второй мировой войны, использовавшийся в ручных сигнальных патронах: \*\* – кизельгур [17].
2. Американский состав 70-х годов 20 века. Использовался в ручных гранатах M18 и авиационных сигнальных патронах XM177. Плотность снаряжения: 1,3-1,63 г/см<sup>3</sup> [23].
3. Американский состав 70-х годов 20 века. Использовался в ручных гранатах M18. Плотность снаряжения: 1,3-1,6 г/см<sup>3</sup>. Связующее – декстрин сверх 100% [23].
4. Американский состав 70-х годов 20 века. Использовался в 40 мм ручных сигнальных патронах. Плотность снаряжения: 1,3-1,6 г/см<sup>3</sup>. Связующее – декстрин сверх 100% [23].
5. Американский состав 70-х годов 20 века. Использовался в 155 мм дымовых шашках M3 и 105 мм M2. Плотность снаряжения: 1,3-1,6 г/см<sup>3</sup> [23].
6. Американский состав 70-х годов 20 века: \*\* – кизельгур. Использовался в морских сигналах Mk117. Плотность снаряжения: 1,16-1,58 г/см<sup>3</sup> [23].
7. Американский состав SG202 70-х годов 20 века: \* – VAAR. Использовался в сигнальных винтовочных гранатах M65. Плотность снаряжения: 1,3-1,6 г/см<sup>3</sup>. Теплота реакции 1,79 МДж/кг [23].
8. Американский состав 1970-х годов: \* – VAAR св. 100%; \*\* – асбест. Использовался в сигнальных патронах M167 и M128A1. Плотность 1,3-1,6 г/см<sup>3</sup>. Теплота реакции 1,63 МДж/кг [23].
9. Американский состав 60-х годов 20 века. Использовался в сигнальных ракетах. Плотность снаряжения: 1,3-1,6 г/см<sup>3</sup> [23].
10. Американский состав для гранаты XM64: \* – НЦ. Плотность снаряжения: 1,3-1,6 г/см<sup>3</sup> [23].
11. Современный состав для американских гранат M18 [23].
12. Состав для дымовых звездок: \* – декстрин св. 100% [4].
13. Новый американский состав для 40 мм сигнального средства: \* – поливиниловый спирт; \*\* – стеарин (св. 100%) [24].
14. Английский состав PN759 для снаряжения сигнальной гранаты L47A1; \* – оксид цинка. Теплота реакции 1,08 МДж/кг. Плотность снаряжения 1,49 г/см<sup>3</sup>. Скорость горения 0,4 мм/сек, температура вспышки 200°C [42].

**Табл. 13.10. Сигнальные составы синего дыма**

Состав	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
хлорат калия	25	25,5	32-35	30	22	33	28	25,7	23	26
лактоза	25	22,1	14-18	20	12	27	-	17,1	18	23
ДЦДА	-	-	-	-	-	-	23	-	-	-
тиомочевина	-	-	-	-	-	-	-	1,1	-	-
судан голубой Г	37,5	38,7	35-40	50	33	-	46	27,7	59	-
индиго	-	13,7	12-14	-	12	-	-	28,4	-	-
фталоцианиновый синий	-	-	-	-	-	40	-	-	-	-
disperse blue 150	-	-	-	-	-	-	-	-	-	48
кизельгур	12,5	-	-	-	15	-	-	-	-	-
прочее*	-	-	0,5-1,0	-	6	3	3	-	-	3

1. Немецкий состав времен Второй мировой войны, использовавшийся в ручных сигнальных патронах [17].
2. Немецкий состав, использовавшийся в ручных сигнальных патронах образца 1939 г. [17].
3. Немецкий состав для сигнальной ракеты времен Второй мировой войны: \* – связующее [17].
4. Состав для немецкой сигнальной винтовочной гранаты [17].
5. Состав для немецкого многозвездного сигнального средства времен Второй мировой войны: \* – НЦ [17].
6. Состав для дымовых звездок: \* – декстрин свыше 100% [4].
7. Состав для 30 мм реактивного сигнального патрона дневного действия: \* – тальк [12].
- 8-9. Составы для применения в гражданской пиротехнике [40].
10. Английский состав PN758M для снаряжения сигнальной гранаты L46A1: \* – оксид цинка. Теплота реакции 1,36 МДж/кг. Плотность снаряжения 1,51 г/см<sup>3</sup>. Скорость горения 0,37 мм/сек, температура вспышки 190°C [42].

**Табл. 13.11. Сигнальные составы фиолетового дыма**

Состав	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
хлорат калия	25	26	30	25	23	22	28	26	23,5	22,5	29
сахароза	-	-	-	-	-	-	18	-	15,5	-	-
лактоза	22	54	49	-	-	24	-	-	-	22,5	25
сера	-	-	-	9	9	-	-	9	-	-	-
родамин Б	44	13	10	-	-	-	-	-	-	-	13
судан голубой Г	6	4	7	-	-	-	-	-	-	-	-
кизельгур	3	3	3	-	-	-	-	-	-	-	-
фиолетовый краситель	-	-	-	42	42	47	47,5	40	38	-	-
фталоцианиновый синий	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	17
1- (p-толиламино)-4-гидроксиантрахинон	-	-	-	-	-	-	-	-	-	40	-
терефталевая кислота	-	-	-	-	-	-	-	-	7,7	-	-
MgCO <sub>3</sub>	-	-	-	-	-	7	-	-	10,2	-	-
NaHCO <sub>3</sub>	-	-	-	24	26	-	4,5	25	5,1	-	-
связка*	-	-	1	-	-	-	-	2	2	-	-
прочее**	-	-	-	-	-	-	2	0,5	0,5	15	16

1. Немецкий состав времен Второй мировой войны, использовавшийся в ручных сигнальных патронах [17].
2. Немецкий состав времен Второй мировой войны, использовавшийся в ручных сигнальных патронах образца 1940 г. Изготавливался прессованием на ручном прессе [17].
3. Немецкий состав времен Второй мировой войны для авиационных сигнальных патронов: \* – метилцеллюлоза [17].

4. Американский состав 70-х годов 20 века. Использовался в ручных гранатах М18 и авиационных сигнальных патронах XM177. Плотность снаряжения:  $1,48 \text{ г/см}^3$  [23].
5. Американский состав. Использовался в ручных гранатах М18. Плотность –  $1,48 \text{ г/см}^3$  [23].
6. Американский состав 70-х годов 20 века. Использовался в 155 мм дымовых шашках М3 и М4. Плотность снаряжения:  $1,46 \text{ г/см}^3$  [23].
7. Американский состав: \*\* – асбест. Плотность снаряжения:  $1,4 \text{ г/см}^3$  [23].
8. Современный американский состав для гранат М18, содержит 0,63% стеарина. Смесь красителей содержит 80% DDA (1,4-диамино-2,3-дигидроантрахинон) и 20% Disperse Red 9: \* – поливиниловый спирт; \*\* – стеарин (св. 100%) [22].
9. Новый американский состав для гранат М18: \* – поливиниловый спирт; \*\* – стеарин (св. 100%) [22].
10. Финский состав: \*\* – тальк [18].
11. Состав для дымовых звездок: \*\* – жироранж [4].

- Согласно [10], чешские дымовые составы содержат 30-50% красителя, 30-35% сахарозы, 22-33% хлората калия, 3-10% бикарбоната натрия, 3-4% индустриального масла, 0-4% кизельгура и 0-3%  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ .
- Отечественные современные композиции: хлорат калия – 20-28%, тиомочевина – 8-12%, ДЦДА – 13-17%, фторкаучук – 5-9%, графит – 2-3%, краситель – 33-50% [35].
- Дымовые составы с продолжительным временем горения часто изготавливают с применением нитрата гуанидина. Например, известна смесь, содержащая 45% нитрата гуанидина, 35% целлулоида и 25% красителя. Подобные композиции характеризуются очень низкой температурой горения и использованием красителей с малой температурой сублимации [11].

### 13.2. Составы цветного дыма на основе неорганических пигментов

Составы цветных дымов, образующие при сгорании окрашенные неорганические пигменты, в настоящее время практически не применяются. Во время Второй мировой войны немцы использовали смесь оранжево-желтого дыма, содержащую 48% гексахлорэтана, 16% магния и 36%  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ . При ее сгорании выделяется хлорид железа III, бурого цвета, который в виде взвеси выглядит как оранжево-желтый туман. На воздухе хлорид железа III жадно поглощает влагу, образуя кристаллогидрат  $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ .

Следует упомянуть следующие композиции, образующие при сгорании окрашенные пигменты:

1. Желтый: ПХА – 25%, полибутадиен – 15%, йодид свинца – 60% [36].
2. Желтый: калия дихромат – 66%, висмута тетраоксид – 20%, Mg – 14% [1].
3. Желтый: висмута субнитрат – 80%, магний – 10%, диатомит – 5%, эпоксидная смола – 5% [27].
4. Оранжевый: калия дихромат – 35%, двуокись свинца – 50%, Mg – 15% [1].
5. Коричневый: двуокись свинца – 35%, окись меди – 50%, магний – 15% [1].
6. Розовый: кальция силицид – 37%, калия хромат – 9%, калия йодат – 54% [1].

Эти дымовые смеси имеют только одно преимущество над органическими дымами: при сгорании они формируют, кроме окрашенного дыма, яркое пламя и поэтому могут применяться для сигнализации как днем, так и ночью. Однако составы на неорганических пигментах характеризуются довольно ограниченной цветовой гаммой. Поэтому на практике предпочитают использовать комбинированные сигнальные патроны, содержащие как сигнальный дымовой состав на основе органических красителей для сигнализации днем, так и сигнальный пламенный состав для сигнализации ночью (см. рис. 13.3, г).

### 13.3. Составы цветного дыма мгновенной возгонки для целеуказания

Для целеуказания, например обозначения позиции снайпера, зачастую необходимо мгновенно сформировать облако цветного дыма. Это достигается двумя способами – подрывом заряда порошка красителя, смешанного с инертным веществом, либо специальными дымовыми составами, при сгорании способными почти мгновенно образовывать облако окрашенного дыма. Оба способа широко применяются на практике.

В СССР первые составы такого типа под названием «цветные пироксилиновые пороха» (ЦПП) были предложены в 1934 году инженером ВХНИИ С.Г. Дерябиным. Созданы они были в целях повышения безопасности производства цветных сигнальных дымов, т.к. перерабатывались по технологии пироксилиновых порохов и использовались также для сигнализации. Пироксилиновая основа содержалась в количестве 67-73%, остальные 27-33% составляли органические красители (жироранж, судан голубой, метиленовый голубой и родамин основной) [38]. Известны послевоенные работы англичан по созданию подобных смесей путем смешивания в одинаковых пропорциях бездымного пороха «ЕС» и красителя [1].

1. Немецкий мгновенно сгорающий состав желтого дыма времен Второй мировой войны: кадмий – 19,3%, сульфид кадмия – 20,1%, цирконий – 16,5%, алюминий – 4,0%, нитрат бария – 28,8%, перхлорат калия – 7,3%, фенолформальдегидная смола – 4,0% [17].
2. Немецкий мгновенно сгорающий состав белого дыма времен Второй мировой войны: пороховая мякоть – 60%, цинк – 40% [17].
3. Отечественный состав красного дыма типа ЦПП середины Великой Отечественной войны: судан III – 35%, пироксилин – 65%, дифениламин – 1,2% (сверх 100%) [39].
4. Отечественный состав желтого дыма типа ЦПП середины Великой Отечественной войны: аминазобензол – 40%, пироксилин – 60%, дифениламин – 1,2% (сверх 100%) [39].
5. В американских целеуказательных составах времен Второй мировой войны использовалась смесь 45% нитрата гуанидина, 10% антрацена и 45% различных органических красителей [28, 43]. Причем антрацен и нитрат гуанидина в данном случае являются простыми разбавителями.

6. Отечественный быстрогорящий состав красного дыма для снаряжения гранат к подствольному гранатомету [37]: 1-метиламиноантрахинон – 50%, дымный ружейный порох – 45%, пористый бездымный порох – 5%. Скорость горения 6,2 мм/сек. Стоит отметить, что попытку использовать дымный порох в качестве термической основы для курящихся сигнальных дымовых составов предпринимали немцы еще во время Второй мировой войны, однако это так и не привело к успеху [17].
7. Состав для снаряжения пристрелочных пуль: двуокись свинца – 85%, алюминий – 15% [29].

## Литература

1. Ellern H. Military and Civilian Pyrotechnics. Chemical Publishing Company Inc. New York. 1968.
2. Г.С. Зайцев, А.Я. Кузнецов. Дымовые средства и дымообразующие вещества. - М.: Изд-во МО СССР, 1961.
3. Engineering Design Handbook. Military Pyrotechnics Series. Part One. Theory and Application. US Army Materiel Command. AMCP 706-185. 1967.
4. Takeo Shimizu. Fireworks: the Art, Science and Technique. Pyrotechnica Publication. 1981.
5. Henry B. Faber. Military Pyrotechnics, The History and Development of Military Pyrotechnics, 3 Vol., Government Printing Office, Washington, 1919.
6. A.P. Hardt. Pyrotechnics. Pyrotechnica Publications. 2001.
7. L.T. Dunnett. Services Textbook of Explosives. Ministry of Defence. JSP333. 1974.
8. Шидловский А.А. Основы пиротехники. - М.: Изд-во оборонной пром-ти, 1943.
9. Tenney L. Davis. Chemistry of Powders and Explosives. NY. 1943.
10. Brebera Stanislav etc. Specialni Technica. I Dil. Гл. ред. Urban Ladislav. Praha 1976.
11. Conkling J.A. Chemistry of Pyrotechnics. Basic Principles and Theory. NY. 1985.
12. Материалы Интернет-ресурса dzromon.narod.ru.
13. Army Ammunition Data Sheets: Military Pyrotechnics. TM 43-0001-37. Headquarters Department of the Army. Washington, DC, 6 January 1994.
14. Army Ammunition Data Sheets for Grenades. TM 43-0001-29. Headquarters Department of the Army. Washington, DC, 30 June 1994.
15. Pirotechnicke Imitacni Prostredky. Del-27-18. Ministerstvo Narodni Obrany. Praha 1985.
16. Army Ammunition Data Sheets Artillery Ammunition Guns, Howitzers, Mortars, Recoilless Rifles, Grenade Launchers and Artillery Fuzes. TM 43-0001-28. Headquarters Department of the Army. Washington, DC, 27 October 2003.
17. The Chemical Compositions of German Pyrotechnic Smoke Signals. Report by Mr. Henry, J. Eppig, U.S. Ord. London. 1945.
18. Matti Hemmil, Maija Hihkio, Kaija Linnainmaa Evaluation of the Acute Toxicity and Genotoxicity of Orange, Red, Violet and Yellow Pyrotechnic Smokes In Vitro. Propellants, Explosives, Pyrotechnics 32, No. 5 (2007).
19. A. Chin and L. Borer. Identification of Combustion Products from Colored Smokes Containing Organic Dyes. Propellants, Explosives, Pyrotechnics 8, 112-118 (1983).
20. Arthur W. Garrison etc. Fate of Colored Smoke Dyes. US Army Medical Research and Development Command. Fort Detrick. Frederick, Maryland 1992.
21. Matti Hemmilä, Maija Hihkio, Matti Harkoma, Kaija Linnainmaa. Toxicity Evaluation of Orange Signalling Smoke. Proceedings of the Twenty-Ninth International Pyrotechnics Seminar Westminster, CO. July 14-19, 2002.
22. Mrs. Tamera Rush. Demonstration of the Replacement of the Dyes and Sulfur in the M18 Red and Violet Smoke Grenades: Cost & Performance Report. WP-0122. 2007.
23. F. L. McIntyre, R.M. Rindner. A Compilation of Hazard and Test Data for Pyrotechnic Compositions. ARLCD-CR-80047. 1980.
24. Katherine von Stackleberg, Craig Amos, Thomas Smith, Don Crokek, and Bruce MacAllister. Military Smokes and Obscurants Fate and Effects. ERDC/CERL TR-04-29. 2004.

25. L. de Yong, B. Park and F. Valenta. A Study of the Radiant Ignition of a Range of Pyrotechnic Materials Using a CO<sub>2</sub> Laser. MRL-TR-90-20. 1991.
26. P. Lessard and G. Couture. Polymer-Bonded Coloured Smoke Compositions. Propellants, Explosives, Pyrotechnics 13, 58-61 (1988).
27. J.E. Tanner and H.A. Webster. Colored Smoke-Flame. Proceedings of the Sixth International Pyrotechnics Seminar 12-21 July 1978.
28. Toxic Hazards Associated with Pyrotechnic Items. NAVWEPS OP 2793. 1963.
29. James Smyth Wallace. Chemical Analysis of Firearms, Ammunition, and Gunshot Residue. CRC Press. Taylor & Francis Group. Boca Raton. 2008.
30. Пат. BG64003 от 2000 г.
31. Пат. PL156037 от 1987 г.
32. Пат. US4455178 от 1983 г.
33. Пат. RO105799 от 1989 г.
34. Пат. US3430569 от 1967 г.
35. Пат. RU2369590 от 2006 г.
36. Пат. US4812180 от 1988 г.
37. Пат. RU2240300 от 2003 г.
38. Вернидуб И.И. На передовой линии тыла. - М.: ЦНИИИИТКПК. 1993.
39. Вернидуб И.И. Боеприпасы – фронту. Очерки. - Москва – Сергиев Посад, 2003.
40. Платов Г.А. Пиротехник. Искусство изготовления фейерверков. - М., 2004.
41. Пат. RU2462442 от 2011 г.
42. P. Barnes, L. de Yong, J. Domanico, P. Twadawa and F. Valenta. A Comparison Between Several Standard Methods Used to Characterize the Ignition/Ignition Transfer of Pyrotechnic Compositions – A Collaborative Study. Part I: Data. Department of Defence, DSTO, Material Research Laboratories Melbourne, Victoria. Report MRL-R-1043. 1987.
43. Technical Manual. Ordnance Data for Toxic Hazards Associated with Pyrotechnic Items. NAVSEA SW050-AC-ORD-010. 2005.
44. Tomasz Sałaciński, Waldemar Witkowski, Andrzej Maranda, Stanisław Cudziło, Leszek Szymańczyk, Mateusz Szala. Wpływ składu chemicznego na właściwości niebezpieczne wyrobów pirotechniki widowiskowej. High-Energetic Materials. Volume 2. Institute of Industrial Organic Chemistry. Warszawa. 2010.
45. Пырьев Е.В., Резниченко С.Н. Бомбардировочное вооружение авиации России 1912-1945 гг. - М.: Редакционно-издательский центр Генерального штаба ВС РФ, 2001.
46. Взрывчатые вещества, пиротехника, средства инициирования в послевоенный период: Люди. Наука. Производство. Второе издание. /Коллектив авторов. - М.; СПб.: Издательство «Гуманистика». - 936 с, 2002.

## **Глава 14. Аэрозольгенерирующие составы**

Аэрозольгенерирующими составами называют пиротехнические смеси, формирующие при сгорании аэрозоль какого-либо действующего вещества. Термин «аэрозольгенерирующие» подразумевает образование химически активного дыма при сгорании, тогда как в маскирующих и сигнальных дымах, наоборот, желательно иметь наименьшую химическую активность дыма в сочетании с наибольшей оптической активностью.

**Различают 4 типа аэрозольгенерирующих составов:**

- составы раздражающих и отравляющих дымов;
- составы для борьбы с вредными насекомыми и микроорганизмами;
- составы для воздействия на погодные условия;
- аэрозольгенерирующие составы для тушения пожаров.

### **14.1. Составы раздражающих и отравляющих дымов**

Раздражающие вещества (ирританты) используются для разгона демонстраций, снаряжения средств самообороны, а также в военном деле для сковывания действий противника или проверки работоспособности средств индивидуальной защиты. Ирританты относятся к группе «нелетальных» отравляющих веществ (инкапсиантов), в том смысле, что их летальная доза на несколько порядков выше, чем действующая. В свою очередь, ирританты подразделяются на лакриматоры (слезоточивые вещества), стерниты (вещества, вызывающие раздражение верхних дыхательных путей) и вещества комбинированного действия. Как правило, представляют собой твердые кристаллические соединения, способные сублимироваться при нагревании с образованием аэрозоля. При попадании этого аэрозоля на кожу и слизистые оболочки возникает стойкое раздражение, сопровождающееся покраснением и зудом. Проникновение аэрозоля в верхние дыхательные пути вызывает кашель и чихание.

**Существуют 3 основных метода приведения ирритантов в боевое состояние, из которых только последний является пиротехническим:**

- Распыление раствора раздражающего вещества в каком-либо органическом растворителе под давлением инертного газа. На этом принципе основано действие т.н. «перцовых баллончиков».
- Распыление действующего вещества, смешанного с наполнителем, путем подрыва центрального заряда ВВ. При разрыве создается облако, приводя, таким образом, ирритант в боевое состояние.
- Возгонка ирритантов за счет теплоты, выделяемой при сгорании пиротехнического состава. Такими составами снаряжаются раздражающие гранаты, артиллерийские боеприпасы и прочие специальные средства.

Из большого ассортимента подобных компонентов в качестве действующих веществ в современных пиротехнических средствах распыления на практике применяются 3 ирританта – агент CN, агент CS и агент CR. Раньше находил применение агент DM (адамсит), характеризующийся сильным стернитным и рвотным

действием, при отсутствии слезоточивого эффекта. Однако из-за близости действующей концентрации и порога непереносимости его скорее относят к боевым ОВ, нежели к «полицейским газам». Агент CR в пиротехнических раздражающих средствах встречается довольно редко из-за легкости окисления при повышенной температуре [1, 2, 3].

### **Краткая справочная характеристика раздражителей [2]:**

- *Агент CN (Хлорацетофенон, ХАФ, «Черемуха»)*

Бесцветные кристаллы с запахом цветов черемухи. Т пл. 59°C, Т кип. 245°C. Плотность 1,318 г/см<sup>3</sup>. Растворимость в воде 0,1% при 20°C. Хорошо растворим в большинстве полярных растворителей. Летучесть 0,11 мг/л при 20°C. Химически и термически весьма устойчив. Слезотечение возникает при концентрации 0,002 мг/л. Порог непереносимости – 0,01 мг/л, при этом слезоточивый эффект сопровождается раздражением лица и шеи. При концентрации 0,08 мг/л и экспозиции 1 мин. человек выводится из строя на 15-20 мин. Смертельная концентрация 10-11 мг/л. На лиц, находящихся под алкогольным или наркотическим опьянением, а также агрессивных животных, действует слабо. Защита – противогаз.

- *Агент CS (Хлорбензальмалондинитрил, «Сирень»)*

Бесцветные кристаллы с запахом цветов сирени. Т пл. 95°C, Т кип. 315°C. Плотность 1,04 г/см<sup>3</sup>. Растворимость в воде 0,01% при 30°C. Хорошо растворим в большинстве полярных растворителей. Летучесть 0,00012 мг/л при 20°C. Химически и термически устойчив, однако менее устойчив, нежели агент CN. Слезотечение возникает при концентрации 0,001 мг/л. Порог непереносимости – 0,005 мг/л в течение 1 мин., при этом слезоточивый эффект сопровождается жжением в области носоглотки, затрудненными болями, кашлем и покраснением кожи. При концентрации 0,27 мг/л и экспозиции 10 мин. поражаются легкие. Смертельная концентрация – 6,1 мг/л при экспозиции 10 мин. В отличие от агента CN, эффективен против лиц, находящихся под алкогольным или наркотическим опьянением, и агрессивных животных. На людей оказывает тератогенный эффект (нарушение эмбрионального развития с возникновением уродств). Защита – противогаз и средства защиты кожи. В качестве первой помощи при легком воздействии помогает обработка 2% раствором соды или промывание обильным количеством воды.

- *Агент CR (Дибензоксазетин)*

Желтые кристаллы с сильным запахом перца. Т пл. 72°C, Т кип. 340°C. Растворимость в воде 0,008%. Хорошо растворим в большинстве полярных растворителей, умеренно – в неполярных. Летучесть 0,0012 мг/л при 20°C. Химически и термически менее устойчив, чем агент CS, и особенно CN. Слезотечение возникает при концентрации 0,000001 мг/л. При 0,0001 мг/л дополнительно возникает раздражение верхних дыхательных путей и крапивное действие на кожу. Порог непереносимости – 0,001 мг/л. Несмотря на гораздо меньшие действующие концентрации, из-за термического разложения в пиротехнических средствах по эффективности он приблизительно соответствует агенту

CS. Защита – противогаз и средства защиты кожи. Имеется информация, что обладает канцерогенными свойствами при меньшей, чем у CS, токсичности. В США классифицируется, как боевое ОВ раздражающего действия, и поэтому запрещен для применения полицией. Агент CR нельзя смывать с кожи водой, т.к. при этом раздражение только усиливается.

• *Агент DM (Адамсит, 10-хлор-5,10-дигидрофенарсазин)*

Желтые кристаллы. Технический продукт темно-зеленый. Т пл. 195°C, Т кип. 410°C с возгонкой. Плотность 1,648 г/см<sup>3</sup>. Хорошо растворим в большинстве полярных растворителей, плохо – в неполярных. Летучесть  $2 \cdot 10^{-5}$  мг/л при 20°C. Химически и термически очень стоек. Пороговая концентрация раздражающего действия 0,0001 мг/л. Порог непереносимости – 0,0004 мг/л. При воздействии на организм вызывает сильное раздражение верхних дыхательных путей, сопровождающееся кашлем и чиханием, при больших концентрациях наблюдается рвотный рефлекс. Высокие концентрации вызывают отек легких и смерть. Смертельная концентрация – 1,41 мг/л при экспозиции 2 мин. Из-за способности вызывать рвоту обладает сильным изматывающим действием на противника. Защита – противогаз.

Первым историческим упоминанием о применении раздражающих газов является греко-спартанская война (428 г. до н.э.). Спартанцы сжигали смесь из древесных щепок, смолы и серы под стенами греческого города Платея с целью вымотать противника. Спустя 5 веков древнегреческий философ Плутарх описывал, как подобным образом римляне выкуривали противника из пещер на территории современной Испании.

Первый, по-настоящему эффективный ирритант – хлорпикрин – был получен в 1848 году, его активно использовали в Первую мировую войну в качестве ОВ раздражающего действия. Но, как «полицейский газ», хлорпикрин не получил распространения из-за высокой токсичности. В настоящее время хлорпикрин применяется как учебное ОВ для проверки индивидуальных средств защиты.

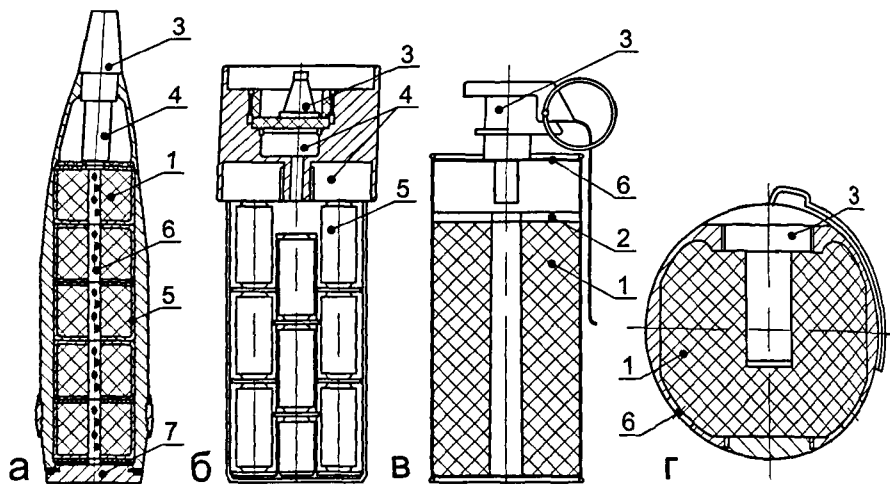
На вооружение полиции ирританты впервые поступили в 1912 году во Франции, где представители правопорядка разгоняли группировки хулиганов при помощи этилбромацетата. К 1914 году Франция и Германия уже обладали внушительным арсеналом боевых раздражающих ОВ. С началом Первой мировой войны многие солдаты брали баллончики со слезоточивым газом на фронт. Впервые в качестве боевого ОВ в 1915 г. немецкими войсками был применен хлор, а затем иприт и другие вещества. К концу войны на вооружение поступили курящиеся боеприпасы с адамситом (DM) и открытым еще в 1869 г. хлорацетофеноном (CN). Однако на практике эти боеприпасы почти не применялись. К 1920 году в связи с ростом количества забастовок и увеличения преступности оба этих вещества были приняты на вооружение американской полицией. Таким образом, вплоть до Второй мировой войны адамсит и хлорацетофенон оставались единственными полицейскими ОВ.

Женевским протоколом 1925 года ирританты были приравнены к обычным ОВ и запрещены. На съезде Лиги наций в 1930 году этот протокол подписали не

все страны, например, США мотивировали свой отказ тем, что ирританты являются гораздо более гуманным оружием, чем традиционные средства поражения. Тем не менее на конференции Лиги по разоружению в 1932 году единогласно было провозглашено запрещение химического оружия, в том числе и ирритантов как средств ведения войны [12].

С конца 50-х годов 20 века хлорацетофенон и адамсит в США начали заменять более эффективным и менее токсичным хлорбензальмалондинитрилом (агентом CS, открытым в 1928 г.), который до сих пор считается основным «полицейским газом». Он широко использовался англичанами на Кипре в 1961 году, а позже – войсками США в боевых действиях во Вьетнаме, где показал довольно высокую эффективность как средство выкуривания солдат Вьетконга из тоннелей [13]. В конце 80-х в Южной Африке для разгона толпы военные распыляли дибензоксазепин (агент CR). Агент CR был разработан в Англии еще в 1962 году и широко использовался там против бойцов ИПА. Однако CR плохо подходит для курящихся пиротехнических изделий по причине довольно невысокой термической стойкости, обычно им начинают «перцовые баллончики» в виде раствора в органических растворителях.

В ряде литературных источников указывается на то, что вещество CS необходимо исключать из перечня разрешенных «полицейских газов» из-за тератогенного действия на организм человека. Однако CS остается на вооружении полиции



**Рис. 14.1. Американские боеприпасы, снаряженные дымовыми смесями раздражающего действия [14, 15].**

а) – 155 мм кассетный артиллерийский снаряд XM631, б) – 66 мм кассетная граната L96A1, для запуска с транспортного средства, в) – ручная граната ABC-M7A2, г) – ручная граната M47.

1 – аэрозольный пиротехнический состав раздражающего действия, 2 – воспламенительный состав, 3 – воспламенитель, 4 – вышибной заряд, 5 – кассеты с аэрозольным составом, 6 – выхлопные отверстия, 7 – вышибное днище.

и армии США (а также других стран) из-за отсутствия весомых альтернатив для применения в пиротехнических спецсредствах. Крупномасштабное использование этого вещества американской полицией было зафиксировано при разгоне демонстрации антиглобалистов в Сизтгле в 2000 году [12, 13].

Агент CS не отличается высокой термической стойкостью, поэтому его частицы покрывают смесью сахарозы и воска (или желатином) и только потом смешивают с термической основой.

В 60-ые годы 20 века в США в качестве действующего вещества для нетоксичных курящихся спецсредств был запатентован аспирин (ацетилсалициловая кислота), однако из-за пониженной эффективности практического применения он так и не нашел.

Вместо ирритантов могут быть использованы другие вещества, способные к возгонке, например вещества, оказывающие воздействие на психику (BZ, EA3443, EA3834A и др). Например, в патенте [18] предлагается композиция из 40% азопентона и 60% агента EA3834A.

**Пиротехнические средства, снаряженные ирритантами, бывают 2-х типов:**

- Курящиеся спецсредства, снаряженные пиротехническим составом, содержащим ирритант. Эти смеси подбираются подобно составам сигнальных дымов, только вместо красителя используют ирритант. Возгоняясь за счет сгорания термической основы, он формирует раздражающий аэрозоль. Термическая основа обычно представляет собой либо бездымный порошок, либо комбинацию хлората калия, сахарозы и пламегасителя. Подобные средства наиболее распространены.
- Курящиеся спецсредства с отдельным снаряжением активной и пиротехнической шашки. Агенты CN, CS и CR относятся к веществам другого класса опасности, нежели пиротехнические составы, и требуют особых мер обращения на производстве. Например, требуется особый пиротехнический цех для изготовления составов и изделий раздражающих дымов, что приводит к усложнению технологического процесса и удорожанию производства. Эта проблема частично решается путем микрокапсулирования ирританта или смешивания его с гранулами готовой термической основы на финальных стадиях производственного процесса.

Более удобно использовать отдельное зарядание. При отдельном зарядании применяется т.н. «топливная» шашка, осуществляющая процесс термовозгонки и вынос ирританта из второй, активной шашки в окружающую среду. Вторая шашка может изготавливаться на предприятии, которое производит ирританты, а конечная сборка изделия осуществляться на пиротехническом производстве. Эта концепция реализована в ряде отечественных и зарубежных изделий. Следует указать на тот факт, что топливные смеси (Fuel Mixture) применяют не только в случае отравляющих дымов, но и для возгонки масел в масляных дымовых шашках типа «вентури».

Табл. 14.1. Составы раздражающих дымов курящегося типа

Состав	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
хлорат калия	-	-	20	22	30	27	26	-	-	26	29	-	28	35
нитрат калия	-	-	-	-	-	-	-	40	-	-	-	-	-	-
сахароза	-	-	20	22	-	18	-	-	-	-	-	-	-	-
лактоза	-	-	-	-	18	-	20	-	-	-	-	-	-	15
тиомочевина	-	-	-	-	-	-	-	-	-	13	-	-	-	-
тиосемикарбазид	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	11	-
агент DM	-	21,0	-	-	-	-	-	40	43,2	-	-	-	-	-
агент CN	40	21,0	25	24	-	-	-	-	-	-	-	40	-	-
агент CS	-	-	-	-	40	41	42	-	-	35	46	-	60	25
порох EC	57,4	55,4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
MgO	2,6	2,6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
диатомит	-	-	5	3	-	-	-	5	-	-	-	-	-	-
KHCO <sub>3</sub>	-	-	30	29	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
MgCO <sub>3</sub>	-	-	-	-	9	12	-	-	-	-	-	-	-	-
связка*	-	-	-	-	3	2	3,6	-	28,3	6	25	12	-	25
прочее **	-	-	-	-	-	-	12	15	28,2	20	-	48	1	-

1. Состав для снаряжения американских дымовых гранат до Второй мировой войны [4].
2. Состав для снаряжения американских дымовых гранат M6 CN-DM (40-50-ые гг. 20 века) [4].
3. Состав для снаряжения американских дымовых гранат M7A1 (1950-ые годы 20 века) [4].
4. Альтернативный состав для снаряжения американских гранат M7A1 (1950-ые годы) [4].
5. Используется в американских авиабомбах CSE159 и шашках XM15: \* – НЦ [16].
6. Используется в американских 40 мм гранатах к ручному гранатомету, в гранатах XM47: \* – декстрин, впоследствии заменен на НЦ [16].
7. Американская смесь L1: \* – НЦ сверх 100%; \*\* – каолин [1].
8. Отечественный раздражающий состав для снаряжения курящейся авиабомбы КРАБ-25яд образца 1939 года. В 1940 г. бомба была снята с производства: \*\* – крахмал [65, 72].
9. Немецкий состав времен Второй мировой войны: \* – ФФС; \*\* – перхлорат аммония [75].
10. Немецкий состав: \* – поливинилацетат; \*\* – мел [19].
11. Американский состав: \* – литевая смесь малеинового ангидрида, полисульфидной смолы и диглицидилового эфира [20].
12. Отечественный состав для снаряжения некоторых спецсредств: \* – идитол, нанесенный на гранулы дымного пороха; \*\* – дымный порошок [21].
13. Американский состав: \*\* – дихромат калия [22].
14. Английский состав PN819: \* – полиэфирный каучук [69].

Табл. 14.2. Составы топливных смесей для возгонки различных химикатов

Состав	1	2	3	4	5	6	7	8
хлорат калия	42	-	-	-	-	-	-	-
нитрат калия	-	70	8	-	4	-	-	3
нитрат аммония	-	-	74	85	82	86	82	65
ПХА	-	-	-	-	-	-	-	10
сахароза	28	-	-	-	-	-	-	-
древесный уголь	-	-	16	-	11	11	7	12
графит или сажа	-	+	-	2	-	-	-	-
синтетич. каучук	-	-	-	12	-	-	-	-
идитол	-	30	-	-	-	-	-	-
олифа	-	-	-	-	3	3	3	-
прочее*	30	-	2	1	-	-	8	10

1. Американский состав «Fuel mixture VII» для возгонки агента CS в ручных гранатах: \* – карбонат магния. Также содержит НЦ сверх 100% [16, 17].
2. Отечественный состав для возгонки ХАФ в некоторых изделиях [23].
3. Использовался в США в американских дымовых шашках М6: \* – дизельное топливо [16].
4. Состав использовался в американских плавучих дымовых шашках AN-M7A1: \* – дихромат аммония [16].
5. Использовался в США для тренировочных гранат типа «вентури» [5].
6. Использовался в США в шашках типа «вентури» в запрессовке первого слоя [5].
7. Использовался в США в шашках типа «вентури» в качестве основного заряда: \* – хлорид аммония [5].
8. Использовался в США в шашках М6 типа «вентури» в качестве основного заряда: \* – эпоксидная смола [70].

## 14.2. Составы для борьбы с вредными насекомыми и микроорганизмами

Пиротехнические составы могут быть эффективно использованы для распыления различных ядохимикатов, вызывающих гибель насекомых, плесени и бактерий. По составу они подобны композициям раздражающих и отравляющих дымов, т.е. содержат теплогенерирующую основу и действующее вещество – ядохимикат. Недавно в США были разработаны реакционные материалы, сочетающие комплексное бактерицидное, фугасное и зажигательное действие [56, 57, 58]. Их предполагается использовать против подземных фабрик бактериологического оружия.

### Различают [6]:

- *Составы инсектицидного и акарицидного действия* для уничтожения вредных насекомых. Действующие вещества: ДДТ, линдан, хлорциклодиены, пиретроиды, тедион (акарицид – средство для борьбы с клещами). Такие составы широко применялись войсками США для сопровождения боевых операций в джунглях с целью уничтожения москитов и других кровососущих насекомых. В СССР инсектицидные и акарицидные шашки сжигали с целью уничтожения комаров и клещей при походах пионеров в лес. Стоит отметить, что типичные хлороорганические ядохимикаты типа ДДТ и линдана в конце 80-х, начале 90-х годов были сняты с производства во всех развитых странах и, соответственно, в современных инсектицидных шашках не используются. Кроме дымовых шашек, применяются специальные тлеющие шнуры, состоящие из пиретроида (неопинамин) – 20%, масла гераниевого – 0,5%, нитрата калия – 5% и хлопчатобумажной основы – 74,5% [62].
- *Составы фунгицидного действия* для уничтожения плесени и вредных грибов.

Действующие вещества – дихлорнафтохинон, соли дидециламмония, сера и  $\text{SO}_2$ . При помощи инсектицидных и фунгицидных составов обрабатывают теплицы и овощехранилища для ликвидации очагов плесени и насекомых-вредителей. Шашками-фумигаторами в обязательном порядке обрабатывают зерновые склады и трюмы кораблей.

- *Составы бактерицидного действия для уничтожения бактерий.*  
Действующие вещества – соли дидециламмония, параформальдегид, йод. Бактерицидные смеси могут быть использованы для обеззараживания помещений и местности с целью ликвидации бактериального и вирусного заражения, например при падеже скота.
- *Составы для защиты растений от заморозков.*  
Генерируют дым, который во влажном воздухе медленно гидролизуетс с тепловым эффектом и способствует аккумуляции тепла.

**Табл. 14.3. Инсектицидные и акарицидные составы**

Состав	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
хлорат калия	-	19	20	23-26	20	20	-	25	20	14	30	25	24
нитрат аммония	-	-	-	-	-	-	6	-	-	-	-	-	-
ДНПТ***	44	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
сахароза	-	23	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ДЦДА	-	-	-	4-6	30	20	-	7	-	-	-	30	-
антрацен	-	-	-	9-12	-	-	-	3	-	-	-	-	-
тиомочевина	-	-	-	-	-	-	-	-	-	7,5	-	-	-
тиурам	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	12	-	12,5
хлорид аммония	-	-	-	9-12	-	-	-	22	12	12	-	10	-
крахмал	-	-	-	-	-	5	4	-	-	-	-	-	-
мочевина	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	30	-	33,5
древесные опилки	-	-	-	-	-	-	17	-	-	-	-	-	-
NaHCO <sub>3</sub>	-	-	13,3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ядохимикат*	50	58	33,3	50-52	50	30	61	40	60	66,5	8	35	10
прочее**	6	-	33,4	-	-	25	12	3	8	-	20	-	20

1. Американская композиция: \* – пиретроиды; \*\* – пиперонила бутоксид; \*\*\* – динитрозолен-таметилентетрамин [7].
2. Американская композиция: \* – ДДТ или его смесь с линданом [8].
3. Американская литьевая композиция: \* – вещество «dursban» (хлорпирифос); \*\* – тиокол [24].
4. Отечественная композиция: \* – линдан [6].
5. Отечественная акарицидная композиция: \* – тедион [6].
6. Отечественная композиция: \* – хлорофос; \*\* – тальк [60].
7. Отечественная композиция: \* – линдан; \*\* – 7% торфа, 5% воды [61].
8. Отечественная композиция по ТУ 84-242-77: \* – ДДТ; \*\* – декстрин [61].
9. Отечественная композиция инсекто-акарицидного действия: \* – линдан; \*\* – уротропин [61].
10. Отечественная композиция по ТУ 84-243-77 для изготовления инсектицидной шашки «Вмола»: \* – ДДТ [61].
11. Современная отечественная композиция: \* – перметрин; \*\* – 9% смолы ПХВ, 5% трикрезил-фосфата, 6% аэросила [61].
12. Современная отечественная композиция: \* – пиретроид (неопинамин) [62].
13. Современная отечественная композиция: \* – перметрин; \*\* – 10% сополимера винилхлорида с винилацетатом, 5% трибутилфосфата, 5% аэросила [54].

### **Фунгицидные составы:**

1. Отечественный состав для серных шашек: сера – 75%, калиевая селитра – 17%, диатомит – 8% [25].
2. Отечественный состав для серных шашек (модифицированный): сера – 80%, калиевая селитра – 10%, диаммонийфосфат – 5%, аэросил – 5% [26].

3. Отечественный состав: дихлорнафтохинон – 58%, хлорат калия – 22%, хлорид аммония – 10%, ДЦДА – 5%, антрацен – 5% [6].
4. Отечественный состав для генерации аэрозоля элементарной серы: нитроцеллюлоза – 40%, дифениламин – 1,5%, сульфат калия – 2%, бисульфат калия – 0,5%, сера – 56% [27]. В качестве термической основы вместо НЦ может быть использована смесь аммиачной селитры с углем.
5. Отечественный состав: смесь хлората калия – 35 г, тиомочевина – 20 г, мочевины – 15 г и хлорида аммония – 10 г пропитывают 32 г 80% спиртового раствора ди-н-децил-аммония бромидом и сушат [28].
6. Отечественный состав: тиабендазол (ТБА) – 30%, хлорат калия – 38%, мочевины – 8%, тиомочевина – 19%, хлорид аммония – 5% [63].
7. Отечественный состав: трилан – 45-50%, хлорат калия – 22-25%, мочевины – 15-20%, тиурам – 5-10%, хлорпарафин ХП-470 – 2-3%, аэросил – 1-2% [71].

#### **Бактерицидные составы:**

1. Отечественный бактерицидный состав: йод – 35-42%, нитрат калия – 38-42%, крахмал – остальное [29].
2. Отечественный бактерицидный состав для ветеринарной обработки: йод – 28-38%, нитрат калия – 36-42%, N-хлорсукцинимид – 8-12%, крахмал – остальное [30].
3. Современный французский бактерицидный состав: нитрат аммония – 48%, ДЦДА – 32%, аэросил – 10%, 4-гидроксисалициланилид – 10% [64].
4. Американский реакционный материал бактерицидного действия: пентоксид йода – 75,2%, алюминий – 20%, карбонат кальция – 4,8% [56].
5. В американских патентах [57, 58] заявлена концепция изделий типа НТИ (High Temperature Incendiary) для нейтрализации подземных фабрик по производству биологического и химического оружия. Эти изделия сочетают проникающий, зажигательный и бактерицидный эффект за счет образования галогенов, в том числе и атомарных.

#### **Состав для защиты растений от заморозков:**

Использовался в 60-х годах 20 века в комплексе защиты растений «Урожай»: ГХЦГ – 74%, феррофосфор – 22%, алюминий – 4% [9].

### **14.3. Составы для воздействия на погодные условия**

Во второй половине 40-х годов 20 века была разработана концепция влияния на погодные условия при помощи аэрозолей химических веществ с целью предотвращения выпадения града или развития штормовой погоды. Первые опыты с сухим льдом были проведены в 1946 г., с йодидом серебра – в 1947 г. (Vonnegut). Побочным эффектом использования специальных аэрозолей является исчезновение облаков и/или тумана. Физически это влияние осуществляется путем распыления аэрозоля йодидов серебра и свинца в зоне облаков при помощи распылителей, установленных на самолете, либо сгорания специальных пиротехнических составов, доставляемых к цели ракетами или противоградовыми снарядами. При

этом йодиды указанных элементов могут находиться в пиротехническом составе как в готовом виде, так и образовываться в процессе горения.

Кристаллы йодидов свинца и серебра по структуре очень похожи на кристаллы льда и поэтому являются эффективными центрами кристаллизации капель воды из перенасыщенной атмосферы. В результате осадки выпадают до прохождения грозового фронта над защищаемой от града местностью.

Попытку распылить йодид серебра пиротехническим способом впервые осуществил Дэвис в конце 40-х годов 20 века [66]. Он привязывал к воздушным шарам 15-граммовый заряд дымного пороха, содержащего 1,5% йодида серебра. Заряд был снабжен замедлителем и при достижении слоя облаков разрывался, распыляя йодид серебра.

Первые полноценные аэрозольгенерирующие составы курящегося типа, разработанные в 50-60-х годах 20 века, содержали до 60% активного вещества в пересчете на йодиды. В результате стоимость противоградовых составов была высокой, а активные компоненты выделялись в виде довольно крупных частиц. В 1968 г. в СССР была испытана смесь нового поколения с уменьшенным содержанием дорогостоящего йодида серебра: ПХА – 52%, фенолформальдегидная смола (ФФС) – 18%, йодид аммония – 30%, йодид серебра – 2% (сверх 100%). Выход льдообразующих ядер составлял  $10^{13}$  [73, 74]. Кроме йодидов, испытывались вещества, способные образовывать водородные связи с молекулами воды: флороглюцин, ацетилацетонат меди, металдегид. Например, известен состав ЛТИ-12, содержащий 35-36% нитрата аммония, 52-54% дихромата аммония, 0,3% йодида серебра и 10-12% флороглюцина [68].

В современных композициях за счет модификации свойств состава удается понизить содержание дефицитных йодидов до 2-4% с одновременным увеличением количества активных частиц – центров кристаллизации [7]. По экологическим соображениям составы на основе свинца в настоящее время не применяются.

### **Основные характеристики противоградовых составов:**

- *Выход льдообразующих ядер* – количество активных частиц, являющихся центрами кристаллизации воды. Определяется при температурах  $-6^{\circ}\text{C}$  и  $-10^{\circ}\text{C}$  за счет сгорания 1 г состава.
- *Порог льдообразующего действия* – температура, при которой начинается льдообразование. Обычно находится в пределах от  $-1,5$  до  $-6^{\circ}\text{C}$ . По возможности эта температура должна быть выше.

Для улучшения льдообразующего действия йодида серебра используют различные модификаторы; например, в патенте [31] предложена смесь, содержащая комплексное соединение  $3\text{AgJ}\cdot\text{CuJ}$ .

Интересно отметить, что существуют противоградовые составы, не содержащие дефицитных компонентов. Так, например, в патенте [32] заявлен южноафриканский состав, содержащий 18% связующего, 5% магнезия, 10% хлорида натрия, 65% перхлората калия и 2% карбоната лития. Причем этот состав по содержанию компонентов соответствует американской морской дымовой смеси «Salty Dog», описанной в Главе 12.

По существующей классификации [68], различают составы:

• *На баллиститной пороховой основе.*

Перерабатываются такие составы по технологии баллиститных порохов. Представляют собой твердые топлива баллиститного типа с присадкой 2-5% йодида серебра. Могут применяться в качестве заряда твердого топлива второй ступени ракетного двигателя противораковой ракеты, что позволяет заметно увеличить полезную нагрузку. В качестве примера можно привести топлива ВБС-10 и ВБС-11, содержащие 48-46,5% НЦ, 42,5-41% нитроглицерина, 2% йодида серебра, 1,5% централита, 2-5% алюминия АСД-1, остальное – добавки: вазелин, мел, стеарат цинка [68].

• *Перерабатываемые по технологии смесевых ракетных топлив.*

Содержат отверждаемые каучуки и смолы. Окислителем обычно является перхлорат аммония.

• *Перерабатываемые по технологии пиротехнических производств.* Перерабатываются глухим прессованием. Окислителями обычно являются перхлораты аммония и калия.

Табл. 14.4. Составы для воздействия на погодные условия

Состав	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
AgI/O <sub>2</sub>	75	-	24,1	23,5	74,05	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Pb(I/O <sub>2</sub> )	-	75	-	-	-	48,9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
AgI	-	-	-	-	-	-	5	2	40	-	50	8	10	4	10	2	2	0,4	2	2
Pb	-	-	-	-	-	-	-	-	-	20-25	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
KI	-	-	-	-	-	-	-	21	-	-	-	12	-	-	-	30	4	-	10	-
NH <sub>4</sub> I	-	-	-	-	-	-	-	-	-	25-34	-	-	15	-	11	-	-	5	-	-
CaI	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5	-	-	-	-	-
KIO <sub>3</sub>	-	-	-	53,6	-	37,6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
KNO <sub>3</sub>	-	-	43,7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ПХА	-	-	-	-	-	-	-	51	40	20-30	40	53	51	71,5	50	52	57	54	61	77
ПХК	-	-	-	-	-	-	73	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
магний	15	15	8,2	16,9	5,12	-	-	-	-	-	-	-	1,5	-	-	-	-	-	-	-
Al	-	-	18	-	10,63	-	-	-	-	-	-	-	1,5	-	-	-	-	-	6	3
ДЦДА	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	10	-	-	10	-	15	20	-	-
ГХБ	-	-	-	-	3,00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
связка*	10	10	6	6	7,20	6	5	26	18	10-20	10	15	20	17	13	13	17	10	31,4	18
прочее**	-	-	-	-	-	7,5	17	-	2	-	-	2	1	7,5	1	3	5	10,6	1,6	0,4

1-2. Американский состав: \* – ламинак [7].

3. Штатный американский состав 60-х годов ТВ-2 для снаряжения изделия WMU-1/B: \* – эпоксидная смола. Эффективность льдообразования  $5,9 \cdot 10^{11}$  при -5°C [33, 70].

4. Американский состав 60-х годов: \* – эпоксидная смола. Эффективность льдообразования  $3,6 \cdot 10^{12}$  при -5,9°C [33].

5. Американский состав 60-х годов: \* – эпоксидная смола. Эффективность льдообразования  $4,1 \cdot 10^{10}$  при -6°C [34].

6. Американский состав конца 60-х годов: \* – эпоксидная смола; \*\* – бор. Эффективность льдообразования  $5,6 \cdot 10^{11}$  при -6°C. Скорость горения 5,9 мм/сек [59].

7. Американский состав CS-40 70-х годов: \* – асфальтит; \*\* – полиметилметакрилат [1].

8. Состав из австрийского патента: \* – эпоксидная смола [35].

9. Отечественный состав 60-х годов: \* – идитол; \*\* – графит. Эффективность льдообразования  $9 \cdot 10^{11}$  при  $-6^{\circ}\text{C}$  [6, 36].
10. Отечественный состав 60-х годов: \* – идитол [6].
11. Отечественный состав «И-2» 60-х годов: \* – идитол [7].
12. Отечественный состав: \* – идитол; \*\* – добавки. Эффективность льдообразования  $7,5 \cdot 10^{12}$  при  $-6^{\circ}\text{C}$  [36].
13. Отечественный состав: \* – смесь идигола, тиксола и эпоксидной смолы; \*\* – отвердители и пластификаторы. Эффективность льдообразования  $5,8 \cdot 10^{12}$  при  $-6^{\circ}\text{C}$ ,  $1,1 \cdot 10^{13}$  при  $-10^{\circ}\text{C}$  [37].
14. Отечественное льдообразующее ракетное топливо: \* – смесь связующего и пластификатора; \*\* – гидразодикарбонамид. Эффективность льдообразования  $2,6 \cdot 10^{11}$  при  $-6^{\circ}\text{C}$  [38].
15. Отечественный состав: \* – идитол; \*\* – графит и индустриальное масло. Эффективность льдообразования  $7,5 \cdot 10^{12}$  при  $-6^{\circ}\text{C}$  и  $1,2 \cdot 10^{13}$  при  $-10^{\circ}\text{C}$  [67].
16. Отечественный состав 50-04-11: \* – смола СФ-342А; \*\* – 2,5% графита, 0,5% индустриального масла [68].
17. Отечественный состав 50-04-02: \* – смола СФ-342А; \*\* –  $\text{TiO}_2$ . Добавки – сверх 100% [68].
18. Отечественный состав 50-03-13: \* – смола СФ-342А; \*\* – 5%  $\text{MoO}_3$ , 5,6% глины [68].
19. Отечественный состав МВТС-33: \* – тикол/дифенилгуанидин; \*\* – двуокись марганца [68].
20. Отечественный состав БКМ-20: \* – каучук БКМ; \*\* – 0,2% двуокиси марганца, 0,2% парахинон-диоксида (сверх 100%) [68].

#### 14.4. Аэрозольгенерирующие составы для тушения пожаров

В конце 70-х годов 20 века в качестве альтернативы существующим автономным системам объемного пожаротушения на базе фреонов были предложены пиротехнические средства, например описанные в [39]. Существующие фреоновые системы были весьма эффективными, но имели 2 существенных недостатка. Во-первых, продукты пиролиза фреонов обладали высокой токсичностью, а во-вторых, фреоны являлись веществами, разрушающими озоновый слой, и их использование постоянно ограничивалось законодательными актами.

Строго говоря, первые пиротехнические средства пожаротушения были разработаны еще в 60-х годах 20 века (например, патент фирмы Dynamit Nobel [40]), однако, составы того времени содержали галогеноорганические соединения типа гексабромбензола, что не решало проблему высокой токсичности продуктов их пиролиза. В период перестройки в СССР/России по программе конверсии оборонной промышленности начал проявляться большой интерес к экологически чистым пиротехническим средствам подавления возгораний, в результате чего были созданы автоматизированные комплексы пожаротушения [68]. Эти комплексы очень эффективны при подавлении очагов возгорания на нефтехранилищах, в служебных и производственных помещениях, а также в тех случаях, когда тушение пожара водой может приводить к неблагоприятным последствиям (например, в книгохранилищах и музеях).

Аэрозольный генератор, как правило, состоит из активной шашки пиротехнического состава и поглотителя тепла, позволяющего снизить температуру выходящей аэрозольно-газовой смеси до допустимого уровня. Поглотитель тепла содержит заряд химического пламегасителя, способного разлагаться с эндотермическим эффектом и/или осуществлять эндотермические фазовые переходы.

В этом качестве раньше применяли пламегасители на основе оксалата аммония. Из-за повышенной токсичности продуктов разложения оксалата аммония в настоящее время наибольшее распространение получили смеси на основном карбонате магния, например состав ОС-3, содержащий 69% осн. карбоната магния, 26% НЦ, пластифицированной триацетином, остальное – добавки [10, 68].

В качестве действующих веществ и одновременно окислителей аэрозольных тушащих композиций используют соли щелочных металлов, обладающих низким потенциалом ионизации. На практике в качестве этих солей обычно применяют нитрат и перхлорат калия.

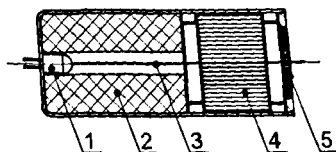


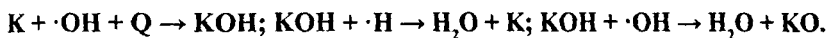
Рис. 11.2. Схема противопожарного пиротехнического генератора.

1 – электровоспламенитель, 2 – пиротехнический состав, 3 – огнепроводный шнур, 4 – поглотитель тепла, 5 – сопло.

**Эффект подавления возгорания обусловлен следующими факторами:**

- вытеснение воздуха продуктами сгорания тушащего пиротехнического состава;
- сбивание пламени напором аэрозольно-газовой смеси;
- создание среды, не благоприятной для процесса горения;
- ингибирующее действие аэрозоля, основанное на обрыве цепных реакций окисления углеводорода.

При первом приближении считается, что горение подавляют атомы щелочного металла, содержащиеся в нагретых продуктах сгорания. Они способствуют обрыву цепных процессов сгорания и тем самым осуществляют пламегашение:



Особенностью составов для тушения пожаров, в отличие от обычных аэрозольгенерирующих, является необходимость очень тонкого измельчения кристаллических компонентов (менее 20 мкм). Только в этом случае наблюдается максимальный эффект подавления очагов возгорания.

Основным параметром аэрозольгенерирующих составов для тушения пожаров является т.н. *гасящая концентрация*. Она показывает, сколько необходимо состава для подавления 1 м<sup>3</sup> пламени. Для большинства аэрозольгенерирующих составов она находится в пределах от 10 до 200 г/м<sup>3</sup>. Для сравнения: эффективность хладонов составляет порядка 300-1100 г/м<sup>3</sup>, порошковых систем – 150-800 г/м<sup>3</sup> [11, 68].

**Различают составы следующих типов [68]:**

- *На баллиститной пороховой основе.*

Перерабатываются такие составы по технологии баллиститных порохов. В качестве пороховой основы могут быть использованы утилизируемые бездымные пороха.

- *Перерабатываемые по технологии смесевых ракетных топлив.* Содержат отверждаемые каучуки и смолы. Окислителем и источником азота являются нитрат и/или перхлорат калия. Известны составы, генерирующие аэрозоль галогенсодержащих соединений, которые подобно фреонам ингибируют процесс горения. В настоящее время применяются редко из-за токсичности продуктов сгорания и высокой стоимости. В качестве примера можно привести смесь из патента [41], содержащую полиглицидилазидное связующее – 25%, аммониевую соль нитраминотетразола – 40%, калиевую соль перфторооктановой кислоты – 5%, пентабромодифенилоксид – 25% и 5% трифенилвисмут.
- *Перерабатываемые по технологии пиротехнических производств.* Типичная смесь типа СТК содержит нитрат калия, ДЦДА, идитол в соотношении 70/20/10 и имеет эффективность порядка 200 г/м<sup>3</sup> [11]. Известны композиции на основе азида натрия, которые отличаются сравнительно невысокой температурой горения. Однако азид натрия слишком дорог и поэтому в настоящее время его применение ограничено. В качестве примера можно привести отечественные композиции, содержащие 63,45% азида натрия, 21,8% нитрата натрия и 14,75% уротропина (газаящая концентрация 65 г/м<sup>3</sup>) [11] или 58% ПХК, 18% азида натрия, 16% перхлорвинилового смолы, 8% сажи [42].

Указанные составы могут использоваться не только для непосредственного пожаротушения, но и выполнять функцию газогенератора в некоторых порошковых огнетушителях.

**Табл. 14.5. Экологически чистые составы для снаряжения автоматических средств пожаротушения**

Состав	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
нитрат калия	50	64	60	38,5	78	-	54-75	66	60	80ч	57	58,5ч	41	40	70	48,5
перхлорат калия	-	-	15	39,5	-	34	-	-	-	-	-	-	41	15	-	-
нитрат натрия	-	-	-	-	-	34	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
нитрат бария	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	25	-	-
ДЦДА	-	-	-	-	-	-	15-42	19	34	-	-	-	-	-	-	-
мелем	-	-	-	-	18	15	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
меламин	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	21,5
идитол	-	-	-	5,0	2	8	4-10	11	6	0,5ч	20	-	-	-	30	18
эпоксидная смола	-	-	25	-	-	5	-	-	-	-	-	-	16	15	-	-
НЦ	17,5	13,8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
пластификаторы	20,0	9,2	-	8,2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2	-	-
бихромат калия	-	-	-	-	2	-	-	3,5	-	-	-	-	-	-	-	-
сажа	10,0	9,0	-	-	-	-	-	-	-	19,5ч	-	9ч	-	-	-	-
поливинилацетат	-	2,0	-	8,8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
гипс	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5ч	-	12,5ч	-	-	-	-
жидкое стекло	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	20ч	-	-	-	-
осн. карбонат магния	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	11	-	-	-	-	10,5
прочее *	2,5	2,0	-	-	-	4	-	0,5	-	-	12	15ч	2	3	-	1,5

1. Состав ПТ-50-2: \* — дифениламин, минеральное, масло, добавки. Пластификатор — ЛД-70. Гасящая концентрация 33-39 г/м<sup>3</sup> [10, 68].
2. Состав ПТ-4: \* — дифениламин, минеральное, масло, добавки. Пластификатор — триацетин. Гасящая концентрация 33-39 г/м<sup>3</sup>. Используется также в газогенераторах [10, 68].
3. Состав ПАС-2. Гасящая концентрация 125 г/м<sup>3</sup> [11].
4. Состав НПО Союз [43].
5. Состав СКТБ «Технолог» [44].
6. Состав СКТБ «Технолог»: \* — окись железа [45].
7. Состав ВНИИПО и НИИПХ [46].
8. Состав ООО «АРТЕХ-2000»: \* — графит [47].
9. Отечественный состав [48].
10. Состав ФГУП «Пермский завод им. Кирова» [49].
11. Состав ООО «Источник»: \* — аммофос [50].
12. Состав ООО «Зодчий»: \* — мел [51].
13. Американский состав: \* — магний [52].
14. Состав ООО «Эпотос»: \* — отвердитель и двуокись марганца [53].
15. Отечественный состав [23].
16. Состав ФГУП ФНПЦ «Алтай»: \* — уротропин [55].

## Литература

1. Engineering Design Handbook. Military Pyrotechnics Series. Part Four. Design for Ammunition for Pyrotechnic Effects. US Army Materiel Command. AMCP 706-188. 1974.
2. Химическая энциклопедия: В 5 т. /Под ред. И.Л. Кнунянц — М.: Советская энциклопедия, 1988-1998.
3. A.P. Hardt. Pyrotechnics. Pyrotechnica Publications. 2001.
4. Вспомогательные системы ракетно-космической техники. — Пер. с англ. Н.В. Обезьева и к.т.н. М.С. Шура. — М.: Мир, 1970.
5. Engineering Design Handbook. Military Pyrotechnics Series. Part One. Theory and Application. US Army Materiel Command. AMCP 706-185. 1967.
6. Шидловский А.А. Основы пиротехники. — М.: Машиностроение, 1973.
7. Ellern H. Military and Civilian Pyrotechnics. Chemical Publishing Company Inc. New York. 1968.
8. McLain, J.H. Pyrotechnics from the Viewpoint of Solid State Chemistry. Franklin Institute Press, Philadelphia. 1980.
9. Д.И. Деметьева, И.С. Кононов, Р.Г. Мамашев, В.А. Харитонов. Введение в технологию энергонасыщенных материалов: Учебное пособие. Издание 2-е, переработанное и дополненное. — Бийск, 2009.
10. Энергетические конденсированные системы. Краткий энциклопедический словарь. /Под ред. Б.П. Жукова. Изд. 2-е исправл. — М.: Янус К, 2000.
11. В.Г. Коростелев. Гашение углеводородных пламен аэрозольгенерирующими пиротехническими составами. Proceedings of the Twenty-First International Pyrotechnics Seminar. September. 11-15. 1995.
12. Timothy Kluchinsky. Identification of CS-Derived Compounds Formed During Heat Dispersion of CS Riot Control Agent and the Temperature Ranges Associated with Their Formation. Uniformed Services University of the Health Sciences, F. Edward Herbert School of Medicine, 4301 Jones Bridge Road, Bethesda, MD, 20814-4799. 2001.
13. Jeffrey J. Hoppe. Operational Planning Considerations for the Use of Riot Control Agents in Military Operations Other Than War. Joint Military Operations Department Naval War College. 686 Cushing Road. Newport, RI 02841-1207. 2005.
14. Army Ammunition Data Sheets for Grenades. TM 43-0001-29. Headquarters Department of the Army. Washington, DC, 30 June 1994.
15. Army Ammunition Data Sheets Artillery Ammunition Guns, Howitzers, Mortars, Recoilless Rifles, Grenade Launchers and Artillery Fuzes. TM 43-0001-28. Headquarters Department of the Army. Washington, DC, 27 October 2003.

16. F. L. McIntyre, R.M. Rindner. A Compilation of Hazard and Test Data for Pyrotechnic Compositions. ARLCD-CR-80047. 1980.
17. L. M. Aikman, T. E. Shook, R. M. Lehr, E. Robinson, F. McIntyre. Improved Mixing, Granulation and Drying of Highly Energetic Pyromixtures. Propellants, Explosives, Pyrotechnics 12, 17-25 (1987).
18. Пат. USS049214 от 1991 г.
19. Пат. DE3418116 от 1985 г.
20. Пат. US3704187 от 1967 г.
21. Пат. RU2394012 от 2009 г.
22. Пат. US3929530 от 1966 г.
23. Пат. SU1445739 от 1985 г.
24. Пат. US3856933 от 1970 г.
25. А.с. СССР 346899.
26. Пат. SU1837762 от 1990 г.
27. Пат. RU2042658 от 1992 г.
28. Пат. RU2399206 от 2009 г.
29. Пат. RU2140293 от 1999 г.
30. Пат. RU2379890 от 2008 г.
31. Пат. RU2309438 от 2006 г.
32. Пат. US5357865 от 1992 г.
33. Пат. US3698968 от 1968 г.
34. Пат. US4096005 от 1977 г.
35. Пат. AT399503 от 1994 г.
36. Пат. RU2175185 от 2000 г.
37. Пат. RU2357404 от 2005 г.
38. Пат. RU2313936 от 2007 г.
39. Пат. GB2028127 от 1978 г.
40. Пат. US3641935 от 1969 г.
41. Пат. US5520826 от 1994 г.
42. Пат. RU2201774 от 2000 г.
43. Пат. RU2005517 от 1992 г.
44. Пат. RU2095102 от 1996 г.
45. Пат. RU2095104 от 1996 г.
46. Пат. RU2046614 от 1991 г.
47. Пат. RU2147903 от 1998 г.
48. Пат. SU1764213 от 1988 г.
49. Пат. RU2157271 от 1999 г.
50. Пат. RU2174972 от 2001 г.
51. Пат. RU2107524 от 1996 г.
52. Пат. US5588493 от 1994 г.
53. Пат. RU2106167 от 1998 г.
54. Пат. RU2485776 от 2012 г.
55. Пат. RU2259987 от 2004 г.
56. Пат. US6663731 от 2002 г.
57. Заявка US2003/0233956.
58. Пат. US7300625 от 2007 г.
59. Пат. US3769107 от 1968 г.
60. А.с. СССР 149648 от 1962 г.
61. Пат. RU2084147 от 1994 г.
62. Пат. RU2058742 от 1994 г.
63. Пат. RU2064765 от 1993 г.
64. Пат. US20050255047 от 2003 г.
65. USSR Bombs and Fuzes. OP 2009. US Government Printing Office. 1955.
66. D.A. Davies. Nature № 167, 614. 1950.
67. Пат. RU2430076 от 2010 г.
68. Жергов Е.Ф., Милёхин Ю.М., Берковская Е.В. Технология порохов и твердых ракетных топлив в приложении к конверсионным программам. – М., 2006.
69. Def. Standard 13-147. Ministry of Defence. Glasgow 1993.
70. Technical Manual. Ordnance Data for Toxic Hazards Associated with Pyrotechnic Items. NAVSEA SW050-AC-ORD-010. 2005.
71. Пат. RU2487539 от 2012 г.
72. Пырьев Е.В., Резниченко С.Н. Бомбардировочное вооружение авиации России 1912-1945 гг. - М.: Редакционно-издательский центр Генерального штаба ВС РФ, 2001.
73. Материалы Интернет-ресурса [www.pyrotechnics.net.ru/](http://www.pyrotechnics.net.ru/) Материалы лекций Дудырева А.С., «Разработка пиротехнических составов». Переработка и оформление Е. Мисоночкиковой и Королева Д.В.
74. Взрывчатые вещества, пиротехника, средства инициирования в послевоенный период: Люди. Наука. Производство. Второе издание. /Коллектив авторов. – М.; СПб.: Издательство «Гуманистика». – 936 с, 2002.
75. Basil T Fedoroff etc. Dictionary of Explosives, Ammunition and Weapons (german section) Dover, New Jersey. 1958.

## Глава 15. Осветительные составы

Осветительными составами называют пиротехнические смеси, предназначенные для освещения больших участков местности. Осветительными шашками и звездками снаряжают большой спектр боеприпасов: осветительные снаряды, мины, ракеты, авиабомбы и др. Для инфракрасной подсветки местности применяются специальные составы инфракрасного излучения, рассмотренные в следующей главе.

### Различают [1]:

- пламенные осветительные составы;
- составы для высотного фотографирования.

### 15.1. Пламенные осветительные составы

Первые пиротехнические осветительные составы берут свое начало от развлекательной пиротехники. Вплоть до конца 19 века они практически ничем не отличались от фейерверочных составов белого огня, характерных для того времени. Например, до второй половины 70-х годов 19 века основными осветительными составами в арсеналах Британской империи были смеси на основе нитрата калия, серы, смол и олифы. Для увеличения яркости свечения в эти композиции иногда добавляли реальгар или антимоний.

Новая эпоха в развитии осветительных составов ознаменовалась концом 19 века, когда началось промышленное производство таких важных в современной пиротехнике металлов, как магний и алюминий.

В это же время в обиход вошли осветительные звездки, спускаемые на парашюте.

В европейской военной пиротехнике начало практического применения магния датируется концом 60-х – началом 70-х годов 19 века, а начало массового применения – Первой мировой войной. Типичные осветительные композиции Первой мировой войны обычно базировались на сочетании нитрата бария с алюминием и небольшим количеством связующего.

В России с 1915 г. широко использовались осветительные снаряды системы Погребнякова, снятые с вооружения только в 1935-36 гг.

В 1923 году в Англии были созданы составы на основе нитрат натрия/магний/связующее. В США магний начали массово вводить в осветительные смеси с 1931 года. В 1933 году там же, в США, было обнаружено, что смесь нитратов бария и стронция более эффективна в осветительных составах, нежели один нитрат бария.

Вторая мировая война ознаменовала себя масштабными ночными военными операциями, громадным расходом осветительных средств, а также широким использованием осветительных составов на основе магния [2].

Магний широко использовался и в СССР, но на случай дефицита этого металла исследовались алюминий, силикоалюминий и ферросилиций. На их основе были созданы резервные рецептуры [31].

Первая советская осветительная авиабомба (САБ-5) поступила на вооружение в 1932 году. Уже в 1934 году ее производство было остановлено из-за несоответствия вновь изменившимся требованиям. На замену САБ-5 в 1935 году была принята на вооружение бомба САБ-3. Модифицированные варианты этой осветительной бомбы образца 1938 и 1944 гг. применялись во время Великой Отечественной войны. С 1936 года началось изготовления осветительных авиабомб больших калибров. В 1941 г. на вооружение были приняты посадочные ракеты ПР-8 и ПР-4, предназначенные для обеспечения аварийной посадки самолетов [36].

Японцы в своих осветительных снарядах времен Второй мировой применяли следующую рецептуру: магний – 53%, нитрат бария – 42,5%, пчелиный воск – 3,5%, оксалат натрия – 1%. Для снаряжения осветительных авиабомб широко применялся состав с более доступным алюминием: 75% нитрата бария, 22,5% алюминия, 2,5% парафина.

Современные осветительные композиции принципиально ничем не отличаются от смесей времен Второй мировой войны. Изменения коснулись лишь технологии изготовления, а также использования более прогрессивных связующих и сортов порошков металлов. Крупные шашки осветительных составов для снаряжения авиабомб начали изготавливать литьем [3].

Осветительные составы похожи на современные сигнальные композиции белого огня, и в ряде случаев они взаимозаменяемы. Различия между ними весьма условны и заключаются в том, что сигнальные составы белого огня ориентированы на излучение чистого белого света, а осветительные – на максимальную светоотдачу. Соответственно, осветительные составы содержат большее количество магния.

Осветительные композиции сгорают, излучая преимущественно в непрерывном спектре, захватывающем весь видимый диапазон длин волн (400-750 нм), а также часть ультрафиолетового и инфракрасного спектра. В действительности, на видимый диапазон приходится не более 10% энергии всего излучения. Излучение возникает за счет нагрева конденсированной фазы окислов легких металлов, являющихся продуктами сгорания таких составов. В грубом приближении это излучение можно считать излучением абсолютно черного тела [3].

Для усиления излучательной способности в видимом диапазоне в состав могут вводиться селективные излучатели (пламенные добавки) – фториды кальция и бария, криолит, некоторые соединения кальция. Энергия излучения этих добавок в видимом диапазоне превосходит энергию излучения абсолютно черного тела.

К примеру, добавка всего 5% фторида кальция к двойной смеси  $\text{NaClO}_4/\text{Mg}$  повышает удельную светосумму (эффективность) с 40000 до 87000 кд·сек/г [32].

Опытным путем установлено, что требуемую силу света дают двойные смеси окислителей и металлических горючих, при сгорании выделяющие не менее 6,3 МДж/кг тепла. Световые характеристики двойных смесей приведены в Табл. 15.1 (заряды запрессовывали под давлением 700 кг/см<sup>2</sup>) [2].

## Основные характеристики осветительных составов:

- **Сила света.** Единицей силы света является кандела (кд), или свеча. Она равна  $1/600000$  силы света, получаемой с  $1 \text{ м}^2$  поверхности черного тела в направлении нормали при температуре затвердевания платины.  
Сила света является абсолютной величиной, характеризующей яркость вообще, и не учитывает скорости горения осветительной звездки. Действительно, если скорость горения велика, то и абсолютная величина силы света будет велика, но такой состав будет сгорать слишком быстро. Поэтому, чтобы характеризовать осветительный состав с точки зрения эффективности отдачи световой энергии с единицы массы состава, было введено понятие *удельной светосуммы*. Удельная светосумма равна отношению произведения силы света (кд) на время горения звездки (с) к ее массе (г) и является важнейшей характеристикой осветительных и сигнальных составов.
- Третьей важной характеристикой является параметр отношения силы света к поверхности горения состава – *удельная интенсивность излучения*, измеряемая в  $\text{кд}/\text{см}^2$ . С помощью этого параметра можно подбирать нужную силу света, варьируя площадью горения состава.
- **Скорость горения** – от нее зависит удельная светосумма. Быстрогогорящие составы со скоростью горения порядка  $10 \text{ мм}/\text{сек}$ . используются в небольших осветительных звездках, предназначенных для отстрела с ракетниц. Медленногогорящие составы со скоростью горения  $1\text{--}2 \text{ мм}/\text{сек}$  находят применение в больших изделиях типа осветительных авиабомб, спускаемых на парашюте.

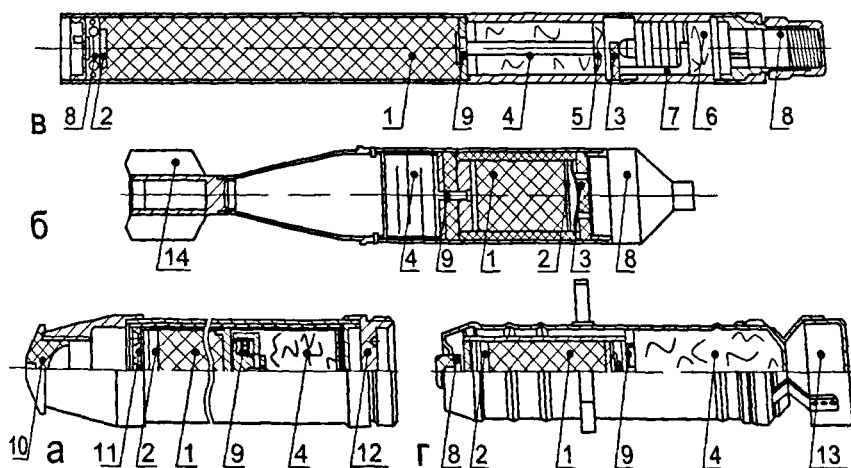
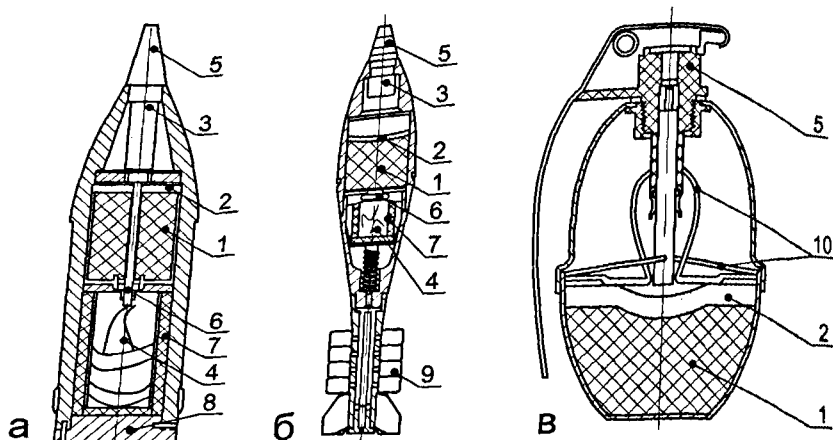


Рис. 15.1. Осветительные средства [4, 13, 14].

- а) – ГЧ авиационной неуправляемой ракеты, б) – американская 60 мм минометная мина М83, в) – ГЧ американской авиационной неуправляемой ракеты М257, г) – авиабомба САБ-3М.

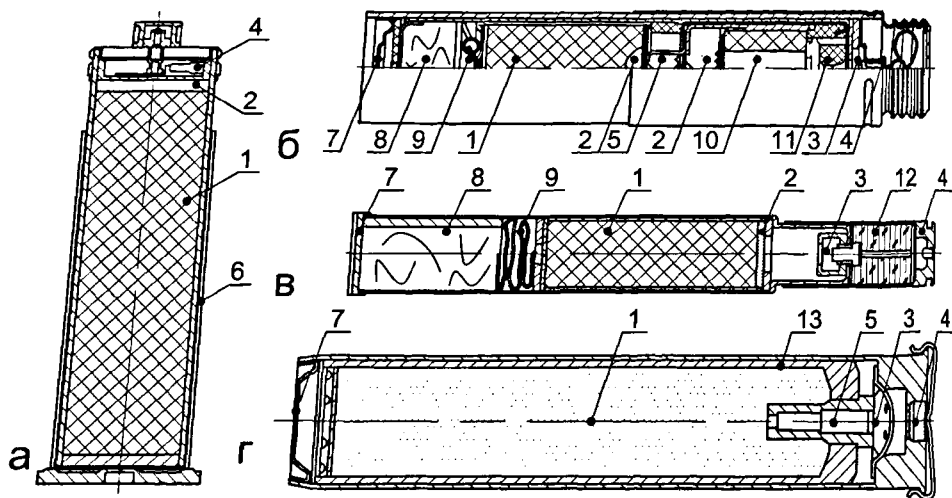
1 – осветительный состав, 2 – воспламенительный состав, 3 – вышибной состав, 4 – парашют, 5 – вытяжной парашют, 6 – тормозной парашют, 7 – замедлитель, 8 – воспламенитель, 9 – узел крепления парашюта, 10 – заглушка, 11 – мембрана, 12 – вышибное днище, 13 – стабилизатор, 14 – метательный заряд пороха.



**Рис. 15.2. Осветительные средства американского производства [14, 15].**

а) – 155 мм снаряд M118A2, б) – 120 мм минометная мина M930, в) – ручная граната Mk-1.

1 – осветительный состав, 2 – воспламенительный состав, 3 – вышибной заряд, 4 – парашют, 5 – замедляющее воспламенительное устройство, 6 – узел крепления парашюта, 7 – усиливающая втулка, 8 – вышибное днище, 9 – метательные пороховые заряды, 10 – стопин.



**Рис. 15.3. Осветительные средства (продолжение) [16, 17].**

а) – американский наземный осветительный патрон M76, б) – отечественный 40 мм реактивный осветительный патрон увеличенной дальности, в) – американский авиационный осветительный патрон M9A1, г) – американский фотоосветительный патрон M112A1.

1 – осветительный состав, 2 – воспламенительный состав, 3 – вышибной состав, 4 – воспламенительное устройство, 5 – замедлительная втулка, 6 – складные опоры, 7 – колпачок, 8 – парашют, 9 – узел крепления парашюта, 10 – заряд твердого ракетного топлива, 11 – сопло, 12 – деревянная проставка, 13 – корпус фотоосветительного патрона.

**Табл. 15.1. Световые характеристики двойных смесей  
солей-окислителей с магнием [2]**

$Ba(NO_3)_2$	Mg	кд/см <sup>2</sup>	мм/сек	г/см <sup>3</sup>	кд/г	$LiNO_3$	Mg	кд/см <sup>2</sup>	мм/сек	г/см <sup>3</sup>	кд/г
80	20	1010	1,2	2,48	3300	20	80	57350	19,1	1,43	22000
68	32	6980	2,15	2,24	14000	$NaNO_3$	Mg	кд/см <sup>2</sup>	мм/сек	г/см <sup>3</sup>	кд/г
64	36	8220	2,85	2,21	13000	80	20	700	1,0	1,91	3600
60	40	14730	4,55	2,08	9800	70	30	5970	3,25	1,87	9700
50	50	28830	7,1	1,96	13000	58	42	15810	5,55	1,82	15500
40	60	53940	16,15	1,86	17500	54	46	24030	6,6	1,79	20000
30	70	55800	17,05	1,84	17500	50	50	27900	6,9	1,74	20000
20	80	-	-	1,83	-	40	60	59830	11,3	1,71	31000
$KClO_4$	Mg	кд/см <sup>2</sup>	мм/сек	г/см <sup>3</sup>	кд/г	30	70	106180	16,5	1,65	36000
80	20	390	0,95	1,91	2100	25	75	121680	18,2	1,62	41000
70	30	2710	1,6	1,78	9500	20	80	88350	18,2	1,59	30000
59	41	5740	2,2	1,72	15000	15	85	68980	13,55	1,51	33000
50	50	6980	2,95	1,66	14000	$KNO_3$	Mg	кд/см <sup>2</sup>	мм/сек	г/см <sup>3</sup>	кд/г
40	60	8370	4,35	1,60	12000	80	20	140	0,95	1,81	600
30	70	26500	11,2	1,54	14500	70	30	170	2,0	1,75	800
20	80	37200	19,45	1,51	12500	62	38	4260	2,9	1,73	8400
15	85	25890	19,9	1,50	8500	58	42	5580	3,6	1,72	9000
$Ca(NO_3)_2$	Mg	кд/см <sup>2</sup>	мм/сек	г/см <sup>3</sup>	кд/г	50	50	8530	5,65	1,68	9000
80	20	545	0,75	1,99	3500	40	60	13330	9,25	1,62	9000
70	30	3880	1,7	1,96	11500	30	70	18450	12,4	1,56	9500
57	43	9920	2,9	1,86	18500	25	75	17980	13,15	1,53	9000
52	48	13330	3,55	1,81	20000	20	80	10850	11,2	1,53	6300
40	60	29140	5,3	1,73	32000	$Sr(NO_3)_2$	Mg	кд/см <sup>2</sup>	мм/сек	г/см <sup>3</sup>	кд/г
30	70	59210	9,3	1,66	40000	80	20	1630	1,15	2,32	6500
25	75	62000	9,85	1,61	41000	70	30	5270	2,55	2,05	10000
20	80	56110	9,1	1,50	41000	63,5	36,5	7830	3,25	1,95	12500
$LiNO_3$	Mg	кд/см <sup>2</sup>	мм/сек	г/см <sup>3</sup>	кд/г	60	40	10620	3,75	1,92	12000
70	30	3260	1,7	1,77	7200	50	50	23560	8,95	1,76	14500
60	40	12170	5,65	1,68	12500	40	60	40380	10,5	1,72	22000
53	47	16900	5,9	1,62	17500	30	70	47590	11,85	1,63	24000
40	60	36580	11,8	1,54	20000	25	75	44330	10,15	1,57	27500
30	70	54250	17,6	1,49	20000	20	80	38750	8,65	1,52	33000

Как видно из таблицы 15.1, наибольшей удельной светосуммой обладают сочетания магния с нитратами натрия, кальция и стронция, несколько менее эффективны нитраты бария и лития. Однако нитраты кальция и лития настолько гигроскопичны, что их практическое применение выглядит затруднительным, а нитрат стронция дает красное окрашивание пламени. По этой причине составы массового применения базируются на нитратах натрия и бария. В США получены отдельные патенты на использование в качестве окислителя перхлората натрия. Перхлорат натрия хоть и эффективен, но сильно гигроскопичен, и при изготовлении составов требуется безводная атмосфера [3]. В составах на его основе необходимо вводить нитрат натрия в качестве стабилизатора химической стойкости, а магний пассивировать никелем [1, 32].

С точки зрения максимальной световой отдачи лучше всего себя проявляют композиции на основе нитрата натрия с магнием и связующим. Это объясняется существованием эффекта люминесценции натрия, входящего в состав окислителя, а также образованием в пламени ряда дополнительных излучателей, например молекул  $\text{NaH}^+$  и  $\text{NaMg}$ , которые являются эффективными источниками белого света [30]. Однако составы на нитрате натрия не всегда удобны, т.к. дают свет с желтым оттенком и отличаются повышенной гигроскопичностью.

Чтобы уменьшить гигроскопичность, в США технический нитрат натрия подвергают двойной перекристаллизации.

В малогабаритных осветительных изделиях часто используют составы на нитрате бария. Нитрат бария не гигроскопичен, при большом содержании магния сжигаемые звездки излучают практически чистый белый цвет, к тому же плотность нитрата бария примерно в полтора раза выше плотности нитрата натрия.

Применение алюминия вместо магния встречает значительные трудности: составы на его основе плохо воспламеняются, а при содержании достаточного количества связующего появляется форсовое искрение и яркость излучения резко падает. Искрение в какой-то степени снижается за счет добавления серы, но суммарная эффективность таких составов все равно остается пониженной. Содержание серы в количестве более 10% считается нецелесообразным, т.к. в этом случае световые характеристики резко уменьшаются [1].

Во время Великой Отечественной войны из-за дефицита магния многие отечественные составы были переведены на алюминий. Например, осветительная бомба САБ-100-55 снаряжалась смесью из 50% нитрата натрия, 30% алюминия, 7% ПАМ-а, 9% серы и 2% канифоли. Скорость горения факела диаметром 230 мм составляла 1 мм/сек, а сила света была равна 1700000 кд [32].

В 70-х годах в США [21] были возобновлены работы по исследованию возможности использования алюминия в качестве горючего. Основной целью этих работ было предотвращение форсового искрения. Изучалось введение различных добавок, увеличивающих степень сгорания алюминия в зоне пламени. Так, например, подобная композиция, состоящая из 35% алюминия, 53% нитрата натрия, 7% вольфрама и 5% ламинака, использовалась в опытном порядке для снаряжения сигнальных мин М49А1. Смесь имеет высокую температуру воспламенения, равную 665°C. В любом случае, удельная светосумма составов на алюминии меньше, чем для составов на основе магния. Поэтому алюминий можно рассматривать как альтернативу лишь в случае острого дефицита магниевого порошка [18, 19].

Для освещения под водой могут быть использованы специальные факелы с ПТФЭ [35]:

1. магний 34,8-27,6%, алюминий 21,7-17,2%, нитрат бария 17,4-13,8%, окись железа 8,7-6,9%, ПТФЭ 17,4-34,5%;
2. магний – 30,5%, ПТФЭ – 49,7%, Viton А – 16,3%, алюминий – 1%, бор – 1%, хлорид натрия – 1,5%.

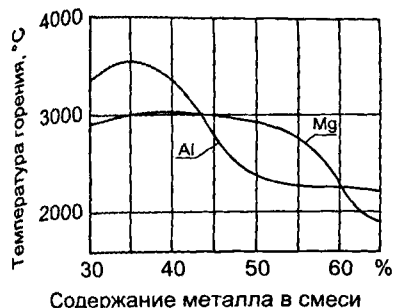


Рис. 15.4. Зависимость температуры горения осветительных составов на основе нитрата натрия от содержания металла (состав также содержит 5% ламинака) [30].

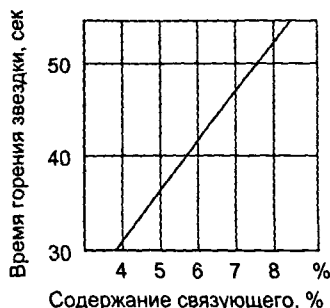


Рис. 15.5. Зависимость скорости сгорания стандартной осветительной звездки на основе нитрата натрия, содержащей 52,5% магния, от количества связующего [5].

### Примечание.

Максимальная удельная светосумма составов с магнием наблюдается при значительном избытке этого металла по сравнению со стехиометрическим соотношением. Это вызвано тем, что избыток магния испаряется и догорает за счет кислорода воздуха, формируя дополнительное излучение.

Табл. 15.2. Основные компоненты современных осветительных составов

Компонент	Наименование	Содержание
окислители и их смеси	$\text{NaNO}_3$ , $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$ , редко $\text{NaClO}_4$	30-76
горючие	магний, редко ПАМ, алюминий и его смеси с магнием	18-65
связующие	ламинак, идитол, полисульфидные каучуки	3-20
замедлители горения	оксид магния, оксалаты, сера	0-15
пламенные добавки	криолит, фториды кальция и бария	0-7
техн. добавки	масла, стеарин, парафин, графит	0,5-2

Табл. 15.3. Осветительные составы на основе нитрата бария

Состав	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
$\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$	63,7	60	71,4	76,0	80	53	66	55	38	49	55	56	60	43	40	22	54	40	70	46	40
$\text{Sr}(\text{NO}_3)_2$	-	-	-	-	-	-	-	5	7	16,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
$\text{KNO}_3$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	10	11	-	-	-	5	-	-	-	-	-
Al-порошок	-	-	7,2	8,1	15	-	-	15	-	-	21	19	-	-	-	-	-	-	13	-	-
Al-пудра	20,4	25	10,7	9,9	-	-	-	-	-	-	-	-	6	-	-	-	-	-	-	-	-
магний	-	-	-	-	-	39	30	17	52	29,5	-	-	24	51	53	61	40	50	14	45	50
сера	15,9	15	10,7	4,0	-	-	-	-	-	-	8	8	-	-	-	-	-	-	-	-	-
$\text{BaF}_2$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	6	6	-	-	-	-	-	-	-	-	-
связка*	-	-	-	-	6	6	4	5	3	5	-	-	10	5	7	2	6	7	3	5	5
прочее**	-	-	-	2,0	5	2	-	3	-	-	-	-	-	-	1	0,25	10	-	3	-	4

- 1 - 3. Составы времен Первой мировой войны [1, 6].
4. Состав времен Первой мировой войны, который использовался в осветительных бомбах: \* – касторовое масло. Скорость горения 1,7 мм/сек, плотность 2,3 г/см<sup>3</sup>, удельная светосумма 11600 кд·с/г [6].
5. Осветительный состав для снарядов системы Погребнякова (Первая мировая война): \* – олифа сверх 100%; \*\* – пороховая мякоть [1].
6. Немецкий состав времен Второй мировой войны, использовавшийся в осветительных авиабомбах: \* – фенолформальдегидная смола; \*\* – тальк [1].
7. Английский состав для арт. снарядов времен Второй мировой войны: \* – шеллак [1].
8. Американский состав, разработанный непосредственно перед Второй мировой войной: \* – асфальтит; \*\* – олифа [1].
9. Американский состав, разработанный перед Второй мировой войной: \* – олифа [1].
10. Американский состав для снаряжения изделия M159: \* – VAAR (позже заменен на ламинак 4116). Температура самовоспламенения – 500°C, Плотность снаряжения – 1,7-2,2 г/см<sup>3</sup>. Теплота сгорания – 6,24 МДж/кг. Факел массой 21,4 г сгорает за 7,6 сек с силой света 26160 кд [19, 33].
11. Немецкий состав для 27 мм сигнального патрона ESN-2 и ESN-3 времен Второй мировой войны [7].
12. Немецкий состав для 27 мм сигнального патрона ESN-5 времен Второй мировой войны [7].
13. Отечественный состав времен Великой Отеч. войны: \* – шеллак [31].
14. Отечественный состав времен Великой Отеч. войны для снаряжения 26 мм парашютного патрона: \* – асфальтит; \*\* – керосин [31].
15. Отечественный состав для снаряжения 26 мм патрона: \* – асфальтит; \*\* – трикрезилфосфат сверх 100% [16].
16. Отечественный состав 10-07-35 для 26 мм патрона: \* – лак KC-50; \*\* – 5% CaSO<sub>4</sub>, 5% ПТФЭ [16].
17. Отечественный состав для 30 мм реактивного однозвездного патрона: \* – CF-340A [16].
18. Отечественный состав: \* – асфальтит; \*\* – криолит. Удельн. светосумма – 20000 кд·сек/г [32].
19. Отечественный состав для снаряжения осветительной парашютной мины: \* – олифа. Скорость горения – 1,5 мм/сек, диаметр факела – 54 мм, сила света – 150000 кд [32].
20. Отечественный состав для ОПС-122: \* – СКФ-32; \*\* – стеарат кальция. Скорость горения – 2,3 мм/сек, диаметр факела – 87 мм, сила света – 700000 кд [32].
21. Английский состав SR-343A для снаряжения осветительных снарядов: \* – парафин; \*\* – оксалат Са. Скорость горения – 2,3 мм/с. Удельная интенсивность излучения – 7130 кд/см<sup>2</sup>. Удельная светосумма – 15000 кд·сек/г [8].

**Табл. 15.4. Осветительные составы на основе нитрата натрия**

Состав	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
NaNO <sub>3</sub>	45	46	39	35,5	54	44	25	52	46	48,5	42	37,5	44	45	42	44	40	47,2	36	30	35	42
NaClO <sub>4</sub>	-	-	-	-	-	-	25	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
магний	50	50	49	60	42	45	42	42	50	36	52	58	50	46	48	44	48	48,4	55	61	65	51
связка*	5	4	5	4,5	2	2	3	3	4	4	6	4,5	6	9	8	12	12	4,4	9	9	5	7
прочее**	-	-	7	-	2	9	5	3	-	11,5	-	-	-	-	2	-	-	-	-	-	-	-

1. Немецкий осветительный состав, использующийся в осветительных авиабомбах времен Второй мировой войны: \* – воск [7].
2. Английский состав SR-563 для снаряжения осветительных снарядов: \* – литографская олифа. Скорость горения – 2,1 мм/с. Удельная интенсивность излучения – 15500 кд/см<sup>2</sup>. Удельная светосумма – 35000–40000 кд·сек/г [8].
3. Английский состав SR-562 для снаряжения парашютных осветительных зарядов: \* – литографская олифа; \*\* – оксалат кальция. Скорость горения – 1,3 мм/с. Удельная интенсивность излучения – 9300 кд/см<sup>2</sup>. Удельная светосумма – 35000–40000 кд·сек/г [8].

4. Английский состав SR-580 для снаряжения малогабаритных осветительных средств: \* – акаронидная смола. Скорость горения – 12,7 мм/с. Удельная интенсивность излучения – 58100 кд/см<sup>2</sup>. Удельная светосумма – 28000 кд·сек/г [8].
5. Отечественный состав для 40 и 50 мм осветительных изделий типа РОПДД: \* – канифоль; \*\* – индустриальное масло [16].
6. Отечественный термостойкий состав: \* – лак ФК-260Л; \*\* – 2% карбоната магния, 3% фторида кальция, 2% ПТФЭ, 2% технологические добавки [32].
7. Отечественный состав для САБ-100МН: \* – канифоль; \*\* – 4% стеарата кальция, 1% индустриального масла. Скорость горения – 1,1 мм/сек, диаметр факела – 80 мм, сила света – 5000000 кд [32].
8. Отечественный состав для САБ-250: \* – канифоль; \*\* – 2% стеарина, 1% индустриального масла. Скорость горения – 2,5 мм/сек, диаметр факела – 88 мм, сила света – 6500000 кд [32].
9. Отечественный состав для РОС «Свет»: \* – канифоль. Скорость горения – 5 мм/сек, диаметр факела – 80 мм, сила света – 2000000 кд [32].
10. Факел для снаряжения современного осветительного парашютного боеприпаса: \* – 3% канифоли, 1% индустриального масла; \*\* – 8% гипса, 3,5% стеарата кальция [34].
11. Чешский состав [5].
12. Американский состав для снаряжения осветительных авиабомб Mk24, Mk45: \* – ламинак. Температура самовоспламенения – 544°C, Плотность снаряжения – 1,74-2,23 г/см<sup>3</sup>. Теплота сгорания – 8,52 МДж/кг. Скорость горения – 1,09 мм/сек при 2,23 г/см<sup>3</sup> [19].
13. Американский состав для снаряжения ручных осветительных средств, например M127A1: \* – ламинак. Температура самовоспламенения – 490°C. Плотность снаряжения – 1,7-2,2 г/см<sup>3</sup>. Теплота сгорания – 8,35 МДж/кг. Скорость горения – 2,16 мм/сек при 2,1 г/см<sup>3</sup> [19].
14. Американский состав: \* – ламинак. Температура самовоспламенения – 510°C. Плотность снаряжения – 2,34 г/см<sup>3</sup>. Теплота сгорания – 7,32 МДж/кг [19].
15. Американский состав для снаряжения авиационных парашютных осветительных средств: \* – ламинак; \*\* – ПВХ. Температура самовоспламенения – 517°C. Плотность снаряжения – 1,78 г/см<sup>3</sup>. Теплота сгорания – 6,88 МДж/кг. Скорость горения – 8,48 мм/сек при 1,78 г/см<sup>3</sup> [19].
16. Американский состав для снаряжения 155 мм артиллерийских снарядов: \* – ламинак. Температура самовоспламенения – 502°C. Плотность снаряжения – 2,34 г/см<sup>3</sup>. Теплота сгорания – 6,74 МДж/кг [19].
17. Американский состав для снаряжения 105 мм снарядов: \* – ламинак. Температура самовоспламенения – 522°C. Плотность снаряжения – 1,7-2,2 г/см<sup>3</sup>. Теплота сгорания – 7,61 МДж/кг [19].
18. Американский состав для сигнальных мин M49A1: \* – VAAR. Температура самовоспламенения – 519°C. Плотность снаряжения – 2,34 г/см<sup>3</sup>. Теплота сгорания – 7,59 МДж/кг [19].
19. Американский состав для снаряжения 81 и 105 мм снарядов M301A2 и M314A3: \* – ламинак. Температура самовоспламенения – 530°C, Плотность снаряжения – 1,57 г/см<sup>3</sup>. Теплота сгорания – 8,03 МДж/кг. Скорость горения – 1,7 мм/сек при 1,57 г/см<sup>3</sup> [19].
20. Американский состав для снаряжения осветительных авиабомбы LUU-28/B: \* – 7,4% полисульфидного каучука с концевыми карбоксильными группами, 1,5% эпоксидного отвердителя, 0,1% линолята железа. Температура самовоспламенения – 586°C. Плотность снаряжения – 1,5 г/см<sup>3</sup>. Теплота сгорания – 7,6 МДж/кг. Скорость горения – 2,3 мм/с. Удельная светосумма – 46000 кд·с/г. Технология изготовления – набивка с уплотнением на прессе [19].
21. Американский состав для M18-O: \* – содержит 70% эпоксидной смолы и полиамидного отвердителя (св. 100%). Температура самовоспламенения – 437°C. Теплота сгорания – 11,6 МДж/кг [17].
22. Американский состав: \* – 25,5% смолы Епон 828, 71,4% тикзола LP-33, 3,1% отвердителя DEN 24. Температура самовоспламенения – 513°C. Теплота сгорания – 8,4 кДж/кг [17]. Состав с подобной связкой в соотношении  $\text{NaNO}_3/\text{Mg}/\text{связка}$  43,7/48,5/7,8 используется для снаряжения осветительных снарядов M485E1 [3].

В настоящее время практически все осветительные звездки изготавливаются по технологии глухого прессования, а крупные факелы – прессованием либо набивкой с последующим уплотнением пластичной массы. Запатентованы пластизольные осветительные составы и композиции, перерабатываемые свободным литьем. Эти технологии позволяют получать крупные факелы без использования дорогостоящих прессов, при этом шашки обладают эластичностью и устойчивы к механическим перегрузкам. Известны составы [22] на основе легкоплавких солевых эвтектик, которые также можно перерабатывать литьем. Впрочем, использование солевых эвтектик на практике не следует считать целесообразным, т.к. они обладают большей гигроскопичностью, чем эти же соли, взятые по отдельности.

**В качестве примеров следует упомянуть следующие патенты:**

1. В патенте [23] заявлен пластизольный состав с энергоемким связующим на основе нитроцеллюлозы: магний – 39%, нитрат натрия – 26%, нитроцеллюлоза – 6,82%, нитроглицерин – 0,1%, триэтиленгликольтринитрат – 18,09%, бутантриолтринитрат – 9,46%, 2-нитродифениламин – 0,28%, толуидиндизоцианат – 0,25%. Состав, залитый в пластиковый корпус длиной 5,8 дюйма и массой 205 г при плотности 1,7 г/см<sup>3</sup>, горел со скоростью 2,0 мм/сек с удельной интенсивностью 13400 кд/см<sup>2</sup> и удельной светосуммой 41400 кд·сек/г.
2. В патенте [24] заявлен литьевой состав со связующим на основе продукта конденсации диглицидилового эфира глицерина с малеиновым ангидридом в соотношении 2:1 в количестве 18%, 48% бимодального магния и 34% нитрата натрия. 100 г звездка обеспечивала удельную светосумму 33600 кд·сек/г.
3. В патенте [25] от 1968 г. заявлен литьевой состав с использованием перхлората натрия и связующего на основе продукта конденсации полиэфирной смолы и глицидилметакрилата в соотношении 1:1 в количестве 15,5%, перхлората натрия – 42%, магния – 42%. В качестве добавок используется 0,5% этилендиметакрилата и небольшое количество сшивающего агента. Состав обеспечивает удельную светосумму 47000 кд·сек/г.
4. Французский литьевой состав от концерна ЕТАТ [26] содержит магний – 49,8%, нитрат натрия – 30%, смесь карбоната и оксида магния – 0,2%, мочевино-формальдегидную смолу марки «Nobelamine» – остальное. Факел массой 147,4 г и диаметром 45 мм сгорал за 33,9 сек. со скоростью 1,98 мм/сек, развивая удельную светосумму 41000 кд·сек/г.
5. В патентах США [27, 28] предложено усовершенствование существующей технологии глухого прессования за счет использования 2 типов микрокапсул со смолой и отвердителем. Композиция готовится в сухом виде, в результате исключается необходимость в последующей очистке смесителя от налипшей массы и предотвращается накопление отходов. При прессовании микрогранулы разрушаются за счет внутренних напряжений, связка входит в контакт с отвердителем и с компонентами состава, после чего заготовку факела нагревают для завершения полимеризации. Согласно [28], первый тип микрокапсул состоит из диглицидилового эфира бисфенола А (EPON 828) – 79%, перекиси

бензоили – 12% и 9,0% смеси арабийской камеди с желатиной в качестве оболочки микрокапсул. Второй тип содержит 86% полиэфирной смолы Агроз 72-40МС, 5% диметил-о-толуидина и 9,0% смеси арабийской камеди с желатиной в качестве оболочки микрокапсул. В патенте приводится следующая таблица, позволяющая охарактеризовать свойства составов на этой основе.

**Табл. 15.5. Свойства осветительных составов, изготовленных по патенту [28].**

Составы были запрессованы в звездки диаметром 31 мм и массой 85 г под давлением 985 кг/см<sup>2</sup>

Состав	Связка, %	Mg, %	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Скорость горения, мм/сек	Сила света, кд
1	6	45	1,808	1,63	137400
2	6	50	1,762	2,03	173300
3	6	55	1,707	2,53	202400
4	6	57	1,686	2,84	201400
5	8	45	1,847	1,46	127400
6	8	50	1,794	1,90	151100
7	8	55	1,754	2,45	161400
8	8	60	1,696	2,82	161700
9	10	45	1,858	1,47	101800
10	10	50	1,815	1,85	119500
11	10	55	1,764	2,21	130900
12	10	60	1,728	2,53	126600
13	12	50	1,863	1,39	115100
14	12	55	1,787	1,91	103800

Следует упомянуть, что во время Второй мировой войны в условиях дефицита нитрата натрия для его частичной замены в Германии применяли сульфат кальция. Сульфат кальция (алебастр) готовили с добавлением воды, таким образом, он выполнял также функцию связующего. Безусловно, это была вынужденная мера, т.к. сульфаты являются менее эффективными окислителями, чем нитраты [7].

1. Нитрат натрия – 11,3%, магний – 34,6%, сульфат кальция – 45,5%, вода – 8,6% [7].
2. Нитрат натрия – 11%, ПАМ – 41%, сульфат кальция – 32%, карбонат кальция – 15%, вода – 1% [9].
3. Нитрат натрия – 13%, магний – 40%, сульфат кальция – 40%, вода – 7% [9].

## 15.2. Составы для высотного фотографирования (фотоосветительные смеси)

Для высотного фотографирования с целью подсветки местности используются фотоосветительные составы. Ими снаряжают либо специальные кассеты с фотоосветительными патронами, которые отстреливаются с самолета, либо фотографические авиабомбы (ФОТАБ). Фотоосветительные составы сгорают в режиме «вспышки», формируя интенсивный световой поток, достаточный для фотографирования. Синхронизация между срабатыванием фотокамеры и фотоосветительного средства осуществляется при помощи оптического датчика. Впервые ночное фотографирование с использованием ФОТАБ было осуществлено англичанами в

1918 году и получило значительное распространение во время Второй мировой войны [2].

Разработка отечественной ФОТАБ была начата в 1936 г. Доработанный вариант ФОТАБ-35 был испытан в 1938 г. В 1941 г. бомба была переименована в ФОТАБ-50-35 и на протяжении всей войны полностью удовлетворяла требованиям строевых частей [36].

Стоит отметить, что в случае современных локальных войн проведение фотографирования при помощи авиации вряд ли можно считать целесообразным из-за существования БПЛА и мощных спутниковых группировок, позволяющих делать качественные фотографии более оперативно, в любой точке Земли и в том числе в инфракрасном диапазоне. Тем не менее в арсеналах ведущих держав фотоосветительные средства остаются на вооружении, т.к. в условиях крупномасштабной войны существует возможность выведения из строя разведывательных спутников или подавления инфракрасных фотокамер при помощи специальных средств противника.

**По принципу действия различают 2 типа авиационных фотоосветительных средств:**

- Снаряженные специальными фотоосветительными смесями окислитель + горючее.
- Снаряженные порошкообразным металлом и воспламенительно-разрывным зарядом (ВРЗ). Эти средства еще называют металлопылевыми ФОТАБ [32].

Средства первого типа содержат окислитель – нитрат или перхлорат и горючее – порошкообразный металл. В качестве горючего обычно используют алюминий или магний. Во время Второй мировой войны, из-за большей доступности и технологичности, получил распространение порошкообразный сплав этих металлов в соотношении 35/65.

Второй тип фотоосветительных средств содержит порошкообразный металл без окислителя. Обычно это чешуйчатый алюминий, реже – порошок алюминий-магниевого сплава 35/65 (ФОТАБ М122). Изделие инициируется при помощи ВРЗ из мощного ВВ или пороха, порошок металла распыляется и воспламеняется.

Магний в качестве наполнителя используется редко, т.к. его труднее инициировать в воздухе, чем чешуйчатый алюминий. ВРЗ для магниевого наполнения не должен содержать ВВ, иначе магний не распыляется, а уплотняется в компактную массу. Наиболее эффективны изделия с использованием чешуйчатого алюминия и ВРЗ массой порядка трети от массы основного наполнителя. В качестве ВРЗ хорошо зарекомендовали ВВ с высокой воспламеняющей способностью типа три-тонала и торпекса в форме крупных гранул. В случае чешуйчатого алюминия их максимальная яркость при воспламенении составляет 500 миллионов кандел [2]. Отечественные металлопылевые бомбы ФОТАБ 100-80 и ФОТАБ 250-215 снаряжались ПАМ-ом с добавкой 2% веретенного масла (пиковая интенсивность излучения 250 и 500 Мкд соответственно), а ФОТАБ 100-140 снаряжалась порошком алюминия с добавкой 2% коллоксилина (пиковая интенсивность излучения – 850 Мкд, масса алюминия 50 кг) [32].

Фотоосветительные составы первого типа создают максимальную силу света за очень короткий промежуток времени, равный 2-5 миллисекундам, и, в целом, более эффективны, чем заряды одного лишь порошкообразного металла с ВРЗ. Однако в случае попадания в фотоосветительный боеприпас пули или осколка у экипажа самолета практически не остается шансов на спасение. Вдобавок изготовление таких боеприпасов набивкой – очень опасный процесс [32]. Удельная светосумма смесей с окислителем составляет порядка 11000-11500 кд·сек/г, а интенсивность через 10 мс после срабатывания может достигать нескольких сотен миллионов кандел [10].

Фотоосветительные изделия, снаряженные порошком металла и ВРЗ, из-за сравнительной безопасности в эксплуатации в настоящее время получили наибольшее распространение. Даже в случае попадания зажигательной пули в авиабомбу, начиненную порошком металла, остается время на аварийный сброс этой авиабомбы.

### Примечание.

Металлопорошковые ФОТАБ появились раньше, чем снаряжаемые пиротехническими смесями, однако первые образцы демонстрировали низкую эффективность, поэтому во время Второй мировой войны предпочтения отдавались пиротехническим смесям на основе металла + окислитель [10]. Опыт производства и применения отечественных бомб ФОТАБ 50-35 в годы войны выявил высокую степень опасности их снаряжения, поэтому в начале 1950-х годов в НИИ-862 (ныне НИИПХ) были созданы металлопорошковые ФОТАБ 100-80 и ФОТАБ 250-215 [37].

**Табл. 15.6. Фотоосветительные составы пиротехнического типа для снаряжения ФОТАБ**

Состав	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$\text{NaNO}_3$	-	-	-	-	-	30	-	-	-	-	-	-
$\text{BaNO}_3$	-	30	-	54,5	-	-	60	-	-	-	10	50
$\text{KClO}_4$	50	30	60	-	40	-	-	49	50	-	10	-
ПАМ	-	-	-	45,5	60	-	-	-	-	-	-	50
Mg	-	-	-	-	-	70	40	-	-	-	-	-
алюминий	50	40	40	5	-	-	-	31	20	-	-	-
$\text{SnF}_2$	-	-	-	-	-	-	-	20	-	-	-	-
кальций	-	-	-	-	-	-	-	-	30	80	80	-
$\text{NaClO}_4$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	20	-	-

1. Английский состав SR-812 [8].
2. Американский состав, созданный после Второй мировой войны. Активно использовался в 50-х годах 20 века в изделиях: M112A1, M112A3, T9E8, M120, T93, T94, T104. Плотность снаряжения – 1,8 г/см³. Теплота реакции – 7,49 МДж/кг. Температура воспламенения – 856°C [19].
3. Американский состав. Плотность снаряжения – 1,14-1,34 г/см³. Теплота реакции – 7,54 МДж/кг. Температура воспламенения – 735°C [19].
4. Американский состав времен Второй мировой войны. Соотношения компонентов в частях. Теплота реакции – 6,71 МДж/кг. Температура воспламенения – 832°C [11, 19].
5. Американский состав времен Второй мировой войны [11].
6. Американский состав. Теплота реакции – 8,14 МДж/кг. Температура вспышки – 525°C [19].

7. Отечественный состав [12].
- 8 - 9. Американские высотные составы [11].
- 10 - 11. Американские высотные составы [11, 29].
12. Состав использовался в отечественных ФОТАБ 50-35 (15-килограммовая навеска обеспечивала пиковую интенсивность излучения 1 млрд кд) и в американских ФОТАБ M120A1 [32, 36].

Фотоосветительные композиции зачастую применяются на высотах, превышающих 10 километров. С увеличением высоты до 30 км эффективность обычных фотоосветительных смесей уменьшается в 2-4 раза, поэтому американцами были разработаны специальные высотные композиции. Например, на высоте в 100000 футов (30,5 км) навеска в 12 граммов состава № 10 (из Табл. 15.6) излучает 320000 кд·сек (на уровне моря – 103000 кд·сек), более удобная в обращении композиция №11 на высоте 100000 футов излучает 343000 кд·сек света. Для сравнения традиционный состав №2, взятый в количестве 30 г, дает только 116000 кд·сек (на уровне моря – 231000 кд·сек).

Фотоосветительные смеси широко использовались в фотовспышках, когда электрические лампы были малоэффективны.

В справочниках фотографа 60-х – 70-х годов 20 века приводились различные составы для фотовспышек, используемые в микрофотографии. В качестве примера можно привести смеси:

1. 50% нитрата калия, бария или аммония и 50% пассивированного магния;
2. 43% перманганата калия и 57% магния;
3. 67% перманганата калия и 33% алюминиевой пудры (смеси на перманганатах плохо хранятся и чувствительны к механическим воздействиям);
4. 54% дихромата калия, 27% магния, 19% сульфида сурьмы.

## Литература

1. Шидловский А.А. Основы пиротехники. - М.: Машиностроение, 1973.
2. Engineering Design Handbook. Military Pyrotechnics Series. Part One. Theory and Application. US Army Materiel Command. AMCP 706-185. 1967.
3. A.P. Hardt. Pyrotechnics. Pyrotechnica Publications. 2001.
4. Миропольский Ф.П. Авиационные средства поражения. - М.: Воениздат, 1995.
5. Brebera Stanislav etc. Specialni Technica. I Dil. Гл. ред. Urban Ladislav. Praha 1976.
6. Henry B. Faber. Military Pyrotechnics, The History and Development of Military Pyrotechnics, 3 Vol., Government Printing Office, Washington, 1919.
7. Basil T Fedoroff etc. Dictionary of Explosives, Ammunition and Weapons (german section) Dover, New Jersey. 1958.
8. L.T. Dunnett. Services Textbook of Explosives. Ministry of Defence. JSP333. 1974.
9. Ellern H. Military and Civilian Pyrotechnics. Chemical Publishing Company Inc. New York. 1968.
10. Brassey's World Military Technology Explosives, Propellants and Pyrotechnics. Series Editor: Colonel R.G. Lee. London. 1989.
11. Engineering Design Handbook. Military Pyrotechnics Series. Part Four. Design for Ammunition for Pyrotechnic Effects. US Army Materiel Command. AMCP 706-188. 1974.
12. А.В. Бабкин, В.А. Велданов, Е.Ф. Грязнов и др. Средства поражения и боеприпасы: Учебник.- М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008.
13. Army Ammunition Data Sheets for Rockets, Rocket Systems, Rocket Fuzes, Rocket Motors. TM 43-0001-30. Headquarters, Department of the Army. December 1981.

14. Army Ammunition Data Sheets Artillery Ammunition Guns, Howitzers, Mortars, Recoilless Rifles, Grenade Launchers and Artillery Fuzes. TM 43-0001-28. Headquarters Department of the Army. Washington, DC, 27 October 2003.
15. Army Ammunition Data Sheets for Grenades. TM 43-0001-29. Headquarters Department of the Army. Washington, DC, 30 June 1994.
16. Материалы Интернет-ресурса dzromon.pard.ru.
17. Army Ammunition Data Sheets: Military Pyrotechnics. TM 43-0001-37. Headquarters Department of the Army. Washington, DC, 6 January 1994.
18. Bossie Jackson, Frank Taylor et al. Substitution of Aluminium for Magnesium as a Fuel in Flares. Proceedings of the Fourth International Pyrotechnics Seminar. 22-26 July 1974.
19. F. L. McIntyre, R.M. Rindner. A Compilation of Hazard and Test Data for Pyrotechnic Compositions. ARLCD-CR-80047. 1980.
20. L. M. Aikman, T. E. Shook, R. M. Lehr, E. Robinson, F. McIntyre. Improved Mixing, Granulation and Drying of Highly Energetic Pyromixtures. Propellants, Explosives, Pyrotechnics 12, 17-25 (1987).
21. Пат. US3664898 от 1969 г.
22. Пат. US3729351 от 1969 г.
23. Пат. US3715248 от 1970 г.
24. Пат. US3673014 от 1970 г.
25. Пат. US3462325 от 1968 г.
26. Пат. FR2471959 от 1979 г.
27. Пат. US3728172 от 1970 г.
28. Пат. USH925 от 1989 г.
29. Пат. US3261731 от 1964 г.
30. David R. Dillehay. Possible Mechanisms for Burning Rate/Candlepower Enhancement in Illuminants. Proceedings of the Third International Pyrotechnics Seminar. 21 August 1972.
31. Вернидуб И.И. Боеприпасы – фронты. Очерки. - Москва – Сергиев Посад, 2003.
32. Материалы Интернет-ресурса [www.pyrotechnics.net.ru/](http://www.pyrotechnics.net.ru/) Материалы лекций Дудырева А.С., «Разработка пиротехнических составов». Переработка и оформление Е. Мисоночкиной и Королева Д.В.
33. Jesse J. Sabatini. Development of Environmentally Friendly Insensitive Pyrotechnic Munitions with Enhanced Battlefield Performance. US Army RDECOM-ARDEC. Environmental Technology Technical Symposium & Workshop. 2011. Washington DC.
34. Полезная модель RU96231 от 2010 г.
35. Ernst-Christian Koch. Metal-Fluorocarbon Based Energetic Materials. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA. 2012.
36. Пырьев Е.В., Резниченко С.Н. Бомбардировочное вооружение авиации России 1912-1945 гг. - М.: Редакционно-издательский центр Генерального штаба ВС РФ, 2001.
37. Взрывчатые вещества, пиротехника, средства инициирования в послевоенный период: Люди, Наука, Производство. Второе издание. /Коллектив авторов. – М.; СПб.: Издательство «Гуманистика». – 936 с., 2002.

## Глава 16. Составы инфракрасного излучения

Составами инфракрасного излучения называют пиротехнические смеси, основная часть излучения которых приходится на ИК-диапазон, с минимальной долей видимого света.

**Различают 3 вида инфракрасных составов:**

- составы для снаряжения инфракрасных мишеней-ловушек (decoy, ложные тепловые цели, ЛТЦ);
- составы для инфракрасной подсветки местности;
- инфракрасные трассирующие составы (рассматриваются в главе «Трассирующие составы»).

Последние 2 типа составов предусматривают широкое оснащение солдат приборами ночного видения и поэтому применяются только самыми технически оснащенными армиями. Инфракрасные приборы полезны не только ночью, но и при неблагоприятных погодных условиях днем, когда видимость затруднена. Поверхность земли довольно эффективно отражает ИК-излучение, поэтому военные объекты и техника хорошо контрастируют с фоном и легче идентифицируются в этих условиях.

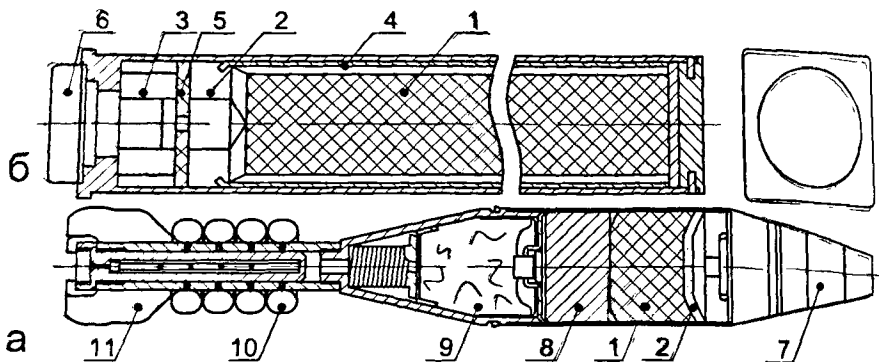


Рис. 16.1. Американские боеприпасы с инфракрасными излучателями [4, 5].

а) – 60 мм минометная мина М737 для ИК-подсветки местности, б) – авиационная ИК-ловушка М206.

1 – Состав ИК-излучения, 2 – воспламенительный состав, 3 – вышибной заряд, 4 – корпус патрона, 5 – перегородка, 6 – резиновый колпачок, 7 – замедлитель, 8 – металлическое основание, 9 – парашют, 10 – метательные пороховые заряды, 11 – стабилизаторы.

### 16.1. Составы для снаряжения инфракрасных мишеней-ловушек

Во время Второй мировой войны немцами были разработаны первые в истории полноценные приборы ночного видения (1939 г.), а также инфракрасная головка наведения для зенитных ракет с детектором на основе сульфида свинца (1944-1945 гг.). К концу войны немцам удалось выпустить 50 танков «Пантера», оснащенных приборами ночного видения активного типа, т.е. требующих внеш-

ней инфракрасной подсветки. Подсветка осуществлялась специальными излучателями, установленными на танке. Инфракрасный блок наведения «Мадрид» для зенитной ракеты «Enzian E1» не успел поступить в производство в связи с поражением Германии в войне [6]. Американцы представили аналогичное устройство только в 1948 г. и во время корейской войны довольно активно использовали средства ночного видения типа инфракрасных прицелов. В 1952 г. был испытан первый прототип ракеты «Sidewinder» с тепловой головкой наведения. В связи с появлением инфракрасных головок ракет, была выдвинута концепция инфракрасных мишеней-ловушек для противодействия ракетам с системами ИК-наведения.

В 1954 году в США появилась первая такая ловушка для снаряжения самолетов-мишеней. В этом же году была внедрена система «RITA» для защиты бомбардировщиков. Пиротехническая композиция для системы «RITA» ничем не отличалась от штатных осветительных составов и содержала 66,7% магния, 28,5% нитрата натрия и 4,8% органического связующего. Вариант для флота в мишенях-ловушках Mk21 mod 0 tracking flare содержал 54% магния, 34% нитрата натрия и 12% ламинака.

В 1956 году был создан первый полноценный самолет-мишень с пиротехническим составом, содержащим 54% магния, 30% политетрафторэтилена (Тефлона) и 16% фторорганического связующего — полихлортрифторэтилена (Кел-Ф)  $\text{CCl}_2\text{F}-\text{CF}_2$ . Кел-Ф начали заменять более эффективным связующим — (фтор-пластиком Viton A (сополимер фторпропилена и винилиденфторида). Этим композициям дали наименование «MTV» (Magnesium-Teflon-Viton), до сих пор используются как в инфракрасных мишенях-ловушках, так и в качестве пиротехнических составов различного назначения.

Последний вариант композиции MTV, согласно стандарту США MIL-F-82736A (OS), содержит: магний — 52,5–54,5%, политетрафторэтилен — 29,5–32,0%, Viton-A — 15,0–16,5% [8]. Свойства MTV подробно описаны в [7, 10, 11, 12, 36].

С 70-х годов 20 века Viton-A в ряде составов начали заменять на акриловый полимер «Нусар», например: 65% магний, 28% ПТФЭ и 7% Нусар. Смеси получили наименование «МТН» [9].

Недавно, в целях упрощения технологии производства ИК-составов типа MTV, американцы исследовали возможность создания термопластичных магни-

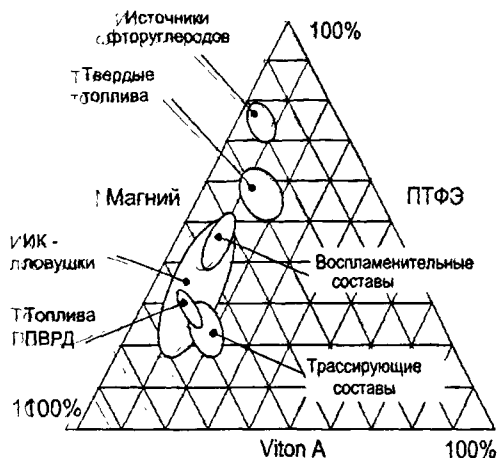


Рис. 16.2. Области применения пиротехнических составов типа MTV [7].

тефлоновых смесей, адаптированных под технологию экструзии (композиции МТР) [30]. Наиболее перспективный с точки зрения производства состав содержал: магний (сфер. 100-200 меш) – 40,425%, магний (сфер. тип III) – 17,325%, ПТФЭ – 18%, диметилфталат – 11,25%, сополимер ПВХ/ПВА – 9%, окись железа – 3%, графит – 1%.

Немецкими исследователями недавно были предложены улучшенные композиции типа MTV, в которых вместо тефлона используется фторграфит ( $-(CF_x)_n$ , где  $x \approx 0,6-1,2$ ) [29]. Немецкая композиция, содержащая 45% магния, 19% фторграфита, 18% гранул каменного угля, 11,9% связующего «fluorel FC-2175», 6% газогенерирующей добавки (гуанидиназотетразолат) и 0,1% пигмента, обеспечивает почти двукратное превосходство по силе излучения над классическими MTV-составами [37].

Излучение нагретого графита близко к излучению абсолютно черного тела, поэтому в США некоторое время использовались мишени-ловушки типа RR-88 (Balls of Fire), конструктивно представляющие собой графитовый корпус, снаряженный термитной смесью, состоящей из 22,5% алюминия, 76,5% оксида кобальта и 1% тефлона. Медленногорящие термитные составы для ИК-ловушек применяются и в настоящее время наряду с пламенными композициями. Один из современных отечественных вариантов составов содержит окись железа, карбид циркония, древесный уголь и фторполимер. Несмотря на значительно (в 5-7 раз) меньшую излучательную способность, такие ловушки, взятые в большом количестве, эффективно формируют ложные тепловые цели и являются спектрально сбалансированными [1].

В 1968 г. в США была осуществлена попытка использовать жидкую самовоспламеняющуюся композицию для источника ИК-излучения, имитирующего сопло реактивного самолета. Смесью состояла из 80% триметилэтилена и 20% триэтилалюминия. На этом принципе в армиях стран НАТО применяются мишени-ловушки типа MJU-5188 и MJU-5130.

В 1969 году было установлено, что основным источником ИК-излучения в составах типа MTV являются частицы нагретой сажи [8].

В связи с развитием электроники в конце 80-х – начале 90-х годов 20 века на вооружение начали поступать ракеты с тепловыми головками наведения, снабженными средствами подавления инфракрасных помех. Физически это осуществлялось разделением полос чувствительности сенсоров на 2 диапазона (УФ и ИК). Классические композиции типа MTV при сгорании сильно излучают не только в ИК, но в УФ и видимом диапазонах, тогда как выхлоп реактивного двигателя самолета в УФ диапазоне не излучает. Детектор совмещает данные из 2-х диапазонов и распознает настоящую цель. Несколько позже появились мультдиапазонные головки наведения, когда ИК-спектр разбивался на несколько диапазонов (например, альфа- и бета- ИК-диапазоны) и сравнивался со спектром излучения выхлопной струи реактивного двигателя (см. рис. 16.3).

В связи с этим появилась потребность в разработке специальных т.н. «спектрально адаптированных» (спектрально сбалансированных) составов, спектр излучения которых более или менее точно имитировал выхлоп реактивного двигателя. Одновременно в связи с появлением на зенитных ракетах и ракетах

«воздух-воздух» бортовых ЭВМ, способных анализировать и сопоставлять траектории самолета и мишенной-ловушек, усложнилась конструкция самих ловушек - они выполнялись в виде ракетного двигателя и при отстреливании летели параллельно самолету. Впрочем, мишени-ловушки, снаряженные композициями типа MTV, в настоящее время еще находят применение в качестве средства противодействия устаревшим типам ракет [6]. Примером современной композиции типа MTV является состав PL9000, содержащий 13,5% Viton A, 13,5% ПТФЭ, 63% магния и 10% графита [24].

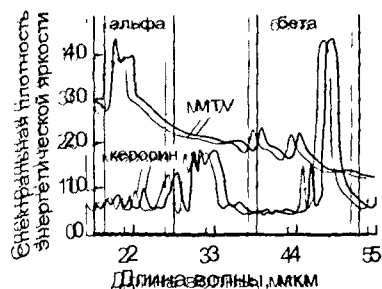


Рис. 16.3. Спектр излучения MTV-композиций, по сравнению со спектром излучения продуктов сгорания авиационного керосина [13] в ИК-диапазоне.

Современные спектрально адаптированные составы бывают двух типов: первые - на основе окислителя и металлического горючего (бора, кремния, алюминия и т.д.), вторые базируются на окислителе и органическом горючем, содержащем мало атомов водорода. Отсутствие или малое содержание атомов водорода и большое количество углекислого газа в продуктах сгорания позволяет выравнивать цветовую температуру излучения, и, таким образом, спектр ИК-излучения состава становится максимально приближенным к спектру излучения продуктов сгорания авиационного керосина. В качестве горючих таких смесей используют диангидриды кислот: пиромеллитовой (ПКДА), бензохинонтетракарбоксидовой, триангидрид меллитовой кислоты, гексацианобензол, нитрилтриацетонитрил и т.д. Составы с органическим горючим следует считать более эффективными по сравнению с современными головок с тепловым наведением, однако в полной мере они еще не освоены промышленностью.

Отечественные мишени-ловушки типа ППИ базируются на смеси нитрата калия, магния и органической добавки типа антрацена, нафталина или дифенила [1, 2]. В [32] приведен модельный состав такого типа, содержащий 25% нитрата калия, 38% магния и 37% дифенила, скорость его горения составляет 6 мм/сек, 87% энергии излучения приходится на диапазон 1,8-6 мкм. Кроме того, в ряде европейских стран применяют составы на основе красного фосфора (ловушки CIRUS

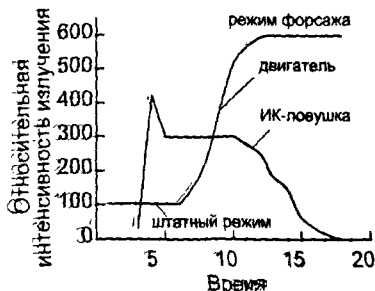


Рис. 16.4. Интенсивность излучения выхлопной струи авиационного двигателя в разных режимах относительно интенсивности излучения ИК-состава [7].

фирмы «Rheinmetall» и DM 69A1) или бездымных порохов. Так, например, составом для немецкой мишени-ловушки «BIRDIE 218» является нитроглицерино-диглицерольный бездымный порох, аналогичный танковому пороху L1. В США на данный момент используются ловушки, снаряженные смесью перхлорат калия/борглицидилазидный полимер. Соотношение ПХК/бор указывается как 2,21. На фоне американской программы по исключению перхлоратов из пиротехнических составов разработана и планируется к внедрению композиция на основе нитрата калия. В качестве горючего она содержит алюминий, бор и диангидрид пиромеллитовой кислоты, а в качестве связки – энергоемкий полиглицидилазид [34].

### Примечание.

Интересно отметить, что первая попытка использовать бездымный порох в ИК-ловушках была предпринята англичанами в середине 50-х годов (кордит SC-1), однако в то время в головках самонаведения использовались довольно примитивные детекторы, против которых MTV-композиции были более эффективными.

Находят применение т.н. «гибридные» мишени-ловушки (MJU-48B), где MTV-композиция используется вместе со спектрально сбалансированной [13, 14].

В режиме форсажа интенсивность излучения выхлопной струи авиационного двигателя перекрывает интенсивность излучения инфракрасной звезды любого типа, поэтому для успешного подавления ИК головки наведения пилот самолета должен перейти в режим работы двигателя с пониженным расходом топлива (см. рис. 16.4).

Стоит также отметить, что эффективность большинства инфракрасных составов зависит от характера смешения их продуктов сгорания с потоком воздуха, т.е. в конечном счете – от скорости отстрела ловушки и скорости самолета. Особенно сильно такая зависимость проявляется для композиций, выделяющих большое количество сажи [37].

**Табл. 16.1. Классические составы на основе магния и политетрафторэтилена для мишеней-ловушек, используемые преимущественно в 1950-1970-х гг.**

Состав:	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
магний	54	55	66,1	50	54	62	70	60	65	47	39,9	54	60	55	54	46,5	70	54	60	60
ПТФЭ	23	45	33,9	40	44	38	30	27,5	35	-	46,8	30	35	40	30	38,1	15	46	35	23
Kel-F	23	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	16	-	-	-	-	-	-	-	-
viton-A	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5	5	16	-	15	-	-	-
фторакрилат	-	-	-	-	-	-	-	-	-	39	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ламинак	-	-	-	-	-	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
титан	-	-	-	10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
fluogel	-	-	-	-	-	-	-	7,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	12
графит	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4	-	-	-	-	-	-	-	5
антрацен	-	-	-	-	-	-	-	5	3-4	4	-	-	-	-	-	-	-	-	5	-
алюминий	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2	-	-	-	-	-	13,6	-	-	-	-
бор/ $\text{BaCrO}_4$ 16/84	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	13,3	-	-	-	-	-	-	-	-	-
нитроцеллюлоза	-	-	-	-	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2,6	-	-
полиизобутилен	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,8	-	-	-	-
сшивающий агент	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

1. Американский имитатор цели для самолета мишени F9F-6K [8].
2. Английский состав начала 60-х годов для Mk1 Decoy. Переработка глухим прессованием [8].
3. Американский состав для мишени-ловушки RR-80 [8].
4. Американский состав для мишени-ловушки RR-82 [8].
5. Американский состав для мишеней-ловушек RR-98, RITA-I и RITA-II [8].
6. Американский состав для мишени-ловушки RR-119 [36].
7. Американский состав для мишеней-ловушек QRC-127 и RITA-III [8].
8. Американский состав для мишени-ловушки QRC-353 [8].
9. Американский состав для мишени-ловушки TAU-56/B с 1963 г. Антрацен сверх 100% [8].
10. Американский состав для мишени-ловушки XADR-9. Заряд изготовлялся свободным литьем. Соотношения компонентов в частях [8].
11. Американский состав для мишени-ловушки FLORA Type C [8].
12. Американский состав для мишеней-ловушек Mk28 Mod 0. Графит сверх 100% [8].
13. Американский состав для мишеней-ловушек Mk28 Mod 3. В Англии известен как SR-885 [15].
14. Английский состав SR-886 [36].
15. Американский состав для мишеней-ловушек Mk33 Mod 1 (конец 60-х) [8].
16. Американский состав для мишеней-ловушек Mk39 Mod 0 (конец 60-х) [8].
17. Американский состав ET-070 [8].
18. Американский состав BU-3006 [36].
19. Состав для ангийской мишени-ловушки «Pierced Point» [8].
20. Современный MTV-состав для германской мишени-ловушки. Плотность 1,89 г/см<sup>3</sup> [37].

Табл. 16.2. Спектрально сбалансированные ИК-композиции<sup>1</sup>

Состав	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
НН <sub>2</sub> СО <sub>3</sub>	289	665	844	289	192	--	--	--	--	--	--	--	--	85,5-87	77,8	--	--	--
КСНО <sub>3</sub>	--	--	--	--	--	63,4	52,8	54,9	65	77	--	--	--	--	--	--	74	81
КСНО <sub>2</sub>	--	--	--	--	17	--	--	--	--	--	65	--	45	--	--	53	--	--
Ва(НО <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	51	--	--	--	--	--	--
магний	46	--	333	222	10	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
алюминий	--	--	--	--	10	--	--	--	--	--	--	25	--	--	--	--	--	--
кремний	--	15	--	--	--	--	--	--	--	--	10	--	--	--	--	--	--	--
бор	--	--	--	--	14	--	--	--	--	--	20	--	--	--	--	4	--	--
антрацен	--	--	15	10	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
бурый уголь	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	32	--	--
уротропин	--	--	--	--	8	--	--	--	--	--	--	--	--	--	11	--	--	--
ПТФЭ	--	--	--	21,4	5	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
сера	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	8	--	--
ПВХ	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	16	--	--	--	--	--	--
карбид циркония	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	50	--	--	--	--	--
графит	--	--	--	--	--	0,2	5	0,6	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
витон А (СКФ-26)	1,5	--	--	--	14	4	--	--	5	5	5	--	5	--	--	--	--	--
связка*	23,5	20	18	17,6	--	--	18,6	13	--	--	--	8	--	14,5-13	11,2	3	3	3
орг. горючее**	--	--	--	--	--	32,4	23,8	31,5	30	18	--	--	--	--	--	--	23	16

1. Американский литейной состав «256»: \* — силиконовое связующее Sylgard [14].
2. Экспериментальная литейная композиция 5222 (Австралия, 1994 г.): \* — полибутадиен [14].
- 3-4. Американские литейные композиции: \* — полибутадиен [19].
5. Американская композиция [20].
6. Американская композиция: \*\*\* — пиромеллитовой кислоты диангидрид [21].
7. Композиция фирмы ПНО: \* — 11,9% НЦ и 6,7% диоктилфталата; \*\* — калия дигидрофталат [22].
8. Композиция фирмы ПНО: \* — НЦ; \*\*\* — натрия D-изо-аскорбат [22].
9. Английская композиция: \*\* — калия бензоат [23].

10. Американская композиция: \*\* – трис-(цианоэтил)-меламин [21].
11. Английская композиция [23].
12. Румынский состав: \* – идиол. Образующийся при горении монохлорид бария, кроме зеленой части видимого спектра, эффективно излучает в ближнем ИК [25].
13. Отечественный состав для изделия ПИКС-23 [32].
14. Классический немецкий спектрально сбалансированный состав: \* – полибутадиев [38].
15. Немецкая смесь. Содержит гранулы состава с повышенным содержанием уротропина, которые формируют протяженный факел пламени: \* – полибутадиев [39].
16. Немецкая смесь фирмы «Diehl»: \* – полихлоропропен [38].
17. Немецкая композиция: \* – полиакрилат; \*\* – пиромеллитовой кислоты диангидрид [40].
17. Немецкая композиция: \* – полиакрилат; \*\* – 1,4-дицианобензол [40].

## 16.2. Составы для инфракрасной подсветки местности

Во время вьетнамской войны на вооружение армии США поступили пассивные приборы ночного видения первого поколения, не требующие внешней ИК-подсветки. С целью увеличения их дальности действия и разрешающей способности, в начале 70-х были разработаны первые инфракрасные составы для скрытого освещения поля боя, которые описаны в патенте [26], а свойства приведены в [17]. Эти составы излучали в ближнем ИК-диапазоне, при этом в качестве окислителей были приняты нитраты калия, рубидия и цезия. Состав на нитрате калия излучал с пиком на длине волны в 760 нм, на нитрате рубидия – с пиком на 770-800 нм, на нитрате цезия – с пиками на 850-1200 нм (см. Табл. 16.3, составы № 1-3). Составы №4 и №5 используются в американской 60 мм минометной мине M767 (XM767) и боеприпасах M721(XM721), №6 – американский состав «Thiolite», №7 и №8 – составы американской фирмы «Cordant», №9 – американский состав для снаряжения бомбы инфракрасной подсветки LUU-19.

Табл. 16.3. ИК-составы для подсветки местности

Состав	1	2	3	4	5	6	7	8	9
нитрат калия - $\text{KNO}_3$	70	-	-	-	30	60	70	37	40
нитрат рубидия - $\text{RbNO}_3$	-	60,8	-	-	-	-	-	-	-
нитрат цезия - $\text{CsNO}_3$	-	-	78,7	70	40	9-10	-	35	35
кремний - Si	10	10	16,3	9	9	7	7	10	9
аморфный бор - B	-	-	-	-	-	2	2	-	-
уротропин	16	23,2	-	16	16	15-16	-	-	-
калиевая соли дицианоимидазола	-	-	-	-	-	-	15	-	-
трехокись железа - $\text{Fe}_2\text{O}_3$	-	-	-	-	-	1	-	-	1
нитроцеллюлоза - НЦ	-	-	-	1	1	-	-	-	-
эпоксидная или полиэфирная смола	4	6	5	4	4	5	6	18	15
литература	26, 17	26, 17	26, 17	18, 31	31	27	28	33	35

## Литература

1. А.В. Бабкин, В.А. Велданов, Е.Ф. Грязнов и др. Средства поражения и боеприпасы: Учебник. - М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008.
2. В.Н. Дик. Взрывчатые вещества, пороха и боеприпасы отечественного производства. Ч.1. – Минск: Охотконтракт, 2009.
3. Jai Prakash Agrawal. High Energy Materials. Propellants, Explosives and Pyrotechnics. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. 2010.
4. Army Ammunition Data Sheets: Military Pyrotechnics. TM 43-0001-37. Headquarters Department of the Army. Washington, DC, 6 January 1994.

5. Army Ammunition Data Sheets Artillery Ammunition Guns, Howitzers, Mortars, Recoilless Rifles, Grenade Launchers and Artillery Fuzes. TM 43-0001-28. Headquarters Department of the Army. Washington, DC, 27 October 2003.
6. Ernst-Christian Koch. Review on Pyrotechnic Aerial Infrared Decoys. Propellants, Explosives, Pyrotechnics 26, 3-11 (2001).
7. Ernst-Christian Koch. Metal-Fluorocarbon-Pyrolants: III. Development and Application of Magnesium/Teflon/Viton (MTV). Propellants, Explosives, Pyrotechnics 27, 262 - 266 (2002).
8. Bernard E. Douda. Genesis of Infrared Decoy Flares. The Early Years from 1950 into the 1970s. NSWCCR/RDTR-08/63. 2009.
9. Russel N. Broad. Replacement of First Fire Composition in M127A1 Ground Illumination Signal. ARWEC-TR-97002. 1997.
10. T. Kuwahara, S. Matsuo, and N. Shinozaki. Combustion and Sensitivity Characteristics of Mg/TF Pyrolants. Propellants, Explosives, Pyrotechnics 22, 198-202 (1997).
11. Ernst-Christian Koch. Metal-Fluorocarbon-Pyrolants IV: Thermochemical and Combustion Behaviour of Magnesium/Teflon/Viton (MTV). Propellants, Explosives, Pyrotechnics 27, 340 - 351 (2002).
12. Farid C. Christo. Thermochemistry and Kinetics Models for Magnesium/Teflon/Viton Pyrotechnic Compositions. DSTO-TR-0938. DSTO Aeronautical and Maritime Research Laboratory. 1999.
13. Ernst-Christian Koch. Pyrotechnic Countermeasures: II. Advanced Aerial Infrared Countermeasures. Propellants, Explosives, Pyrotechnics 31, No. 1. P 3-18 (2006).
14. Ernst-Christian Koch. 2006 - 2008 Annual Review on Aerial Infrared Decoy Flares. Propellants Explos. Pyrotech. 2009, 34, 6-12.
15. Def. Standard 13-170. Ministry of Defence. Glasgow 1995.
16. F. L. McIntyre, R.M. Rindner. A Compilation of Hazard and Test Data for Pyrotechnic Compositions. ARLCD-CR-80047. 1980.
17. Schmied, Licht- und Farbintensitäten pyrotechnischer Satze durch Variation der Metallkomponente, Bericht über die 14. Arbeitstagung-Wehrtechnik Chemie und Physik der Explosivstoffe III, 5 - 7. November 1968, Akademie für Wehrverwaltung und Wehrtechnik, Mannheim.
18. E. David Shoua, Paul Betts, Diane Scheneck. Demilitarization Plan for XM767 Infrared Illumination Round. Tech. Report ARWEC-TR-98009. 1998.
19. Пат. US5834680 от 1996 г.
20. Пат. US5472533 от 1994 г.
21. Пат. US6427599 от 1997 г.
22. Пат. US2009/0120545 от 2006 г.
23. Пат. US2004/0011235 от 2004 г.
24. Пат. US6675716 от 2004 г.
25. Пат. RO110058 от 1991 г.
26. Пат. US3733223 от 1972 г.
27. Пат. US5056435 от 1991 г.
28. Пат. US5912430 от 1995 г.
29. Заявка US2003/0150535 от 2003 г.
30. Campbell Carol. Twin Screw Extruder Production of MTTP Decoy Flares SEROP WP-1240. 2005.
31. Пат. US6230628 от 1998 г.
32. Материалы Интернет-ресурса [www.pyrotechnics.net.ru/](http://www.pyrotechnics.net.ru/) Материалы лекций Дудырева А.С., «Разработка пиротехнических составов». Переработка и оформление Е. Мисоночкиной и Королева Д.В.
33. Пат. US6190475 от 2000 г.
34. Robert G. Shortridge, Caroline K. Wilharm, Christina M. Yamamoto. Elimination of Perchlorate Oxidizers from Pyrotechnic Flare Compositions. NSWC Crane Division. Technical Report WP-1280. 2007.
35. Technical Manual. Ordnance Data for Toxic Hazards Associated with Pyrotechnic Items. NAVSEA SW050-AC-ORD-010. 2005.
36. Ernst-Christian Koch. Metal-Fluorocarbon Based Energetic Materials. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA. 2012.
37. Пат. EP2468700 от 2011 г.
38. Пат. EP2530064 от 2012 г.
39. Пат. DE102011120454 от 2011 г.
40. Jason S. Brusnahan, Mark Fitzgerald, Michael Morgan and Raoul Pietrobon. Bi-Spectral IRCM-Flare Formulations based on Tetrazole-Derivatives. Propellants, Explosives, Pyrotechnics 39, 133-137 (2014).

## Глава 17. Сигнальные составы огневые

Огневými сигнальными составами называют пиротехнические смеси, сгорающие с образованием яркого окрашенного пламени. Служат для подачи сигналов при военных операциях, на флоте, транспорте и т.д. Небольшие шашки сигнального состава (звездки) отстреливают из специальных пусковых устройств (ракетниц, патронов, кассет и т.д.). При подъеме на определенную высоту звездка воспламеняется при помощи воспламенительных средств, сгорает в свободном падении или спускается на парашюте. Для сигналов на море или на суше используют фальшфейеры – удлиненные заряды сигнальных смесей, закрепленные на ручке для удерживания в руке, или специальные факелы, втыкаемые в землю. Главная функция сигнальных составов – это обеспечение подачи легко распознаваемого цветового сигнала на значительные расстояния.

Появление первых полноценных огневых сигнальных составов обязано получению в 1786 г. очищенного хлората калия – бертолетовой соли. Это вещество одновременно выполняло функцию как превосходного окислителя, так и интенсификатора свечения. С различными солями (натрия, стронция, бария, меди) и горючими компонентами хлорат калия образует смеси, способные сгорать достаточно ярким цветным пламенем. Первоначально бертолетову соль пытались применять как компонент пороха вместо калиевой селитры. Это послужило причиной многочисленных несчастных случаев и до 1823 г. затормозило внедрение этого ценного окислителя в пиротехнике. Цветопламенными составами на основе бертолетовой соли начали усиленно заниматься лишь с 30-х годов 19 века. К середине 19 века во многих армиях появились первые штатные сигнальные средства для военного применения и фейерверков, начали использоваться системы со спуском горящих звездок на парашюте. Наиболее эффективными сигнальными составами в то время считались смеси на основе хлората калия и серы. Сера значительно улучшала цветность, способствуя вытеснению хлора из хлората калия. Несколько позже сера была заменена (в ущерб цветности пламени) шеллаком и другими смолами ввиду высокой чувствительности серосодержащих хлоратных составов к механическим воздействиям и наличием проблем, связанных с хранением.

### *Примечание.*

*Строго говоря, попытки получить составы, сгорающие цветным пламенем, велись и до открытия бертолетовой соли. Но существующего в то время ассортимента производимых химических веществ было недостаточно для создания полноценных цветопламенных эффектов. Производимые огни имели лишь слабые цветовые оттенки.*

Первая мировая война ознаменовала себя громадным расходом сигнальных и других пиротехнических средств, чего не наблюдалось в прошедших войнах [1].

Первоначально сигнальные составы подбирались чисто эмпирическими методами, теоретическая база была разработана только к началу Второй мировой войны. В это время началось массовое использование менее опасных и более

эффективных магнийсодержащих сигнальных составов типа нитрат металла/магний/хлорорганическое вещество/связующее. Эти смеси только начинали применяться и использовались наряду с традиционными композициями на основе хлората калия [2].

Стоит отметить, что производство магния для пиротехники началось в Европе еще в 60-х годах 19 века, тогда этот металл был очень дорогим, поэтому о массовом его применении в качестве горючего сигнальных составов не могло быть и речи.

Советская промышленность в первые годы Великой Отечественной войны испытывала трудности с поставками сырья для пиротехнических композиций. Поэтому постоянно решались задачи по переходу на более доступные компоненты. Для замены дефицитного нитрата стронция оказался пригодным природный стронциевый минерал целестин в паре с хлоратом калия. Вместо гексахлорбензола в ряде сигнальных составов использовали перхлорвиниловую смолу, пока в 1943 г. не было налажено крупномасштабное производство ГХБ. Олифу успешно заменили смесью канифоли с индустриальным маслом и т.д. В ходе войны отечественная номенклатура сигнальных средств была увеличена в несколько раз. Исследования в области новых видов сигнализации привели к созданию шифрованных сигналов, предназначенных для авиадесантных войск. Опознавание цвета пламени сигнала производилось при помощи очков-фильтров [64].

Аналогичные составы несколько позднее были разработаны американцами. Например, в патенте [42] заявлена композиция: нитрат бария – 30%, нитрат стронция – 13%, перхлорат калия – 9%, магний – 30%, дехлоран – 12%, VAAR – 4%. Состав излучает в области зеленого и красного цветов, однако по правилу сложения цветов глазом воспринимается результирующий желтый. Если же использовать красный или зеленый светофильтры, идентифицируется соответственно зеленый или красный цвет.

В послевоенное время, с развитием ракетной техники и реактивной авиации, усилия были направлены на улучшение сигнальных смесей с целью придания им возможности сгорать в разреженных слоях атмосферы. Бертолетова соль была полностью вытеснена как окислитель [1].

Соли металлов атомарных излучателей диссоциируют при высоких температурах, в результате чего в пламени наблюдается линейчатый спектр металлов. Если атомарное излучение характеризуется линейчатым спектром, то для молекулярного излучения характерно расположение этих линий сериями.

**Табл. 17.1. Атомарные и молекулярные излучатели**

Цвет пламени – атомарный излучатель	Цвет пламени – молекулярный излучатель
алый – литий (Li), желтый – натрий (Na), зеленый – таллий (Tl), синий – индий (In) сиреневый – калий (K)	малиновый – SrCl оранжевый – CaCl розовый – SrO, CaO желто-зеленый – BaOH, BaO зеленый – BaCl, BaBr, BO, CuO синий – CuCl, CuBr

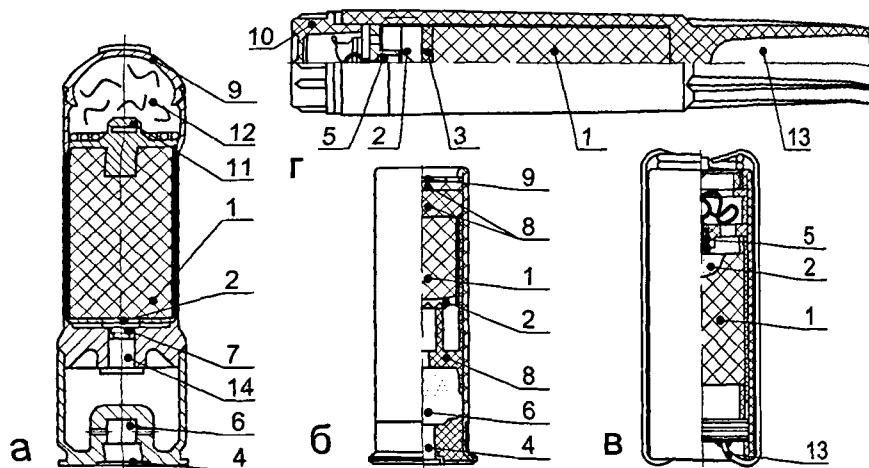
Соединения молекулярных излучателей существуют в пламени в парообразном состоянии, однако при превышении температуры некоторого порога

(для зеленого цвета  $2000^{\circ}\text{C}$ ) они начинают диссоциировать на атомы. Атомы этих элементов уже не обладают необходимым цветовым спектром, и насыщенность цвета уменьшается. Поэтому в реальной пиротехнике с использованием молекулярных излучателей насыщенность цветом и яркость являются взаимоподавляющими характеристиками. Чтобы добиться хорошей яркости при сгорании звездки, необходимо поднимать температуру пламени, однако при превышении температуры некоторого порога начинается диссоциация излучающих молекул галогенидов и падает цветность. Поэтому на практике



**Рис. 17.1. Спектр излучения пиротехнического состава зеленого цвета пламени [21].**

путем подбора соотношения между компонентами стараются найти некоторый компромисс между этими величинами.



**Рис. 17.2. Сигнальные изделия [18, 19, 20].**

а) – 40 мм сигнальная граната М661 (М662) к американскому гранатомету М79 и подствольному гранатомету, б) – ружейный сигнальный патрон 12-ого калибра, в) – наземный сигнальный патрон, г) – фальшфейер Ф-2.

1 – сигнальная звездка, 2 – воспламенительный состав, 3 – переходный состав, 4 – ударный капсюль-воспламенитель, 5 – терочный воспламенитель, 6 – заряд бездымного пороха, 7 – вышибной заряд пороха, 8 – пыж, 9 – пробка, 10 – крышка, 11 – узел крепления парашюта, 12 – парашют, 13 – ручка, 14 – замедлитель.

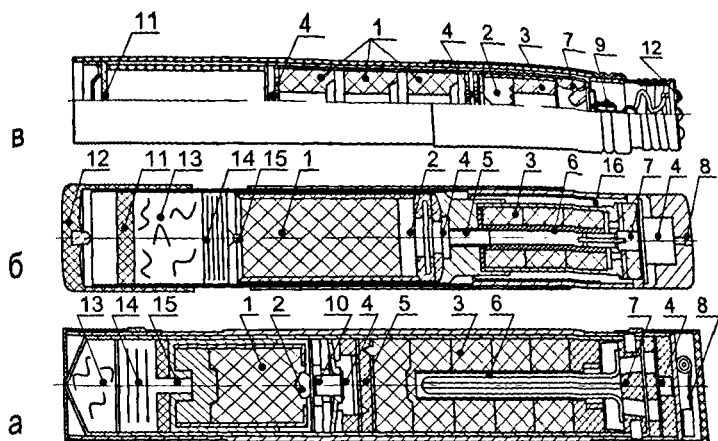
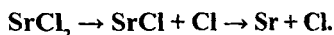


Рис. 17.3 Схемы сигнальных ракет [19, 20].

а) – американский сигнал бедствия M131, б) – американская сигнальная ракета M126A1, в) – отечественная 30 мм многозвездная сигнальная ракета.

1 – сигнальная звездка, 2 – воспламенительный состав, 3 – твердое ракетное топливо, 4 – вышибной заряд дымного пороха, 5 – замедлитель, 6 – стопин, 7 – сопло, 8 – ударный воспламенитель, 9 – терочный воспламенитель, 10 – усиливающий заряд, 11 – пробка, 12 – колпачок, 13 – парашют, 14 – трос, 15 – узел крепления парашюта, 16 – складные стабилизаторы.

Диссоциация галогенидов на примере хлорида стронция с ростом температуры происходит по схеме:



Очевидно, что этот эффект не наблюдается для излучателей первого типа (атомарных), которые теоретически более эффективны. Однако такие элементы, как литий, таллий и индий, – дефицитны. К тому же таллий так ядовит, что его применение в практической пиротехнике недопустимо.

Стоит отметить, что атомарные излучатели (кроме натрия) не распространены на практике, однако их можно встретить в отдельных экспериментальных смесях. Составы с атомарными излучателями типа лития и индия не должны содержать источников хлора, т.к. это приводит к падению цветности из-за связывания атомов в молекулы галогенидов. Вдобавок излучение таких элементов, как индий и литий, блокируется даже небольшими примесями соединений натрия и конденсированной фазой в зоне пламени.

Лишь натрий имеет хорошие свойства, позволяющие применять его в смесях желтого огня. Остальные цвета формируются почти исключительно на молекулярных излучателях – монохлоридах стронция, бария и меди. Монохлориды этих элементов устойчивы только в зоне пламени (монохлорид меди также устойчив и при обычной температуре), где они формируются за счет химических реакций горения между донором хлора и источником окрашивающего пламя элемента.

В литературе зачастую указывается возможность использования в качестве излучателей других галогенидов, например, фторидов или бромидов. Однако излучение фторидов не всегда удается эффективно использовать, а соединения брома достаточно дороги.

Традиционно принято считать, что устойчивость основных излучателей при повышении температуры изменяется в следующем порядке [3]:



При составлении сигнальных смесей на молекулярных излучателях необходимым недостаток окислителя по сравнению со стехиометрическим соотношением и избыток хлороорганического вещества. При повышении температуры горения состава это способствует стабилизации монохлоридов в зоне пламени и замедляет их переход по схеме: монохлорид металла  $\rightarrow$  оксид металла + хлор.

**Табл. 17.2. Длины волн видимого диапазона излучения**

Длина волн, нм	Цвет	Молекулы и атомы-излучатели, которые могут использоваться в пиротехнике (длина волны в нм). Жирным шрифтом показаны наиболее интенсивные полосы излучения
<380	ультрафиолет	излучение не видно невооруженным глазом
380-435	фиолетовый	CaI (429), CuBr (434), BiF (434 и 437), K (405 и 404), CaO (387-460)
435-480	синий	PbF (444), PbCl (458), BiCl (459), CuI (460), Li (460), CuO (428-446), In (451)
480-490	голубой	SbO и BaOH (487), CuI (488), <b>CuCl (390-498)</b> ,
490-500	сине-зеленый	Li (497)
500-560	зеленый	CuF и CuI (507), BaOH (512), <b>BaCl (514 и 525)</b> , BaBr (521 и 536), CuCl (526), CaF (531), BaI (538), SbO (543), Na (509), Ti (535), BO (483-520), CuO (520-560)
560-580	желто-зеленый	BaI (561), CuF (570), Na (568 и 569)
580-595	желтый	<b>CaCl (593 и 594)</b> , Na (588 и 589)
595-650	оранжевый	CaF (604 и 607), <b>CaCl (619 и 621)</b> , CaBr (626 и 628), SrO (611-601), SrCl (636), <b>CaO (605-655)</b> , CuO (605-629)
650-780	красный	<b>SrCl (662 и 675)</b> , SrBr (666 и 680), BaF (711 и 712), Li (671 и 610), K (694, 691, 766 и 770), Ti (655), BO (687-472), SrO (686-678)
>780	инфракрасный	излучение не видно невооруженным глазом

Физиологически цвет – это эффект восприятия разных длин световых волн сетчаткой глаза. Безусловно, человеческий глаз может воспринимать достаточно узкий диапазон длин волн, по сравнению, к примеру, с полным спектром солнечного света. Особенностью сигнальных составов является способность излучать при сгорании преимущественно какую-то определенную длину волны видимого света. Излучение света на какой-то одной длине волны называется монохроматическим.

### **Примечание.**

*Строго говоря, в реальности все происходит немного иначе: длин волн, на которых излучает соответствующее вещество, как правило, несколько; более того, некоторые пики могут лежать и вне диапазона, относящегося к данному цвету (визуально это воспринимается как оттенки цветов). Это обусловлено физической природой колебательных процессов на молекулах или атомах излучающих веществ.*

Физически цветность определяется распределением спектральной энергии, содержащейся в лучах света, или иными словами – длиной волны результирующего излучения.

### Характеристики сигнальных составов:

Чувствительность глаза к разным длинам волн носит нелинейный характер. Поэтому в реальных условиях в пиротехнике достаточно иметь всего 4 спектральные зоны, т.к. переходные цвета уже на сравнительно небольших расстояниях теряют свою индивидуальность.

Табл. 17.3. Цветовые зоны

Зона	Диапазон длин волн, нм	Максимум излучения, нм	Излучатели, которые излучают в пламени штатных составов
синяя	400-500	470	CuCl (Cu, Cl <sub>2</sub> )
зеленая	500-550	530	BaCl
желтая	550-600	590	Na
красная	600-700	630	SrCl

С точки зрения восприятия цвета важным является лишь отношение интенсивности света в диапазоне, определяющем какой-то конкретный цвет к общей видимой световой интенсивности. Эта величина – основная характеристика сигнальных составов, называемая еще *чистотой цвета*. Выражается она в процентах. На практике чистота цвета должна составлять не менее 70-75%, иначе на больших расстояниях цвет может восприниматься недостаточно надежно. Следует отметить, что разные длины волн (грубо говоря, цвет) на больших расстояниях воспринимаются неодинаково, потому что при уменьшении длины волны видимого света (переходе от красного цвета к синему) степень поглощения атмосферой световых волн значительно возрастает, а восприимчивость сетчатки глаза понижается. По этой причине основными цветами при сигнализации в настоящее время приняты красный, зеленый и желтый. При необходимости для замены желтого цвета может использоваться белый. Волны синего цвета, с одной стороны, сильно поглощаются атмосферой и на больших расстояниях воспринимаются как белый цвет, с другой стороны, создать одновременно дешевый и эффективный пиротехнический излучатель синего цвета достаточно сложно. Раньше использовали пятицветную схему с применением красного, желтого, зеленого, белого и синего цветов, которая до сих пор сохранилась в гражданских сигнальных средствах.



Рис. 17.4. Цветовой круг [3].

Основные цвета (красный, желтый, зеленый, синий) получают при помощи излучателей, перечисленных в таблице 17.3, переходные цвета могут быть

получены смешением основных цветов. Принципы смешения пиротехнических цветов можно объяснить при помощи т.н. «цветового круга» (рис. 17.4). Наблюдаемый цвет, полученный за счет смешения цветов разных излучателей, будет определяться по результирующей хорде. Поэтому противоположно расположенные цвета дают при смешении белый цвет. Так, например, фиолетовый можно получить, как смешивая красный и синий, так и оранжевый и синий, однако хорда, соединяющая область синего и красного, отстоит от центра дальше, чем соединяющая оранжевый и синий, соответственно, насыщенность пламени цветом в первом случае будет выше.

### **Примечание.**

*Цветовой круг – это упрощенное представление хроматической диаграммы.*

- Другой важной характеристикой сигнальных составов, как и осветительных, является параметр *удельной светосуммы*  $S$ :

$$S = \frac{l \cdot t}{m},$$

где  $I$  – сила света в канделах (кд),  $t$  – время горения звездки в секундах,  $m$  – масса звездки. Удельная светосумма визуально определяет эффективность горящей звездки с точки зрения светоотдачи с 1 г состава и в общем случае растет с повышением температуры горения пиротехнических составов (достигается добавлением магния). Аналогичным параметром, характеризующим силу света с единицы поверхности горящей звездки, является отношение  $I/F$  ( $F$  – площадь поверхности горения). Оно называется «удельная интенсивность излучения».

**Табл. 17.4. Сила света (кд), необходимая для различимости сигналов на расстоянии 5000 ярдов (4570 м) [22]**

Погодные условия	Красный	Желтый	Белый	Зеленый
ночь, ясно	1	2	2,5	2,8
ночь, слабый дождь	1,2	2,1	3	3,2
ночь, сильная облачность, туман	3,2	4,1	3,1	5,9
ночь, сильный дождь	8,9	33,5	132	33,5
ночь, слабый снег	222	835	1556	567
день, сильная облачность, туман	2000	2111	3222	4000
день, ясно	4778	7556	11111	10000

Стоит отметить, что конденсированные частицы в зоне пламени, которыми, в частности, является оксид магния, излучают белый свет. Окраску дают вещества и элементы, находящиеся исключительно в парообразном или газообразном состоянии. Избыток соединений хлора способствует очистке зоны пламени от частиц оксида магния и тем самым несколько улучшает показатель чистоты цвета. Согласно [4], свойством очищать пламя от оксида магния обладают оксалаты. При пиролизе они образуют моноокись углерода, которая способна восстанавливать оксид до парообразного магния непосредственно в зоне пламени. Но, исходя из химической кинетики, это утверждение выпля-

дит спорным. Скорее всего, добавка оксалата увеличивает количество газов и снижает температуру горения, замедляя скорость окисления магния в центре пламени, а введение дополнительного количества окрашивающего элемента благотворно сказывается на насыщенности пламени цветом.

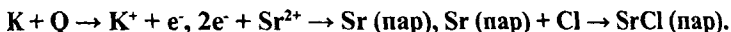
#### Примечание.

Значения в табл. 17.4 – это минимальные величины яркости, необходимые для того, чтобы идентифицировать сигнал. В реальных боевых условиях нужно учитывать коэффициент запаса, зависящий не только от погоды и времени суток, но и от ожидаемого сектора наблюдения [1]

**Табл. 17.5. Основные компоненты сигнальных составов**

Компонент	Наименование	Содержание
окислитель или их смесь	$Ba(NO_3)_2$ , $Sr(NO_3)_2$ , $KClO_4$ , $NH_4ClO_4$ , $NaNO_3$ , $KNO_3$	30-85%
цветообразующая добавка	оксалаты и карбонаты Ba, Sr, Na, криолит, соединения меди	0-30%
донор хлора	гексахлорбензол, дехлоран, ПВХ	6-20%
металлическое горючее	магний, алюминий-магниевый сплав и др.	10-40%
дополнительное горючее	уротропин, сера	0-8%
связующее	идитол, ламинак, олифа, канифоль	3-12%
технологич. добавки	графит, индустриальное масло, воск	0-3%

Окислителями большинства современных сигнальных составов являются нитраты стронция и бария. Американские и английские составы часто содержат перхлораты. Перхлораты играют роль дополнительного окислителя, модификатора скорости горения [23], донора хлора (в случае перхлората аммония) и буфера ионизации [65], способствуя накоплению в пламени активных излучателей по схеме:



Перхлораты облегчают воспламенение составов, хотя при этом несколько возрастает восприимчивость к механическим воздействиям. В последние годы американцы проводят работы по исключению перхлоратов из пиротехнических композиций, т.к. было доказано, что перхлорат-анион влияет на метаболизм йода в щитовидной железе. В отечественных сигнальных смесях перхлораты не используются.

Горючим обычно служит порошкообразный магний в количестве 15-25%. Этого количества магния достаточно для стабильного горения, поддержания хорошей яркости, и при этом пламя не перегревается.

Среди доноров хлора наибольшее распространение получили ПВХ (или ПХВ), гексахлорбензол и дехлоран.

Возможно применение других хлорорганических соединений, например линдана, гексахлорэтана и хлорпарафина. Наилучшими свойствами обладают ПВХ, ХПВХ и хлорпарафин ХП-1100, т.к. они доступны, нетоксичны и нелетучи.

Гексахлорэтан, несмотря на большое содержание хлора, не так эффективен, т.к. обладает высокой температурой разложения, улетучивается из состава при

хранении, а продукты его пиролиза менее активны в реакциях образования монохлоридов. К тому же наличие легко сублимирующегося гексахлорэтана оказывает негативное влияние на воспламеняемость звездок и устойчивость их горения. В связи со снятием с производства гексахлорбензола, дехлорана, линдана и ряда других токсичных хлороорганических соединений, в современной пиротехнике имеют реальную возможность применения хлорпарафин, ПВХ, ХПВХ (поливинилхлорид хлорированный или перхлорвиниловая смола), парлон и некоторые другие хлорсодержащие полимеры.

Самые распространенные связующие сигнальных составов – это фенольные смолы (идитол), полиэфирные смолы (ламинак), полисульфидные и эпоксидные полимеры. До сих пор используются олифа и пластифицированная канифоль.

В старых литературных источниках [3, 6] зачастую указывается, что связующие для сигнальных составов должны содержать большое количество кислорода, чтобы окраска пламени не портилась из-за наличия в зоне горения частичек сажи. Однако для сигнальных составов на основе магния, из-за малого содержания связки и высокой интенсивности процессов сгорания, влияние вида связующего не так критично. Вдобавок, высокая температура, развиваемая за счет горения магния, препятствует образованию сажи.

Смеси, предназначенные для снаряжения фальшфейеров и других сигнальных средств, ориентированных для использования в непосредственной близости от человека, не должны ослеплять, обжигать, образовывать шлаки и токсичные продукты сгорания. Зачастую они содержат небольшой избыток окислителя, для того чтобы корпус фальшфейера или факела выгорал более полно.

**Табл. 17.6. Параметры составов зеленого огня в зависимости от дисперсности магниевого порошка**

Состав	1	2	3
нитрат бария	57	57	57
магний МПФ-1	18	-	-
магний МПФ-2	-	18	-
магний МПФ-4	-	-	18
гексахлорбензол (ГХБ)	19	19	19
смола 211	6	6	6
уд. светосумма, кд·с/г	2090*	2670*	3200
$I/S$ , кд/см <sup>2</sup>	595	1130	4090*
скорость горения, мм/сек	1,6	2,4	7,4
чистота цвета, %	73	77	-
длина волны, нм	561	554	-

\* – оценочные величины из предположения, что составы запрессованы до плотности 1,77 г/см<sup>3</sup>.

Эффективная регулировка параметров сигнальных составов иногда осуществляется за счет изменения дисперсности компонентов (в первую очередь – металлов). Например, составы, указанные в таблице 17.6, имеют одинаковое процентное соотношение компонентов, но разные сорта магния. Первый состав использовался в 30 мм сигнальном патроне, второй – в сигнальной мине, третий – в трассерах (трассирующий состав зеленого огня 33-16) [13, 73].

## 17.1. Составы красного огня

Красный цвет пламени пиротехнических составов основан на излучении оксида стронция (ок. 600 нм) и монохлорида стронция (полосы в диапазоне 636–688 нм). Излучение от оксида стронция хорошо проявляется лишь при температурах, превышающих  $\sim 2500^{\circ}\text{C}$ , когда это вещество становится летучим. Составы, где излучение полностью формируется за счет оксида стронция, более характерны для трассирующих средств. Эти смеси содержат большое количество магния, достаточного для перевода оксида стронция в парообразное состояние, отличаются высокой яркостью, но пониженными цветовыми показателями.

Хлорсодержащие составы красного огня имеют подавляющее распространение из-за лучшей насыщенности пламени цветом. Окислителями в них обычно служит нитрат стронция. Технический нитрат стронция содержит примеси ионов натрия и кальция, которые даже в таком небольшом количестве влияют на окраску пламени, придавая ему оранжевый оттенок. Второй недостаток технического продукта – повышенная гигроскопичность готовых составов на его основе. Поэтому для составления смесей красного огня необходимо использовать очищенный нитрат стронция.

Известны композиции с добавкой нитрата калия, который улучшает воспламеняемость, позволяет экономить более дорогой нитрат стронция и является буфером ионизации.

Некоторые композиции могут вовсе не содержать нитрата стронция, а базироваться на менее гигроскопичной основе «перхлорат калия/оксалат или карбонат стронция». На Рис. 17.5 представлены зоны максимальной цветовой насыщенности пламени для тройных систем нитрат стронция/хлорорганическое соединение/магний.

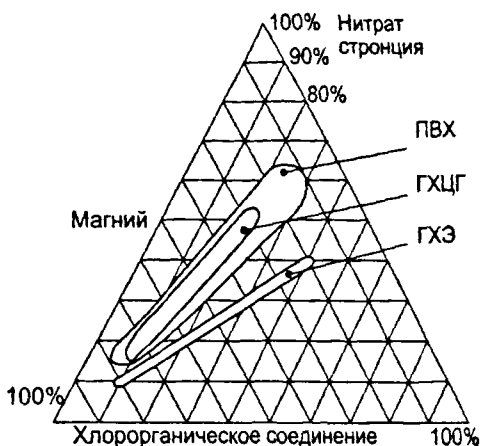


Рис. 17.5. Наилучшие показатели цветности для тройных систем нитрат стронция – хлорорганическое соединение – магний [5].

### Примечание.

График показывает, что ПВХ наиболее сбалансирован по сочетанию горючих компонентов и хлора. Однако это не означает, что в составах красного огня ГХЦГ и гексахлорэтан обеспечивают худшую цветность. При использовании этих интенсификаторов свечения можно добиться такого же эффекта, как и с ПВХ, за счет введения органического горючего.

**Табл. 17.7. Составы красного огня периода до Второй мировой войны (включительно)**

Состав	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
KClO <sub>3</sub>	42	64	-	16,7	-	60	-	-	-	-	56	-	-	-
KClO <sub>4</sub>	-	-	-	-	15,4	-	-	-	-	-	-	-	24	22
Sr(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	42	-	66,6	66,6	13,4	-	60	62,5	55	52	-	75	34	41
SrCO <sub>3</sub>	-	18	-	-	-	25	-	-	-	-	-	-	-	-
целестин (SrSO <sub>4</sub> )	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	14	-	-	-
алюминий	-	-	16,7	-	-	-	-	-	-	-	-	24,5	-	-
связующее*	16	18	16,7	16,7	25,4	15	-	6	-	13	18	2,5	4	8
сахароза	-	-	-	-	20,4	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ПВХ или ХПВХ	-	-	-	-	-	-	16	18	18	15	-	-	-	-
ГХБ	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4	6
магний	-	-	-	-	-	-	24	13,5	27	20	12	-	24	23
древесные опилки	-	-	-	-	14	-	-	-	-	-	-	-	-	-

1. Американский состав первой половины 20 века для фальшфейера Mk1: \* = шеллак [24].
2. Американский состав первой половины 20 века для изделия Mk2: \* = шеллак [24].
3. Смесь для авиационных сигналов времен Первой мировой войны: \* = сера, покрытая шеллаком [6].
4. Сигнальная смесь времен Первой мировой войны: \* = шеллак [7].
5. Смесь для снаряжения сигнальных фальшфейеров, для применения на железнодорожном транспорте: \* = сера [8].
6. Отечественный сигнальный состав 30-х годов 20 века, другой вариант смеси вместе карбоната содержал оксалат стронция: \* = идитол [9].
7. Немецкий сигнальный состав времен Второй мировой войны. Типичные немецкие составы красного огня содержали 50-61% нитрата стронция, 17-35% магния, 14-28% ПВХ или хлорированного ПВХ и до 5% синтетического воска или вазелина. Стоит отметить, что подобные составы из-за своей эффективности широко используются и в современных сигнальных средствах [2].
8. Немецкий сигнальный состав конца Второй мировой войны для бомбы-постановщика ложных целей Mark 50 (имитатор НОСАБ): \* = воск [2].
9. Немецкий состав времен Второй мировой войны для 6-звездной сигнальной ракеты ESN-6 [2].
10. Немецкий сигнальный состав конца Второй мировой войны для маркера Mark 3B: \* = моностирол. Для полимеризации в состав вводился тетрачлорид олова, впоследствии стирол был заменен связующим, не дающим усадки при полимеризации. Звездки изготавливались при помощи прогрессивной технологии экструзии, которую планировалось внедрить на всех германских пиротехнических предприятиях, что так и не было осуществлено из-за поражения Германии в войне [2].
11. Отечественный состав времен Великой Отечественной войны с применением стронциевого минерала целестина: \* = 12% идитола, 6% канифольного лака [64].
12. Японский состав для снаряжения сигнальных бомб времен Второй мировой войны: \* = тарвафин [58].
13. Американский состав для наземного сигнального средства времен Второй мировой войны: \* = 2% асфальтита, 2% олифы. Т.всп. 391°C. Теплота сгорания 5,88 МДж/кг [25].
14. Американский состав для сигнальных звездок времен Второй мировой войны: \* = асфальтит [1].

# Табл. 17.8. Американские составы красного огня периода после Второй мировой войны

Состав	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
$\text{Sr}(\text{NO}_3)_2$	74	38	18	45	45	45	30	41	34,7	43	44	48	38,3	56	37,75	37	68	39,3	72,4
$\text{KClO}_4$	66	-	22	15	25	25	20	22	20,5	9	7	-	9,9	20	21,85	15	4	-	-
$\text{KNO}_3$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4	-	8
Магний	-	8	40	21	17,5	9	40	23	24,4	29	29	33	29,4	-	24,5	29	-	29,4	-
$\text{SrCO}_3$	-	10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ПВХ	-	17	-	-	5	6	-	-	11,4	12	13	15	14,7	-	9,94	-	-	14,7	5,3
ГХБ	-	-	99	12	-	-	5	6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Сера	10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	20	-	-	12	-	10,5
Связующее*	44	66	11	77	75,5	24	55	8	9,0	7	7	4	6,6	2	5,96	5	10	6,8	3,8
Прочие**	66	17	-	-	-	11	-	-	-	-	-	-	1,1	4	-	14	2	9,8	-

1. Смесью для снаряжения железнодорожных сигнальных фальшфейеров (fusee): \* – воск; \*\* – связующее [10].
2. Смесью для снаряжения сигнальных мин Mk43 Mod 0 и Mk44 Mod 0: \* – стеарин; \*\* – 2% силицида кальция в 155% перхлората аммония. Т.всп. 414°C. Теплота сгорания 5,79 МДж/кг. Соотношение компонентов в частях [25].
3. Современный состав для ракетного сигнала: Picatinny Arsenal: \* – асфальтит [10].
4. Смесью для снаряжения изделия Mk13 Mod 0: \* – асфальтит. Т.всп. 401°C. Теплота сгорания 6,02 МДж/кг [25].
5. Альтернативная смесь для снаряжения изделия Mk13 Mod 0: \* – асфальтит. Т.всп. 416°C. Теплота сгорания 5,89 МДж/кг [25].
6. Состав для фальшфейера: \* – тшеллак; \*\* – солифа [10].
7. \* – асфальтит. Т.всп. 550°C. Теплота сгорания 5,92 МДж/кг [25].
8. Нюный сигнал: \* – асфальтит. Т.всп. 399°C. Теплота сгорания 4,93 МДж/кг [25].
9. Состав для сигнала в обсерватории Mk124 Mod 0 (MSIS), запускаемого с подводной лодки: \* – асфальтит. Низкотемпература 96% [21].
10. Состав для М158: \* – ламинак. Т.всп. 3376°C. Плотность снаряжения 2,4 г/см³. Теплота сгорания 6,02 МДж/кг [25].
11. \* – ламинак. Т.всп. 3376°C. Плотность снаряжения 2,4 г/см³. Теплота сгорания 5,57 МДж/кг [25].
12. Альтернативный состав для М158: \* – UAAR или ламинак. Т.всп. 440°C. Плотность снаряжения 2,4 г/см³. Теплота сгорания 6,23 МДж/кг [25].
13. Современный состав для ручной сигнальной ракеты M126A1: \* – ламинак 4116; \*\* – добавки. Удельная светосумма 8100 кд·сек/г. Чистота цвета 89-91% [26].
14. Состав для снаряжения фальшфейеров: \* – асфальтит (сверх 100%); \*\* – 3% нитрата натрия и 1% дизельного топлива (технологическая добавка для предотвращения пыления) [33].
15. Состав для малокалиберного сигнального патрона: \* – ламинак [35].
16. Состав для Mk66: \* – эпоксидная смола Epox; \*\* – асфальтит [70].
17. Состав для железнодорожного фальшфейера M72: \* – акаридная смола; \*\* – стеарин [70].
18. Экологичный состав для замены штатного состава в M126A1: \* – эпоксидная смола Epox 813; \*\* – стронций бисмугнитриминотетразолат. Чистота цвета 90%. Состав превосходит штатный как по яркости, так и по времени горения [66].
19. Современный состав без перхлоратов для железнодорожных фальшфейеров: \* – смесь сахара и парафина [22].

**Табл. 17.9. Послевоенные составы красного огня стран Европы и СССР**

Состав	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
$\text{Sr}(\text{NO}_3)_2$	-	-	-	41	40	43	62	60	59	66	61	45	55	54	43	58	71	40	66	70	50
$\text{KClO}_4$	30	38	28,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
магний	50	48	-	35	29	38	22	17	15	14	15	30	29	29	40	15	-	40	-	-	28
ПАМ	-	-	-	-	-	-	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	10	-	12	9	-
$\text{SrC}_2\text{O}_4$	10	10	26,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ПВХ	-	-	-	-	10	14	8	16	20	-	14	-	10	10	10	17	16	10	17	16	22
ГХБ	-	-	-	-	-	-	-	-	-	14	-	17	-	-	-	-	-	-	-	-	-
связующее*	8	4	12,0	4	7	5	6	7	4,5	6	8	8	6	5	7	10	2	10	4	4	-
прочее**	2	-	33,0	20	14	-	-	-	1,5	-	2	-	-	2	1	-	1	-	1	1	-

1. Английский состав SR-297B: \* – акароидная смола; \*\* – льняное масло. Удельная светосумма 13800 кд·сек/г.  $I/S = 10540$  кд/см<sup>2</sup>. Скорость горения 5,1 мм/сек [11].
2. Английский состав SR-170C: \* – льняное масло. Состав SR-170D содержит 0,2% азросила [27].
3. Английский состав SR-307A: \* – акароидная смола; \*\* – перхлорат аммония. Удельная светосумма 280 кд·сек/г.  $I/S = 59$  кд/см<sup>2</sup>. Скорость горения 0,7 мм/сек [11].
4. Английский состав SR-91: \* – олифа; \*\* – парлон [11].
5. Состав производства Восточной Германии: \* – новолачная смола; \*\* – нитрат калия [28].
6. Современный немецкий состав: \* – полиолефин. Удельная светосумма 19600 кд·сек/г. Чистота цвета 94% [71].
7. Чешский состав: \* – новолачная смола [12].
8. Отечественный состав 35-01: \* – смола СФ–340А. Удельная светосумма 4100 кд·сек/г. Скорость горения 1,9 мм/сек. Чистота цвета 90%. (По данным [14],  $I/S = 1190$  кд/см<sup>2</sup>. Скорость горения 1,5 мм/сек. Чистота цвета 80%). Использовался в ранних модификациях 40 мм патрона РДСП [13].
9. Состав 35-02: \* – канифоль; \*\* – масло веретенное. Удельная светосумма 1800 кд·сек/г.  $I/S = 450$  кд/см<sup>2</sup>. Скорость горения 0,9–1,1 мм/сек. Чистота цвета 94–96%. 39 мм двухзвездный сигнальный патрон ночного действия [13, 14].
10. Состав 35-07: \* – идитол.  $I/S = 450$  кд/см<sup>2</sup>. Скорость горения 1,4 мм/сек. Чистота цвета 86%. 15 мм патроны «Сигнал», 26 мм патрон, 30 мм ручные сигнальные патроны, 40 мм патрон РДСП. Зондировочный патрон НЗП, ружейные сигнальные патроны, сигнальные мины, фейерверки [13, 14].
11. Состав 35-18: \* – резинат кальция; \*\* – масло веретенное.  $I/S = 430$  кд/см<sup>2</sup>. Скорость горения 0,9 мм/сек. Чистота цвета 95%. 40 мм патрон РПСП. Сигнальный патрон КСП(к), ПСНД, наземный сигнальный патрон [13, 19].
12. \* – Смола СФ–340А. Магний – МПФ–1.  $I/S = 1780$  кд/см<sup>2</sup>. Скорость горения 2,5 мм/сек. Чистота цвета 87%. 30 мм ручные сигнальные патроны [13].
13. \* – Канифоль. Ракета бедствия РБ–40 [13].
14. \* – Глицериновый эфир канифоли; \*\* – графит. Ракета бедствия судовая РБ–50С, фальшфейер Ф–2К. (Состав для РБ–50Ш содержит 6,5% связующего, 1,5% графита и 0,5% масла веретенного).  $I/S = 3520$  кд/см<sup>2</sup>. Скорость горения 1,5 мм/сек. Чистота цвета 82% [13].
15. Состав КО–8: \* – смола СФ–342А; \*\* – графит свыше 100%.  $I/S = 12000$  кд/см<sup>2</sup>. Скорость горения 3,7 мм/сек. Чистота цвета 75%. Ракета бедствия судовая РБ–40С [13].
16. \* – Идитол.  $I/S = 1350$  кд/см<sup>2</sup>. Скорость горения 1,7 мм/сек. Чистота цвета 93%. Состав для снаряжения изделия СХТ–40 [13].
17. \* – Канифоль; \*\* – масло индустриальное.  $I/S = 83$  кд/см<sup>2</sup>. Скорость горения 0,6 мм/сек. Чистота цвета 88%. Состав для шашки сигнальной огневой [13].
18. \* – СФ–340А.  $I/S = 3700$  кд/см<sup>2</sup>. Скорость горения 2,5 мм/сек. Чистота цвета 90%. Пиротехнический сигнальный патрон [13].
19. \* – СФ–340А; \*\* – масло индустриальное.  $I/S = 764$  кд/см<sup>2</sup>. Скорость горения 0,9 мм/сек. Чистота цвета 95%. ЦОСАБ–10КО [13].
20. \* – Канифоль; \*\* – масло индустриальное.  $I/S = 764$  кд/см<sup>2</sup>. Скорость горения 0,6 мм/сек. Чистота цвета 95%. НОСАБ–100КО [13].
21. Современный испанский состав. Скорость горения 1,45 мм/сек при 1,7 г/см<sup>3</sup> [34].

## 17.2. Составы зеленого огня

Действие составов зеленого огня основано на излучении монохлорида бария. Обычно в пламени присутствует некоторое количество молекул  $\text{BaO}$  и  $\text{BaOH}$ , придающих пламени желто-зеленый оттенок. Кроме хлорида бария, зеленое пламя может быть получено на основе излучения бора и меди. Зеленое излучение при сгорании бора достаточно интенсивно и может быть с успехом использовано в современных составах зеленого огня. Например, в целях исключения токсичного бария и замены штатного состава в издании M125A1, была предложена композиция, содержащая 83% нитрата калия, 10% карбида бора в смеси с аморфным бором и 7% эпоксидной смолы Epox 828. Смесь несколько превосходит штатный состав по времени горения и яркости, но уступает в цветности – 51%, против 62% у штатного [66, 69].

Соединения меди дают невысокую интенсивность зеленого свечения в реальных смесях, это свечение слишком чувствительно к различным факторам: например, в зависимости от состава и температуры могут проявляться не только синие-зеленые полосы спектра, но и оранжевые (см. Табл. 17.2). В присутствии хлорорганических соединений медь окрашивает пламя в синий цвет, что используется в составах синего огня (см. далее).

Некоторые американские составы зеленого огня зачастую содержат небольшое количество соединений меди. Предположительно, медь в присутствии хлорорганических соединений играет роль корректора цвета, маскируя желтый оттенок от оксида и гидроксида бария.

Очень хороший изумрудный зеленый цвет (с чистотой до 80%) демонстрирует двойная смесь гидрата хлората бария с шеллаком или идиолом.

В 50-60-х годах американцами была проведена большая экспериментальная работа по разработке состава зеленого огня с оптимальным отношением цветности и удельной светосуммы на современных компонентах. Следует подчеркнуть, что целью работы было не создать состав для военных, а добиться максимальной эффективности излучения зеленого пиротехнического пламени. С этой точки зрения лучшей была признана композиция, содержащая 40% магнезия, 45% хлората бария, 10% поливинилиденхлорида и 5% ламинака [1]. Однако смеси с хлоратом бария очень чувствительны к механическим воздействиям и уже продолжительное время для военной пиротехники не производятся. Также давно не производятся составы, содержащие в качестве компонентов каломель или серу. Большинство современных композиций зеленого огня базируется на основе нитрата бария и хлорорганического вещества в смеси с магнием и связующим. Другие соли бария, типа оксалата или карбоната, в реальных составах встречаются достаточно редко, они эффективны, только если в смеси содержится металлический порошок, и не имеют никаких преимуществ над нитратом бария.

Температуру горения составов зеленого огня не рекомендуют поднимать выше  $\sim 2000^\circ\text{C}$ , т.к. в пламени начинает появляться оксид бария, и зеленая окраска переходит в желто-зеленую. Несколько компенсировать этот эффект позволяет добавка избыточного количества хлорорганического вещества и поддержание отрицательного кислородного баланса, благодаря чему удастся сместить равновесие в сторону образования монохлорида бария.

**Табл. 17.10. Составы зеленого огня периода до Второй мировой войны (включительно)**

Состав	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
KClO <sub>3</sub>	-	-	27	-	-	24	23,8	18	-	-	-	-	40	-	-	-	-	-
Ba(ClO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> ·H <sub>2</sub> O	90-85	55,5	-	-	63	-	-	64	79	-	-	-	50	-	-	-	-	-
Ba(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	-	33,3	53	81,1	25	-	57,1	-	6,5	58	55	61	-	60-56	70	55	65	70
магний	-	-	-	-	-	-	-	-	-	8	16	11	-	17-21	10	25	15	-
алюминий	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	20
ПВХ или ПВХ	-	-	-	-	-	-	-	-	-	22	29	21	-	17-15	-	-	-	-
ГХБ	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	14	16	14	-
связующее*	10-15	11,2	13	10,8	12	12	19,1	18	2,3	-	-	-	5	6-8	6	4	6	-
прочее**	-	-	7	8,1	-	64	-	-	12,2	12	-	7	5	-	-	-	-	10

- Английский и русские составы времен Первой мировой войны: \* – шеллак [6, 15].
- Состав времен Первой мировой войны: \* – шеллак. Цветность несколько хуже, чем у составов, но чувствительность к удару заметно ниже [6].
- Состав времен Первой мировой войны: \* – шеллак; \*\* – хлористый аммоний [6].
- Германский состав времен Первой мировой войны: \* – сера; \*\* – 2,7% древесного угля, 5% каломели [6].
- Отечественный состав 30-х годов 20 века: \* – идитол [15].
- Состав времен Первой мировой войны: \* – шеллак; \*\* – карбонат бария [6].
- Германский состав времен Первой мировой войны: \* – сера [2].
- Германский состав, использовавшийся непосредственно перед Второй мировой войной: \* – шеллак [2].
- Германский состав середины Второй мировой войны: \* – метилцеллюлоза; \*\* – 10,5% антацида, 1,7% лактозы [2].
- Германский состав конца Второй мировой войны: \*\* – 5% резорциловой к-ты, 7% кремния [2].
- Германский состав для сигнальных патронов начала Второй мировой войны [2].
- Германский состав для снаряжения ложных целеуказателей (имитатор НОСАБ): \*\* – воск [2].
- Американский состав для изделия Mk2: \* – шеллак; \*\* – акароидная смола [24].
- Отечественный состав начала Великой Отеч. войны: \* – шеллак [64].
- Отечественный состав середины Великой Отеч. войны: \* – идитол [64].
- Отечественные составы середины Великой Отеч. войны: \* – асфальтит [64].
- Японский состав для снаряжения сигнальных бомб времен Второй мировой войны: \*\* – борная кислота [68].

**Табл. 17.11. Американские и английские составы зеленого огня периода после Второй мировой войны**

Состав	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Ba(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	45	66	50	53	59	40,1	22,5	22,5	46	48	40	-	-	46	44	15	17	50	46,55	31,82
KClO <sub>4</sub>	16	-	10	-	-	9,5	32,5	22,5	-	10	-	34	30	-	-	25	27	-	21,92	18,18
магний	26	15	20	23	16	33,6	21	35	33	22	40	40	48	36	-	42	42	39	15,28	30,9
CuO	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
медь	-	2	-	2	2	-	7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4,55
ПВХ	-	-	16	-	-	-	12	13	16	-	-	-	-	-	-	-	8	-	13	-
ГХБ	7	15	-	20	21	-	-	-	-	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
дехлоран	-	-	-	-	-	12,6	-	-	-	15	-	-	-	-	-	-	-	-	-	9,1
парлон	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	18	-	12	-	-	-	-
связка*	2	2	4	2	2	4,2	5	7	5	5	5	6	4	-	13	6	6	5	3,25	5,45
прочее**	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	10	20	18	-	43	-	-	6	-	-

1. Состав времен Второй мировой войны для наземных сигнальных средств: \* – асфальтит, \*\* – льняное масло. Т всп. 456°C [25].
2. Состав времен Второй мировой войны для сигнальных звездок: \* – олифа. Т всп. 448°C [25].
3. Послевоенный состав для сигнальной мины Mk39 Mod 0: \* – олифа. Т всп. 497°C [25].
4. Послевоенный состав для сигнальных звездок: \* – асфальтит. Т всп. 456°C [25].
5. Послевоенный состав для сигнальных звездок: \* – олифа. Т всп. 516°C [25].
6. Смесь разработки Picatinny Arcenal: \* – VAAR. Т всп. 340°C. Теплота сгорания 6,36 МДж/кг [25].
7. Состав для маркера Mk117 Mod 0 на флоте: \* – смесь эпоксидной смолы CX 7069,7 и отвердителя CX 3842,1. Альтернативный вариант содержит ламинак. Удельная светосумма 3400 кд·с/г. Чистота цвета 58%. Сила света 12200 кд [21, 25].
8. Смесь разработки Picatinny Arcenal: \* – ламинак [25].
9. Состав 8797956 для сигнальной ракеты M125A1: \* – ламинак. Чистота цвета 62% [25, 29, 66].
10. Состав для изделия M195: \* – ламинак. Чистота цвета 65%. Звездка сгорает в течение 55 сек, излучая 5832 кд света [29, 66].
11. Американский состав: \* – эпоксидная смола; \*\* – бор. Удельная светосумма 5600 кд·с/г, чистота цвета 60% [36].
12. Английский состав SR-477: \* – олифа; \*\* – 10% хлорида бария, 10% крахмала. Удельная светосумма 6400 кд·сек/г.  $I/S = 1780$  кд/см<sup>2</sup>. Скорость горения 1,7 мм/сек [11].
13. Состав SR-429: \* – олифа; \*\* – 12% хлората бария, 6% лактозы. Удельная светосумма 10400 кд·сек/г.  $I/S = 7440$  кд/см<sup>2</sup>. Скорость горения 4,2 мм/сек [11].
14. Состав SR-193. Удельная светосумма 4000 кд·сек/г.  $I/S = 4030$  кд/см<sup>2</sup>. Скорость горения 6,3 мм/сек [11].
15. Состав SR-475: \* – акаронидная смола; \*\* – ПХА. Удельная светосумма 300 кд·сек/г.  $I/S = 55$  кд/см<sup>2</sup>. Скорость горения 0,85 мм/сек [11].
16. Состав SR-703: \* – олифа [37].
17. Английский состав: \* – олифа [38].
18. Экспериментальный английский состав EDG (A): \* – олифа; \*\* – бор [37].
19. Состав для снаряжения сигнального изделия Mk116: \* – ламинак 4110 [24].
20. Состав для малокалиберного сигнального патрона: \* – ламинак [35].

**Табл. 17.12. Отечественные современные составы зеленого огня**

Состав	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
$\text{Ba(NO}_3)_2$	66	67,5	57	65	66	57	68	71	67	70	65	53	40
магний	14	13	18	12	14	18	8	-	14	-	13	22	40
ПАМ	-	-	-	-	-	-	-	9	-	8	-	-	-
ПВХ	-	-	-	17	-	-	-	16	-	16	16	-	15
ГХБ	14	14,5	19	-	14	19	19	-	13	-	-	19	-
графит св. 100%	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-
масло инд.	-	-	-	1,5	-	-	-	2	-	2	1,5	-	-
связующее*	6	5	6	4,5	6	6	5	2	6	4	4,5	6	5
уд. светосумма, кд·с/г	2300	-	-	860	-	-	-	-	-	-	-	-	-
$I/S$ , кд/см <sup>2</sup>	916	473	595	127	420	1130	98,2	100	-	117	-	-	-
скорость горения, мм/сек	1,6-1,9	1,3	1,6	0,8-0,9	1,4	2,4	0,9	0,6	-	0,7	-	-	-
чистота цвета, %	70-75	69	73	70-73	76	77	65	70	-	75	-	-	-

1. Состав 33-01: \* – идитол. Широко использующийся в отечественных изделиях состав: 15 мм сигнальный патрон, 26 мм сигнальный патрон, 40 мм РПСР, ружейные сигнальные патроны 12 и 16 калибра, фейерверочные изделия [13, 14].
2. \* – Идитол. 26 мм двухзвездный сигнальный патрон, 30 мм реактивный сигнальный патрон, сигнальная мина «СМ» [13].
3. \* – СФ-340А. 30 мм реактивный сигнальный патрон [13].
4. Состав 33-02: \* – канифоль. РПСР-40а, КСПа, наземный сигнальный патрон [13, 14].

5. Состав 33-17: \* – СФ-340А. РДСП-40А [13, 19].
6. \* – СФ-340А. Сигнальная мина «СМ» [13].
7. \* – Идитол. ЗОС-1з, ЗОС-2кз, ЦОСАБ-10 [13].
8. \* – Канифоль. Шашка огневая ШСО [13].
9. \* – Идитол. Сигнальный патрон к мине УИТМ-60 [13].
10. \* – Канифоль. НОСАБ-100 [13].
11. \* – Канифоль. 39 мм двухзвездный сигнальный патрон ночного действия [19].
12. \* – СФ-340А. 30 мм реактивный однозвездный патрон [19].
13. Состав из Восточной Германии: \* – новолачная смола [28].

### 17.3. Составы синего (голубого) огня

Создание эффективного состава синего огня является очень непростой задачей, которая даже на данный момент полностью не решена. Свечение составов синего огня базируется на основе излучения моноклорида меди. Согласно старым литературным источникам [3], температура пламени таких композиций не должна превышать 1000-1200°C, иначе наблюдается диссоциация моноклорида меди. В более новых источниках указывается, что заметная диссоциация  $\text{CuCl}$  начинается только при превышении 2000-2200°C, а при температурах до 1200°C излучателем синего цвета является тример моноклорида меди, который при дальнейшем нагревании распадается до моноклорида [5, 30]. Причиной снижения насыщенности цвета пламени при введении металлических горючих является не диссоциация  $\text{CuCl}$ , а низкая интенсивность излучения молекул моноклорида меди, которая накладывается на непрерывный спектр излучения конденсированных компонентов, что приводит к резкому падению чистоты цвета. Пламя становится белым с голубоватым или зеленоватым оттенком. Если же в составе хлор содержится в недостатке, – с красной каемкой из-за присутствия в пламени спектра оксида меди. Чистота цвета также очень невысока: современные составы имеют чистоту цвета не более 50%, и лишь для самых новых смесей на баллиститной основе чистота цвета достигает 65-70%, а удельная светосумма – порядка 130 кд·с/г. Поэтому для хорошего насыщенного пламени необходима термическая основа, сгорающая прозрачным пламенем, и избыток хлора в зоне пламени.

Синий цвет в наибольшей степени поглощается атмосферой, а чувствительность человеческого глаза к нему наименьшая. По этим причинам в сигнализации составы голубого огня используются редко (например, в фальшфейерах для вызова лоцмана). Впрочем, составы синего огня довольно широко распространены в фейерверочных изделиях, где отсутствуют жесткие требования к надежности передачи сигнала на большие расстояния.

Самые первые смеси голубого огня базировались на сочетании хлората калия с различными соединениями меди – парижской зелени или горной сини – и специфическими интенсификаторами свечения типа каломели. При сгорании такие композиции обычно давали очень токсичные продукты, были опасны в обращении, и чистота их цвета не превышала 30%.

Современные составы в качестве окислителей содержат перхлораты калия и (или) аммония, соединения меди типа оксида, роданида, сульфида и даже порошок металлической меди. Зачастую в смесь вводятся хлорорганические вещества.

Такие композиции используются в немногочисленном ассортименте современных сигнальных и фейерверочных средств голубого свечения.

Смеси голубого огня на баллиститной и пироксилиновой основе более эффективны и легко перерабатываются по технологии бездымных порохов. Они рассмотрены в конце этой главы.

Пламя синего огня — самое чувствительное к примесям других окрашивающих элементов. Совсем незначительного количества примеси натрия достаточно, чтобы пламя стало желтым, а если в составе используется нитрат калия, то края пламени становятся розовыми.

**Табл. 17.13. Сигнальные составы синего огня**

Состав	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
$\text{KClO}_3$	61	58	-	46	70	59	-	56	53	-	-	-	-
$\text{KClO}_4$	-	-	73	-	-	-	-	-	-	39,8	48	-	58
$\text{KNO}_3$	-	-	-	15,5	-	-	40	-	-	-	-	-	-
$\text{Ba(NO}_3)_2$	-	-	-	-	-	-	5	-	-	19,5	-	-	-
$\text{NH}_4\text{ClO}_4$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	74,2	-
ГХБ	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	12
каломель	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	22	-	-
сера	20	22	-	23	-	-	-	-	-	-	-	-	-
медная пыль	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	11,1	-
парижская зелень	-	-	-	-	-	31	-	-	-	32,6	-	-	-
$\text{Cu}[\text{NH}_3]_4\text{SO}_4$	-	-	-	-	15	-	-	-	19	-	-	-	-
$\text{CuCl}$	-	-	-	-	-	-	-	22	-	-	-	-	-
$\text{CuCl} \cdot \text{NH}_4\text{Cl}$	-	-	18	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
малахит	-	20	-	-	-	-	-	-	-	-	8	-	-
окись меди	-	-	-	15,5	-	-	-	-	-	-	-	-	25
закись меди	-	-	-	-	-	-	-	13	14	-	-	-	-
связующее*	-	-	3	-	15	1,5	45	7	9	8,1	22	14,7	5
прочее**	19	-	6	-	-	8,5	10	2	5	-	-	-	3

1. Наиболее известный состав начала 20 века: \*\* — горная синь (аналог малахита). Опасен в обращении [6].
2. Состав времен до Первой мировой войны. Опасен в обращении [6].
3. Состав времен до Второй мировой войны: \* — асфальтит; \*\* — стеарин [6].
4. Итальянский состав [16].
5. Итальянский состав: \* — шеллак [16].
6. Германский состав времен Второй мировой войны (использовался ограниченно): \* — метилцеллюлоза; \*\* — 2% лактозы, 6,5% антрацена [2].
7. Германский состав времен Второй мировой войны: \* — Kupferprodukt B (медная соль неуставленного хлорорганического соединения); \*\* — магний [2].
8. Состав для сигнала бедствия Mk1: \* — шеллак; \*\* — стеарин [24].
9. Состав для сигнала бедствия Mk1: \* — шеллак; \*\* — реалгар [24].
10. Состав для сигнала бедствия Mk1 Mod1: \* — стеарин [24].
11. Английский состав SR-405: \* — лактоза. Удельная светосумма  $171 \text{ кДж/г}$ ,  $1/S = 31 \text{ кДж/см}^2$ . Скорость горения  $0,77 \text{ мм/сек}$  [11].
12. Американский состав: \* — 11,1% стеариновой кислоты, 3,6% парафина [40].
13. Состав для снаряжения фальшфейера Ф-2Г: \* — стеарин; \*\* — графит св. 100% [19, 41].

## 17.4. Составы желтого огня

Желтое свечение натрия носит атомарный характер, оно более устойчиво к наличию примесей, чем зеленые и красные цвета пламени. Это обстоятельство позволяет получать составы с высокими как яркостными характеристиками, так и превосходной чистотой цвета. Например, при использовании баллиститной основы чистота цвета может достигать 99%. Теоретически лучшим окислителем для таких составов является нитрат натрия, однако ввиду его повышенной гигроскопичности предпочитают использовать нитраты бария или калия вместе с малорастворимой солью натрия – оксалатом, карбонатом или криолитом.

При большом количестве магния насыщенность цветом несколько ухудшается, но это происходит исключительно из-за «разбавления» желтого цвета белым от раскаленных частиц оксида магния. В зарубежные составы иногда вводятся хлорорганические вещества типа ПВХ или ГХБ. Теоретически присутствие хлорорганических соединений никак не отражается на цветовых показателях составов желтого огня, т.к. излучение носит атомарный характер. Однако ионы хлора способствуют очистке зоны пламени от конденсированной фазы, переводя оксид магния в пары хлорида и тем самым повышают цветовую насыщенность. Введение хлорорганики также способствует обеспечению единообразия процесса изготовления в пиротехническом производстве. Для желтой сигнализации допускается использовать штатные осветительные смеси на основе нитрата натрия, которые сгорают с образованием яркого пламени светло-желтого цвета.

Табл. 17.14. Составы желтого огня: немецкие 1-10, отечественные 11-18

Состав	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
KClO <sub>3</sub>	46	-	-	-	-	-	-	-	-	-	60	55,5	-	-	-	-	-	-
NaNO <sub>3</sub>	16	-	-	11,3	23-56	55,5	54,5	45	43	36	-	-	-	-	-	52	-	-
KNO <sub>3</sub>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	55	-
Ba(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	15	72	61,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	54	49	64	-	-	65
Na <sub>2</sub> C <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	-	12	-	-	-	-	-	-	-	-	25	-	-	-	-	-	-	-
Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	27,8	-	-	-	-	-	-
SrCO <sub>3</sub>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5	5	5	6	4	4
криолит	-	-	8,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	14	16	10	15	12	12
магний	-	-	15	34,6	20-55	17	40,5	-	48	58	-	-	19	-	-	-	20	-
ПАМ	-	-	-	-	-	-	-	40	-	-	-	-	-	22	11	17	-	12
оксалат Ca	-	-	5	-	0-10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
алюминий	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
связующее*	18	10	6	45,5	3-25	27,5	5	8	8	3	15	16,7	8	8	5	9	4	6
прочее**	-	6	4	8,6	-	-	-	7	1	3	-	-	-	-	5	1	5	1

1. Состав времен Первой мировой войны: \* – шеллак [6].
2. Состав времен Первой мировой войны: \* – шеллак; \*\* – сера [6].
3. Состав времен Второй мировой войны: \* – igelit (аналог идитола); \*\* – воск [2].
4. Состав для наземных сигн. средств (конец Второй мировой войны): \* – гипс; \*\* – вода [2].
5. Большинство германских составов желтого огня времен Второй мировой имели подобное сочетание компонентов. Для замены дефицитного магния также использовался алюминий и алюминиево-магниевый сплав: \* – вазелин, воск и древесные опилки [2].

6. 27 мм сигнальный патрон конца Второй мировой войны (отстреливался с сигнального пистолета): \* – ПВХ [2].
7. 27 мм сигнальный патрон конца Второй мировой войны (отстреливался с сигнального пистолета): \* – IG воск (тип L) [2].
8. Сигнальный патрон конца Второй мировой войны: \* – IG воск (тип L); \*\* – 2% нитрата стронция, 3% древесной муки, 2% вазелина [2].
9. Состав производства Восточной Германии: \* – новолак; \*\* – стеарат кальция [28].
10. Современный германский состав: \* – полиолефин; \*\* – полихлоропреновый каучук. Удельная светосумма 40500 кд·с/г. Чистота цвета 82%. [71].
11. Состав 30-х годов 20 века: \* – идитол или шеллак [6, 15].
12. Состав 30-х годов 20 века: \* – идитол [6].
13. Состав 34-01: \* – идитол. Удельная светосумма 3800 кд·с/г,  $I/S = 2100$  кд/см<sup>2</sup>. Скорость горения 2,1 мм/сек. Чистота цвета 85%. 15 мм сигнальный патрон, ружейные сигнальные патроны, 26 мм патроны, фейерверочные изделия [13, 14].
14. \* – Резинат кальция.  $I/S = 1000$  кд/см<sup>2</sup>. Скорость горения 0,9 мм/сек. Чистота цвета 84%. 39 мм двухзвездный патрон [13].
15. Состав 34-03: \* – СФ-340А; \*\* – 3% ПВХ, 2% олифы. Удельная светосумма 880 кд·с/г,  $I/S = 160$  кд/см<sup>2</sup>. Скорость горения 0,7 мм/сек. Чистота цвета 94%. ЦОСАБ-10Ж, РПСР-40ж, наземный сигнальный патрон [13, 14].
16. Состав 34-02: \* – СФ-340А; \*\* – графит. Удельная светосумма 4500 кд·с/г,  $I/S = 1950$  кд/см<sup>2</sup>. Скорость горения 1,5 мм/сек. Чистота цвета 87%. РПСБ-40ж [13, 14].
17. \* – Канифоль; \*\* – 3% ПВХ, 2% масла индустриального.  $I/S = 95$  кд/см<sup>2</sup>. Скорость горения 0,7 мм/сек. Чистота цвета 77%. ЗОС-1Ж [13].
18. \* – Канифоль; \*\* – масло индустриальное.  $I/S = 90$  кд/см<sup>2</sup>. Скорость горения 0,5 мм/сек. Чистота цвета 96%. НОСАБ-100 [13].

**Табл. 17.15. Послевоенные американские и английские составы желтого огня**

Состав	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
KClO <sub>4</sub>	23	50	-	-	21	50	17	50	-	-	-	-	-	12-22	17
NaNO <sub>3</sub>	-	-	-	-	-	-	-	-	49	21	-	48	46	-	-
Sr(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	-	-	-	-	-	-	16	-	-	-	-	-	-	-	-
Ba(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	29	-	63-67	53	20	-	17	-	-	21	43	-	-	24-34	32
Na <sub>2</sub> C <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	13	15	8-17	15	19,8	17	17	15	-	5	12,5	-	5	23-31	24
ГХБ	5	7	-	10	-	9	12	7	-	-	-	-	-	-	-
магний	26	19	0-11	12	30,3	9	18	19	40	48	36	40	45	17-21	19
алюминий	-	-	3-20	-	-	-	-	-	-	-	4	-	-	-	-
связующее*	2	9	4-5	10	5	12	3	9	11	3	2,5	4	4	4	4
прочее**	2	-	2-3	-	3,9	3	-	-	-	2	2	8	-	3-5	4

1. Наземный сигнал времен Второй мировой войны: \* – асфальтит; \*\* – олифа. Т всп. 496°C. Теплота сгорания 5,25 МДж/кг [25].
2. Состав для сигнальных звездок времен Второй мировой войны: \* – асфальтит [25].
3. Американский состав: \* – сера; \*\* – касторовое масло [10].
4. Состав для маркера Mk99: \* – ламинак [24].
5. Состав для морского маркера Mk118. Чистота цвета 82%: \* – ламинак; \*\* – асфальтит [21].
6. Ночной сигнал: \* – асфальтит; \*\* – инд. масло. Т всп. 478°C. Теплота сгор. 5,43 МДж/кг [25].
7. Ночной сигнал в АН М44А2: \* – олифа. Т всп. 532°C. Теплота сгорания 4,66 МДж/кг [25].
8. Ночной сигнал: \* – асфальтит. Т всп. 510°C. Теплота сгорания 4,81 МДж/кг [25].
9. Состав для сигнальной мины М49А1: \* – ламинак 4116 [25].
- 10-11. \* – Парафин; \*\* – олифа + касторовое масло [25].

12. Устаревший английский состав SR-581: \* – акароидная смола; \*\* – мука из плодов фителефаса. Удельная светосумма 24600 кд·с/г,  $I/S = 14100$  кд/см<sup>2</sup>. Скорость горения 3,6 мм/сек [11].
13. Английский состав SR-560: \* – литографская олифа [31].
14. Состав из американского патента, используется в сигнальном изделии, запускаемом с подводной лодки: \* – ламинак 4110; \*\* – асфальтит [39].
15. Пламенный состав в изделии Mk115: \* – ламинак 4110; \*\* – асфальтит [24].

## 17.5. Составы белого огня

Белый цвет является синтетическим, т.е. образуется при смешивании основных цветов. Составы белого огня 19-го века обычно состояли из нитрата калия, связующего типа шеллака и порошкообразной сурьмы (или сульфида сурьмы). Составы начала 20 века уже содержали алюминий и (или) магний обычно вместе с нитратом бария. Немецкие композиции белого огня времен Второй мировой войны в большинстве своем состояли из: 54-76% нитрата бария, 0-10% нитрата калия, 15-18% алюминия или алюминий-магниевого сплава, 2-20% воска или вазелина, 0-6% пламенной добавки (фторида бария) и 4-12% серы [2].

В качестве сигнальных средств белого огня могут быть использованы штатные осветительные средства с составами на основе нитрата бария, которые при горении дают яркий белый свет. Современные сигнальные смеси белого огня схожи с осветительными композициями на основе нитрата бария. Однако, в связи с меньшим содержанием магния, при горении начинает проявляться спектр соединений бария, придающий пламени зелено-желтый оттенок, который требует коррекции введением соединений калия или стронция.

Табл. 17.16. Составы белого огня

Состав	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
Ba(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	77	55	38	55	56	13	-	49	42	38,3	-	65	65	66	68	31	67	64	64
KNO <sub>3</sub>	-	-	-	10	11	54	-	-	-	25,2	-	13	7	6	5	37,5	6	12	6
Sr(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	-	5	7	-	-	-	-	16,5	11	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ПТФЭ	-	-	-	-	-	-	46	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
сера	5	-	-	8	8	13	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
магний	-	17	52	-	-	-	54	29,5	25	26,9	66	-	-	10	17	5	18	-	28
алюминий	13	15	-	21	19	-	-	-	14	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ПАМ	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	18	20	10	-	13,5	-	16	-
NaNO <sub>3</sub>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	29	-	-	-	-	-	-	-	-
BaF <sub>2</sub>	-	-	-	6	6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
связующее*	5	5	3	-	-	2	2,6	5	5	6,7	5	2	6	6,5	10	13	5	6	2
прочее**	-	3	-	-	-	18	-	-	-	3	2,9	-	2	2	1,5	1	-	4	2

1. Состав времен Первой мировой войны для авиационных выпелов: \* – шеллак [8].
2. Американский состав времен Второй мировой войны: \* – асфальтит; \*\* – олифа [17].
3. Американский состав времен Второй мировой войны: \* – олифа [17].
4. Немецкий состав для 27 мм сигн. патрона ESN-2 и ESN-3 времен Второй мировой войны [2].
5. Немецкий состав для 27 мм сигнального патрона ESN-5 времен Второй мировой войны [2].
6. Американский состав для Mk2: \* – декстрин; \*\* – антимион [24].
7. Американский экспериментальный ночной сигнал. Существует 2 варианта с различными фракциями ПТФЭ и магния: \* – НЦ св. 100%. Т всп. 510°C. Теплота сгорания 4,67 МДж/кг [25].
8. Американский ночной сигнал M159: \* – VAAR или ламинак. Т всп. 425°C. Теплота сгорания 6,24 МДж/кг [25].

9. Американский ночной наземный сигнал М18А1: \* – асфальт; \*\* – олифа. Т всп. 525°С. Теплота сгорания 5,89 МДж/кг [25].
10. Американский ночной сигнал: \* – парафин; \*\* – олифа [25].
11. Ночной сигнал (США) М127А1: \* – ламинак. Также используется как осветительный [26].
12. Отечественный состав для огневой сигнальной шашки: \* – канифоль; \*\* – масло индустриальное. Скорость горения 0,5 мм/сек.  $I/S = 99$  кД/см<sup>2</sup> [13, 67].
13. Отечественный состав для 39 мм сигнального патрона ночного действия: \* – идитол; \*\* – криолит. Скорость горения 1,4 мм/сек.  $I/S = 367$  кД/см<sup>2</sup> [13].
14. Отечественный состав 37-17 для РПСР-406: \* – канифоль; \*\* – масло индустриальное. Скорость горения 0,9 мм/сек.  $I/S = 450$  кД/см<sup>2</sup> [13, 19].
15. Отечественный состав 36-16 для РДСП: \* – СФ-340А; \*\* – графит свыше 100%. Скорость горения 2,6 мм/сек.  $I/S = 2467$  кД/см<sup>2</sup> [13, 19].
16. Отечественный состав для сигнальной мины «СМ»: \* – идитол. Скорость горения 1,7 мм/сек.  $I/S = 315$  кД/см<sup>2</sup> [13].
17. Отечественный состав для ЗОС-16: \* – канифоль; \*\* – 2% криолита, 2% индустриального масла. Скорость горения 0,6 мм/сек.  $I/S = 690$  кД/см<sup>2</sup> [13].
18. Отечественный состав для НОСАБ-100-706: \* – канифоль; \*\* – индустриальное масло. Скорость горения 0,66 мм/сек.  $I/S = 688$  кД/см<sup>2</sup> [13].
19. Отеч. состав для фальшфейера Ф-2Б: \* – масло индустриальное; \*\* – графит св. 100% [13, 19].

## 17.6. Составы на термопластичной, пластизольной и нитроцеллюлозной основе

В связи с появлением новых материалов и технологических возможностей, с начала 60-х годов 20 века были разработаны сигнальные составы на пластизольной, термопластичной и литьевой основах [13]. Новая основа позволяет сократить производственный цикл и получить составы с улучшенными механическими свойствами. Однако подобные технологии зачастую требуют перехода на новое оборудование, изменения технологического процесса и использования более дорогих компонентов, чем при обычном процессе прессования порошковых смесей.

- Термопластичные композиции ориентированы на процесс непрерывного производства и обычно изготавливаются методами проходного прессования. В качестве полимеров могут быть использованы полиизобутилен и различные синтетические каучуки.
- Литьевые композиции на основе жидких олигомеров при достаточном содержании полимера изготавливаются литьем подобно технологии смесевых ракетных топлив. За счет добавок происходит сшивка жидких олигомеров (полимеризация) с образованием поперечных связей. В результате получается эластичная шашка.
- Пластизольные составы можно изготавливать на существующем оборудовании, эта технология удобна для организации непрерывного производства и представляет наибольший практический интерес. Она основана на набухании порошкообразного полимера в пластификаторе при нагревании; в результате композиция переходит из пластичного в эластичное состояние. С точки зрения безопасности промышленного производства для практических целей пригодны полимеры, имеющие температуру гелеобразования 80-90°С и время созревания не более 1 часа. В СССР были отработаны композиции на основе хлорнаирита ( $[C_4H_5Cl_2]_n$  - продукт хлорирования хлоропренового каучука) и полимера ВА-15 (сополимер винилхлорида с винилацетатом).

Стоит обратить внимание, что пластизольная и термопластичная основа в количестве, достаточном для получения требуемой механической прочности сигнального состава, содержит много органических компонентов и довольно небольшое количество хлора. Поэтому для обеспечения нужной степени насыщенности пламени, составы на их основе зачастую содержат в качестве окислителя и дополнительного источника хлора перхлорат аммония.

Данные типы составов известны уже более 40 лет и имеют перспективы, связанные с возможностью организации высокопроизводительного поточного производства. Тем не менее реальное производство сигнальных составов продолжает быть ориентированным на простые технологии глухого прессования. В таблицах, приведенных ниже, представлены в основном отечественные термопластичные и пластизольные композиции, разработанные в 1960-80 годах 20 века. Некоторые из них, ввиду низких световых показателей, могут быть использованы только в гражданской пиротехнике. Вероятно, в СССР и США эти технологии являлись «двойными» с ориентацией на военное применение, а в фейерверочных изделиях велась их практическая отработка.

В конце 20 века, в рамках конверсии, в СССР/России проявился интерес к малодымным цветопламенным составам на основе нитроцеллюлозы и утилизируемых бездымных порохов, отличающимся очень высокими цветовыми и световыми показателями. Они легко воспламеняются и обычно не требуют нанесения специальных воспламенительных мастик. Следует отметить, что стоимость основы бездымного пороха (пироксилина и нитроэфиров) весьма значительна, и, несмотря на высокое качество и зрелищность эффектов, такие составы могут быть конкурентоспособными лишь при использовании утилизируемого порохового сырья.

### **Примечание.**

*Использование бездымной пороховой основы в пиротехнике известно еще с середины 20 века [43], когда после Второй мировой войны накопились избыточные запасы пироксилина, которые нужно было утилизировать.*

Хотя и сообщается о практическом применении смесей на утилизируемых порохах, перспективы их использования в сигнальных составах военного назначения выглядят сомнительными, т.к. в случае крупномасштабной войны пироксидин и коллоксидин могут оказаться дефицитным стратегическим сырьем.

В США тоже были разработаны цветопламенные составы непрерывного излучения на бездымной основе, перерабатываемые глухим прессованием. В качестве примеров можно привести смеси из патента [44]:

1. Основа для звездок: 55,5 ч. нитроцеллюлозы, содержащей 30% воды, 18 ч. нитрогуанидина, 18 ч. ПХА, 5 ч. 20% водного р-ра поливинилового спирта в качестве связующего и 8 ч. цветовой добавки (карбонаты Sr, Ba и Cu).
2. Основа для факелов и лансов с пламенем красного цвета: 58 ч. нитроцеллюлозы, содержащей 30% воды, 7,8 ч. нитрогуанидина, 21,4 ч. ПХА, 8 ч. 20% водного р-ра поливинилового спирта в качестве связующего, 7,8 ч. карбоната стронция и 3,9 ч. титанового порошка.

3. Основа для факелов и лансов с пламенем синего цвета: 28 ч. нитроцеллюлозы, содержащей 30% воды, 38,6 ч. нитрогуанидина, 21,1 ч. ПХА, 8 ч. 20% водного р-ра поливинилового спирта в качестве связующего, 7,7 ч. основного карбоната меди и 3,9 ч. титанового порошка.

В последние годы появился ряд патентов [45, 46, 47], связанных с использованием в пиротехнике цветообразующих высокоазотных соединений типа солей бис-тетразолов и аминотетразолов. Такие композиции отличаются высокой цветовой насыщенностью пламени и малой дымностью, однако компоненты этих смесей на данный момент дороги и дефицитны [32].

**Табл. 17.17. Термопластичные, пластизольные, пироксилиновые и баллиститные составы красного огня**

Состав	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$Sr(NO_3)_2$	35	38-53	50-60	30-50	20-37	25-30	62	62	20	-	-	65-70
$NH_4ClO_4$	20	35-50	-	30-50	29-36	25-35	-	-	-	-	-	-
магний и/или ПАМ	25	-	13-18	-	10-20	10-17	15	15	15	10	3	10-15
ПВХ	10	-	5-10	-	-	-	-	-	9	6	2	6-10
пластификатор*	10	-	-	4-6	5-7	5-10	8	12	-	28,2	37,7	-
полимер**	-	10-12	10-12	14-18	13-15	12-17	15	11	-	-	-	8-12
пироксилиновая основа	-	-	-	-	-	-	-	-	56	-	-	-
коллоксилин	-	-	-	-	-	-	-	-	-	45,1	52,6	-
прочее***	-	-	3-5	-	-	-	-	-	-	10	4	-
идитол	-	-	1-6	-	2-3	-	-	-	-	-	-	-
тех. добавка	-	-	1-3	0-2	1-2	-	-	-	-	0,7	0,7	1-1,5

- Американский пластизольный состав: \* – диоктилфталат. После тщательного перемешивания компонентов в течение 15 мин., массу помещают в картонный корпус длиной 4 дюйма, диаметром 1 дюйм и выдерживают полчаса при температуре около 170°C. После охлаждения получается эластичная шашка, сгорающая в течение 60 сек. с силой света 15900 кд [48].
- Термопластичный КТ-1: \*\* – СКН-40Т. Скорость горения 0,8-1,1 мм/с,  $I/S = 92,5$  кд/см<sup>2</sup>, чистота цвета 77% [13].
- Термопластичный КТМ-1: \*\* – СКН-40Т; \*\*\* – ДЦДА. Техническая добавка – стеарат кальция и вазелиновое масло. Скорость горения 0,75-1,13 мм/с,  $I/S = 710-740$  кд/см<sup>2</sup>. Удельная светосумма 2620 кд·с/г, чистота цвета 87% [13, 49].
- Пластизольный КХ-1: \* – ДБС или ДБФ; \*\* – хлорнаирит. Скорость горения 1,1-1,4 мм/с,  $I/S = 16,6$  кд/см<sup>2</sup>, чистота цвета 85-94% [13].
- Пластизольный КХМ-1: \* – ДБС или ДБФ; \*\* – хлорнаирит. Скорость горения 0,85-1,35 мм/с,  $I/S = 700-1300$  кд/см<sup>2</sup>, чистота цвета 90-96% [13].
- Пластизольный КСМ-2. (медленногорящий): \* – МГФ-9; \*\* – СНК-МБ. Скорость горения 0,43-0,8 мм/с,  $I/S = 650-900$  кд/см<sup>2</sup>, чистота цвета 95-97% [13].
- Пластизольный КВМ-1: \* – ТБФ; \*\* – ВА-15. Скорость горения 1,0 мм/с,  $I/S = 1180$  кд/см<sup>2</sup>, чистота цвета 92% [13].
- Пластизольный КВМ-2: \* – СО; \*\* – ВА-15. Скорость горения 0,96 мм/с [13].
- Отечественный состав на пироксилиновой основе. Удельная светосумма 3010 кд·с/г. Чистота цвета 93% [49].
- Отечественный состав на баллиститной основе для звездок: \* – нитроглицерин/ ДЭГДН/ ДНТ/ добавки; \*\*\* – карбонат стронция. Чистота цвета 98%, скорость горения 1,9 мм/сек [50].
- Отечественный состав на баллиститной основе для декоративных бездымных свечей: \* – нитроглицерин/ ДЭГДН/ ДНТ/ добавки; \*\*\* – карбонат стронция. Чистота цвета 93% [51].
- Отечественный состав с повышенной прочностью на растяжение: \*\* – смесь СКН-40Т и СКУ-8А. Добавка – стеарат цинка [52].

**Табл. 17.18. Термопластичные, пластизольные, пироксилиновые и баллиститные составы зеленого огня**

Состав	1	2	3	4	5	6	7	8
$\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$	28	20-25	25-50	27-35	25-30	63	20	20
$\text{NH}_4\text{ClO}_4$	57	45-55	30-55	27-35	30-35	-	-	-
магний и/или ПАМ	-	12-17	-	10-20	10-20	15	15	8
нитрогуанидин	-	-	-	3-5	-	-	-	-
пластификатор*	-	-	5-6,5	5-7	6-12	7	-	30
полимер**	10	10-12	13,5-14,5	13-15	10-20	15	-	-
ДЦДА	-	3-5	-	-	-	-	-	-
пироксилиновая основа	-	-	-	-	-	-	56	-
коллоксилиновая основа	-	-	-	-	-	-	-	33
ПВХ	-	-	-	-	-	-	9	8
идитол	5	-	-	-	-	-	-	-
тех. добавка	-	-	0-2,5	1-2	-	-	-	1

1. Термопластичный ЗТ-1: \*\* – СКН-40Т. Скорость горения 1,1-1,6 мм/с,  $I/S = 24 \text{ кД/см}^2$ , чистота цвета 82% [13].
2. Термопластичный ЗТМ-1: \*\* – СКН-40Т. Скорость горения 1,1-1,3 мм/с,  $I/S = 500-928 \text{ кД/см}^2$ , чистота цвета 62-72% [13].
3. Пластизольный ЗХ-1: \* – ДБС или ДБФ; \*\* – хлорнаирит. Скорость горения 0,8-1,8 мм/с,  $I/S = 8,5 \text{ кД/см}^2$ , чистота цвета 90-93% [13].
4. Пластизольный ЗХМ-1: \* – ДБС или ДБФ; \*\* – хлорнаирит. Скорость горения 0,8-1,2 мм/с,  $I/S = 257-475 \text{ кД/см}^2$ , чистота цвета 68-76% [13].
5. Пластизольный ЗСМ-2 (медленногорящий): \* – МГФ-9; \*\* – СНК-МБ. Скорость горения 0,6-0,88 мм/с,  $I/S = 43-286 \text{ кД/см}^2$ , чистота цвета 80-85% [13].
6. Пластизольный ЗВМ-1: \* – ТБФ; \*\* – ВА-15. Скорость горения 1,1 мм/с,  $I/S = 580 \text{ кД/см}^2$ , чистота цвета 75% [13].
7. Отечественный состав на пироксилиновой основе. Удельная светосумма 2080 кД·с/г, чистота цвета 74% [49].
8. Отечественный состав на баллиститной основе: \* – нитроглицерин : ДЭГДН 2:1. Сила света 3600 кд, скорость горения 2,5 мм/с, чистота цвета 85% [50].

**Табл. 17.19. Термопластичные, пластизольные, пироксилиновые и баллиститные составы желтого и белого огня**

Состав	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$\text{Sr}(\text{NO}_3)_2$	11-13	5-10	-	-	-	-	-	-	-	-
$\text{NaNO}_3$	-	-	56	-	-	-	-	-	-	-
$\text{KClO}_4$	-	-	-	-	56-59	20	20	-	-	-
$\text{NH}_4\text{ClO}_4$	57-63	40-45	-	45-55	-	-	-	-	-	-
оксалат натрия	13-17	8-23	-	-	-	-	14	-	-	-
криолит	-	-	-	-	-	-	-	6	4	-
магний и/или ПАМ	-	15-20	18	35-45	16-18	12	17	15	-	17
пластификатор*	-	-	8	-	8	-	-	31	39	40,6
полимер**	12-14	10-12	15	10-12	15-18	-	2	-	-	-
пироксилиновая основа	-	-	-	-	-	58	49	-	-	-
баллиститная основа	-	-	-	-	-	-	-	48	57	42,4
идитол	-	-	3	-	3	-	-	-	-	-
окись меди	-	-	-	-	-	10	-	-	-	-

1. Термопластичный ЖТ-1: \*\* – полиизопрен. Скорость горения 0,9 мм/с,  $I/S = 20$  кд/см<sup>2</sup>, чистота цвета 92% [13].
2. Термопласт. ЖТМ-1: \*\* – СКН-40Т. Скорость горения 0,98-1,15 мм/с,  $I/S = 833-1140$  кд/см<sup>2</sup> [13].
3. Пластизольный ЖВМ-1: \* – ТБФ; \*\* – ВА-15. Скорость горения 0,9 мм/с,  $I/S = 1450$  кд/см<sup>2</sup>, чистота цвета 92% [13].
4. Термопласт. БТМ-1: \*\* – СКН-40Т. Скорость горения 1,23-1,44 мм/с,  $I/S = 1026$  кд/см<sup>2</sup> [13].
5. Пластизольный БВМ-1: \* – ТБФ; \*\* – ВА-15. Скорость горения 1,1-1,8 мм/с [13].
6. Состав белого огня на пироксилиновой основе. Удельная светосумма 2580 кд·с/г [53].
7. Состав желтого огня на пироксилиновой основе: \*\* – ВА-15 св. 100%. Удельная светосумма 3650 кд·с/г, чистота цвета – 91% [54].
8. Состав желтого огня на баллиститной основе: \* – нитроглицерин + ДЭГДН 1:1. Скорость горения 1,2 мм/с, чистота цвета 96% [55].
9. Состав желтого огня на баллиститной основе для декоративных свечей типа лансов: \* – нитроглицерин / ДЭГДН/ ДНТ/ добавки. Чистота цвета 98% [56].
10. Состав белого огня на баллиститной основе: \* – нитроглицерин/ ДНТ/ добавки. Удельная светосумма 3100 кд·с/г, сила света 2900 кд, скорость горения 1,1 мм/с [57].

**Табл. 17.20. Термопластичные, пластизольные, пироксилиновые и баллиститные составы голубого и фиолетового огня**

Состав	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Sr(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	-	10-20	-	10-30	-	-	34	17	-	-
KClO <sub>4</sub>	-	-	-	-	49	254	-	-	-	-
NH <sub>4</sub> ClO <sub>4</sub>	60-65	60-70	45-65	40-60	-	-	20	23	-	-
CuO	15-20	-	15-38	-	20	154	14	10	7	15
сульфид меди II - CuS	-	8-10	-	8-10	-	-	-	-	-	-
пироксилиновая основа	-	-	-	-	-	464	-	43	-	-
коллоксилин	-	-	-	-	-	-	-	-	33,4	29,6
магний и/или ПАМ	-	-	-	-	10	104	5	7	17,5	18
ПВХ	-	-	-	-	-	94	-	-	10	10
пластификатор*	-	-	5-6	6-10	7	-	1	-	23,7	21,05
полимер**	8-12	10-12	12-14	10-14	14	-	6	-	-	-
прочее***	8-12	0,5-10	-	-	-	-	15	-	8	6
тех. добавка	-	-	1-2	1-2	-	-	5	-	0,4	0,35

1. Термопластичный ГТ-1 (Голубой): \*\* – СКН-40Т; \*\*\* – уротропин. Скорость гор. 2,2-2,4 мм/с [13].
2. Термопластичный ФТ-1 (Фиолетовый): \*\* – СКН-40Т; \*\*\* – уротропин. Скорость горения 1,5-2,4 мм/с,  $I/S = 52$  кд/см<sup>2</sup>, чистота цвета 47%. (Уротропин – сверх 100%) [13].
3. Пластизольный ГХ-1 (Голубой): \* – ДБФ или ДБС; \*\* – хлорнаирит. Скорость горения 1,6-2,2 мм/с [13].
4. Пластизольный ФХ-1 (Фиолетовый): \* – ДБФ или ДБС; \*\* – хлорнаирит. Скорость горения 0,8-1,6 мм/с,  $I/S = 15-20$  кд/см<sup>2</sup>, чистота цвета 50-90% [13].
5. Пластизольный голубого пламени: \* – трикрезилфосфат; \*\* – хлорсодержащий сополимер. Удельная светосумма 1215 кд·с/г, чистота цвета 60% [58].
6. Состав голубого пламени на пироксилиновой основе. Соотношение компонентов в частях. Удельная светосумма 1240 кд·с/г, чистота цвета 62% [59].
7. Состав фиолетового пламени: \* – ДБФ; \*\* – хлоркаучук; \*\*\* – алюминий. Удельная светосумма 680 кд·с/г, чистота цвета 68% [60].
8. Состав фиолетового пламени на пироксилиновой основе. Удельная светосумма 870 кд·с/г, чистота цвета 71% [61].
9. Пример состава лилового огня на баллиститной основе: \* – нитроглицерин/ ДЭГДН/ ДНТ/ добавки; \*\*\* – карбонат стронция. Удельная светосумма 2518 кд·с/г [62].
10. Пример состава голубого огня на баллиститной основе: \* – нитроглицерин/ ДЭГДН/ ДНТ/ добавки; \*\*\* – карбонат бария. Сила света 1450 кд, чистота цвета 69% [63].

1. Engineering Design Handbook. Military Pyrotechnics Series. Part One. Theory and Application. US Army Materiel Command. AMCP 706-185. 1967.
2. Basil T Fedoroff etc. Dictionary of Explosives, Ammunition and Weapons (german section) Dover, New Jersey. 1958.
3. Жиров Н.Ф. Свечение пиротехнического пламени.- М.: Оборонгиз, 1939.
4. Takeo Shimizu. Fireworks: the Art, Science and Technique. Pyrotechnica Publication. 1981.
5. Shimizu, Dr. Takeo. Fireworks from a Physical Standpoint, Part II, Pyrotechnica Publications, 1983.
6. И.В. Быстров. Краткий курс пиротехники. - М.: Изд-во оборонной промышленности, 1939.
7. A.P. Hardt. Pyrotechnics. Pyrotechnica Publications. 2001.
8. Tenney L. Davis. Chemistry of Powders and Explosives. NY. 1943.
9. В.М. Солодовников. Пиротехника (Производство и сжигание фейерверков). - М.: Оборонгиз, 1938.
10. Ellern H. Military and Civilian Pyrotechnics. Chemical Publishing Company Inc. New York. 1968.
11. L.T. Dunnett. Services Textbook of Explosives. Ministry of Defence. JSP333. 1974.
12. Brebera Stanislav etc. Specialni Technica. I Dil. Гл. ред. Urban Ladislav. Praha 1976.
13. Ф.П. Мадякин. Пиротехнические составы цветных огней. КХТИ им. Кирова. - Казань, 1978.
14. Энергетические конденсированные системы. Краткий энциклопедический словарь. /Под ред. Б.П. Жукова. Изд. 2-е исправл. - М.: Янус К, 2000.
15. А.А.Фрейман. Краткий курс пиротехники. М.: Гос. изд. оборонной промышленности, 1940.
16. A.lzzo. Pirotecnia e Fuochi Artificiali, Hoepli, Milano. 1950.
17. Вспомогательные системы ракетно-космической техники. Пер. с англ. Н.В. Обезьяева и к.т.н. М.С. Шура. - М.: Мир, 1970.
18. Army Ammunition Data Sheets Artillery Ammunition Guns, Howitzers, Mortars, Recoilless Rifles, Grenade Launchers and Artillery Fuzes, TM 43-0001-28, Headquarters Department of the Army. Washington, DC, 27 October 2003.
19. Материалы Интернет-ресурса dzromon.narod.ru.
20. Army Ammunition Data Sheets: Military Pyrotechnics. TM 43-0001-37. Headquarters Department of the Army. Washington, DC, 6 January 1994.
21. Henry A. Webster III. Visible Spectra of Standard Navy Colored Flares. Propellants, Explosives, Pyrotechnics 10, 1-4 (1985).
22. Surface Pyrotechnics and Projectors, Ordnance Pamphlet 1177, 1945.
23. R.J. Hancox. A Re-examination of the Role of Potassium Perchlorate in Red Flare Formulations. Proceedings of Twenty-Eighth International Pyrotechnics Seminar. Adelaide, South Australia. 2001.
24. S. C. Chatteraj, T. A. Drehoobi and C. W. Gilliam. Disposal of Colored Flare Compositions. Proceedings of the Seventh International Pyrotechnics Seminar. 14-18 July 1980, Volume 1.
25. F. L. McIntyre, R.M. Rindner. A Compilation of Hazard and Test Data for Pyrotechnic Compositions. ARLCD-CR-80047. 1980.
26. G.R. Lakshminarayanan, Gregory S. Mannix etc. Evaluation of Alternate Fuel and Binder Materials in Hand Held Signals Illuminant Compositions. Tech. Report ARWEC-TR 99008. Picatinny Arsenal, New Jersey. 2000.
27. Def. Standard 13-171. Ministry of Defence. Glasgow 1994.
28. Martin Groeger-Schlin. Disposal of Pyrotechnic Illuminating and Signalling Ammunition. RTO SAS Symposium on «Approaches to the Implementation of Environment Pollution Prevention Technologies at Military Bases», held in Budapest, Hungary, 5-7 May 1999.
29. MIDAS database 2007.
30. Barry T. Sturman. On the Emitter of Blue Light in Copper-Containing Pyrotechnic Flames Propellants, Explosives, Pyrotechnics 31,70-74 (2006).
31. Def. Standard 13-162. Ministry of Defence. Glasgow 1995.
32. T. M. Klapotke and G. Steinhäuser. «Green» Pyrotechnics: A Chemists Challenge. Angew.-Chem. Int. Ed. 2008, 47, 3330-3347.
33. Пат. US4768439 от 1987 г.
34. Пат. ES2067419 от 1993 г.
35. Пат. US3611935 от 1969 г.
36. Пат. US4204895 от 1978 г.
37. Пат. USS044281 от 1991 г.

38. Пат. GB2044748 от 1980 г.
39. Пат. US3960087 от 1974 г.
40. Пат. US3262824 от 1964 г.
41. А.с. СССР 194594 от 1966 г.
42. Пат. US3888177 от 1974 г.
43. Пат. GB614189 от 1946 г.
44. Пат. US6599379 от 2001 г.
45. Пат. US6312537 от 1999 г.
46. Пат. WO2008127106.
47. Пат. WO2008127107.
48. Пат. US3761329 от 1971 г.
49. Пат. SU1519156 от 1987 г.
50. Пат. RU1777320 от 1989 г.
51. Пат. RU2046123 от 1991 г.
52. Пат. SU527413 от 1974 г.
53. Пат. SU1519157 от 1987 г.
54. Пат. SU1535017 от 1987 г.
55. Пат. SU1776027 от 1989 г.
56. Пат. RU2046118 от 1991 г.
57. Пат. RU2046121 от 1991 г.
58. А.с. СССР 687783 от 1978 г.
59. Пат. SU1519158 от 1987 г.
60. А.с. СССР 750949 от 1980 г.
61. Пат. SU1527841 от 1987 г.
62. Пат. RU2046120 от 1991 г.
63. Пат. RU2046122 от 1991 г.
64. Вернидуб И.И. Боеприпасы – фронт. Очерки. - Москва – Сергиев Посад, 2003.
65. K.L. And B.J. Kosanke, and C. Jennings-White. Lecture Notes for Pyrotechnic Chemistry. Journal of Pyrotechnics, Inc. 2004.
66. Jesse J. Sabatini. Development of Environmentally Friendly Insensitive Pyrotechnic Munitions with Enhanced Battlefield Performance. US Army RDECOM-ARDEC. Environmental Technology Technical Symposium & Workshop. 2011. Washington DC.
67. Пат. RU2462443 от 2011 г.
68. Japanese Pyrotechnics. US Naval Technical Mission to Japan. January 1946. USNTMJ-200E-0123-0148. Report 0-12.
69. Пат. US8282749 от 2011 г.
70. Technical Manual. Ordnance Data for Toxic Hazards Associated with Pyrotechnic Items. NAVSEA SW050-AC-ORD-010. 2005.
71. Ernst-Christian Koch. Energetic Materials Including R3, Removal of Perchlorates from Formulations and Production Techniques. Munition Safety Information Analysis Center. 2012.
72. Пат. US8182622 от 2011 г.
73. Пат. UA22294 от 2006 г.

## **Глава 18. Трассирующие составы**

Трассирующими составами называют пиротехнические смеси, оставляющие при сгорании видимый след траектории полета пуль, снарядов, ракет и других объектов с целью визуального определения дальности полета боеприпасов, целеуказания и оптического наведения. В малокалиберных пулях трассирующий состав запрессовывается непосредственно в торцевой канал пули, тогда как в более крупных боеприпасах – в цилиндрический корпус, ввинчиваемый в снаряд – так называемый «трассер».

При помощи трассеров удобно осуществлять самоликвидацию зенитных снарядов и снарядов к скорострельным пушкам с целью предупреждения их падения на землю. В этом случае значительно упрощается конструкция головного взрывателя (отсутствуют узлы инициирования самоликвидатора). На финальном этапе горения трассирующего состава через тонкую металлическую оболочку инициируется специальный теплочувствительный замедлительный состав, от которого тепловой импульс передается на донный детонатор или подпрессовку пороха (см. Рис. 18.1 в). Эта схема также позволяет избежать преждевременного срабатывания ВВ снаряда в случае выхода трассера из строя. Воспламенение трассирующих составов осуществляется от специального воспламенительного состава, инициируемого сгоранием пороха в стволе оружия [1].

### **Различают:**

- огневые трассирующие составы;
- инфракрасные трассирующие составы;
- дымовые трассирующие составы.

### **18.1. Огневые трассирующие составы**

Первые образцы огнестрельного оружия из-за малого радиуса действия и низкой скорострельности не нуждались в специальных трассирующих устройствах. С появлением в конце 19 века – начале 20 века скорострельного автоматического оружия возникла острая необходимость в визуальной корректировке огня. Непосредственно перед Первой мировой эта задача была решена в Германии и Франции разработкой трассирующих составов.

Эти первые составы имели существенные недостатки. Например, германские смеси, содержащие нитрат стронция, магний и резинат кальция, не были оптимизированы по составу, поэтому давали достаточно тусклую трассу и плохо воспламенялись. Французские составы, содержащие в качестве связующего очень небольшое количество олифы, имели сроки хранения не более месяца. По истечении этого времени состав удалялся из канала пули вручную и заменялся новой смесью [2].

В конце Первой мировой войны англичане совместно с американцами разработали 2 типа составов – первый, более тусклый на основе перекиси бария с магнием; второй, более яркий, кроме этих компонентов, содержал в своем составе нитрат бария и при использовании давал вполне удовлетворительные результаты.

Впрочем, с окончанием Первой мировой войны задача обеспечения армии надежными трассирующими изделиями так и не была полностью решена.

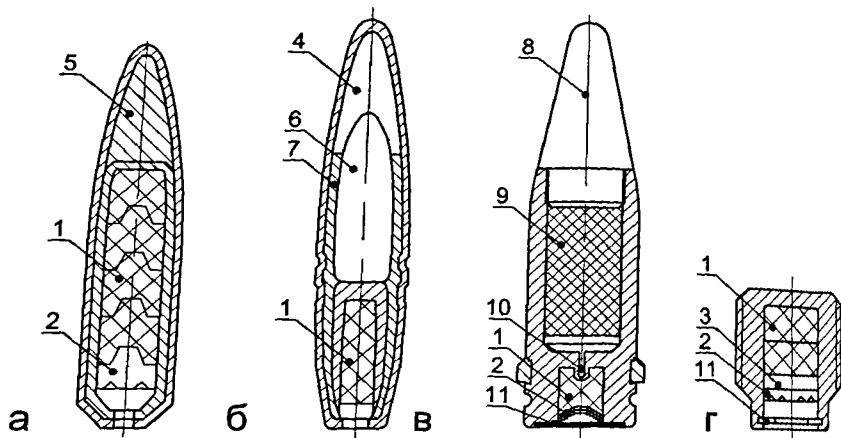
После войны работы были продолжены, и в 1926 г. в США появилась первая стандартизованная трассирующая композиция, которая полностью удовлетворяла требования военных. Она содержала перекись стронция и высокоплотную каломель. В 1926-1929 гг. американские составы содержали магний, нитрат, оксалат и пероксид стронция, каломель и резинат кальция в качестве связующего. Вскоре обнаружилось, что каломель при хранении взаимодействует с металлическими компонентами и корпусом пуль с образованием элементарной ртути, и ее исключили из употребления. К середине 30-х годов была отработана новая «сухая» технология изготовления, позволившая значительно повысить сроки хранения составов.

В период с 1935 по 1941 г. в Германии и США появились первые «dim» (тусклые) воспламенятельные смеси типа I-136 и I-194 для трассирующих составов. Они сгорали практически без видимого света, воспламеняли промежуточный воспламенятельный, а затем трассирующий составы. Таким образом, видимая трасса начиналась только на определенном удалении от стрелка. Это позволило, во-первых, затруднить обнаружение боевых точек, во-вторых, при ночной стрельбе исключалось ослепляющее действие трассы на самого стрелка.

Во время Второй мировой войны работы по совершенствованию трассирующих составов продолжились. В основном изучалось влияние примесей на свойства и стабильность составов. Появление пассивированного магния и более энергоемкого алюминий-магниевого сплава благоприятно отразилось на сроках хранения и световых характеристиках составов. Алюминий же в трассирующих составах применяется только в качестве добавки из-за плохой воспламеняемости смесей на его основе.

В Японии трассирующие составы появились незадолго до Второй мировой войны. Первая японская композиция была скопирована с состава для снарядов к швейцарской пушке «Эрликон». Она содержала 70% нитрата стронция, 20% магния, 7% каломели и 3% шеллака. Этот состав был внедрен в трассеры для снарядов калибром 20, 30 и 40 мм. Несколько позже был разработан собственный состав к 25 мм снаряду, указанный в табл. 18.2. Для этих же снарядов был внедрен состав зеленого огня, содержащий 62% нитрата бария, 28% магния, 6% хлорида бария и 4% пчелиного воска. Он запрессовывался непосредственно после воспламенятельного состава, сгорал в течение 3 секунд, после чего воспламенялась смесь красного огня. Во время войны из-за проблем с поставками нитрата стронция японцы заменили часть своих трассеров на рецептуры желтого и оранжевого огня. Состав желтого огня содержал 70% нитрата бария, 20% магния, 7% оксалата натрия и 3% парафина. Смесь оранжевого огня состояла из 50% пероксида кальция, 30% магния, 12% поваренной соли и 8% шеллака. Впрочем, последняя рецептура отличалась плохой воспламеняемостью (надежность около 80%) и хранилась не более полугода [43].

Во время Второй мировой войны из-за дефицитности стронциевых солей как в Германии, так и в СССР широко применялись трассирующие составы с желтым



**Рис. 18.1. Принципиальные схемы трассирующих боеприпасов и изделий [2, 3].**

а) – обыкновенная трассирующая пуля для корректировки огня, б) – бронебойно-зажигательно-трассирующая пуля (БЗТ), в) – схема снаряда с самоликвидацией через трассер, г) – типичный трассер, ввинчивающийся в донную часть снаряда.

1 – трассирующий состав, 2 – воспламенительный состав, 3 – промежуточный или переходный состав, 4 – зажигательный состав, 5 – свинцовый сердечник, 6 – бронебойный сердечник, 7 – рубашка, 8 – детонатор, 9 – заряд ВВ, 10 – теплочувствительный замедлительный состав, 11 – донное кольцо и целлулоидная заглушка.

и белым цветами пламени. Классический трассирующий состав №59, разработанный И.В. Быстровым в 1942 г., содержащий нитрат стронция, магний, алюминий и резинат кальция, имел «дублера», в котором нитрат стронция был заменен смесью нитратов бария и натрия. В 1942 г. для морских 37 мм зенитных орудий был отработан трассер с составами 4-х цветов (белого, зеленого, желтого и оранжевого). Обстрел одной цели из нескольких огневых точек, каждая из которой снабжена своим цветом трассера, более эффективна с точки зрения корректировки огня [39, 40]. Однако существование 4-х видов трассеров к одному боеприпасу заметно усложняет снабжение боевых подразделений, поэтому такой подход вряд ли можно считать целесообразным в военное время.

После войны в США предпринимались попытки по использованию в качестве горючих титана и бора. Были решены задачи по созданию ТС, способных устойчиво сгорать при низких давлениях (в условиях высотной разреженной атмосферы). Это так называемые «высотные трассеры» для наведения на цель зенитных ракет и реактивных снарядов. Типичным примером такого состава является композиция, использовавшаяся в трассере для английской зенитной ракеты «Rapier». Она состояла из 48% титана (8 мкм), 45% нитрата стронция, 4% олифы и 3% парлона [10]. Высотный состав белого огня с цирконием, использующийся в ракете РМ-3Б, содержит: нитрат бария – 52%, магний – 22%, цирконий – 18%,

идитол – 6%, графит – 2% [9, 42]. Современный высотный состав красного огня: нитрат стронция – 52%, цирконий – 19%, алюминий – 10%, ХПВХ – 14%, эпоксидная смола – 5% [44].

В конце 60-х годов для трассеров пуль самых малых калибров в качестве горючего также был применен порошок циркония, сообщающий трассирующим составам способность к устойчивому сгоранию даже в самых узких каналах. В современных трассирующих смесях в качестве связующих часто используют фторорганические полимеры, которые резко повышают удельную светосумму за счет образования в пламени селективных излучателей. Раньше небольшое кол-во фторидов в виде т.н. «пламенных добавок» специально вводили в осветительные составы с целью повышения удельной светосуммы. С внедрением фторорганических полимеров появилась возможность синтеза этих «пламенных добавок» непосредственно при горении.

С конца 70-х годов 20 века на вооружение американской армии начали поступать боеприпасы, снаряженные инфракрасными трассирующими средствами. ИК трассеры дают почти незаметную невооруженным глазом трассу, используются совместно с приборами ночного видения и состоят на вооружении всех современных армий.

Несмотря на некоторую функциональную и компонентную схожесть трассирующих составов с сигнальными, существуют и некоторые различия.

Основной задачей трассирующих составов является обеспечение четкого визуального контроля над летящими боеприпасами при любом времени суток и, по возможности, в любых погодных условиях. В атмосфере лучше всего проникают лучи света, смещенные по длине волны к красному, и особенно к инфракрасному спектру. Поэтому практически все современные трассирующие составы красного цвета пламени либо инфракрасные.

В патентах встречаются составы зеленого и синего цветов пламени, но на практике они используются редко по указанной ранее причине. Трассирующие составы должны обладать высокой яркостью, достаточной для уверенного наблюдения трассы в солнечную погоду днем. Поэтому они содержат большое количество магния или алюминий-магниевого сплава. Раньше для применения в авиационных и тренировочных боеприпасах производились дымовые трассирующие составы. Их трасса была видна днем, но не наблюдалась ночью, поэтому в целях унификации предпочтение было отдано пламенным составам, которые могут применяться как днем, так и ночью.

В целях понижения дымности и преодоления оптических помех трассирующие составы могут излучать в пульсирующем режиме [42]:

- *красное пламя*: нитрат стронция – 70%, ПАМ – 30%, каучук – 5% (св. 100%). Частота пульсаций 2-5 Гц;
- *белое пламя*: ПХА – 65%, ПАМ – 35%, каучук – 5% (св. 100%). Частота пульсаций 50-70 Гц.

На трассирующие составы при выстреле действуют значительные перегрузки, поэтому они должны обладать очень высокой прочностью. Невыполнение этого условия приводит к полному или частичному выгоранию состава в канале ствола,

что ведет к возникновению укороченной трассы или ее отсутствию, а также к преждевременному износу ствола огнестрельного оружия. Также возможен демонтаж (выскакивание) горячей трассирующей таблетки из боеприпаса из-за проникновения пороховых газов в поры состава. Обеспечению этой прочности, кроме подбора соответствующего связующего, способствует запрессовка под очень высоким давлением, достигающим  $3000-9000 \text{ кг/см}^2$ . Трассирующий состав должен безотказно воспламеняться от соответствующего воспламенительного состава, но быть не восприимчивым к горячим пороховым газам, так или иначе проникающим в состав. Наконец, предпочтительно, чтобы после сгорания состава в полете трассера малокалиберной пули оставалось максимальное количество шлаков. Это условие необходимо для того, чтобы отклонение от траектории боеприпаса было минимальным. При полете пули имеет место интенсивный теплообмен и охлаждение пламени набегающим потоком воздуха, поэтому интенсивность цвета пламени в полете выше, чем при стационарном сжигании, а температура горения и яркость – ниже. Продолжительность горения трассеров составляет от 2 сек. для снарядов и пуль до 10-15 сек. для зенитных боеприпасов и ракет, наводимых через трассер. По американским требованиям надежность срабатывания трассирующих боеприпасов должна быть не менее 90-95% (в Первую мировую войну надежность трассеров не превышала 10-15%, к началу 1940-х годов – ок. 50%) [2, 25].

Излучение обычных трассирующих составов недостаточно надежно наблюдается через оптику и светофильтры, предназначенные для защиты органов зрения от вредного воздействия лазерных прицелов и дальномеров. Эта оптика не пропускает лучи ИК-диапазона и часть красного диапазона излучения, в которых функционирует большинство современных лазерных систем. Для возможности устойчивого наблюдения трассы часть излучения трассирующих составов смешают из красного в желтую часть спектра с меньшей длиной волны, например, частично замещая нитрат стронция нитратом натрия.

Еще одна область использования трассирующих составов – уменьшение донного сопротивления снарядов. В полете позади снаряда образуется зона разрежения, создающая силу, противоположную по направлению траектории движения боеприпаса. При использовании специальных трассеров с составами, обладающими повышенным газообразованием, удастся скомпенсировать донное сопротивление снаряда и тем самым увеличить дальность полета боеприпасов на 20-30%. В качестве примера можно привести состав из патента [20]: нитрат стронция – 51,9%, магний – 29,9%, резинат кальция – 8,2%, желатин – 10,0%. Скорость горения 3,3 мм/сек.

Согласно этому же патенту, оптимальное кол-во магния для достижения максимальной температуры горения составов на основе нитрата стронция составляет от 25 до 35%.

Для облегчения воспламенения в трассирующие составы часто вводят пероксид стронция или бария.

С целью замедления горения составы содержат оксалаты либо оксамид.

По технологии изготовления различают составы, изготовленные «мокрым» или «сухим» способом. Первый включает в себя растворение или плавление свя-

зующего с последующей сушкой и прессованием смеси. Второй – обычное сухое измельчение компонентов и затрессовку в трассер, в этом случае состав обычно содержит твердый смазывающий агент – дисульфид молибдена или графит.

Скорость горения трассирующих составов заметно ускоряется с ростом частоты вращения боеприпасов нарезного огнестрельного оружия.

Табл. 18.1. Время существования трассы (сек.), в зависимости от частоты вращения мули [11]

Частота вращения, об/мин	BT-L-88*	R-284 с добавкой оксалата Sr	Бельгийский состав L-110**
0	3,21	7,3	3,17
60000	2,9	3,9	3,02
120000	2,4	3,0	2,71
180000	1,90	2,11	2,34
240000	1,88	1,83	1,92
300000	1,58	1,66	1,61

\* – экспериментальный канадский состав.

\*\* – содержит перекись стронция, нитрат стронция, магний, бор, ПВХ и ФФС.

Табл. 18.2. Трассирующие составы времен Второй мировой войны (1-12 – немецкие, 13,14 – русские, 15-17 – английские, 18 – польский, 19, 20 – японские)

Состав	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Магний	38	-	30,9	27	119	19	24,5	32	34	31,2	25	20,8	23	15	27,6	12,2	28,1	17,2	19,3	30
ПАМ	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	6	15	-	-	-	-	-	-
KNO <sub>3</sub>	-	7,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Ba(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	45	-	29,5	-	-	57	53	36	60	13,2	64	76,5	-	63	-	49,3	-	-	57,4	-
Sr(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	-	-	10,3	42,5	57	-	-	-	-	50,8	-	-	60	-	60,1	-	58,3	60,5	-	60
Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	-	-	12,6	-	-	-	-	12	-	-	5,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-
BaO	-	58	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	39,9	-	-	-	-
Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	112	-	-	-	8	8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SrCO <sub>3</sub>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3,3	-	5
SrO	-	7,5	-	117,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SrF <sub>2</sub>	-	-	-	-	5	5	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Связка**	110	110	112,4	9,2	10	110	110	2	6	4,8	5,5	2,7	11	7	9,7	-	13,6	13	20,6	5
Прочие**	-	22	4,3	3,8	11	11	7,5	18	-	-	-	-	-	-	2,6	5,6	-	6	2,7	-

1. Дневной состав желтого огня для 7,92 мм патрона: \* – фенолформальдегидная смола «Ersalz» (аналогидитол). Составы с трассой белого цвета вместо карбоната натрия содержали дополнительное количество нитрата бария. Длина трассы 900 м [4].
2. Ночной трассер для 7,92 мм патрона и снарядов к 20 мм пушке: \* – «Ersalz»; \*\* – сульфат бария. Длина трассы 600 м. В снарядах к 20 мм пушке использовался без воспламенительного состава [4].
3. Дневной состав белого огня для 7,92 мм патрона: \* – «Ersalz»; \*\* – остаток при анализе [4].
4. Дневной состав красного огня для 7,92 мм патрона: \* – канифоль; \*\* – лактат железа [4].
5. Состав красного огня для 20 мм зенитного снаряда: \* – «Ersalz»; \*\* – стеарат магния [4].
6. Состав желтого огня для 20 мм снаряда: \* – «Ersalz»; \*\* – стеарат магния [4].
7. Состав желтого огня для 20 мм бронебойного снаряда: \* – «Ersalz»; \*\* – 6,5% декстрина и 100% ПВХ. Для тех же целей использовался состав красного огня с нитратом стронция вместо нитрата бария [4].

8. Состав желтого огня для 37 мм снаряда: \* – воск; \*\* – 11%  $\text{BaCO}_3$ , 6% –  $\text{Mg(OH)}_2$ , 1% – остаток от анализа [4].
9. Состав белого огня для 37 мм бронебойного снаряда: \* – «Ersalz» [4].
10. Состав белого огня для 40 мм снаряда: \* – каучук [4].
11. Состав белого огня для 50 мм бронебойного снаряда: \* – «Ersalz» [4].
12. Состав белого огня для 88 мм бронебойного снаряда [4].
13. Состав красного огня П5С. Производился и после войны для пуль 7,62 мм: \* – идитол [5].
14. Состав белого огня №10: \* – идитол [5].
15. Состав красного огня для пуль калибром 7,7 мм: \* – шеллак; \*\* – парафин [5].
16. Состав красного огня для пуль калибром 7,7 мм: \*\* – сажа. Соотношения – в частях [5].
17. Состав красного огня для пуль 7,92 мм: \* – шеллак [5].
18. Состав красного огня для пуль 7,9 мм: \* – шеллак; \*\* – перхлорат калия [5].
19. Состав для 12,7 мм патрона к авиационному пулемету: \* – шеллак; \*\* – алюминий [5].
20. Состав для 25 мм трассирующего снаряда: \* – пчелиный воск [43]. Магний покрывался шеллаком [43].

**Табл. 18.3. Американские послевоенные и современные трассирующие составы**

Состав	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
магний	-	46	26,7	28	28	26	25,2	25	42	23,1	22,6	26,0	23,9	25,7	19,8	20,5	23,4	40	45	25
$\text{Sr(NO}_3)_2$	56	18	33,3	40	55	52	49,5	43	44	41,9	41,9	37,4	32,4	41,8	34,5	35,5	33,5	20	20	40,9
$\text{SrO}$	-	-	26,7	-	-	-	-	-	-	19,8	20,3	21,1	8,6	5,9	22,1	29,7	-	-	-	-
$\text{SrCO}_3$	-	-	5,0	8	-	-	-	-	-	-	-	-	1,6	1,1	-	-	6,7	-	-	-
$\text{BaO}$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,1	23,5	12,9	-	-	-	-	-	-
ПХК	-	29	-	20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	16,7	-	-	-
ПВХ	7	4	-	-	17	16	15,3	-	-	12,9	12,9	11,5	6,9	10,6	12,6	11,0	-	-	-	15,2
дехлоран	-	-	-	-	-	-	-	-	7	-	-	-	-	-	-	-	2,8	-	-	-
оксамид	-	-	-	-	-	-	10	12	-	-	-	-	-	-	6,7	-	9,6	-	-	8,9
$\text{MnO}_2$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4,0	5	-	-
связка*	-	3	8,3	4	-	6	-	18	7	2,3	2,3	1,8	2,8	1,9	4,3	3,3	3,3	6	12	10
прочее**	37	-	-	-	-	-	-	2	-	-	-	-	1,1	0,3	0,1	-	-	-	29	23

1. Состав R-45: \*\* – сплав АМ [12].
2. Артиллерийский трассирующий состав. Ранние модификации вместо ПВХ содержали гексахлорбензол. Плотность снаряжения до 3,6 г/см<sup>3</sup>. Температура самовоспламенения 421°C. \* – асфальтит [12].
3. Штатный состав R-256: \* – резинат кальция. Плотность снаряжения до 3,0 г/см<sup>3</sup>. Температура воспламенения 286°C. Теплота сгорания 7,62 МДж/кг. .50 кал., М1, М10, М17, М20, .45 кал., М26 [13].
4. Штатный артиллерийский состав R-257: \* – резинат Са [2].
5. Штатный состав R-284. Плотность снаряжения до 3,0 г/см<sup>3</sup>. Температура самовоспламенения 488°C. Теплота сгорания 8,50 МДж/кг. 5,56 мм М196, .30 кал., 7,62 мм и .50 кал. М1 [13].
6. Штатный состав R-321: \* – парлон [6].
7. Штатный состав R-403 [6].
8. Штатный состав R-505: \* – резинат кальция; \*\* – полиэтилен LP-390. Температура самовоспламенения 486°C. Теплота сгорания 7,75 МДж/кг [13].
9. Штатный состав R-508 для М13: \* – VAAR. Температура самовоспламенения 344°C. Теплота сгорания 9,6 МДж/кг [13].
10. Устаревший состав для 7,62 мм патронов к М62: \* – резинат Са [21].
11. Устаревший состав для 7,62 мм патронов к М25: \* – резинат Са [21].
12. Устаревший состав для 5,56 мм патронов с пулей М196: \* – резинат Са; \*\* –  $\text{PbO}_2$  [21].
13. Устаревший состав для 12,7 мм патронов с пулей М48: \* – резинат Са; \*\* – стеарат цинка [21].

14. Устаревший состав для 12,7 мм патронов с пулей М17: \* – резинат Са; \*\* – стеарат цинка [21].
15. Устаревший состав для 20 мм снарядов М242: \* – резинат Са [21].
16. Устаревший состав для 20 мм снарядов М220: \* – резинат Са [21].
17. Устаревший медленногорящий трассирующий состав для снарядов к пушкам малого калибра: \* – резинат Са [22].
18. Состав, испытанный в 25 мм снаряде М919 к пушке для БМП «Bradley»: \* – 5% Viton А, 1% этилцеллюлоза; \*\* – 5% нитрата натрия, 9% окиси железа и 15% нитрата калия. Трасса хорошо наблюдается через защитные оптические средства [23].
19. \* – Viton А; \*\* – 20% политетрафторэтилена, 3% графита. Не требует воспламенительного состава. Похожий состав используется в 25 мм снарядах к пушке М242 «Bushmaster» для БМП «Bradley» [24].
20. \* – Резинат кальция [6].

**Табл. 18.4. Послевоенные и современные трассирующие составы других стран**

Состав	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
мгний	22	15	50	18	24	43	49	36	22	30,0	45	38,1	25,5	42,5	22	27	35	30	38	25	33,3
ПАМ	2	15	-	8	6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	9	-	-	-	-	-	-
SiO <sub>2</sub>	62	50	30	50,6	50	37	30	-	33	55,5	45	45,6	56,0	46,5	46	32	45	53	42,8	58	51,7
NaNO <sub>3</sub>	-	-	10	-	-	-	10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
KaNO <sub>3</sub>	-	-	-	-	-	-	-	43	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SnO <sub>2</sub>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	10	5	-	5	-
KClO <sub>4</sub>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	22	22	-	-	-	-	-
SiC O <sub>2</sub>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4,8	-	-	-	-	-	-	-	-
ПВХ	8	-	-	8	10	10	-	15	-	-	-	-	11,8	2,0	-	-	-	-	-	-	5,4
MgCO <sub>3</sub>	-	-	-	5	-	-	-	-	-	-	-	4,7	-	5,0	-	-	5	-	4,8	-	-
SiCO <sub>2</sub>	-	-	-	2	-	5	-	-	-	6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
связка*	6	7,5	10	8	5	5	6	6	33	7	10	11,6	-	4,0	4	12	10	12	4,8	12	9,6
прочее**	-	12,5	-	0,4	5	-	5	-	12	1,5	-	-	1,9	-	-	7	-	2,5	9,6	2,5	-

1. Отечественный послевоенный состав: \* – идитол [3].
2. Отечественный состав, вероятно, №5М: \* – идитол; \*\* – ХПВХ, графит – 0,5% (св. 100%) [7, 27].
3. Отечественный состав по ОСТ В 84-2016: \* – идитол. Скорость горения 3,7 мм/сек. Удельная светосумма 5000 кд·с/г [28].
4. Отечественный состав: \* – идитол; \*\* – графит. Скорость горения 3,8 мм/сек. Температура воспламенения 530°C [29].
5. Отечественный состав: \* – идитол; \*\* – стеарат кальция [42].
6. Отечественный состав: \* – смола СФ-211 [42].
7. Украинский состав: \* – фторкаучук СКФ-32; \*\* – криолит. Скорость горения 4,0 мм/сек. Удельная светосумма 9000 кд·с/г [28].
8. Украинский состав зеленого огня: \* – фторкаучук СКФ-32-25. Скорость горения 4,0 мм/сек. Удельная светосумма 6200 кд·с/г [30].
9. Германский состав для снаряжения малокалиберных пуль из патента Великобритании: \* – кальция тетрахлорфталат; \*\* – 10% циркония, 2% хлората калия [31].
10. Чешский состав: \*\* – канифоль. А также 0,5% графит (сверх 100%) [3].
11. Чешский состав времен Второй мировой войны: \* – шеллак [3].
12. Канадский состав ВТ-1252 для пуль калибра 5,56 мм: \* – 1,9% шеллака, 6% парлона, 3,7% Viton А. Удельная светосумма при 270000 об/мин – 2526 кд·с/г. Температура вспышки 618°C [14].
13. Предположительно канадский состав: \*\* – дисульфид молибдена. Удельная светосумма 1780 кд·с/г. Скорость горения 3,8 мм/сек [32].
14. Канадский состав: \* – Купат 9301 (сополимер винилиденфторида, гексафторпропилена и тетрафторэтилена). Удельная светосумма 4568 кд·с/г. Скорость горения 6,2 мм/сек [32].

15. Югославский состав: \* – идитол. Соотношение компонентов приведено в частях [16].
16. Болгарский состав: \* – идитол; \*\* – 3% алюминия, 4% хлорида калия.  $I/S=9500$  кД/см<sup>2</sup> [33].
17. Английский состав: \* – олифа. Соотношение компонентов в частях [17].
18. Английский состав для снаряжения малокалиберных пуль: \* – олифа; \*\* – тальк св. 100% [17].
19. Английский состав для снаряжения крупнокалиберных пуль: \* – шеллак; \*\* – воск пчелиный и парлон по 4,8%. Удельная светосумма 2771 кД·с/г. Скорость горения 8,3 мм/сек [8].
20. Английский состав SR-607: \* – олифа; \*\* – тальк свыше 100% [19].
21. Современный английский состав: \* – фенолформальдегидная смола/желтый краситель [8].

Кроме того, можно отметить следующие устаревшие американские трассирующие смеси:

1. Смесь для снаряжения пуль малого калибра, способная устойчиво гореть в зарядах малого диаметра: цирконий – 68,7%, перхлорат калия – 29,3%, VAA – 2,0% [25]. Цвет трассы – белый. В Англии для этих целей во время войны применяли более дешевый состав SR-458 – на основе калиевой соли диинитрофенола и перекиси бария.
2. Состав с трассой синего цвета и дымовым шлейфом. Из-за высокой степени поглощения синего света атмосферой, эта смесь вряд ли применима для снаряжения штатных боеприпасов: ПХК – 7,7%, магний – 15,4%, безводный хлорид меди II – 15,4%, нитрат бария – 38,5%, ГХБ – 15,3%, сера – 7,7% [26].
3. Состав с трассой зеленого цвета: нитрат бария – 45%, ПХК – 16%, магний – 26%, ГХБ – 7%, окись меди – 2%, асфальтит – 2%, льняное масло – 2% [2].

Следует также упомянуть два характерных для нашего времени южно-корейских состава [45]:

1. Нитрат стронция – 45%, магний – 40%, хлоркаучук – 6%, Viton A – 9%. Скорость горения – 2,3 мм/сек.
2. Нитрат стронция – 23%, магний – 50%, ПТФЭ – 20%, Viton A – 7%. Скорость горения – 5,7 мм/сек.

## 18.2. Инфракрасные трассирующие составы

С появлением пассивных приборов ночного видения в 70-х годах в США были разработаны инфракрасные трассирующие составы, трасса которых была почти не различимой невооруженным глазом, но отчетливо идентифицировалась при помощи инфракрасных очков [34]. Такие составы получили распространение сначала в артиллерии, а с появлением индивидуальных приборов ночного видения и в ручном огнестрельном оружии.

Кроме специализированных инфракрасных трассирующих композиций, применяются комбинированные трассирующие составы, которые легко идентифицируются как при помощи приборов ночного видения, так и невооруженным глазом. Как правило, их интенсивность излучения в видимом диапазоне невелика, но позволяет наблюдать трассу ночью, что полезно при отработке приемов ночной стрельбы на учениях. Для этих целей пригодны модифицированные композиции на основе ПТФЭ/магний. Например, в [41] заявлена композиция из 58% магния, 38% ПТФЭ, 4% акрилового полимера. В качестве добавки в состав вводится графит в кол-ве 1,5% (сверх 100%).

Табл. 18.5. Трассирующие составы, излучающие в ИК-диапазоне

Состав	1	2	3	4	5	6	7	8	9
перекись стронция - $\text{SrO}_2$	40	34,5	40	-	-	-	-	-	-
перекись бария - $\text{BaO}_2$	40	34,5	40	-	-	20	-	80	-
нитрат бария - $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$	-	10	-	-	-	-	-	-	31
нитрат натрия - $\text{NaNO}_3$	-	-	-	-	-	-	-	-	27
перхлорат калия - $\text{KClO}_4$	-	-	-	-	45	-	-	-	-
перекись цинка - $\text{ZnO}_2$	-	-	-	50	-	-	-	-	-
трехокись железа - $\text{Fe}_2\text{O}_3$	-	-	-	-	-	31	35	-	-
кремний - Si	-	1	-	-	-	-	6	5	24
бор аморфный - B	-	-	0,5	10	10	-	-	-	-
лактоза	-	-	5,5	-	-	-	-	-	-
магний - Mg	-	-	-	-	-	45	45	-	-
древесный уголь	-	-	-	-	-	-	-	5	9
$\text{MgCO}_3$	10	10	-	10	10	-	-	-	-
связующее*	10	10	4	5	10	2	2,5	7	6
прочее**	-	-	10	25	25	2	11,5	3	3

1. Медный штатный американский трассирующий ИК-состав R-440. Используется до сих пор в снарядах малого и среднего калибров: \* — резинат кальция [19].
2. Американский состав фирмы «General Dynamics», адаптированный для применения в снарядах среднего калибра за счет уменьшения скорости горения: \* — резинат кальция [19].
3. Состав фирмы «Thiokol» для снарядов калибром до 30 мм: \* — VAAR; \*\* — оксалат калия [35].
4. Состав для снаряжения малокалиберных пуль: \* — полиизобутилен; \*\* —  $\text{KNO}_3$  [36].
5. Состав для снаряжения малокалиберных пуль: \* — резинат кальция; \*\* — салицилат Na [36].
6. Состав для трассера к французской противотанковой ракете SS11B1: \* — HЦ; \*\* — 1% ПВХ, 1% графита [9].
7. Состав для трассера к французской противотанковой ракете MILAN: \* — фенолформальдегидная смола; \*\*\* — 3%  $\text{ZnO}$ , 8,5% ПТФЭ [9].
8. Немецкий состав: \*\*\* — 2% оксидата стронция, 1% графита [15].
9. Немецкий состав: \*\*\* — алюминий [15].

### 18.3. Дымовые трассирующие составы

В учебных снарядах для авиационных пушек используют трассирующие составы цветного дыма. При сгорании они образуют цветную дымовую трассу длиной порядка 600 м. Во время Второй мировой войны и в послевоенные годы эти композиции использовались в штатных боеприпасах, однако были вытеснены пламенными составами. Типичные смеси для такого рода трассеров описаны в патенте [37] и обычно содержат около 70% перекиси стронция, 10-15% резината кальция и 10-20% красителя типа метиламиноафтрахинона или аурамина в смеси с пироксетином.

На практике использовалась смесь S200W, содержащая 70% перекиси стронция, 15% резината кальция и 15% 11-метиламиноафтрахинона [6].

Также можно привести современную медленногорящую композицию из патента [38]: перекись стронция — 33%, нитрат бария — 5%, сульфат бария — 7,5%, резинат кальция — 4,5%, зеленый краситель — 50%.

1. Шидловский А.А. Основы пиротехники. - М.: Машиностроение, 1973.
2. Engineering Design Handbook. Military Pyrotechnics Series. Part One. Theory and Application. US Army Materiel Command. AMCP 706-185. 1967.
3. Brebera Stanislav etc. Specialni Technica. I Dil. Гл. ред. Urban Ladislav. Praha 1976.
4. Basil T Fedoroff etc. Dictionary of Explosives, Ammunition and Weapons (german section) Dover, New Jersey. 1958.
5. Н.Г. Меньшиков. Альбом конструкций патронов стрелкового и крупнокалиберного автоматического оружия (от 6,5 до 37 мм). - М.: Артиллер. акад. КА им. Дзержинского, 1946.
6. Engineering Design Handbook. Military Pyrotechnics Series. Part Four. Design for Ammunition for Pyrotechnic Effects. US Army Materiel Command. AMCP 706-188. 1974.
7. В.Н. Дик. Взрывчатые вещества, пороха и боеприпасы отечественного производства. Ч.1. - Минск: Охотконтракт, 2009.
8. James Smyth Wallace. Chemical Analysis of Firearms, Ammunition, and Gunshot Residue. CRC Press. Taylor & Francis Group. Boca Raton. 2008.
9. Jai Prakash Agrawal. High Energy Materials. Propellants, Explosives and Pyrotechnics. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. 2010.
10. Cecil D. Hassell. The Application of Solid State Physics Principles to Pyrotechnic Mixture Systems. CRDEC-TR-87048. 1987.
11. Paul Briere. The Effect of High Spin on the Performance of Tracer Compositions. Propellants, Explosives. Pyrotechnics 14, 250-254 (1989).
12. F.L. McIntyre, R.M. Rindner. A Compilation of Hazard and Test Data for Pyrotechnic Compositions. ARLCD-CR-80047. 1980.
13. L. M. Aikman, T. E. Shook, R. M. Lehr, E. Robinson, F. McIntyre. Improved Mixing, Granulation and Drying of Highly Energetic Pyromixtures. Propellants, Explosives, Pyrotechnics 12, 17-25 (1987).
14. Dr. Bernard E. Douda. Survey of Military Pyrotechnics. Prepared for Presentation at the Sixteenth International Pyrotechnics Seminar, Jonkoping, Sweden, 24-28 July 1991. NWSC/CR/RDTR-595. 1991.
15. G. Krien, Thermoanalytische Ergebnisse der Untersuchung von Pyrotechnischen Satzen, Az.: 3,0-3/5446/81, Wehrwissenschaftliches Insitut fur Werk-, Explosiv- und Betriebsstoffe Swisttal-Heimerzheim, 05.03.1981.
16. Ines Batinic-Haberle, Dubravka Barisin, Ivan Spasojevic, and Zoran Vranic. The Stability Characterization of the Pyrotechnic System. The Degradation of the Nitrate Oxidant in the Presence of Magnesium Under the Accelerated Aging Conditions. Propellants, Explosives, Pyrotechnics 17, 10-13 (1992).
17. D.C.A. Izod and R.F. Eather. Improved Red Tracer Flares. Proceedings of the Fourth International Pyrotechnics Seminar. 22-26 July. 1974.
18. Def. Standard 13-169. Ministry of Defence. Glasgow 1994.
19. Guy Henry III. IR Dim Trace for Ammunition. 38th Annual Guns & Ammunition Symposium, March 26, 2003.
20. Пат. US3886009 от 1973 г.
21. Пат. US3930844 от 1975 г.
22. Пат. US3983818 от 1975 г.
23. Пат. US5472536 от 1994 г.
24. Пат. US4094711 от 1977 г.
25. Пат. US4528911 от 1983 г.
26. Пат. US3951705 от 1975 г.
27. А.с. СССР SU644119 от 1972 г.
28. Пат. UA22295 от 2006 г.
29. Пат. RU2039727 от 1993 г.
30. Пат. UA22294 от 2006 г.
31. Пат. GB1605237 от 1974 г.
32. Пат. US4979999 от 1990 г.
33. Пат. BG60995 от 1995 г.
34. Пат. US3677842 от 1970 г.
35. Пат. US5639984 от 1996 г.
36. Пат. CA2604980 от 2006 г.
37. Пат. US2823105 от 1958 г.
38. Пат. US4621580 от 1982 г.
39. Вернидуб И.И. На передовой линии тыла. - М.: ЦНИИИТКПК. 1993.
40. Вернидуб И.И. Боеприпасы - фронту. Очерки. - Москва - Сергиев Посад, 2003.
41. Пат. US8007608 от 2009 г.
42. Материалы Интернет-ресурса [www.pyrotechnics.net.ru/](http://www.pyrotechnics.net.ru/) Материалы лекций Дудырева А.С., «Разработка пиротехнических составов». Переработка и оформление Е. Мисоночкиковой и Королева Д.В.
43. Japanese Tracers. US Naval Technical Mission to Japan. January 1946. USNTMJ-200E-0447-0464 Report 0-22.
44. Пат. EP2592060 от 2012 г.
45. Пат. KR100917149 от 2007 г.

## Глава 19. Фейерверочные составы

Фейерверочными составами называют пиротехнические смеси, используемые для снаряжения фейерверочных изделий, т.е. пиротехнических средств, предназначенных для увеселительных целей, проведения салютов, фейерверков и т.д. Основные предъявляемые к ним требования – оригинальность и красочность наблюдаемого эффекта.

### Классификация фейерверочных составов:

- Цветопламенные непрерывного излучения – смеси для изготовления пиротехнических зарядов, сгорающих цветным пламенем.
- Составы периодического излучения – смеси для изготовления пиротехнических зарядов, сгорание которых сопровождается вспышками определенной частоты.
- Искристо-пламенные – смеси, горение которых сопровождается образованием пламени и выбросом искр.
- Искристо-форсовые – смеси, горение которых сопровождается выбросом газов и искр.
- Жидкие смеси для проведения огненных шоу – составы в жидком агрегатном состоянии, как правило, предназначенные для распыления в воздухе из специальных устройств либо создания горящих надписей. При распылении на воздухе, образуют струю объемного окрашенного пламени.
- Звуковые – смеси для создания акустических эффектов треска, свиста или разрыва.

В старой литературе по развлекательной пиротехнике [1] фейерверочные составы зачастую разделяют на т.н. «слабые» и «сильные». При этом слабыми называют медленногорящие пламенные композиции, не производящие при этом работы, например, составы для звездок. Под сильными (или динамическими) составами обычно подразумевают сравнительно быстрогорящие смеси, выделяющие значительное количество газов, способных производить работу. Таковыми являются смеси для форсов, фонтанов и т.д. По конструктивному исполнению фейерверочные изделия бывают сложными и простыми [1, 2, 3]. Сложные – содержат в своем составе несколько простых изделий.

Анализ литературы по гражданской пиротехнике представляет наибольшую трудность, т.к. единой классификации гражданских пиротехнических составов и изделий не существует. В различных источниках и национальных школах терминология может значительно отличаться. В этой связи автор постарался привести терминологию в определенную согласованность.

По условиям применения фейерверочные изделия подразделяются на:

- высотные (салюты);
- парковые;
- наземные;
- для применения на воде;
- для использования в помещениях.

## Высотные фейерверочные изделия:

- *Люсткагуль (ball shell, Рис. 19.1, а)* – шарообразный снаряд из специальной проклеенной бумаги с центральным разрывным зарядом из пороха или подобной ему смеси. Люсткагуль отстреливается из мортиры, через определенный промежуток времени шар разрывается в воздухе, разбрасывая горящие звездки. Существует множество вариантов укладки звездок, которые определяют конечный эффект. Мортирой называют пусковое устройство, закрепляемое на земле или на транспортном средстве, которое способно выстреливать фейерверочные изделия вертикально вверх подобно миномету.
- *Цилиндрический люсткагуль (cylinder shell, Рис. 19.1, б)* – цилиндрический снаряд, по назначению аналогичный шарообразному люсткагулю, более технологичный в изготовлении.
- *Фейерверочные ракеты (rockets)* – изделия, приводимые в движение реактивной тягой, возникающей за счет сгорания порохового заряда и снабженные стабилизатором полета. По окончании работы двигателя срабатывает световой заряд либо выбрасываются звездки. В зависимости от калибра фейерверочные ракеты условно подразделяются на большие (Рис. 19.2, е) и малые (Рис. 19.2, ж).

**Парковые фейерверочные изделия (высота подъема изделий над поверхностью земли – до 120 м):**

- *Бурак (maroon, Рис. 19.1, в и г)* – фейерверочное изделие типа короткой мортиры, снаряжаемое мелкими пиротехническими элементами и/или изделиями. В зарубежной литературе бураки иногда называют минами (*mines*).
- *Фугас* – фейерверочное изделие в виде деревянного ящика с прочными стенками, врытого в землю. Снаряжается вышибным зарядом пороха, поверх которого уложены шлагги, швеммеры и пчелки. При инициировании создает сильный звуковой эффект с выбросом простейших фейерверочных изделий.
- *Простой бурак* (Рис. 19.1, д) – снаряжается одной крупной звездкой типа кометы или метеора.
- *Римская свеча* (Рис. 19.2, а) – фейерверочное изделие в виде длинной картонной мортиры, снаряженной последовательно расположенными звездками, размещенными через перегородки с замедлителем и собственным пороховым зарядом. При воспламенении римская свеча отстреливает звездки через определенные промежутки времени. Стоит отметить, что метательные пороховые заряды по мере удаления от дула мортиры следует ослаблять с определенным шагом. Иначе каждый последующий выстрел будет сильнее предыдущего, что может привести либо к разрыву изделия, либо к разрушению звездки в картонном стволе.
- *Турбилионы (tourbillions, жаворонки)* – аналоги ракет, но запускаемые с горизонтального положения. Снабжены соплом, расположенным в стенке бумажной гильзы. По центру к гильзе прикреплено небольшое крыло, создающее подъемную силу. По аналогии турбилионы иногда называют «вертолетами».

### Наземные фейерверочные изделия:

- *Фальшфейер (parade torch)* – изделие, представляющее собой цилиндрический корпус, заполненный цветопламенным составом. Фальшфейер снабжается ручкой для удерживания в руке.
- *Факел (torch, Рис. 19.2, б)* – представляет собой крупный фальшфейер, втыкаемый в землю. Состоит из корпуса, запрессованного в него пиротехнического состава и штыря.
- *Декоративная пиротехническая свеча (контурная свеча или «ланс», Рис. 19.2, в)* – сравнительно небольшое изделие, конструктивно схожее с факелом. Состоит из бумажного корпуса, запрессованного в него цветопламенного состава, воспламенительной головки и глиняной забивки на дне. Служит для составления светящихся надписей.
- *Фонтан (Рис. 19.2, г)* – изделие, устанавливаемое на земле и снабженное глиняным соплом. При воспламенении выбрасывает сноп искр. Фонтан, сгорающий пульсациями и в котором запрессовано несколько составов поочередно, называется гейзером.
- *Огненное колесо (wheel)* – динамическое изделие, состоящее из нескольких форсов, закрепленных по кругу на специальной деревянной конструкции. При воспламенении форсов колесо раскручивается за счёт реактивной тяги. Визуально наблюдается как вращающийся искрящийся круг.
- *Солнечное колесо (pinwheel)* – динамическая фигура, представляющая собой свернутую в спираль длинную тонкую бумажную трубку, наполненную форсовым или пороховым составом. Крупные солнечные колеса устанавливаются на специальную деревянную основу, имеющую ось вращения. При воспламенении изделие раскручивается, выбрасывая снопы искр.
- *Петарда (firecracker)* – изделие, снабженное пороховым или светозумовым зарядом и средством замедления в виде отрезка огнепроводного шнура. Конструктивно обычно изготавливается в виде картонного цилиндра с глиняными заглушками. Разрывается с громким треском. В США мелкие петарды, начиненные светозумовым составом, называются «cherry bomb». Крупные изделия промышленного производства, принципиально схожие с петардами и предназначенные для имитации разрыва боеприпасов, называют взрывпакетами.
- *Трещотка (celebration cracker)* – связка мелких петард, соединенных стопином. При воспламенении последовательно взрываются с эффектом, напоминающим автоматную стрельбу.
- *Торпеды (torpedoes)* – класс изделий, подобных петардам, инициируемых не огнем способом, а от удара. Были популярны в начале 20 века, хотя в некоторых странах их производят до сих пор. Бывают довольно крупного размера. Во многих странах торпеды запрещены к производству и использованию.
- *Штухи (crackers)* – представляют собой длинную тонкую гильзу, неплотную наполненную порохом. Гильзу перегибают зигзагообразно, собирая в гармошку, и туго перетягивают по центру веревкой. При воспламенении стопина

сначала вспыхивает с треском первое отделение, затем второе и т.д. При этом шутиха подскакивает вверх. В настоящее время встречается не часто, уступая место трещоткам, которые более технологичны при автоматизированном изготовлении.

### **Пиротехнические фигуры для использования на воде:**

- *Дукер (водяной фонтан)* – принципиально устроен подобно фонтану, снабжен полым кольцевым поплавком в районе сопла, а к днищу прикреплен груз. Плавает на поверхности воды и выбрасывает вверх блестящие искры напоподобие фонтана, иногда погружаясь целиком в воду. По окончании горения разрывается с громким треском. Запрессовка динамического состава чередуется с запрессовкой дымного пороха. В современных фейерверках встречается редко.
- *Квекарь* – прочная бумажная гильза, набитая быстрогорящим составом. Концы гильзы заглушены, но у конца гильзы, в ее боку просверлено отверстие. При воспламенении вращается на поверхности воды, временами погружаясь. Использовалось как самостоятельно, так и в плавающих бумажных фигурах. В современных фейерверках встречается редко.
- *Водяная мортира* – изделие в виде наклоненной крупнокалиберной мортиры, расположенной на берегу водоема или на катере, которое выстреливает несколькими шарообразными пластиковыми люсткутелями (*water shell*) со звездками. Эти люсткутели разрываются последовательно на поверхности воды, создавая светящиеся полусферы из мелких горящих звездок.

### **Фейерверочные изделия, предназначенные для использования в помещениях:**

- *Декоративные комнатные фонтаны* – небольшие фонтаны, снаряженные специальным составом, который не выделяет при сгорании дым и вредные вещества.
- *Конусные фонтаны (cones)* – фонтаны с корпусом в форме конуса. Просты в изготовлении и набивке, при горении диаметр выходного отверстия увеличивается за счет выгорания, что компенсируется увеличением площади горения.
- *Искристые свечи (sparklers, по отечественной терминологии – бенгальские огни)* – изделия в виде проволоки, на которую нанесен искрообразующий состав. При сгорании равномерно разбрасывают искры в разные стороны.
- *Хлопушки* – комнатные изделия, снабженные небольшим зарядом из чувствительного к трению состава. При выдергивании шнура выбрасывают конфетти с громким шумовым эффектом. В последнее время все большее распространение получают пневматические хлопушки (с зарядом сжатого воздуха).
- *Пистоны (toy caps)* – отрезки картона или плотной бумаги, на которые наносятся капли чувствительного к удару состава. Служат для создания звуковых эффектов в игрушках, а также применяются в некоторых стартовых пистолетах. Выпускаются в виде лент, роликов, колец, пробок.

• *Фараоновы змеи* – небольшие изделия, наполненные специальным составом, который при сгорании формирует пористый спекшийся шлак, значительно превышающий первоначальный объем. Шлак выходит из изделия наподобие извивающейся змеи.

• *Шарики-хлопушки (cracker balls, japanese torpedoes)* – небольшие изделия в виде свернутого бумажного шарика, наполненного чувствительным к удару составом. Взрываются с громким треском при бросании о твердую поверхность.

**Простейшие фейерверочные изделия, используемые как составная часть более сложных изделий:**

• *Швермеры (serpents)* – небольшие фигуры, принципиально устроенные так же, как и ракеты без стабилизаторов, с разрывным зарядом в головной части. В воздухе описывают зигзагообразную траекторию, оставляя искристый шлейф, а затем разрываются. Используют для снаряжения бураков, ракет, фугасов и т.д.

• *Пчелки (hummers)* – небольшие фигуры, принципиально устроенные так же, как и ракеты с соплом, расположенным не по оси, а сбоку у конца гильзы. При воспламенении изделие вертится в воздухе и издает звук, похожий на звук пролетающей пчелы. В головной части пчелки размещен заряд пороха, который по окончании горения производит звук, похожий на выстрел. Используют для снаряжения бураков, ракет, фугасов и т.д.

• *Китайское колесо (saxon)* – длинная бумажная гильза с двумя глухими концами, рядом с которыми проделано по отверстию. В центре гильзы имеется глиняная забивка, через которую пропущен металлический стержень перпендикулярно оси гильзы. Стержень вбивается на неподвижную рейку или фигурную конструкцию. При воспламенении гильза начинает крутиться на стержне, разбрасывая искры в разные стороны. Применяется для составления динамических фигур.

• *Шлаг* – прочная гильза, наполненная небольшим кол-вом дымного пороха, светозвукового состава типа флэша. При воспламенении шлаг разрывается со звуком выстрела подобно петарде. Используют для снаряжения бураков, ракет, фугасов и т.д.

• *Форс (gerb)* – бумажная гильза с одним глухим концом, набитая быстрогорящим искристым составом. Служат для создания направленных струй огня или форсов искр, а также для приведения в движение сложных динамических фигур. В этом случае форсы называют движителями (*drivers*). Форсы, которые предназначены для начинения люсткугелей, называют «*flying squibs*». В настоящее время «*flying squibs*» запрещены в некоторых странах из-за непредсказуемости траектории полета.

• *Стопин (quickmatch)* – служебное изделие в виде хлопчатобумажной скрученной нити, пропитанной насыщенным раствором калиевой селитры и обмазанной пороховым тестом. Служит для воспламенения пиротехнических фигур.

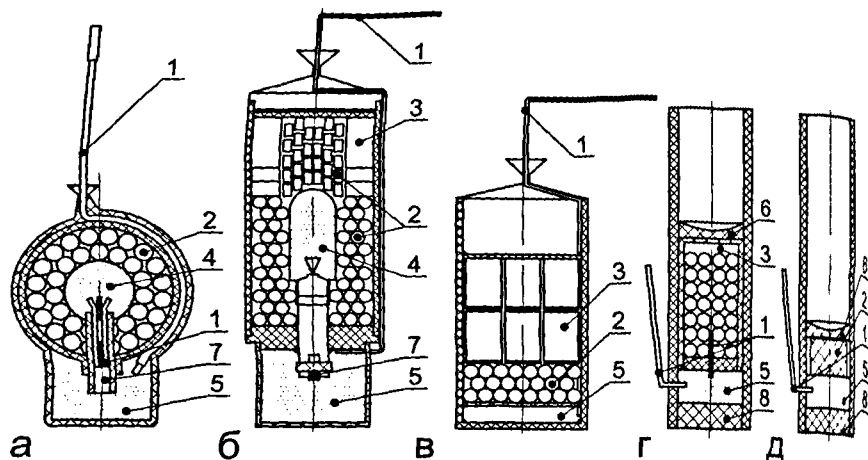
Обрезки стопина часто используют для пересыпания звездок, швермеров, пичелок и т.д. для обеспечения их воспламенения в сложных изделиях. Стопин, помещенный с зазором в бумажную трубку, называют стопиновым приводом. Он предназначен для быстрой передачи луча огня к фейерверочным изделиям. Скорость горения стопинового привода может достигать нескольких метров в секунду.

- *Фитиль* – служебное изделие в виде льняного или хлопчатобумажного шнура толщиной более 5 мм, пропитанного ацетатом свинца либо дихроматом калия. Служит для воспламенения стопиновых приводов и фейерверочных фигур. 1 метр фитиля горит (тлеет) до 3 часов.
- *Шнурфейер* – служебное изделие для дистанционного воспламенения фейерверочных композиций. Конструктивно напоминает ракету, двигающуюся по тонкой, не видимой для наблюдателя проволоке. Спереди ракета содержит воспламенительную головку, которая зажигает первичный стопин, установленный на фейерверочной композиции. Такой способ воспламенения весьма зрелищный, но в современных фейерверках вытеснен более надежным электровоспламенением.
- *Фейерверочные звездки* – небольшие заряды связанного пиротехнического состава. Для большинства сигнальных и осветительных изделий звездки изготавливают в виде прессованных таблеток и цилиндров. Фейерверочные же звездки гораздо более разнообразны. По технологии изготовления различают:
  - *Кубические звездки (cut stars)* – звездки, изготавливаемые путем раскатывания тестообразной пиротехнической массы на плоском шероховатом листе, после чего масса нарезается тонким острым ножом на кубические сегменты, которые слегка провяливаются, после чего кубики отделяются от листа и окончательно досушиваются. Этот способ изготовления очень популярен в полукустарных пиротехнических мастерских, т.к. не требует специального оборудования и позволяет за один раз изготавливать большое количество изделий, а благодаря острым углам такие звездки легче воспламеняются.
  - *Прессовые звездки (pumped stars)* – звездки, изготавливаемые простым прессованием при помощи матрицы и плунжера. Имеют цилиндрическую форму при примерно одинаковом диаметре и высоте. Крупные прессовые звездки, изготавливаемые из искристого состава, не содержащего металла, называют кометами (comets). Если же в составе содержится металл, – то метеорами (meteors). Метеоры оставляют более выразительный искристый след.
  - *Распадающиеся кометы (crossettes)* – крупные прессовые звездки по типу комет, однако плунжер имеет особую конструкцию: в центре плунжера присутствует цилиндрический пенек, который при запрессовке образует полость по оси кометы. В эту полость вкладывается небольшой заряд раз-

рывного состава, после чего звездку обертывают крафт-бумагой. Такие кометы в полете распадаются на более мелкие сегменты, и их траектория ветвится.

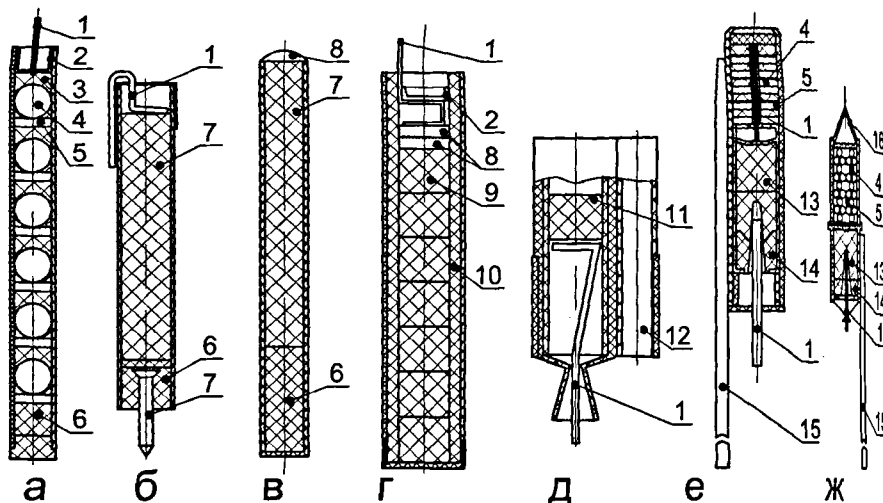
- *Круглые звездки (round stars)* – звездки в форме шариков, получаемых накаткой. В емкость, наполненную сухим составом, засыпают затравки для звездок в виде песчинок или семян размером до 1 мм. Их помещают в полированный барабан и засыпают порошок пиротехнической смеси, периодически сбрызгивая водой. В результате получают шарики пиротехнического состава. Этот метод особенно популярен в пиротехнической промышленности Японии и Китая.
- *Сложные круглые звездки* – звездки, изготавливаемые по вышеописанному методу, но состоящие из различных составов, накатанных слоями. Таким образом можно легко получать эффекты изменения цвета. В качестве затравок часто используют «потрескивающие микрозвездки», описанные в разделе мерцающих составов.
- *Корпусные звездки (box stars)* – при их изготовлении пиротехнической массой заполняется бумажный цилиндрический корпус с открытыми торцами и пропущенным сквозь него стопином. Такая конструкция иногда применяется для звездок, изменяющих при горении цвет. Впрочем, в настоящее время они выходят из употребления.
- *Экструзируемые звездки* – звездки, получаемые на проходном прессе из пластичной пороховой массы. Этим способом обычно изготавливают звездки на бездымной пироксилиновой или коллоксилиновой основах.

В связи с тем, что фейерверочные изделия имеют приблизительно постоянный спрос, колеблющийся от праздника к празднику, к ним предъявляются не такие жесткие требования по срокам хранения по сравнению с составами военного назначения. Например, в качестве связующих фейерверочных составов может быть использован более широкий ассортимент как синтетических, так и природных компонентов. Самые дешевые смеси зачастую содержат связующие типа декстрина или гуаровой камеди, замешиваемые на воде. В условиях жесткой конкуренции производители гражданских пиротехнических изделий вынуждены руководствоваться в первую очередь показателем себестоимости своей продукции, что зачастую негативно отражается на качестве изделий. С другой стороны, возможна и обратная ситуация, когда в гражданских изделиях начинают использовать типично военные композиции и более дорогие компоненты с целью создания скрытого ресурса сырья для военной пиротехники на случай войны. Это было характерно во времена «холодной войны».



**Рис. 19.1. Схемы типичных фейерверочных изделий.**

а) – люсткаugel, б) – цилиндрический люсткаugel, в) и г) – бурак, д) – простой бурак.  
 1 – огнепроводный шнур, или стопин, 2 – звездки, 3 – простые фейерверочные изделия (шеры, петарды и т.д.), 4 – разрывной заряд, 5 – метательный заряд дымного пороха, 6 – пыж, 7 – замедлительная звездка, 8 – глиняная забивка.



**Рис. 19.2. Схемы типичных фейерверочных изделий (продолжение).**

а) – римская свеча, б) – факел, в) – декоративная пиротехническая свеча, г) – фонтан или гейзер, д) – бегун (изделие, подобное шнурфейеру, однако лишенное воспламенительной головки). Двигается со свистом по натянутой проволоке), е) – крупная ракета, ж) – малая ракета.

1 – огнепроводный шнур, или стопин, 2 – пыж, 3 – замедлительный состав, 4 – звездка, 5 – метательный (вышибной) состав, 6 – глиняная забойка, 7 – штырь, 8 – воспламенительный состав, 9 – искристо-форсовый состав, 10 – глиняная теплоизоляция, 11 – реактивный или свистящий состав, 12 – направляющая трубка, 13 – дымный порошок (ракетный), 14 – сопло, 15 – стабилизатор, 16 – баллистический обтекатель.

## 19.1. Цветопламенные составы непрерывного излучения

В качестве введения в теорию создания цветного пламени автор рекомендует прежде ознакомиться с главой о сигнальных составах огневых (глава 17).

Цветопламенные фейерверочные составы непрерывного излучения отличаются от сигнальных большим цветовым ассортиментом, характером компонентов и менее жесткими требованиями к этим смесям. В основном используются цвета: красный, оранжевый, желтый, зеленый, голубой, синий и фиолетовый, но возможны и различные оттенки. Если в сигнальных составах наличие оттенков цветов является нежелательным, т.к. мешает надежной идентификации сигнала на расстоянии, то в фейерверочных цветопламенных составах это скорее приветствуется, т.к. придает индивидуальность пиротехническим эффектам. Нужные оттенки достигаются за счет принципа смешения цветов (см. главу 17). Основные излучатели те же самые, что и в сигнальных составах, т.е. монохлориды стронция, бария, меди и атомы натрия. Для придания пламени оранжевого и розового цветов также применяются нерастворимые в воде соли кальция, например карбонат. При этом оранжевый цвет проявляется, если в пламени присутствуют галогениды кальция, розовый цвет характерен для составов без галогенов (излучатель –  $\text{CaO}$ ).

В комнатных свечах пониженной дымности на основе пироксилина зачастую находит применение малорастворимый в воде карбонат лития. Стоит напомнить, что для атомарного излучения, коим является свечение лития, противопоказано наличие в смесях соединений хлора и других галогенов, т.к. это приводит к резкому падению насыщенности цветом.

Эффекты парковых фейерверочных изделий (мортиры малых калибров, римские свечи, бураки и т.д.) наблюдают со сравнительно небольших расстояний, поэтому для них более важна не удельная светосумма (яркость), а насыщенность цветом (красочность). Для этого вполне достаточно эффекта сгорания дешевых в производстве смесей на основе хлората калия, подобных тем, что применялись в конце 19 – начале 20 века для сигнальных целей. Такие составы довольно чувствительны к механическим воздействиям, поэтому композиции на перхлоратах выглядят предпочтительнее. В целом, перхлорат калия и хлорат калия взаимозаменяемы в пиротехнических эффектах, однако при этом следует учитывать некоторые особенности этих окислителей, указанные ниже.

В 1920-30 гг. 20 века предлагались составы с добавками пикрата аммония или пикриновой кислоты. Эти вещества позволяли уменьшить дымность и улучшить глубину цвета, что ценится в фейерверках, предназначенных для использования в помещениях. Однако смеси с пикратами были слишком опасными в обращении и вскоре вышли из употребления [3].

Во второй половине 20 века некоторое распространение в качестве окислителя цветопламенных составов получил перхлорат аммония, однако его использование можно считать неоправданным по критерию красочность/стоимость. Исключением являются составы синего огня, в которых введение перхлората аммония позволяет достичь показателей чистоты цвета, недостижимых при использовании других окислителей.

**Табл. 19.1. Особенности различных окислителей, применительно к цветопламенным фейерверочным составам**

Характеристика	Калия хлорат	Калия перхлорат	Аммония перхлорат	Нитраты (K, Sr, Ba)
стоимость, USD/тонна (пр-ва Китай)	800-1200	1200-1500	2500-4500	500-1000
воспламеняемость	хорошая	хорошая	хорошая	уд./неуд.
чувствительность к механ. возд.	высокая	средняя	средняя	низкая
совместимость с активными горючими	неуд.	уд.	уд., кроме Mg	уд.
термическая стабильность	уд./неуд.	хорошая	уд./хорошая	хорошая
насыщенность пламени цветом	хорошая*	уд.*	очень хор.*	хорошая**
скорость горения составов	высокая	средняя	средняя	средняя***

\* – в присутствии цветопламенных добавок;

\*\* – в присутствии доноров хлора;

\*\*\* – без металлических горючих типа магния составы обычно горят неустойчиво.

В связи с меньшей опасностью в обращении и значительным понижением себестоимости, в последние годы наблюдается тенденция постепенной замены хлората калия перхлоратом даже в фейерверочных составах китайского производства.

В смесях, не содержащих металла, стоит избегать использования горючих и связующих, дающих при сгорании большое количество сажи, т.к. это в значительной мере портит окраску пламени [4]. Как правило, бесцветным пламенем сгорают вещества, содержащие повышенное количество водорода, кислорода или азота и пониженное – углерода. Наиболее удобными и доступными горючими, не дающими сажи при сгорании, являются уротропин, тиомочевина, мочевина, параформальдегид, лактоза, крахмал и т.д.

В композиции для высотных салютов, которые наблюдаются на значительных расстояниях, вводят повышающие яркость добавки типа магния и порошка алюминиймагниевого сплава. Эти смеси очень близки по используемым компонентам к сигнальным составам, поэтому в целях унификации производства некоторые типичные сигнальные композиции использовались одновременно и в фейерверочных средствах [5].

Стоит отметить, что в связи с особенностями восприятия глазом человека красного и зеленых цветов, в наземных фейерверках, особенно при сжигании лансов, следует избегать следования зеленого цвета пламени за красным или белым, т.к. в первом случае цвет будет восприниматься неправильно, а во втором – недостаточно контрастно. В высотных фейерверках эта проблема почти отсутствует.

Для достижения максимально зрелищного эффекта рекомендуется следующий порядок смены цвета в высотных фейерверках: красный после зеленого, красный после синего, золотистый после зеленого, серебристый после синего, золотистый-красный-зеленый, красный-серебристый-синий, красный-зеленый-золотистый [3, 6].

**В зарубежной литературе по гражданской пиротехнике в основном различают следующие типы составов непрерывного излучения [3, 6, 7]:**

- Композиции для использования в разрывных изделиях типа салютов в виде звездок (*star compositions*). К ним предъявляются повышенные требования по устойчивости горения на ветру и в условиях перегрузок. Различают обычные звездки и бриллиантовые (*brilliant stars*). Последние содержат в своем составе металл типа магния, алюминия или их сплавов. Бриллиантовые звездки сгорают слепящим ярким пламенем, напоминающим электрическую дугу, поэтому в старой литературе их иногда называют «электрическими» (*electric stars*).
- Композиции для изготовления фигурных свечей (лансов или контурных свечей) – смеси, которыми набивают бумажные гильзы, размещаемые таким образом, чтобы при одновременном воспламенении формировались цветные фигуры, картины, надписи и т.д. Одни из немногих видов пиротехнических составов, которые могут вовсе не содержать связующего.
- Композиции для бенгальских огней (*bengal illumination*) – медленногорящие малодымные композиции, устанавливаемые стационарно и сгорающие в специальных факелах для декоративного освещения зданий, местности и помещений. Самые древние из цветопламенных составов использовались в Бенгалии для религиозных церемоний, откуда и получили свое название. В настоящее время используются редко. Стоит отметить, что в отечественной пиротехнике под «бенгальскими огнями» традиционно подразумеваются искристые составы, наносящиеся на проволоку (см. далее).
- Составы для парадных огней – смеси, подобные предыдущим, используются для снаряжения декоративных фальшфейеров (*parade torches*).
- Составы белого огня для снаряжения специальных факелов, называемых палительными свечами (*portfires*), которые используются для огневого иницирования фейерверочных изделий.

**Табл. 19.2. Простые фейерверочные составы красного огня, не содержащие металлических горючих**

Состав	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
KClO <sub>3</sub>	-	13	20	-	-	-	-	-	64	-	60,7	84	-	10	-	63	-	-	60	-
KClO <sub>4</sub>	66	-	-	75	70	70	24	66	-	68	-	-	-	-	62	-	63	16	-	67
Sr(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	-	66	65	-	-	-	94	-	-	-	-	64	484	70	-	-	-	63,5	-	-
KNO <sub>3</sub>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	34	124	-	-	-	-	-	-	-
SrC <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	22	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SrCO <sub>3</sub>	20	-	-	12	18	15	-	12	14	11	-	-	-	-	21	21	16	-	17	13,5
сера	-	-	-	-	-	-	24	-	-	-	-	-	54	20	-	-	-	-	-	-
сахар (лактоза)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	7	-	-	-	-	-	-	9,5	-	-
др. уголь (сажа)	-	4	-	-	-	2	-	2	14	-	0,3	14	44	-	-	-	5	1,5	10	-
акароидная смола	14	-	-	13	12	9	14	13	-	11	-	-	-	-	14	8	11	9,5	6	-
связующее*	-	17	15	-	-	4	-	5	24	-	7	24	-	-	-	5	5	-	4	6
прочее**	-	-	-	-	-	-	-	2	-	10	3	-	-	-	3	3	-	-	3	13,5

1. Состав для звездок [8].
2. Состав для звездок: \* – шеллак [8].
3. Состав для бенгальских огней: \* – шеллак. Скорость горения 0,56 мм/сек [8].
- 4 - 5. Составы для лансов [6, 8].
6. Состав для звездок: \* – декстрин [8].
7. Состав для праздничных фальшфейеров [9].
8. Состав для звездок: \* – рисовый декстрин; \*\* – ПВХ [10].
9. Состав для лансов: \* – шеллак [11].
10. Состав для звездок: \*\* – древесная мука [6].
11. Чешский состав для звездок: \* – шеллак; \*\* – каломель [20].
12. Чешский состав для бенгальских огней: \* – монтавоск [12].
- 13 - 14. Чешские составы для бенгальских огней [12, 20].
15. Состав для лансов: \*\* – асфальт [7].
16. Состав для звездок: \* – декстрин; \*\* – шеллак [7].
17. Состав для звездок: \* – декстрин [7].
18. Состав для бенгальских огней. Скорость горения 0,85 мм/сек [8].
19. Состав для японских сферических звездок: \* – декстрин; \*\* – канифоль [7].
20. Состав для звездок: \* – декстрин; \*\* – сосновая смола [6].

**Табл. 19.3. Составы красного огня с применением ПХА и/или металлических горючих**

Состав	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
KClO <sub>4</sub>	25	-	42	54	-	35	30	25	74	30-60	32,7	-	-	-	-	42	42
NH <sub>4</sub> ClO <sub>4</sub>	-	70	-	-	-	30	-	-	-	-	28,0	30-40	-	35-42	41	-	-
Sr(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	20	-	-	-	60	-	20	45	44	-	-	35-40	50-60	35-42	-	-	-
SrCO <sub>3</sub>	-	10	20	10	-	17	-	-	-	10-25	16,9	-	-	-	9,5	20	18
ГХБ или ГХЦГ	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	8-12	-	-	-	-
уротропин	-	-	-	-	-	4	-	-	-	-	2,8	15-20	-	-	-	-	-
тиомочевина	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5	-	-	-	-	-
ПВХ или ХПВХ	-	-	5	-	10	-	18	6	-	-	-	-	-	-	-	5	10
парлон	15	-	-	13	-	-	-	-	-	6-14	-	-	-	-	-	-	-
магний	-	-	-	-	-	-	30	9	44	-	-	-	-	-	33,3	-	-
ПАМ	20	-	15	14	20	-	-	-	-	15-30	-	-	8-12	-	-	20	15
алюминий	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	17-23	-	-	-	-
акароидная смола	5	-	-	4	10	10	-	-	-	-	14	-	-	-	9,5	-	-
связующее*	-	-	3	5	-	4	-	14	14	10-12	3,7	5-10	4-6	15-18	4,8	8	15
прочее**	15	20	15	-	-	-	2	1	-	-	1,9	0-0,5	0-5	См.	1,9	5	-

1. Состав для звездок: \*\* – сульфат стронция [7].
2. Состав для лансов: \*\* – древесная мука [6].
3. Германский патент: \*\* – бензоат стронция [27].
4. Состав для звездок: \* – рисовый крахмал [6].
5. Классический современный состав для высотных звездок [28].
6. Состав для лансов: \* – декстрин [7].
7. Состав для высотных звездок: \*\* – древесный уголь [10].
8. Состав для праздничных фальшфейеров: \* – шеллак; \*\* – олифа [6].
9. Состав для высотных звездок: \* – шеллак [11].
10. Характерные составы китайских звездок: \* – акароидная смола/рисовый декстрин (примерно 1–2/1). Вместо парлона может быть использован хлоркаучук [6].

11. Состав для звездок: \* – декстрин (при изготовлении смеси увлажняется 25% спиртом); \*\* – древесный уголь [13].
12. Отечественный состав для звездок К-67Ф: \* – идиол; \*\* – ферроцен сверх 100%. Удельная светосумма 250-412 кд·с/г, скорость горения 0,7-1,1 мм/сек, чистота цвета 97% [5].
13. Отечественный состав КФ-68 для высотных звездок: \* – идиол; \*\* – милори сверх 100%. Удельная светосумма 27600 кд·с/г, скорость горения 2,48 мм/сек, чистота цвета 66% [5].
14. Отечественный пламенный состав: \* – поливиниловый спирт; \*\* – 5-8% глицерина, 0,1-1,0% формалина [5].
15. Состав для специальных высотных звездок: \* – рисовый декстрин; \*\* – бихромат калия [10].
16. Современный китайский состав. Эффект «Red Dahlia»: \* – смола resinox; \*\* – шеллак [21].
17. Современный китайский состав: \* – шеллак [21].

**Табл. 19.4. Простые фейерверочные составы зеленого огня, не содержащие металлических горючих**

Состав	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
KClO <sub>3</sub>	26	14	16	-	30	-	-	28	23ч	-	2ч	-	-	-	-	9,5	45	28
KClO <sub>4</sub>	-	-	-	30	-	49	25	-	-	4ч	-	-	46	47,2	15	-	-	-
Ba(ClO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> ·H <sub>2</sub> O	-	-	-	60	55	-	36	53	-	5ч	-	90	-	-	-	-	-	50
Ba(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	54	72	70	-	-	31	25	-	46ч	-	4ч	-	32	28,3	68,5	60	30	-
древ. уголь	-	-	-	-	5	-	-	5	-	-	-	-	-	-	-	-	6	4
ПВХ	-	-	-	-	-	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
антимоний	-	-	-	-	-	-	-	-	9ч	-	-	-	-	-	-	-	-	-
сера	-	-	-	-	-	-	-	-	32ч	-	-	-	-	-	-	15	-	-
парлон	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4,7	-	-	-	8
акароидная смола	20	-	13	-	10	15	14	10	-	-	-	-	-	14,2	15	-	10	6
связующее*	-	14	-	10	4	-	-	4	-	1,7ч	1,5ч	10	16	5,6	-	9,5	4	4
прочее**	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	2,5	6	-	1,5	6	5	-

1. Состав для звездок [8].
2. Состав для звездок: \* – шеллак [8].
3. Состав для бенгальских огней: \*\* – парафиновое масло. Скорость горения 0,64 мм/сек [8].
4. Состав для лансов: \* – копаловая смола (связующее, известное своей способностью подчеркивать зеленую окраску пламени) [8].
5. Состав для звездок: \* – декстрин сверх 100% [8].
6. Состав для звездок [6].
7. Состав для лансов [6].
8. Звездки к римской свече: \* – декстрин [14].
9. Чешский состав для звездок [20].
10. Чешский состав для бенгальских огней: \* – монтанвоск [12].
11. Чешский состав для бенгальских огней: \* – шеллак [12].
12. Состав для звездок: \* – шеллак; \*\* – декстрин сверх 100% [11].
13. Состав для звездок: \* – канифоль; \*\* – рисовый декстрин [13].
14. Состав для звездок: \* – рисовый декстрин; [10].
15. Состав для бенгальских огней: \*\* – сурьма. Скорость горения 1,27 мм/сек [8].
16. Чешский состав для бенгальских огней: \* – шеллак; \*\* – каломель [20].
17. Состав для японских сферических звездок: \* – декстрин [7].
18. Состав для прессовых звездок: \* – декстрин; \*\* – 2% стеарина, 6% шеллака [7].

**Табл. 19.5. Составы зеленого огня с применением ПХА и/или металлов**

Состав	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
КСЮ	-	-	-	-	-	-	16	-	6	39	10	10	-	18	30	15	15	25
NH <sub>4</sub> ClO <sub>4</sub>	41	50	50	45-55	-	184	-	-	-	-	-	37	-	-	-	-	-	-
Ba(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	-	35	34	20-25	63-69	-	42	-	56	23	50	37	56	45	-	35	50	35
магний	33,3	-	-	-	-	-	25	20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ГХБ или ГХЦГ	-	-	-	-	7-11	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
уротропин	-	-	-	15-20	-	-	-	-	5	-	-	8	-	-	-	-	-	-
тиомочевина	-	-	-	0-5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
алюминий	-	-	-	-	8-12	44	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ПАМ	-	-	-	-	8-12	-	-	-	10	15	13	-	17	11	10	20	20	15
ПВХ	-	-	-	-	-	-	15	-	18	5	-	-	15	-	-	8	-	10
парлон	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	15	-	-	12	20	-	-	-
акароидная смола	9,5	15	-	-	-	-	-	-	-	-	7	8	7	6	5	-	-	-
связующее*	4,8	-	8	5-10	4-6	3,34	-	20	5	3	5	-	5	5	-	7	5	15
прочее**	11,4	-	8	0-0,5	0-5	54	2	60	-	15	-	-	-	3	35	15	10	-

1. Состав для спец. высотных звездок: \* – декстрин; \*\* – 1,9% K<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub> и 9,5% BaCO<sub>3</sub> [10].
2. Состав для звездок [6].
3. Состав для фальшфейеров и лансов: \* – шеллак; \*\* – древесная мука [6].
4. Отечественный состав для звездок 3-67Ф: \* – идитол; \*\* – ферроцен сверх 100%. Удельная светосумма 100-117 кд·с/г, скорость горения 0,8-1,15 мм/сек, чистота цвета 87% [5].
5. Отечественный состав 3Ф-68 для высотных звездок: \* – идитол, \*\* – милори сверх 100%. Удельная светосумма 20000 кд·с/г, скорость горения 2,01 мм/сек, чистота цвета 63% [5].
6. Английский состав: \* – эпоксидная смола «Araldite D» + отвердитель; \*\* – оксалат бария [29].
7. Состав для высотных звездок: \*\* – древесный уголь [10].
8. Состав для высотных звездок: \* – шеллак; \*\* – Ba(ClO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>·H<sub>2</sub>O. Опасен в обращении [11].
9. Классический современный состав для высотных звездок: \* – акароидная смола [28].
10. Германский состав: \*\* – бензоат бария [27].
11. Состав для звездок: \* – рисовый крахмал [6].
12. Состав для лансов [7].
13. Состав для звездок: \* – декстрин [7].
14. Состав для звездок: \* – декстрин; \*\* – древесный уголь [7].
15. Состав для звездок с сульфатом бария: \*\* – сульфат бария [15].
16. Китайский состав. Эффект «Зеленая чешуя»: \* – резинокс; \*\* – 5% др. угля, 10% серы [21].
17. Китайский состав: \* – резинокс; \*\* – 5% шеллака, 5% серы [21].
18. Китайский состав: \* – шеллак [21].

**Табл. 19.6. Простые фейерверочные составы синего огня (6-9 – в частях)**

Состав	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
KClO <sub>3</sub>	-	68	65	28	47	8	36	18	32	-	-	-	-	58	56	63	-	64	62	-
KClO <sub>4</sub>	64	-	-	-	-	-	-	-	-	68,5	68	60,8	66,5	-	-	-	70	-	-	64
парлон	-	-	13	-	-	-	-	-	-	-	-	13,1	5,4	-	-	-	-	-	-	-
ПВХ	-	-	-	-	-	1	1	1	9	11	-	-	-	-	-	-	18	-	-	-
каломель	-	-	-	-	5	7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
сера	-	-	-	15	28	-	-	-	-	-	-	-	-	20	17	-	-	-	-	-
парижская зелень	32	22	-	-	-	8	6	10	-	-	-	-	-	-	29	-	-	-	-	17
Cu[NH <sub>4</sub> ] <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	-	-	-	15	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
малахит	-	-	-	-	18	2	-	-	-	-	15	12,3	-	20	-	-	-	-	-	-
окись меди	-	-	7	-	-	-	-	-	15	-	-	13,4	-	-	-	12	-	13	-	-
акароидная смола	-	6	10	-	-	-	-	-	7,5	6	9	9,9	-	-	-	-	-	9	-	-
связующее*	4	4	5	-	2	-	2	1	4	5	5	4,8	4,8	2	2	4	-	10	5	6
прочее**	-	-	-	42	-	3	4	2	-	-	-	-	-	-	25	4	-	26	11	13

1. Состав для лансов: \* – копаловая смола [8].
2. Состав для звездок: \* – декстрин [8].
3. Состав японских сферических звездок: \* – декстрин [7].
4. Чешский состав для бенгальских огней: \*\* – 27%  $KNO_3$ , 15%  $K_2SO_4$  [20].
5. Чешский состав для звездок: \* – шеллак [20].
6. Чешский состав для бенгальских огней: \*\* – лактоза [12].
7. Состав для звездок: \* – декстрин; \*\* – стеарин [11].
8. Состав для звездок: \* – декстрин; \*\* – лактоза [11].
9. Состав для лансов: \* – стеарин [11].
- 10 - 11. Составы синего пламени: \* – рисовый декстрин сверх 100% [13].
- 12 - 13. Составы для звездок: \* – рисовый декстрин [10].
14. Состав синего пламени: \* – декстрин [1].
15. Состав синего пламени: \* – декстрин; \*\* – 4%  $PbCl_2$ , 21% основного сульфата меди [1].
16. Состав для лансов: \* – стеарин; \*\* – ГХБ [7].
17. Состав для лансов [7].
18. Состав для звездок: \* – 5% vinsol (частично окисленная канифоль), 5% декстрина; \*\* – 19% хлорокси меди (ХОМ), 2% стеарина, 5% хлорпарафина [7].
19. Состав для звездок: \* – декстрин; \*\* – парлон [7].
20. Состав для звездок: \* – рисовый декстрин; \*\* – сосновая смола [6].

**Табл. 19.7. Составы синего огня на основе ПХА и типичные современные**

Состав	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
$KClO_4$	26	40	-	-	-	-	-	39	-	59	61	61	46	62	60	55	47	-
$NH_4ClO_4$	46	30	70	64-72	55-61	74,5-84,5	69-74	29	70	-	-	-	-	-	-	-	-	68
ГХБ	-	-	-	-	11-13	-	-	-	-	8	-	-	-	-	-	-	-	-
парлон	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	13	18	-	10	15	-	-
уротропин	-	-	-	-	-	12,8-18,8	12-6	-	-	10	6	-	-	-	-	-	-	17
$CuO$	-	-	-	-	22-27	-	-	-	-	15	17	-	20	-	10	15	18	-
$CuCNS$	-	-	-	-	-	-	10-19	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
$CuSO_4$	-	-	-	-	-	-	-	-	10	-	-	-	-	-	-	-	-	-
малахит	10	15	10	-	-	-	-	14	-	-	-	12	-	-	-	-	-	-
ХОМ	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	12	-	-	-	11
$Cu_2S$	-	-	-	13-17	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ПАМ	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	6	-	-	6	2	-
сера	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	18	-	-	20	-
борная кислота	-	-	-	9-11	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
акароидная смола	15	15	10	-	-	-	-	14	-	-	3	9	5	-	-	9	-	-
связующее*	-	-	5	6-8	4-6	-	1-4	4	10	8	3	5	5	4	-	4	3	4
прочее**	3	-	10	0-0,5	2,5-3,5	2,6-6,7	-	-	10	-	10	-	-	4	20	-	13	-

1. Состав для звездок: \*\* – стеарин. Похожий состав без стеарина применяется в лансах [7, 8].
2. Состав для звездок и бенгальских огней [8].
3. Состав синего пламени с искристым шлейфом: \* – рисовый декстрин сверх 100%; \*\* – древесный уголь [13].
4. Отечественный состав С-67 для звездок: \* – идитол; \*\* – графит сверх 100%. Удельная светосумма 60 кд·с/г, скорость горения 0,67-1,06 мм/сек, чистота цвета 58% [5].
5. Отечественный состав голубого огня Г-67: \* – стеарин; \*\* – графит сверх 100% [5].
6. Отечественный состав голубого огня: \*\* –  $CuCl$ . Чистота цвета около 40% [5].
7. Отечественный состав синего огня: \* – лак НЦ [5].
8. Состав для крупных звездок: \* – декстрин [6].
9. Состав для лансов: \* – шеллак; \*\* – древесная мука [6].
10. Состав из сборника «Пиротехника» 1975 г.: \* – идитол [30].

11. Классический современный состав: \* – декстрин; \*\* – ПВХ [28].
- 12 - 13. Составы для звездок: \* – декстрин [7].
14. Состав для звездок: \* – декстрин; \*\* – дехлоран [7].
15. Состав для лансов: \*\* – лактоза [6].
16. \* – Декстрин св. 100% [22].
17. Китайский состав: \* – декстрин св. 100%; \*\* – хлорпарафин [73].
18. Состав «Bleser #20»: \* – декстрин [21]

**В литературе [7] также встречаются рецепты смешанных сине-зеленых оттенков:**

*Бирюзовый:* хлорат бария – 32%, хлорат калия – 32%, парижская зелень – 20%, шеллак – 8%, стеарин – 4%, декстрин – 4%.

*Аквамаринный:* хлорат бария – 36%, перхлорат калия – 30%, основной карбонат меди – 11%, акароидная смола – 13%, парлон – 6%, декстрин – 4%.

**Табл. 19.8. Составы желтого огня. Соотношения компонентов в составах 10-13 приведены в частях**

Состав	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
KClO <sub>3</sub>	-	-	-	-	-	-	-	-	40	-	-	16	-	-	-	-	-	-	60	-	-	-
KClO <sub>4</sub>	73	70	68	45	-	-	73	-	-	-	2	-	4	-	-	-	19	-	-	72	20	50
NaNO <sub>3</sub>	-	-	7	-	-	-	-	60	-	-	-	-	-	-	20	46	-	-	-	-	-	-
Ba(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	-	-	-	-	-	68	-	-	-	36	6	6	-	-	30	-	-	-	-	-	25	15
KNO <sub>3</sub>	-	-	-	-	-	-	-	-	20	-	-	-	-	-	-	-	45	-	-	-	-	-
NH <sub>4</sub> ClO <sub>4</sub>	-	-	-	-	41	-	-	-	-	-	-	-	-	55	-	-	-	75	-	-	-	-
Na <sub>2</sub> C <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	10	14	-	-	-	-	-	-	10	6	1	1	2	19,5	-	-	-	5	-	7	-	-
сера	-	-	-	-	-	5	-	30	30	3	0,5	-	-	-	-	-	6	-	-	-	-	-
криолит	-	-	-	-	-	10	14	-	-	-	-	-	-	-	20	-	-	-	16	-	15	11
магний	-	-	-	30	33,3	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	50	-	-	-	-	-	-
ПАМ	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	10	-	-	-	2	-	22	2
др. уголь	2	-	2	2	-	-	-	4	-	-	-	4	-	-	-	-	6	-	8	-	2	3
акароид. смола	-	6	18	-	9,5	5	10	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	9	-	-	-
связка*	15	4	5	10	4,8	-	-	-	-	5	-	1	1	10,5	10	3	7	5	5	6	9	11
прочее**	-	6	-	13	11,4	12	3	6	-	-	-	4	-	15	10	1	17	15	-	15	7	8

1. Состав для лансов: \* – шеллак [8].
2. Состав для звездок: \* – декстрин; \*\* – шеллак [8].
3. Состав для звездок: \* – рисовый декстрин [10].
4. Состав для высотных звездок: \* – ПВХ; \*\* – ультрамарин [10].
5. Состав для специальных высотных звездок: \* – рисовый декстрин; \*\* – 1,9% бихромата калия, 9,5% ультрамарина [10].
6. Состав для звездок: \*\* – 11% алюминия (dark pyro), 1% борной кислоты [6].
7. Состав для лансов: \*\* – лактоза [6].
8. Чешский состав для бенгальских огней: \*\* – сульфид сурьмы [20].
9. Чешский состав для звездок [20].
10. Чешский состав для бенгальских огней: \* – шеллак или идитол [12].
11. Состав для бенгальских огней [11].
12. Состав для звездок: \* – декстрин; \*\* – шеллак [11].
13. Состав для высотных звездок: \* – шеллак [11].
14. Отечественный состав Ж-67 для звездок: \* – идитол, \*\* – уротропин, а также графит 0-0,3% сверх 100%, ферроцен 0-0,5% сверх 100%. Удельная светосумма 193 кд·с/г. Скорость горения 0,71-0,84 мм/сек, чистота цвета 95% [5].

15. Отечественный состав Ж-68 для высотных звездок: \* – идиол; \*\* – 10% пудра алюминевая. Милори сверх 100%. Скорость горения 3,5 мм/сек [5].
16. Состав яркого желто-белого пламени по ОСТ 84-1712: \* – лак КС-50 + канифоль 1:1; \*\* – масло промышленное [31].
17. Американский состав: \* – 6% декстрина, 1% гуаргама; \*\* – 11% бензоата натрия, 6% дициандиамида [32].
18. Состав для лансов: \* – канифоль; \*\* – древесная мука [6].
19. Состав для японских сферических звездок: \* – декстрин [7].
20. Состав для звездок: \* – рисовый декстрин; \*\* – 12% сосновой смолы, 3% канифоли [6].
21. Состав для китайских звездок: \* – резинокс; \*\* – 7% шеллак [21].
22. Состав для китайских звездок: \* – резинокс; \*\* – антимоний [21].

**Табл. 19.9. Составы белого огня**

Состав	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
$Ba(NO_3)_2$	-	-	76	-	66	-	-	-	45	-	-	35	-	-	-	-	-	65	-	-	64,6
$KNO_3$	65	-	-	51	-	-	-	13	15	60	63	-	50	60	80	104	-	-	284	-	-
$NH_4ClO_4$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	70	-	-	40	-
$KClO_4$	-	52	-	-	-	56	74	64	-	-	-	50	-	-	-	-	-	-	-	30	-
антимоний	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	10	-	-	20	-	-	5	-	74	14	-
алюминий	-	44	18	-	27	32	-	-	35	-	-	-	-	-	-	-	-	20	54	-	18,7
сурьма	10	-	-	10	-	-	-	13	-	-	-	-	12	-	-	-	-	-	-	-	-
реальгар	-	-	-	-	-	-	18	-	-	-	-	-	-	-	10	34	-	-	-	-	-
сера	20	-	4	18	-	-	8	-	-	20	16	-	16	20	10	34	-	-	84	-	13,6
ПМ	5	-	-	15	-	-	-	-	-	20	11	-	-	-	-	-	-	-	34	-	-
связка*	-	4	2	3	6	10	-	10	5	-	-	15	-	-	-	0,54	5	10	14	-	3,1
прочее**	-	-	-	3	1	2	-	-	-	-	-	-	22	-	-	-	20	5	-	16	-

1. Состав для лансов [8].
2. Состав для праздничных фальшфейеров: \* – декстрин. Используется 2 сорта алюминия [8].
3. Состав для праздничных фальшфейеров: \* – петролатум. Используется сорт алюминия Dark pyro [8].
4. Состав для звездок: \* – декстрин; \*\* – древесный уголь [8].
5. Состав для быстрогорящих серебристых звездок: \* – рисовый декстрин; \*\* –  $H_3BO_3$  [10].
6. Состав для серебристых звездок: \* – 5% рисового декстрина, 5% канифоли; \*\* – др. уголь [10].
7. Состав для звездок [6].
8. Состав для звездок: \* – копаловая смола [6].
9. Состав для серебристых звездок: \* – акароидная смола. Используется 2 сорта алюминия: 15% Dark pyro и 20% чешуйчатого [6].
- 10–11. Составы для подсветки фейерверков – Portfires [6].
12. Состав для подсветки фейерверков – Portfires: \* – 4% акароидной смолы, 11% копаловой смолы [6].
13. Чешский состав для бенгальских огней: \*\* – свинцовый сурик [20].
14. Чешский состав для звездок [20].
15. Чешский состав для бенгальских огней [12].
16. Состав для звездок: \* – декстрин [12].
17. Отеч. состав для звездок Б-67: \* – идиол; \*\* – уротропин. Скорость горения 0,76 мм/сек [5].
18. Отечественный состав БФ-68 для высотных звездок: \* – идиол; \*\* – ПАМ + милори сверх 100%.  
Уд. светосумма 9750 кд·с/г (по др. данным, 2240 кд·с/г), скорость горения 2,88 мм/сек. [5].
19. «Electric star»: \* – декстрин [3].
20. Состав для лансов: \*\* – 11% крахмала, 5% древесной муки [6].
21. Современная итальянская звездка белого огня. Эффект «Bianco Luce»: \* – аравийская камедь (замешивается с водой: 1 ч. камеди на 2 ч. воды) [76].

**Табл. 19.10. Составы фиолетового и лилового огня. Соотношения компонентов в составах 4-6 приведены в частях**

Состав	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
KClO <sub>3</sub>	51	54	60	24	18	-	-	47	56	-	-	-	-	-	-	23	-	57	-	-
KClO <sub>4</sub>	-	-	-	-	-	9	70	-	-	61,3	64,0	-	-	-	-	62	30	46	-	35
NH <sub>4</sub> ClO <sub>4</sub>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	54-63	51-59	54-63	-	-	-	-	-	68
Sr(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	-	-	-	4	3	7	-	19	-	-	-	13-17	-	13-17	-	10	-	-	-	-
SrCO <sub>3</sub>	-	-	-	-	-	-	9	-	15	7,4	7,8	-	-	-	-	-	13	7	8	12
парлон	-	-	-	-	-	-	-	-	-	12,4	8,7	-	-	-	-	10	17	10	-	-
сера	10	-	16	-	-	5	-	19	20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	9
уротропин	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	11-13	18-23	11-13	-	-	-	-	-	7
окись меди	-	-	-	4	3	7	6	-	-	-	5,2	-	-	-	15	-	8	7	19	-
ХОМ	10	8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	19	-	-	-	-
малахит	-	-	-	-	-	-	-	10	7	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Cu <sub>2</sub> S	14	20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	7-9	4-6	-	-	-	-	-	-	-
CuS	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	7-9	-	-	-	-	-	-
ПВХ	-	-	-	1	1	0,5	10	-	-	-	-	-	-	-	5	-	-	-	8	-
ПАМ	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	6	5	12	5
K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	-	-	12	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
акар. смола	-	-	-	-	-	-	5	-	-	9,1	9,5	-	-	-	-	5	5	10	-	-
связующее*	2	2	-	4	2	-	5	2	2	4,8	4,8	4-6	4-6	4-6	3	-	5	4	5	4
прочее**	13	16	12	-	-	-	-	3	-	-	-	-	14-16	-	15	3	-	-	4	8

1. Фиолетовое пламя: \* – декстрин; \*\* – карбонат кальция [1].
2. Фиолетовое пламя: \* – декстрин; \*\* – оксалат стронция [1].
3. Чешский состав для бенгальских огней: \*\* – квасцы [20].
4. Состав для звездок: \* – шеллак [11].
5. Состав для лансов: \* – шеллак [11].
6. Состав для бенгальских огней [11].
7. Состав фиолетового пламени: \* – рисовый декстрин сверх 100%. Вместо окиси меди может быть использован порошок металлической меди [13].
8. Фиолетовое пламя: \* – декстрин; \*\* – древесный уголь [1].
9. Фиолетовое пламя: \* – декстрин [1].
- 10 - 11. Составы для звездок: \* – рисовый декстрин [10].
12. Отечественный состав Ф-67 для звездок: \* – идиол. Удельная светосумма 313 кд·с/г, чистота цвета 57% [5].
13. Отечественный состав фиолетового огня: \* – идиол; \*\* – карбонат кальция. Графит 0,5% сверх 100% [5].
14. Отечественный состав фиолетового огня: \* – идиол [5].
15. Состав лилового огня: \*\* – бензоат кальция [27].
16. Состав фиолетового огня для звездок: \*\* – магний [7].
17. Состав пурпурного огня для звездок: \* – декстрин [7].
18. Состав для японских пурпурных сферических звездок: \* – декстрин [7].
19. Китайская пурпурная «dahliа»: \* – резинокс; \*\* – оксалат натрия [21].
20. \* – Декстрин св. 100%; \*\* – бензоат меди [15].

**Табл. 19.11. Составы оранжевого огня**

Состав	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
KClO <sub>3</sub>	52	-	30	56	59	56	57	-	-	-	76	-	-
KClO <sub>4</sub>	-	14	-	-	-	-	-	-	-	68	-	58,5	47
Sr(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	-	64	36	-	-	-	-	18-22	18-22	-	-	-	-
NH <sub>4</sub> ClO <sub>4</sub>	-	-	-	-	-	-	-	37-43	37-43	-	-	-	-
Na <sub>2</sub> C <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	-	1,54	-	-	-	2	-	13-17	13-17	-	4	12,5	-
сера	14	0,54	20	20	21	19	-	-	-	-	-	-	-
SrCO <sub>3</sub>	-	-	-	20	-	-	14	-	-	-	4	-	-
Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	-	-	-	2	2	-	2	-	-	-	-	-	-
уротропин	-	-	-	-	-	-	-	12-13	13-17	-	-	-	-
древесный уголь	-	-	3	-	-	-	3	-	-	-	-	-	-
CaCO <sub>3</sub>	34	-	-	-	16	-	-	-	-	-	-	-	11
парлон	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4	15,5
связующее*	-	14	2	2	2	2	10	8-10	8-12	2	16	21	11
прочее**	-	-	9	-	-	21	14	-	-	30	-	4	15,5

- Чешский состав для бенгальских огней [20].
- Состав для звездок: \* – шеллак [11].
- Оранжевый огонь: \* – декстрин; \*\* – нитрат натрия [1].
- Оранжевый огонь: \* – декстрин [1].
- Оранжевый огонь: \* – декстрин; \*\* – оксалат стронция [1].
- Оранжевый огонь: \* – олифа; \*\* – пороховая мякоть [1].
- Отечественный состав для звездок О-67ФС: \* – идиол. Удельная светосумма 318 кд·с/г, чистота цвета 96%, скорость горения 0,82 мм/сек [5].
- Отечественный состав О-67: \* – идиол [5].
- Германский состав: \*\* – по 10% бензоата кальция, бензоата бария, ПВХ [27].
- Состав для звездок: \* – 4% канифоли, 8% акароидной смолы, 4% декстрина [7].
- Состав для звездок: \* – 17% канифоли, 4% декстрина; \*\* – 4% оксалат стронция [7].
- Состав для звездок: \* – 6,5% акар. смолы, 4,5% декстрина; \*\* – 11% ПАМ, 4,5% криолита [7].

**Табл. 19.12. Составы розового и малинового огня**

Состав	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
KClO <sub>3</sub>	-	67	58	63	48	47	-	-	244	-	-
KClO <sub>4</sub>	44	-	-	-	-	-	-	-	-	354	-
KNO <sub>3</sub>	-	-	-	8	13	-	6-8	-	-	-	76
SrCO <sub>3</sub>	-	16	-	10	-	6	-	-	-	184	-
NH <sub>4</sub> ClO <sub>4</sub>	-	-	-	-	-	-	38-42	-	-	304	-
Sr(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	-	-	-	-	-	-	-	14	244	-	-
сера	-	9	20	13	21	-	-	-	-	-	-
магний	-	-	-	-	-	-	-	34	-	-	-
древесный уголь	-	-	-	-	-	3	2-4	-	84	24	19
CaCO <sub>3</sub>	-	-	18	-	-	9	38-42	-	-	-	-
связующее*	14	2	2	2	2	8	8-12	14	64	194	5
прочее**	14	6	2	4	16	27	0,5	-	24	34	-

- Розовый бенгальский огонь: \* – шеллак; \*\* – гипс [11].
- Розовый огонь: \* – декстрин; \*\* – парафин [1].
- Розовый огонь: \* – декстрин; \*\* – окись меди [1].
- Розовый огонь: \* – декстрин; \*\* – мастика [1].
- Розовый огонь: \* – декстрин; \*\* – оксалат стронция [1].

6. Розовый огонь: \* – олифа; \*\* – пороховая мякоть [1].
7. Отечественный состав Р-67: \* – идитол; \*\* – ферроцен (сверх 100%) [5].
8. Состав малинового огня: \* – шеллак [11].
9. Состав малинового огня: \* – 4% акаридной смолы, 2% декстрина; \*\* – 1% стеарина, 1% ПВХ или гексахлорбензола [15].
10. Состав малинового огня: \* – 15% акаридной смолы, 4% декстрина; \*\* – 3% уротропин [15].
11. Состав розового огня: \* – канифоль [34].

## 19.2. Составы периодического излучения

Составы периодического излучения – пиротехнические составы, сгорание которых сопровождается вспышками определенной частоты, т.е. периодическим измерением яркости. Также их называют мерцающими составами, составами пульсирующего излучения (в англоязычной литературе – «strokes» или «twinklers»). Широко используются в фейерверочных изделиях. Мерцающие источники излучения более заметны для человеческого глаза, поэтому имеются перспективы применения в сигнальных изделиях военного назначения, и на это получен ряд патентов [16].

Первоначально эффекта мерцания добивались послойной запрессовкой медленногорящего и быстрогорящего состава. Медленногорящий состав при сгорании излучал с низкой интенсивностью, быстрогорящий – с высокой. Однако таким образом было невозможно добиться высокой частоты мерцания. При неплоском фронте горения эффект нарушался, а многократная послойная запрессовка была затратной. В 60-х годах 20 века в СССР и почти одновременно в Японии были разработаны составы, мерцание которых при сгорании было заложено в самом процессе горения. В СССР они неофициально назывались «составы Нодела».

Впрочем, еще в книге Дэвиса [3] упоминается мерцающий состав желтого огня, состоящий из: 24 ч. пороховой мякоти, 4 ч. оксалата натрия, 3 ч. антимония, 3 ч. порошка алюминия и 1 ч. декстрина. Вариант белого огня содержит 25 ч. пороховой мякоти, 3 ч. антимония, 3 ч. порошка алюминия и 1 ч. декстрина. Смеси из книги Дэвиса способны нормально функционировать только в полете, т.к. при поджигании без обдува воздухом мерцающий эффект исчезает.

Есть предпосылки считать, что мерцающие составы были известны в Англии еще в конце 19 века, хотя так или иначе их массовое применение началось лишь в 60-х годах 20 века.

Упрощенно механизм горения составов периодического излучения можно представить как одновременное сгорание двух смесей, объединенных в один состав: медленногорящей – «тусклой» с малой энергией инициирования реакции и быстрогорящей – «яркой» с высокой энергией инициирования. При сгорании первой, медленногорящей смеси, создаются благоприятные условия для накопления в горящем слое компонентов второй «яркой» смеси. Когда выделяющаяся энергия начинает превышать энергию инициирования второй смеси, она воспламеняется и сгорает со вспышкой, при этом в горящем слое накапливаются компоненты первой смеси, вспышка исчезает, но благодаря низкой энергии инициирования первой смеси горение не прекращается. Далее цикл повторяется. Гипотетически горение

можно представить на примере классического мерцающего состава: нитрат бария/ порошок алюминий-магниевого сплава/ сера/ связующее.

• «тусклая» реакция:  $\text{Mg} + \text{S} \rightarrow \text{MgS}$ ;

• «яркая» реакция:  $3\text{Ba}(\text{NO}_3)_2 + 10\text{Al} \rightarrow 3\text{BaO} + 3\text{N}_2 + 5\text{Al}_2\text{O}_3$ .

На стадии первой реакции происходит «выгорание» серы и магния с накоплением алюминия и нитрата бария в зоне горения, когда алюминия и нитрата бария будет достаточно много, инициируется вспышка (реакция 2), которая быстро затухает, передавая часть энергии на инициирование первой реакции.

Безусловно, описанный механизм — это всего лишь упрощенная модель, тем не менее она подтверждена на практике. В действительности, химические и физические процессы при сгорании гораздо более сложны с большим кол-вом переходных процессов.

Если мерцающий состав является цветопламенным, то интенсивность цвета при горении тоже носит переменный характер. На «тусклой» стадии насыщенность цветом наибольшая, на «яркой» стадии из-за повышения температуры активируется диссоциация молекул-излучателей, и насыщенность цветом резко падает. В этом отношении наилучшее сочетание цветности с обеспечением надежных пульсаций демонстрируют композиции на основе перхлората аммония, магния и цветопламенных добавок. Однако эти смеси имеют ограниченный срок хранения из-за взаимодействия ПХА и магния. Во избежание самоускоряющейся реакции разложения магний должен быть пассивирован, а в пиротехнический состав вводится добавка дихромата калия, способствующего регенерации защитного слоя на частицах порошка металла [7].

В металлосодержащих составах зеленого и красного огней, содержащих бихроматы, нельзя использовать растворимые соли бария или стронция. Эти соли взаимодействуют с бихроматом калия с образованием нерастворимых продуктов, в результате чего защитное действие бихромата исчезает [10].

Применяющиеся на практике смеси, как правило, содержат порошок алюминий-магниевого сплава, который является ключевым компонентом при организации прерывистого излучения. Особенностью алюминий-магниевого сплава является его двустадийность горения: вначале выгорает магний, а уже затем алюминий. Таким образом, этот материал способствует наличию мерцающего эффекта. В качестве окислителей обычно используются нитраты стронция и бария, а также перхлорат аммония. Нитрат натрия самостоятельно не применяется из-за равномерного сгорания составов на его основе.

Стоит отметить, что существуют методы управления частотой мерцания, отличные от подбора компонентов состава. Так, например, для увеличения частоты мерцания используют более тонкую фракцию металла или повышают его удельную поверхность (например, заменяя порошок с частицами сферической формы на порошок с частицами пластинчатой формы). Если состав поместить в оболочку, то при сгорании осуществляется большая теплоотдача на поверхность горения, что также сопровождается увеличением частоты мерцания. На наличие

эффекта также сильно влияет степень и характер запрессовки состава. В целом, мерцающие составы наиболее чувствительны к технологии изготовления среди всех типов фейерверочных составов и требуют высокой культуры производства. Согласно [6], даже на современном пиротехническом производстве не удастся добиться стабильных характеристик мерцающих звездок; незаметные отклонения в технологии ведут к значительному изменению качества изделий.

**Табл. 19.13. Типы основ для практически примененных мерцающих смесей [23]**

Состав	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
нитрат бария	54	50	-	-	-	-	-	-	-	-	-
сера	23	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ПАМ	18	20	33,3	30	25	20	-	-	-	-	-
декстрин	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
нитрат гуанидина	-	30	33,3	42	-	-	-	-	70	55	-
перхлорат калия	-	-	33,3	-	-	-	-	-	-	-	-
перхлорат аммония	-	-	-	28	60	50	60	50	-	25	30
сульфат бария	-	-	-	-	15	-	-	-	-	-	-
уротропин	-	-	-	-	-	30	40	-	-	-	-
магний	-	-	-	-	-	-	-	50	-	-	-
Mg <sub>2</sub> Cu	-	-	-	-	-	-	-	-	30	-	-
медь	-	-	-	-	-	-	-	-	-	20	30
(CH <sub>3</sub> ) <sub>4</sub> N(NO <sub>3</sub> )	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	40

**Табл. 19.14. Отечественные мерцающие составы (составы 1-8 ввиду хрупкости используются в корпусных оболочках)**

Состав	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Ba(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	-	70-80	30-37	65-75	45-52	70-80	-	-	25	60-65
Sr(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	78-84	-	30-37	-	-	-	8-12	25	-	
NaNO <sub>3</sub>	-	-	-	-	18-23	-	-	-	-	-
NH <sub>4</sub> ClO <sub>4</sub>	-	-	-	-	-	-	40-48	35	-	-
Na <sub>2</sub> C <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	-	-	-	2-8	2-8	-	-	-	-	-
ПАМ-2	11-15	13-15	25-35	19-23	-	10,5-11,5	26-34	-	-	20-25
ПАМ-3	5-7	5-7		7-11	25-35	3,5-5,5		24	-	
оксид меди	-	-	-	-	-	-	5-11	-	-	-
медь	-	-	-	-	-	8-12	-	-	-	-
идитол	1,5-2,5	до 2	0,1-0,2	-	1-2	до 2	-	-	-	1-2
MgO	-	-	1-5	-	-	-	-	-	-	-
CuCl	-	-	-	-	-	-	-	16	-	-
хлорид аммония	-	-	-	-	-	-	-	-	-	10-20
сера	-	-	-	-	-	-	5-11	-	-	-
бездымная основа	-	-	-	-	-	-	-	-	52	-

1. Красный МР-67. Скорость горения 0,6-0,74 мм/с, I/S = 1500 кд/см<sup>2</sup>, частота вспышек 0,4-0,65 Гц [5].
2. Белый МБ-67. Скорость горения 0,4-0,7 мм/с, I/S = 2700 кд/см<sup>2</sup>, частота вспышек 0,5-0,6 Гц [5].
3. Белый МБ-72. Скорость горения 0,6-0,7 мм/с, I/S = 1700 кд/см<sup>2</sup>, частота вспышек 1,4-3,0 Гц [5].
4. Желтый МЖ-67. Скорость горения 0,2-0,9 мм/с, I/S = 1700 кд/см<sup>2</sup>, частота вспышек 0,9-1,0 Гц [5].

5. Желтый МЖ-72. Скорость горения 0,6-0,7 мм/с,  $I/S = 1600$  кД/см<sup>2</sup>, частота вспышек 1,1-3,0 Гц [5].
6. Зеленый МЗ-67. Скорость горения 0,4-0,9 мм/с,  $I/S = 1500$  кД/см<sup>2</sup>, частота вспышек 0,7-0,8 Гц [5].
7. Фиолетовый МФ-72. Скорость горения 0,8 мм/с,  $I/S = 1100$  кД/см<sup>2</sup>, частота вспышек 15-16 Гц [5, 35].
8. Пурпурный МП-72. Скорость горения 1,0-2,0 мм/с, частота вспышек 12-15 Гц [5].
9. Белый. Частота вспышек 3-5 Гц [36].
10. Современный отечественный состав красного и зеленого огня [74].

**Табл. 19.15. Зарубежные мерцающие смеси. Соотношения компонентов для 3-5 указаны в частях**

Состав	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
$\text{NH}_4\text{ClO}_4$	-	-	-	-	-	5	6	7	-	-	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-
$\text{KClO}_4$	-	-	18	-	-	-	3	5	9	10	-	-	-	-	-	-	-	40	25	5
нитрат гуанидина	-	-	-	-	-	-	-	-	36	35	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
$\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$	40	33	37	-	40	65	-	60	-	-	60	51	54	-	51	53	58	-	-	-
$\text{Sr}(\text{NO}_3)_2$	-	-	-	4	-	-	65	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
$\text{KNO}_3$	-	7	-	2	10	-	-	-	-	-	5	8	-	50	7	-	-	-	-	10
сера	30	27	-	6	20	-	-	-	-	-	-	23	20	12	19	17	14	-	-	20
ГХБ или хлоркаучук	5	11	8	-	-	-	-	-	14	10	-	-	9	-	-	-	-	-	-	-
ПАМ	18	12	20	-	20	20	18	20	-	-	28	13	12	14	18	12	14	-	-	20
магний (пассивир.)	-	-	-	-	-	-	-	-	18	20	-	-	-	-	-	-	-	20	10	-
антимоний	7	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	10	-	-	-	-	-	15
древесный уголь	-	-	-	-	7	-	-	-	-	-	-	-	-	10	-	-	7	-	-	15
цветопл. добавка*	-	5	9	-	-	3	-	3	18	20	-	-	-	-	-	-	-	30	13	10
прочее **	-	-	7	1	10	-	8	-	-	-	2	5	5	4	5	18	7	10	52	5
нитроцеллюлоза	2,5	2,5	-	-	-	7	+	5	5	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

1. Состав зеленого огня. Скорость горения 1,8 мм/сек. НЦ сверх 100% [10].
2. Состав желтого огня: \* – оксалат натрия. Скорость горения 2,5 мм/сек. НЦ св. 100% [10].
3. Состав лимонно-желтого огня: \* – криолит; \*\* – канифоль [37].
4. Состав красного огня: \*\* – алюминий [38].
5. Серебристый мерцающий (Китай): \*\* – декстрин [21].
6. Состав желтого огня: \* – оксалат натрия. Частота мерцания – 1,5 Гц [40].
7. Состав красного огня: \*\* – ДЦДА. Частота мерцания – 1,5 Гц [40].
8. Состав зеленого огня: \* – перхлорат бария [40].
9. Состав зеленого огня: \* – сульфат бария [41].
10. Состав красного огня: \* – сульфат стронция [41].
11. Состав белого огня: \*\* – окись меди. В качестве связующего содержит латекс на основе поливинилбутирала сверх 100% [42].
12. Состав белого огня: \*\* – декстрин [7].
13. Состав зеленого огня: \*\* – декстрин [7].
14. Японские сферические звездки: \*\* – декстрин [7].
15. Состав белого огня: \*\* – декстрин. Частота мерцания – 2 Гц [17].
16. Состав зеленого огня: \*\* – 5% декстрина, 13% дехлорана. Частота мерцания – 3,5 Гц [17].
17. Состав зеленого огня (Китай): \*\* – декстрин [21].
18. Состав красного огня (Китай): \* –  $\text{SrCO}_3$ ; \*\* – декстрин [21].
19. Состав красного или зеленого огня: \* – сульфат стронция или бария, в зависимости от требуемого цвета; \*\* – уротропин [39].
20. Золотистый мерцающий (Китай): \* – оксалат натрия; \*\* – декстрин [21].

Табл. 19.16. Зарубежные мерцающие смеси на основе ПХА

Состав	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$\text{NH}_4\text{ClO}_4$	50	60	50	60	60	57,1	48,1	45,2	47,5	47,6
ПВХ	-	-	-	-	-	-	4,8	4,9	1	3,8
парлон	-	-	-	-	-	3,9	2,9	2,9	3,8	-
ПАМ	-	-	-	-	25	15,2	-	-	-	-
магний (пассивир.)	30	30	40	23	-	-	17,3	17,6	22,9	23,8
цветопл. добавка*	20	10	10	17	15	19	25	27,4	20	20
нитроцеллюлоза св. 100%	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	*	*	*	*	*
$\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ св. 100% для 1-5	5	5	5	5	5	4,8	1,9	2	4,8	4,8
скорость горения, мм/с	4,4	6,9	9,7	1,7	11,4	-	-	-	-	-
частота вспышек, Гц	3,5	6,9	3,5	3,1	9,7	-	-	-	-	-

1. Состав красного огня: \* – сульфат стронция [10].
2. Состав оранжевого огня: \* – сульфат кальция [10].
3. Состав желтого огня: \* – сульфат натрия [10].
4. Состав зеленого огня: \* – сульфат бария [10].
5. Состав белого огня: \* – сульфат бария (при замене на безводный сульфат натрия частота пульсаций увеличивается) [10].
6. Состав красного огня: \* – 11,4% сульфата стронция, 7,6% карбоната стронция [7].
7. Состав красного огня: \* – 15,4% сульфата стронция, 9,6% карбоната стронция [7].
8. Состав зеленого огня: \* – 17,6% сульфата бария, 9,8% карбоната бария [7].
9. Состав оранжевого огня: \* – 12,4% сульфата кальция, 7,6% карбоната кальция [7].
10. Состав желтого огня: \* – 12,4% сульфата натрия, 7,6% карбоната бария [7].

Существует особая разновидность мерцающих составов, используемых в т.н. «*потрескивающих микрозвездах*» (*crackling microstars*). Эти изделия пришли в пиротехнику, по-видимому, из Китая. Из технологической смеси формируют звездки размером не более 4 мм. При воспламенении звездка сначала тлеет, а через приблизительно 1-2 сек. взрывается с яркой вспышкой и громким треском. В данном случае, как и в классических мерцающих составах, имеет место 2 стадии – «тусклая» и «яркая». Однако вторая реакция протекает настолько бурно, что ведет к разрыву звездки. Стоит отметить, что трещащие микрозвезды весьма чувствительны к удару и трению, поэтому требуют аккуратного обращения. Состав трещащих микрозвезд базируется, как правило, на сочетании оксидов свинца, меди или висмута с порошком алюминиймагниевого сплава [6, 7]. Известны под названием «*dragon eggs*».

Состав:	1	2	3	4	5
ПАМ	11	17	15	30	25
титан	-	-	-	-	5
свинцовый сурик	89	44	-	-	-
нитрат калия	-	4	-	-	-
сера	-	4	-	-	-
окись меди II	-	31	10	70	70
окись висмута III	-	-	75	-	-
декстрин св. 100%	-	-	-	10	-
НЦ св. 100%	+	+	+	-	+
литература	6	6	6	21	21

Табл. 19.17. Составы трещащих микрозвезд

Связующим для микрозвезд служит, как правило, 10% раствор нитроцеллюлозы в амилацетате или ацетоне (смесь замешивается до состояния теста). Также могут использоваться фенольные смолы.

Для практического применения высушенные микрозвезды добавляют в смоленную до состояния теста смесь: 51,5% нитрата калия, 33% угольной пыли, 6,5%

серы, 3% нешуйчатого алюминия, 6% декстрина — и формируют крупные звездки. Этот состав служит матрицей и воспламенителем для микрзвездок. Соотношение между звездками и составом выбирается как 1:4.

### **Примечание.**

Смесь висмута является менее токсичным аналогом свинцового сурика. Единственный ее недостаток, как компонента пиротехнических смесей, — это высокая стоимость.

## **19.3. Искристо-пламенные и искристо-форсовые составы**

Искристо-пламенными называют пиротехнические смеси, горение которых сопровождается выбросом искр при наличии пламени.

Искристо-форсовыми называют пиротехнические смеси, горение которых сопровождается образованием газов и выбросом искр.

В действительности, различия в классификации этих смесей зачастую носят условный характер, поэтому в данной главе они рассматриваются вместе. Можно лишь указать, что искристо-пламенные составы используются чаще для создания многочисленных эффектов типа летящих цветных звездок с искристым хвостом и в меньшей степени — в фонтанах и различных огненных колесах. Их обычно относят к «слабым» искристым составам.

Применение искристо-форсовых смесей более характерно для фонтанов и огненных колес. Искристо-форсовые смеси обычно относятся к «сильным» искристым составам.

Различают искрение шлаковое (искры формируются раскаленными частицами шлака, которые выбрасываются потоком газов) и форсовое (искры формируются частицами металла или другого материала, сгорающего на воздухе).

Форсовое искрение является наиболее зрелищным, и искры существуют дольше [1].

Искрами называют жидкие или твердые частицы, возникающие на поверхности горения и выбрасываемые из зоны пламени. В отличие от золы или дыма, искры способны продолжать горение в окружающем воздухе и излучать свет. В пиротехнике различают искры, которые существуют в единственном числе вплоть до затухания (fire dust) — такие искры характерны для порошка алюминия или магния; и искры, которые в полете разветвляются на более мелкие светящиеся образования (sparks), характерные для железа, стали и титанового порошка [10]. Разветвление искр обычно объясняют наличием в материале отдельно взятой частицы нескольких фаз, горение которых происходит неравномерно. В результате образуются очаги раскаленного материала, расположенные в матрице из расплавленного шлака, а тепловые напряжения в массе материала ведут к отколу или разрыву частиц на более мелкие фрагменты.

Физически излучение раскаленного искрообразователя является излучением серого тела и поэтому зависит от температуры. В свою очередь, температура зависит от интенсивности процессов догорания искристого материала на воздухе, т.е. в конечном итоге — от природы материала искрообразователя.

Стоит обратить внимание, что создание окрашенного форса искр представляет значительные трудности, особенно для стационарных пиротехнических изделий

**Табл. 19.18. Цвет искр в зависимости от их температуры [6]**

Температура, °C	Цвет	Яркость
500	темно-красный	очень низкая
700	красный	низкая
850	оранжевый	средняя
1000	желтый	высокая
1100	белый	очень высокая

типа фонтанов. Искры представляют собой твердую фазу, излучающую в непрерывном спектре, а эффективное окрашивание возможно лишь в газовой фазе пламени, где образуются летучие галогениды или атомы металлов, излучающие в определенной области спектра.

Впрочем, ряд металлов-искрообразователей способен при сгора-

нии образовывать небольшое кол-во летучих соединений и давать слабоокрашенные искры.

В искристо-пламенных смесях проблема получения цвета решается комбинированием цветопламенного состава с искрообразователем. Цветопламенная основа при сгорании маскирует белый цвет форса искр, который при наблюдении эффекта кажется окрашенным.

Другим вариантом является комбинирование газообразующей смеси с небольшими зернами обычного цветопламенного состава (т.н. «крупкой» или «микростарками»). Горящие зерна цветопламенного состава выбрасываются потоком газов и формируют разноцветные элементы, похожие на крупные искры.

Платов [18] приводит следующий состав для бриллиантовых микростарок: хлорат калия – 2,5 ч., алюминиевая пудра – 2,5 ч., крахмал – 0,23 ч. Более безопасным вариантом является состав из [19]: нитрат бария – 40%, ПАМ – 30%, сера – 30%, нитроцеллюлоза в виде 10% раствора сверх 100%.

В общем случае искристые составы содержат термическую газообразующую основу и искрообразователь. Термическая основа служит источником газов, производящих работу по выталкиванию искр из зоны пламени, а также осуществляет первичный нагрев искр. Термическая основа может быть весьма разнообразной по составу – от обычной пороховой мякоти до быстрогорящих цветопламенных составов и баллистических основ.

**Наиболее распространены следующие искрообразователи [6, 7, 10]:**

- **Порошок древесного угля.** В искристых составах применяется достаточно крупная фракция (до 3 мм) древесного угля, получаемого пиролизом древесины твердых пород (береза, дуб и т.д.). Образует крупные неяркие искры цветом от розового до оранжевого.
- **Порошок железа.** Издавна используется в искристых составах типа фонтанов. Образует не слишком яркие искры желтоватого цвета. Порошок железа перед применением необходимо обработать парафином или провести воронение (нагревание в льняном масле), т.к. в условиях готовых составов, при контакте с солями-окислителями и следами влаги, железо быстро корродирует.
- **Стальные или чугунные опилки.** Образуют достаточно яркие рассыпающиеся искры белого цвета с желтоватым оттенком. Перед применением металлические опилки необходимо обработать парафином или провести воронение.

- *Алюминиевый порошок или опилки.* Образуют яркие рассыпающиеся искры цветом от желтого до серебристо-белого. Эффект может варьироваться в зависимости от сорта алюминия. Лучший искрообразователь по соотношению цены и красочности эффекта.
- *Крупные магниевые опилки.* Используются изредка в некоторых фонтанах и т.н. «гейзерах» (пульсирующих фонтанах). Магний имеет низкую температуру кипения, что приводит к выгоранию его паров уже в зоне пламени. Форс искр может быть получен только с крупными опилками, он достаточно короткий, но очень яркий, белого цвета.
- *Порошок алюминиймагниевый (ПАМ, магналий).* В виде искр сгорает в 2 стадии, на первой стадии выгорает магний, развивая температуру, достаточную для инициирования алюминия, на второй стадии алюминий воспламеняется, и раскаленная частица с треском распадается на несколько более мелких.
- *Титановый порошок.* Является одним из лучших, если не лучшим, искрообразователем по зрелищности наблюдаемого эффекта при довольно доступной цене. Поэтому в последние годы ему отдается предпочтение. Образует крупные яркие искры серебристого цвета, иногда с желтоватым оттенком. Поведение искр титана зависит от технологии его получения. Искры из порошка, полученного при измельчении титановой губки, а также обычные сорта порошков, полученных кальциевогидридным методом, имеют тенденцию рассыпаться в воздухе с небольшой вспышкой и треском. Тогда как порошок из чистого электролитического титана этим свойством почти не обладает. Обычно требует термической основы, дающей при сгорании большое количество газов, иначе вместо образования искр состав сгорает в компактной массе, спекаясь в шлак. Титан нетоксичен, обладает высочайшей устойчивостью к коррозии даже в присутствии солей. Его целесообразно использовать в декоративных изделиях внутри помещений. В японских фейерверках зачастую применяются недорогие сплавы титана с железом с порядка 80% содержанием титана (ферротитан).
- *Циркониевый порошок* – образует яркие искры ослепительно белого цвета, иногда с желтым оттенком. Очень хороший искрообразователь, тем не менее слишком дорогой для широкого практического применения. Иногда используется как добавка в составы для фонтанов [43].
- *Медный порошок* – образует искры зеленого цвета. Используется в некоторых фонтанах.
- *Цинковый порошок* – образует искры голубого или фиолетового цветов (в зависимости от фракции металла и состава искрообразующей смеси). Из-за высокой активности цинка в реакциях окисления предпочтительно использование крупных опилок.

Комбинирование двух искрообразователей, например угля и стальных опилок, приводит к эффекту «двойной ленты», когда одновременно образуется 2 цвета искр – оранжевые и белые [1].

Среди искристых составов в пиротехнической литературе обычно различают [1, 3, 6, 7, 10]:

- *Стримеры (streamers)* – звезды, образующие при сгорании золотистый или белый искровой шлейф. Впрочем, стримерами обычно называют все типы звезд, состав которых базируется на компонентах черного пороха. К стримерам относят такие известные в пиротехнике эффекты, как «плакучая ива» или «хризантема». Согласно [7], лишь варьируя соотношением, сортами компонентов и технологией изготовления таких составов, можно получать совершенно различные эффекты. Согласно [10], эффекты от «хризантемы» до «ивы» соответствуют составам: нитрат калия – 35-55%, сосновый уголь – 33-50%, сера – 0-12%, рисовый декстрин – 5-8%.
  - = Эффект «плакучей ивы» («weeping willow») достигается использованием в составе древесного угля в количестве около 50% и нитрата калия порядка 35% (остальное – сера и связующее). Звезды из этого состава сгорают достаточно медленно, формируя характерный пиротехнический эффект в виде ниспадающих пушистых следов, напоминающих ветви ивы. Традиционный японский состав для сферических звезд с эффектом «плакучей ивы»: нитрат калия – 35%, сосновый уголь – 45%, сера – 11%, рисовый декстрин – 9%. При замене части угля на металлический порошок получают эффект «парчовой ивы»: нитрат калия – 29%, сосновый уголь – 34%, сера – 6%, ферротитан – 25%, рисовый декстрин – 6%.
  - В *крестсах (распадающихся кометах)* могут быть использованы композиции подобного состава, например: нитрат калия – 30%, древесный уголь – 50%, сера – 7%, титан – 7%, декстрин – 6%.
  - Эффект «хризантемы» («chrysanthemum») наблюдается при уменьшении количества угля до 40% и увеличения нитрата калия до 48%. Такие смеси в звездках сгорают уже заметно быстрее, формируя более короткий и менее продолжительный по времени шлейф. Например, этот эффект наблюдается для смесей: нитрат калия – 52-58%, древесный уголь – 35-42%, сера – 6-7%, декстрин – 5%.
  - Эффект «паучьей сети» («spider web») характерен для композиций состава: 70% пороховой мякоти, 25% древесного угля, 5% декстрина. Такие составы характеризуются большой скоростью горения и совместно с мощным разрывным зарядом формируют эффект тонких, равномерно распределенных траекторий, напоминающих паучью сеть. Размеры «сети» могут быть очень большими, а отдельные лучи даже достигают земли.
  - Эффект «парчи» («brocade») – быстрогорящие смеси, которые получают, добавляя в пороховые составы без серы металл вместе с антимонием: нитрат калия – 56%, перхлорат калия – 6%, уголь из конопли – 11%, антимоний – 6%, алюминий (bright) – 17%, декстрин – 4%.
  - Эффект «пальмы» («palm tree» effect) – эффект, напоминающий ветви кокосовой пальмы. Для этого также используют быстрогорящие пороховые смеси и особый способ снаряжения люсткугелей. В качестве примера можно привести состав из [15]: пороховая мякоть – 14 ч., алюминий (сфе-

рический, смесь среднего и крупного) – 3 ч., карбонат стронция – 1 ч., антимоний – 1 ч., декстрин – 1 ч. Более зрелищные смеси содержат ферротитан: пороховая мякоть – 40%, нитрат калия – 30%, ферротитан – 25%, декстрин – 5%.

В целом, для современных стримерных составов характерно более широкое использование металлических порошков, при этом предпочтение отдается алюминию и титану, как наиболее зрелищным в эффектах и не подверженным коррозии. В старых составах используются, как правило, железные, стальные и чугунные опилки [7].

- *Глиттер (glitter)* – звезды, сгорающие с характерным эффектом в виде «мерцающего шлейфа». Образованию такого шлейфа из микровспышек составы обязаны специфическим процессам, протекающим в частицах жидкого шлака, выбрасываемых сгорающей звездкой. Эти процессы весьма сходны с эффектами мерцающих огней, описанных ранее. Глиттеры очень популярны во всех видах салютов. Все они изготавливаются с применением декстрина, замешанного на 1% водном растворе борной кислоты, иначе значительно ухудшаются свойства состава при хранении и изготовлении. Во избежание нежелательных химических реакций, сушка составов производится при комнатной температуре. Различают следующие типы глиттеров:

- Эффект «жемчужины» («*pearl*» effect) – характеризуется присутствием микровспышек непосредственно за зоной пламени. Визуально это наблюдается как короткий, но объемный мерцающий шлейф.
- Эффект «тремоланта», итал. – «*tremolante*», англ. – «*tremolon*». Микровспышки наблюдаются как непосредственно за зоной пламени, так и в шлейфе позади зоны пламени.
- Эффект «мерцания» («*twinkler*») (не путать с самими мерцающими составами, рассмотренными ранее). Микровспышки наблюдаются только в шлейфе позади зоны пламени. При этом протяженность шлейфа может быть очень большой.

- *Серебристые звездки (silver stars или silver streamers)* – звезды, оставляющие пушистый шлейф из белых искр, образующихся при сгорании частиц чешуйчатого алюминия. Причем существуют серебристые звездки, сгорающие вполне различным цветным пламенем. В цветных серебристых звездках в качестве искрообразователя рекомендуется использование порошка титана, т.к. с ним эффект получается более зрелищным, чем с алюминием или другими металлами.

В ряде современных литературных источников серебристые звезды еще называют *флиттерами (flitters)*.

#### Примечание.

Стоит отметить, что с терминам «флиттер» связана путаница в современной пиротехнике, т.к. многие практикующие пиротехники издавна называют флиттерами составы, подобные глиттерам типа тремолантов, но содержащих повышенное кол-во алюминия.

- *Светлячки (firefly)* – звездки, содержащие в своем составе небольшое (порядка 5%) количество алюминиевого порошка в виде крупных чешуек и порядка 40% порошка древесного угля. Их эффект сгорания выражается в том, что сначала образуется первичный шлейф, сформированный частицами сгорающего угля, а затем появляется вторичный шлейф от сгорания частиц алюминия. Время жизни шлейфа может достигать 30 секунд.
- *Цинковые звезды (spreaders)* – звезды, разбрасывающие в разные стороны большое количество искр голубовато-зеленого цвета и оставляющие короткий оранжевый шлейф. Для них характерным является не столько наличие шлейфа, как у большинства искристых звездок, сколько равномерное разбрасывание мелких искр непосредственно из звездки во все стороны, воспринимаемое наблюдателем, как яркое белое облако с сине-зеленым оттенком. Шлейф же формируется частицами догорающего угля, который входит в состав этих смесей. В современных фейерверках эти композиции встречаются не так часто, тем не менее эффект очень зрелищный. Были известны еще в 18 веке. Разновидностью цинковых звезд являются «гранитные звездки».
- *Водопады (waterfall, cascades)* – разновидности зрелищных стационарных искристых фейерверков. Смесь запрессовывают в бумажные гильзы, гильзы закрепляют в ряд на высотных объектах, например на мостах или штангах с горизонтальной планкой. При одновременном инициировании изделия сгорают почти без пламени, выбрасывая искры. При этом поток искр формируется в виде длинного ниспадающего шлейфа длиной до 20 м. Иногда для усиления эффекта изделия подвешивают с таким расчетом, чтобы искры падали на поверхность в виде бушующего потока подобно водопаду. Согласно [6], первые смеси для водопадов изготавливались на основе бертолетовой соли и порошка алюминия сорта «Bright», например, 72% хлората калия и 28% алюминия. Впоследствии, в целях безопасности и увеличения сроков хранения, хлорат калия был заменен перхлоратом. Например, известна композиция 50% перхлората калия и 50% алюминия (смесь 2 ч. Bright, 1 ч. чешуйчатого 30/80 меш и 1 ч. чешуйчатого 5/30 меш).
- Составы для форсов (*gerbs*) – сильные смеси, используемые в различных эпизодах фейерверочных композиций. При сжигании в корпусе формируют мощную струю декоративного яркого огня и/или искр. В целом, тождественны с фонтанами, но служат элементами для составления сложных фигур или создания струи искр (огня) в заданном направлении, а также для приведения в движение огненных колес. В некоторых литературных источниках [6] выделяют группу форсовых составов для движителей (*drivers*), предназначенных для снаряжения различных изделий типа китайских колес и подобных им динамических фигур. Под термином «форсовые» понимаются композиции для начинения малокалиберных фонтанов диаметром до 16 мм, запрессованные в бумажные гильзы. Простейший состав – это модифицированный черный порох, например: пороховая мякоть – 4 ч.,  $\text{KNO}_3$  – 2 ч., сера – 1 ч., уголь древесный крупный – 1-2 ч.

- Составы для *фонтанов* – смеси, подобные форсовым, но с несколько меньшей скоростью горения и запрессовываемые с большим давлением в корпуса, оборудованные глиняным соплом. Используются в фонтанах – неподвижных пиротехнических изделиях, выбрасывающих искры в виде снопа. Фонтанами, как правило, называют более крупные изделия, чем форсы. Фонтаны с пульсирующим горением называются «гейзерами», в них запрессовывают поочередно различные составы. Плавающие фонтаны для применения на воде называют *квскарями* и *дукерами*. Если в составах для фонтанов используется алюминий, то почти всегда 2-х фракций, это позволяет уменьшить количество шлака, остающегося в гильзе. В отличие от форсовых, смеси для фонтанов разнообразнее по своему составу и цветовому эффекту. Если практически все употребляемые на практике форсовые составы являются комбинацией пороховой мякоти с искрообразователем, то среди смесей для фонтанов встречаются композиции на основе перхлората и нитрата аммония. Особая разновидность фонтанов это «горшок с цветами» (*flower pot*) – особые фонтаны без сопла [3]. Состав подобран таким образом, что при сгорании выбрасывается большое количество капель расплавленного шлака. У основания фонтана эти капли имеют тусклый красный цвет, однако, поднимаясь на высоту, они разрываются с золотистой вспышкой и разбрасыванием искр, напоминая своей формой букет цветов.
- Смеси для *искристых свечей* (*sparklers*) – в отечественной пиротехнике известны под названием «бенгальские огни», хотя в зарубежной пиротехнике под этим термином подразумевают цветопламенные свечи для подсветки различных объектов. Наносятся в виде пасты на металлическую проволоку и подсушиваются. При поджигании сгорают обычно без пламени или с окрашенным пламенем, равномерно разбрасывая в разные стороны белые или желтые искры. Существуют экзотические искристые свечи с применением бездымной пороховой основы или ПХА. Например, композиция из английского патента [44] содержит: 20 ч. пороховой массы (50% НЦ, 48% ДБФ и 2% дифениламина) и 90 ч. смеси (12 ч. – железная пыль, 1 ч. алюминия, 6 ч. калия перхлората). Из пластичной смеси готовят ленты, которые экструзируют вместе с проволокой в стержни. Стержни снабжены ручкой из картона. В американском патенте [45] предложены бенгальские огни с применением перхлората аммония. Например: ПХА – 30 ч.,  $MnO_2$  – 1,5 ч., порошок железа – 10 ч., алюминиевый порошок – 2,5 ч., древесный уголь – 0,5 ч., стеариновая кислота – 5,0 ч. В отечественном патенте [46] описан экструзионный состав: 42% ПХА, 3% нитрата аммония, 33% порошка железного ПЖР, 5% алюминиевой пудры ПАП-1, 13% поливинилбутираля, 4% дибутилфталата.
- *Сплиттеры* (*splitters*) – звездки, которые изготавливают из составов, предназначенных для использования в искристых свечах. Из них прессуют звездки-метеоры, которые отстреливают обычно залпом. В полете сплиттеры постепенно рассыпаются на яркие фрагменты, догорающие непосредственно около самой звездки, формируя светящее и «роящееся» образование. В конце полета звездки, как правило, разрываются.

- Установлено, что при сжигании обычных искристых составов, нанесенных на железную проволоку, материал проволоки способен частично сгорать с образованием до 20% от общего числа искр. Искристые свечи, известные в зарубежной литературе как «wire dips» и «fire sticks», реализуют этот эффект практически. Эти свечи представляют собой цветопламенный состав, нанесенный на пучок очень тонких железных проволок или деревянных щепок. Изделия сгорают цветным пламенем и разбрасывают искры за счет сгорания основы, на которую нанесен состав. Чем тоньше используемые проволоки, тем больше выход искр.
- Японские искристые свечи (Senko Hanabishi) — содержат смеси, которые, будучи запрессованными в тонкую бумажную трубочку, образуют экзотический эффект искрения. Эффект выражается в формировании капли раскаленного шлака, которая эмитирует в окружающее пространство рой потрескивающих искр. Композиции для Senko Hanabi по составу напоминают меднониобиевые сорта черного пороха, содержащие, наряду с древесным углем твердых пород дерева, ламповую сажу. Стоит отметить, что для этого фейерверка не подходят газовая сажа и кристаллические формы углерода типа графита.

### Примечание.

Следует учитывать, что от введения в составы титридных металлов титана, стали, и особенно титана, резко возрастает чувствительность сухих пиротехнических смесей к механическим воздействиям. Так, например, известны многочисленные случаи воспламенения звездок, содержащих титан и черный порох при прессовании. Согласно последним исследованиям [24], чувствительность к механическим воздействиям практически не зависит от размера фракции порошка титана и достигает максимума при 20-30% содержании титанового порошка. При выпрессовке составов, содержащих титридные металлы, металлические частицы царапают поверхность матрицы.

Табл. 19.19. Смеси для белых и золотистых стримеров. Соотношения компонентов для составов 1-9 приведены в частях

Состав	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
KNO <sub>3</sub>	16	10	12	-	1	-	4	10	36	40	45	50	44,2	59	-	111	54	-	21	30	30	10	22	20
Ba(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	9	-	-	-	-	-	-	-	-	5
др. уголь	1	2	6	1	-	-	6	-	-	2	-	7,5	44,2	18,5	-	-	25	4	3	34	15	30	20	20
сера	4	3	2	-	-	-	8	3	10	10	10	17,5	5,4	7,5	-	-	7	-	4	10	10	20	15	20
ПМ	-	-	12	3	-	32	33	-	12	-	5	-	-	-	67	56	-	66	-	-	-	-	-	-
Sb <sub>2</sub> S <sub>3</sub>	-	-	6	1	-	4	-	-	12	-	-	2,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Al	-	-	-	-	-	-	-	1	-	30	40	7,5	-	7,5	17	17	-	-	-	-	-	-	-	-
титан	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	7	25	10	20	20	20	15	20
ПАМ	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,5	-	-	-	-	-	-	19	-	15	10	10	-
CuO	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	34	-	-	-	10	10
сажа	-	-	-	2	12	24	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
реальгар	-	3	-	-	-	-	-	3	-	10	-	7,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
связка*	1	1	1	*	1	1	1	1	2	7	5	6	6,2	7,5	7	5	7	5	7	6	10	10	8	5
прочее**	8	-	-	-	8	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	11	-	-	2	-	-	-	-	-

1. Золотой стример: \* – акароидная смола; \*\* – оксалат натрия. Модифицированный состав под названием «Китайский стример» вместо древесного угля содержит сажу, а вместо акароидной смолы – декстрин [3].
2. Серебряный стример: \* – акароидная смола [3].
3. Золотая комета: \* – декстрин [3].
4. Комета. Замещивается на декстрин [3].
5. Ива: \* – декстрин; \*\* – хлорат калия [11].
6. Эффект «плакучей ивы»: \* – шеллак [11].
7. «Паучья сеть»: \* – декстрин [11].
8. Серебристая звезда: \* – акароидная смола [11].
9. Эффект «кожанный крест»: \* – декстрин. Заряд для этого эффекта содержит всего 4 звезды, которые при разлете образуют фигуру из траекторий в виде креста [11].
10. «Золотая хризантема»: \* – рисовый декстрин; \*\* – борная кислота [10].
11. Серебряный стример без перхлоратов: \* – декстрин св. 100%. Используется алюминий: 30% бак. уголь, 10% сферический 120 меш [6].
12. «Серебряная хризантема»: \* – рисовый декстрин. Создает экзотический эффект с искрами разных оттенков цветов [10].
13. «Хвост тигра»: \* – рисовый декстрин. Используется сосновый уголь [10].
14. Золотистый стример: \* – декстрин [7].
15. Белый стример: \* – декстрин [7].
16. \* – Декстрин; \*\* – пшеничная мука [7].
- 17-18. \* – Декстрин [7].
19. Китайский титановый стример: \* – 4% резинкса, 3% декстрина; \*\* – перхлорат калия [21].
20. «Парча» (Китай): \* – декстрин [21].
21. «Серебристый комка» (Китай): \* – декстрин [21].
22. Золотой стример (Китай): \* – резинкса [21].
23. «Плакучая ива» (Китай): \* – декстрин [21].
24. «Плакучая ива» (Китай): \* – декстрин [21].

Табл. 19.20. Эффекты типа «глиттер» (glitter) и флиттеры (flitter) типа тремолантов. Соотношения для 8-11 указаны в частях

Состав	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
KNO <sub>3</sub>	11	35	-	-	32	-	-	8	17	-	20	50	50	-	-	49	48	-	10	36-43
Ba(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	-	15	-	-	-	-	-	-	-	2	5	-	-	-	-	-	9,5	-	-	13-16
KClO <sub>4</sub>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	32	-	-	-	-	-	-	-	-	5	-
оксалат Sr	-	-	-	-	-	8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4	-	-	-	-
оксалат Na	-	-	10	7	10	-	-	2	-	-	-	-	-	11	-	4	-	9	10	-
др. уголь	-	5	-	-	6	-	-	1	3	2	20	6,9	8,3	-	-	10	11	-	15	10-12
сера	5	4	-	-	8	-	-	2	3	-	30	20	25	-	-	6,5	16	-	20	10-13
ПМ	50	16	70	60	-	26	24	-	-	-	-	-	-	61,5	68	-	-	62,5	-	-
гран. ДП	-	-	-	-	27	40	40	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
антимоний	18	14	8	21	8	14	12	-	11	-	-	-	-	15,5	17	12,5	-	12,5	15	-
алюминий	8	6	7	7	7	8	7	8,5	13	12	-	17,3	-	8	10	8	9,5	-	-	12-13
ПАМ	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	12,5	-	-	-	-	9	20	-
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5,8	4,2	-	-	-	-	-	-	7-8
декстрин	5	5	5	5	-	4	5	2	4	3	3	-	-	4	5	6	6	7	5	4-5
прочее*	3	-	-	-	2	-	12	-	-	3	18	-	-	-	-	-	-	-	-	-

1. «Глиттер»: \* – пшеничная мука [6].
2. «Глиттер» [6].
- 3-4. Желтый «глиттер». Также содержит 0,5% борной кислоты [6].
5. Желтый «глиттер»: \* – арабийская камедь. Также содержит 0,5% борной кислоты [6].

6. Белый «глиттер» [6].
7. Белый «глиттер»: \* – карбонат бария [6].
8. Gold flitter. Алюминий: 4 ч. bright и 0,25 ч. flitter [11].
9. Silver flitter. Алюминий: 10 ч. bright и 3 ч. flitter [11].
10. Sinter: \* – акароидная смола [11].
11. «Хризантема с эффектом ивы» (Китай): \*\* – 16% окиси меди, 2% титана [21].
12. «Глиттер» с алюминием. Смесь увлажняется, прессуется и сушится при комнатной температуре. Большие звезды можно изготавливать с добавкой декстрина [6].
13. «Глиттер» с ПАМ-ом [6].
14. Золотистый глиттер. Алюминий: 4% bright, 4% dark [7].
15. Серебристый глиттер для крупных прессованных звездок. Замешивается на 1% растворе борной к-ты. Алюминий: 5% bright, 5% flitters [7].
16. Золотистый глиттер. Используется сферический алюминий. Состав для кубических и прессованных звездок [7].
17. Серебристый глиттер без антимония. Используется сферический алюминий [7].
18. Золотистый глиттер с ПАМ-ом [7].
19. Золотистый глиттер (Китай) [21].
20. Эффекты, подобные «глиттерам» [25].

### Примечание.

Во многих приведенных композициях не учитывается фракционный состав некоторых компонентов, таких как, например, древесный уголь. Хотя в реальных составах для достижения требуемого эффекта это имеет первостепенное значение, т.к. мелкая фракция играет роль горючего, а более крупная – искрообразователя. Древесный уголь является ключевым компонентом практически всех искрообразующих составов, предпочтение отдается углю из сосны, т.к. из-за специфической микроструктуры и наличия остатков смолы время жизни искр выше, чем при использовании угля лиственных пород дерева.

Табл. 19.21. Смеси для серебристых звездок (флиттеров)

Состав	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
KClO <sub>3</sub>	-	-	-	-	59	50	-	-	-	-	-	-	-	-
KClO <sub>4</sub>	104	-	64	-	-	-	32	30	58,5	50	13	-	40	60
Ba(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	24	55	-	-	-	-	-	-	-	-	44	-	-	-
KNO <sub>3</sub>	-	13	-	37	-	8	-	27	-	-	-	40	-	-
сера	-	4	-	-	-	-	-	-	-	-	9	10	-	5
антимоний	-	-	-	9	-	-	-	-	-	-	13	-	-	-
Al – сфер.	-	-	-	-	-	-	-	15	-	-	-	-	-	-
Al – dark pyro	-	21	-	-	-	-	6	15	15	-	18	-	-	-
Al – bright	74	-	28	47	26	21	21	-	15	35	-	50	25	-
Al – flitter	-	-	-	-	-	8	5	-	-	-	-	-	-	-
ПАМ	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	25	15
др. уголь	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2,5	-	-	-	-
связующее*	14	6	8	6	15	13	8	13	11,5	10	3	6	10	10
прочее**	-	1	-	1	-	-	28	-	-	2,5	-	1	-	10

1. Серебряная комета: \* – шеллак. [11].
2. Серебряный стример: \* – декстрин; \*\* – борная к-та [6].
3. Серебряный стример: \* – шеллак [6].
4. «Золотой вихрь»: \* – рисовый декстрин; \*\* – борная кислота. В разных вариантах рецептуры вместо антимония может использоваться сера или реальгар, по отдельности или в смесях, придавая искрам различные оттенки желтого [10].

5. \* – 7,5% декстрина, 7,5% акароидной смолы [7].
6. \* – 8% декстрина, 5% акароидной смолы [7].
7. \* – 8% декстрин, \*\* – порошок дымный [7].
8. \* – 5% декстрина, 8% акароидной смолы [7].
9. \* – 4,5% декстрина, 7% акароидной смолы [7].
10. Японские сферические звездки: \* – декстрин; \*\* – акароидная смола [7].
11. Японские быстрогорящие сферические звездки. Используются как ядро в многослойных звездках: \* – декстрин [7].
12. Сферические звездки: \* – декстрин; \*\* – борная кислота (сверх 100%) [15].
13. Китайская серебристая звездка: \* – резинокс [21].
14. «Серебристая чешуя» (Китай): \* – резинокс; \*\* – титан [21].

**Табл. 19.22. Смеси для цветопламенных флиртеров: соотношения компонентов для составов 1-5 и 9-12 приведены в частях**

Состав	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
KClO <sub>3</sub>	-	-	-	-	-	13	-	62	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
KClO <sub>4</sub>	-	24	4	14	6	-	47	-	70	64	64	64	20	-	-	5	16	48	30	43	15	50	35
NH <sub>4</sub> ClO <sub>4</sub>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	20	50	50	-	-	-	-	-	-	-	-
Ba(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	2	-	8	-	-	25	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	32	-	-	-	-	50	15
Ba(ClO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> ·H <sub>2</sub> O	4	-	8	-	4	25	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Sr(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	-	12	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	40	-	-	-	-	-	-	-
CuO	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	20	-	-	-	-	14
BaCO <sub>3</sub>	-	-	-	1	1	4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SrCO <sub>3</sub>	-	-	-	-	-	-	20	18	-	-	8	13	-	-	-	-	-	-	20	-	-	-	11
CaCO <sub>3</sub>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	15	14	-	-	-	-	-	-	-	-	-
криолит	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	20	-	11	-
парлон	-	-	-	-	-	-	-	-	-	14	13	10	10	20	20	-	-	-	-	-	-	-	-
малахит	-	-	-	-	-	-	-	-	-	13	5	-	-	-	15	-	-	-	-	-	-	-	-
магний	-	-	-	-	-	-	3	-	-	-	-	-	-	-	-	15	-	-	-	-	-	-	-
алюминий	1	8	6	6	4	19	20	1	-	-	-	-	-	10	10	-	-	-	12	-	-	-	12
титан	-	-	-	-	-	-	-	-	40	-	-	-	15	-	-	20	12	-	-	10	-	-	-
ПАМ	-	-	-	-	-	-	-	-	-	15	15	15	15	-	-	-	20	20	18	20	20	2	12
др. уголь	-	1	1,5	-	-	2	-	-	5	-	-	-	-	-	-	-	2	2	-	-	-	3	-
связка*	1	4	1	3	2,5	12	10	19	4	14	14	15	5	5	5	5	10	5	6	7	5	16	8
прочее**	-	-	2	12	2	-	-	-	30	-	-	-	-	-	-	15	8	5	14	-	10	8	8

1. Зеленый метеор: \* – декстрин [3].
2. Красный метеор: \* – 2 ч. шеллака, 2 ч. декстрина [11].
3. Зеленый метеор: \* – декстрин; \*\* – акароидная смола [11].
4. Синий метеор: \* – 1 ч. декстрина, 2 ч. шеллака; \*\* – 10 ч. парижской зелени, 2% ПВХ [11].
5. «Золотая бабочка»: \* – 2 ч. декстрина, 0,5 ч. шеллака; \*\* – оксалат натрия [11].
6. Зеленая звездка с серебристым шлейфом: \* – 5% декстрина, 7% акароидной смолы [6].
7. Красная звездка с серебристым шлейфом: \* – акароидная смола [6].
8. Красная комета: \* – 13% акароидной смолы, 6% декстрина [15].
9. Желтый стример: \* – декстрин; \*\* – натрия бензоат [15].
10. Синяя комета со звуковым эффектом шипения: \* – 9 ч. акароидной смолы, 5 ч. декстрина. Без добавки ПАМ-а является составом для обычных цветных звездок [15].
11. Фиолетовая комета со звуковым эффектом шипения: \* – 9 ч. акароидной смолы, 5 ч. декстрина. Без добавки ПАМ-а является составом для обычных цветных звездок [15].
12. Красная комета со звуковым эффектом шипения: \* – 10 ч. акароидной смолы, 5 ч. декстрина. Без добавки ПАМ-а является составом для обычных цветных звездок [15].

13. Оранжевая комета: \* – акароидная смола [15].
14. Оранжевая комета: \* – саран [19].
15. Синяя комета: \* – саран [19].
16. Красная бриллиантовая комета: \* – поливинилацетат; \*\* – ПВХ [21].
17. Зеленый китайский состав. Эффект «зеленый кокос»: \* – резинокс; \*\* – шеллак [21].
18. «Синяя жемчужина» (Китай): \* – резинокс; \*\* – сера [21].
19. «Красный кокос» (Китай): \* – резинокс; \*\* – 4% серы, 10% ПВХ [21].
20. «Желтый кокос» (Китай): \* – резинокс [21].
21. «Зеленая жемчужина» (Китай): \* – резинокс; \*\* – 5% шеллака, 5% серы [21].
22. «Желтая жемчужина» (Китай): \* – 11% резинокса, 5% декстрина (св. 100%); \*\* – антимоний [21].
23. «Пурпурный кокос» (Китай): \* – 8% резинокса; \*\* – шеллак [21].

**Табл. 19.23. Смеси для светляков (firefly) 1-4, цинковых звезд (spreader) 5-9, водопадов (waterfall) 10-14**

Состав	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
KNO <sub>3</sub>	49	45	38,5	47,5ч	-	28-30ч	8ч	30	-	-	40	8ч	-	-
KClO <sub>3</sub>	-	-	-	-	15ч	-	-	-	9	3ч	-	-	-	-
KClO <sub>4</sub>	-	-	-	-	-	-	-	-	18	-	-	-	27,5	50
Ba(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	14ч	-	52ч	-	-
NH <sub>4</sub> ClO <sub>4</sub>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	14	-
цинк	-	-	-	-	72ч	80ч	16ч	45	71	-	-	-	-	-
мелкий уголь	29		45	47,5ч	-	8ч	4ч	5	-	-	-	-	-	-
крупный уголь	11	40	-	-	12ч	6ч	-	-	-	-	-	-	-	-
сера	6,5	4,5	6	5ч	-	5ч	-	-	-	-	4	-	-	-
алюминий (18-30 меш)	4,5	4	2	4,6ч	-	-	-	-	-	9ч	49	41ч	-	50
титан	-	-	4,5	7ч	-	-	-	-	-	-	-	-	34,5	-
пороховая мякоть	-	-	-	-	-	-	4ч	15	-	-	-	-	-	-
декстрин	-	-	4	5ч	2ч	2ч	1ч	5	2	-	-	-	-	-
прочее*	-	6,5	-	-	12ч	-	-	-	-	-	7	0,5ч	24	-

1. Замешивается на клейстере из пшеничной муки [7].
2. Замешивается на клейстере из пшеничной муки; \* – BaSO<sub>4</sub> или SrSO<sub>4</sub> [10].
3. Используется титановый порошок в виде чешуек 20-40 меш [7].
4. Состав из книги Ланкастера [6].
5. Классический цинковый состав; \* – дихромат калия [3].
6. «Granite star». Используется в виде квадратных звезд со стороной 3/8 дюйма [3].
7. Жемчужный «spreader» [11].
8. Классический цинковый состав [7].
9. «Electric spreader» [7].
10. Чешский рецепт водопада. Содержит 6 ч. порошка алюминия и 3 ч. чешуйчатого алюминия [12].
11. \* – 6% декстрина, 1% борной к-ты. Используется чешуйчатый алюминий крупной фракции [10].
12. Содержит 22 ч. алюминия «dark pyro», 14 ч. чешуйчатого размером 5-30 меш. и 5 ч. чешуйчатого 30-80 меш. Возможны вариации состава с добавкой 3% пороховой мякоти (ПМ). \* – борная кислота. Смесь набивается в бумажные гильзы в слегка увлажненном состоянии [6].
13. Английский состав. В качестве связующего используется композиция из 5 ч. меламина, 5 ч. параформа и 14 ч. воды. После смешивания и формования пиротехнических элементов образуется меламино-формальдегидный самоотверждаемый композит [62].
14. Алюминий: 25% bright, 12,5% flitter (30-80 меш), 12,5% flitter (5-30 меш) [13].

**Табл. 19.24. Смеси для форсов. Соотношения компонентов для составов 1-13 приведены в частях**

Состав	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
$KNO_3$	8	8	2	-	7	-	-	10	46	14	4	16	1	-	-	10	5	13
оксалат Na	-	-	-	-	-	6	6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
древесный уголь	-	-	1	1	2	-	-	1	16	3	1	8	-	12	-	12	-	-
сера	3	4	1	-	-	-	-	2	19	4	1	3	1	-	-	4	5	13
гранулированный ДП	-	-	-	-	-	-	-	6	24	8	5	8	-	-	-	-	-	37
пороховая мякоть	2	3	6	4	8	40	40	6	-	-	10	8	2	88	70	74	65	37
антимоний	1	2	-	-	-	8	9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
алюминий	-	-	-	-	-	4	-	-	-	-	-	3	-	-	-	-	-	-
сталь	-	-	1	2	5	-	-	-	-	6	6	-	-	-	30	-	-	-
Fe или чугун	-	-	-	-	-	-	-	-	30	-	-	-	-	-	-	-	25	-
звездки	-	-	-	-	5	-	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
декстрин	-	-	-	-	-	-	4	-	8	-	-	-	-	-	-	-	-	-

- 1-4. Обыкновенные форсы [3].
5. Форс со звездками [3].
6. Золотистый форс [3].
7. Золотистый форс со звездками [3].
8. Форсовый состав для огненных колес [3].
9. Форсовый состав для огненных колес. Используются чугунные опилки [3].
- 10-13. Форсовые составы для солнечных колес (pinwheels), рекомендованные Вейнгардом [3].
- 14-15. Составы для небольших форсов диаметром 12-16 мм в движителях [6].
- 16-17. Составы для крупных форсов диаметром до 40 мм в движителях [6].
18. Динамический состав для солнечных колес. Может содержать до 12% чешуйчатого алюминия [6].

**Табл. 19.25. Смеси для форсов (продолжение)**

Состав	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
$KNO_3$	23	15	54	52	52	31	53	17	52	-	55	52	-
$Ba(NO_3)_2$	-	-	-	-	-	-	-	35	-	-	-	-	-
древесный уголь	7	9	2	13	13	23	16	-	10	-	-	-	-
сера	6	7	24	9	9	4	10	11	7	-	20	23,7	-
пороховая мякоть	55	60	8	-	-	42	-	-	67	-	7,4	70-93	-
антимоний	-	-	-	-	-	-	-	-	14	17	5	-	-
алюминий	-	-	-	-	-	-	-	37	7	9	-	-	5-23
сталь	-	-	-	26	-	-	-	-	-	-	-	-	-
сажа	-	-	4	-	-	-	-	-	-	20	9,5	-	-
титан	9	9	-	-	26	-	-	-	-	-	-	-	-
силицид кальция	-	-	-	-	-	-	16	-	-	-	-	-	-
реальгар	-	-	8	-	-	-	-	-	-	-	7,4	-	-
$BaCO_3$	-	-	-	-	-	-	-	-	10	-	-	-	-
прочее*	-	-	-	-	-	-	5	-	-	7	-	-	3,5-5

1. Состав для небольших движителей [6].
2. Состав для крупных движителей [6].
3. Состав для традиционного английского фейерверка «Flower Pot» [6].
- 4-6. Обыкновенные форсы [7].
7. Конический фонтан: \* – декстрин [7].

8. Серебристый фонтан типа форса. Используется смесь алюминиевых порошков сорта dark, bright и flitter [7].
9. Фонтан типа «белый флиттер» [7].
10. Фонтан типа «золотистый флиттер»: \* – оксалат натрия [7].
- 11 - 12. «Flower Pot» [7].
13. Искристо-форсовый состав для снаряжения летающих игрушек: \* – 1,5-4,5% идитола, 0,5-2,5 % нитропленки. Нитропленка не растворима в спирте, а идитол растворим, одновременное применение этих двух связующих позволяет обеспечить хорошее гранулообразование состава для последующего прессования [47].

**Табл. 19.26. Смеси для традиционных фонтанов на основе компонентов дымного пороха**

Состав	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
$KNO_3$	5	72	40	44	27	55	7	5	-	28	-	-	-	45	32	23	26	50	40	55	-	1
$Ba(NO_3)_2$	-	-	-	-	-	-	-	45	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5	-	-
оксалат Na	-	-	-	-	-	-	-	-	10	-	-	-	14	-	-	-	-	-	-	-	-	-
др. уголь	-	20	8	8	9	-	7	-	-	-	8	-	10	9	-	-	-	15	20	10	15	16
сера	-	8	8	9	14	25	-	-	-	27	-	-	7	6	16	9	5	-	-	10	-	-
ПМ	-	-	16	9	40	-	72	5	68	38	67	76	42	15	32	45	43	-	-	-	45	47
антимоний	-	-	-	-	-	-	-	-	14	-	-	8	20	-	-	-	-	-	-	-	-	-
алюминий	-	-	4	-	-	-	14	45	7	-	25	6	7	5	-	-	-	-	-	10	-	-
сажа	-	-	-	-	-	14	-	-	-	-	-	-	-	12	-	-	-	-	-	-	-	-
чугун или Fe	1	-	24	30	-	-	-	-	-	-	-	-	-	8	20	-	-	15	15	-	-	-
титан	-	-	-	-	10	-	-	-	-	7	-	-	-	-	-	-	-	-	15	-	40	32
ПАМ	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	10	-	-	-	-
нитрогуанидин	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	6	10	-	-	-
$SrCO_3$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
$BaCO_3$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5	-	-
прочее*	1	-	-	-	-	6	-	-	1	-	-	-	-	-	-	23	26	4	-	5	-	4

1. Смесь для крупных фонтанов: \* – декстрин. Соотношение компонентов в частях [3].
- 2 - 5. Смесь для фонтанов внутренним диаметром 18-75 мм [6].
6. Смесь для фонтанов «Zodiac» и «Orion»: \* – реальгар [6].
7. Фонтан с алюминием. Используется 7% алюминия dark pyro и 7% 80/120 меш [6].
8. Фонтан с алюминием и нитратом бария. Смесь развивает высокую температуру и поэтому требует наличия жаростойкого корпуса [6].
9. Фонтан с эффектом желтый «glitter». Вариант с серебристым эффектом вместо оксалата натрия содержит карбонат бария и оксалат стронция. Алюминий используется чешуйчатый и сферический 120 меш: \* – борная кислота [6].
- 10 - 14. Бессопловой фонтан по типу «форса» [6].
15. Чешский состав [20].
16. Чешский состав с фиолетовыми искрами: \* – цинк [20].
17. Чешский состав с зелеными искрами: \* – медь [20].
18. Отечественный состав: \* – идитол. Вместо ПАМ-а может содержать порошок титана [48].
19. Отечественный состав [49].
20. Американский состав: \* –  $Fe_2O_3$ . Фонтан с эффектом «глиттер» [13].
21. Американский состав [50].
22. Американский состав: \* – акароидная смола [50].

Табл. 19.27. Смесы для фонтанов

Состав	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
ПХА	-	36ч	50-60	56-58	12,5ч	11-22	41	-	-	-	-	-	-	-	-
нитрат аммония	-	-	-	-	-	-	19	-	-	-	82,6	78ч	-	-	-
$KNO_3$	15	-	-	-	-	30-47	-	29	-	9-21	-	-	-	-	-
$KClO_4$	-	-	-	-	-	-	-	28	-	-	-	-	-	10	38
$Ba(NO_3)_2$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	20
пироксилиновая основа	-	-	-	-	33,6ч	1-3	-	0,05	86	27-54	-	-	-	70	-
баллиститная основа	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	93-82	-	-
алюминий	-	6ч	18-28	20	-	8-18	-	-	-	22-42	-	20ч	-	-	12
титан	70	-	-	-	6,5ч	-	18	6	10	-	4,3	-	6-12	20	-
магний	-	-	0-5	4-5	-	2-8	-	14	2	7-11	-	-	-	-	-
ПАМ	-	-	-	-	-	-	-	2,95	-	-	-	-	-	-	20
чугун	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2,5	-	-	-	-
уротропин	-	-	12-16	8-10	-	-	16	-	-	-	4,1	-	-	-	-
уголь активный	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	6,5	12ч	-	-	-
нитрогуанидин	-	-	-	-	25ч	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
малахит	-	-	-	-	3,3ч	-	6	-	-	-	-	-	-	-	-
милори	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	10ч	-	-	-
связующее*	15	18ч	6-10	3-7	1,2ч	6-15	-	4	-	-	-	-	-	-	-
прочее**	-	2ч	-	-	5ч	7-19	-	16	2	3-5	-	-	-	1-6	10

- Отечественный состав: \* – нитролак [51].
- Английский состав: \* – мочевиноформальдегидная смола; \*\* – оксалат стронция [52].
- Отечественный состав: \* – идитол. Вместо алюминия может использоваться сталь, чугун или ПАМ [53].
- Отечественный состав. Вместо алюминия может быть использован порошок стали: \* – идитол [26].
- Американский малодымный состав с пурпурным цветом пламени: \* – поливиниловый спирт; \*\* – карбонат стронция [54].
- Искристо-пламенные смеси с различным цветом пламени: \* – сополимер ВА-15; \*\* – ферросилиций. Вместо  $KNO_3$  могут быть использованы нитраты Na, Ba и Sr [55].
- Отечественная смесь на базе двойного окислителя [56].
- Смесь розового огня с повышенной скоростью горения: \* – идитол; \*\* – бензоат калия [57].
- Настольный фонтан. Частицы титана создают протяженную зону тепловыделения, в которой происходит горение частиц магния, сопровождающееся его диспергированием, формируя дополнительный сноп искр: \*\* – масло индустриальное [58].
- Состав для настольных фонтанов: \*\* – 1-2% ферроцена, 1,5-2,5% графита, 0,4-0,6% масла индустриального [59].
- Состав для настольных фонтанов [60].
- Отечественный состав, отличающийся безопасностью в обращении, зрелищностью и пониженной дымностью. При использовании фонтана на открытом воздухе, милори можно заменить дихроматом калия или аммония. При замене алюминия порошком титана улучшается зрелищность фейерверка [18].
- Искристо-пламенный состав желтого свечения: \*\* – криолит. Чистота цвета пламени 96,9% [61].
- Современный китайский настольный фонтан [75].
- Современный китайский фонтан с зеленым пламенем: \*\* – ПВХ [75].

**Табл. 19.28. Смеси для искристых свечей («sparklers», в отечественной пиротехнике – бенгальские огни). Соотношения компонентов для составов 1-12 приведены в частях**

Состав	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
KNO <sub>3</sub>	64	64	-	-	-	-	-	-	-	-	-	8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Ba(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	30	-	6	48	48	-	-	-	-	-	-	4	-	50	-	-	70	-	-	50	55	55	55	58
Sr(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	-	-	-	-	-	-	5	6	16	-	-	-	-	-	64	60	-	30	-	-	-	-	-	-
KClO <sub>4</sub>	-	3	16	-	-	6	-	-	-	-	10	-	30	-	-	-	-	-	45	20	10	10	-	-
KClO <sub>3</sub>	-	-	-	-	-	-	2	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
др. уголь	16	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2	-	0,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
серы	16	18	4	-	-	-	-	-	-	-	-	2	-	-	-	-	-	-	-	-	11	20	-	-
Al	-	-	4	-	-	-	6	-	24	-	1	10	-	20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Al пудра	9	6	6	7	7	1	-	-	-	-	7	-	-	8	-	-	-	4,4	-	-	-	-	10	10
ПАМ	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	16	15	15	15	-	-
магний	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	10	8	7	-	-	-	-	-	-	-
сталь	-	-	-	-	9	12	-	-	-	-	-	-	-	30	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
железо	-	-	-	24	18	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	10	11	35	-	-	-	-	28	24
связка*	16	4	4	12	12	2	1	1	7	3	3	2	20	10	10	2,5	2	10,3	6	7	+	+	7	8
прочее**	16	5	-	2	2	-	-	-	-	16	-	2	40	1,5	6	17,5	9	13,3	25	-	9	-	-	-

1. \* – Декстрин; \*\* – антимоний [3].
2. Бенгальский огонь с лиловым пламенем: \* – акароидная смола; \*\* – сажа. Дополнительно вводится связующее, известное под названием «черный воск», получаемое сплавлением 3-х фунтов канифоли с 1 галлоном битума [3].
3. Бенгальский огонь с белым пламенем: \* – акароидная смола. Дополнительно вводится «черный воск» [3].
4. \* – Декстрин; \*\* – MnO<sub>2</sub> [3].
5. \* – Декстрин; \*\* – 1 ч. MnO<sub>2</sub>, 1 ч. – глюкозы [3].
6. \* – Декстрин [3].
7. Wire dip красного пламени: \* – шеллак [3].
8. Fine strip красного пламени: \* – шеллак [3].
9. Wire dip красного пламени: \* – 4% акароидной смолы, 3% декстрина [3].
10. Fire strip зеленого пламени: \* – шеллак; \*\* – хлорат бария [3].
11. Fire strip белого пламени: \* – декстрин [3].
12. Splitter: \* – декстрин; \*\* – сурьма [11].
13. \* – Акароидная смола; \*\* – окись железа [6].
14. \* – Декстрин; \*\* – борная кислота [6].
15. Красное пламя: \* – шеллак; \*\* – каломель [63].
16. Искристый состав красного пламени: \* – декстрин; \*\* – 16% ХПВХ, 1,5% дихромата калия [64].
17. Искристый состав зеленого пламени: \* – декстрин; \*\* – 8% ХПВХ, 1% дихромата калия [64].
18. Искристый состав красного пламени: \* – смесь нитроцеллюлозы и эпоксидной смолы; \*\* – 7% уротропина, 6,3% хлорида стронция [65].
19. Красное пламя: \* – resinox; \*\* – карбонат стронция. Также содержат 8% спирта [66].
20. Зеленое пламя: \* – resinox. Также содержат 8% спирта [66].
21. Желтое пламя: \* – пшеничная мука на воде 1:11 св. 100% до состояния пасты; \*\* – криолит [66].
22. Серебристые искры: \* – пшеничная мука на воде 1:11 св. 100% до состояния пасты [66].
23. Золотистые искры: \* – resinox [66].
24. Современный китайский состав: \* – resinox [75].

Табл. 19.29. Фейерверочные искристые свечи «Senko Hanabi» [6, 10]

Состав	1	2	3	4	5	6
нитрат калия	50	61	36	48	59	60ч
сера	34	24	22	34	24	27ч
ламповая сажа	-	15	7	12	14	4ч
уголь павловский	8	-	35	-	3	-
сосновый уголь	8	-	-	6	-	8ч
антрацен	-	-	-	-	-	3ч

#### 19.4. Прочие пиротехнические эффекты развлекательного характера

В данном разделе рассмотрены составы для снаряжения различных пиротехнических игрушек:

- Ударные составы для хлопушек и пистонов. Базируются на основе хлората калия/фосфор. Издавна известны под названием «смеси Армстронга» [8]. Чрезвычайно чувствительны к удару и трению. При легком ударном воздействии взрываются с громким звуком. Смеси Армстронга пытались применять для ударного воспламенения в капсюлях к патронам ручного стрелкового оружия, однако из-за высокой чувствительности, низкой надежности и оржавляющему действию на ствол оружия практического применения они так и не нашли. Единственная сохранившаяся область применения этих составов — хлопушки и пистоны к игрушечным моделям оружия. Стехиометрическая смесь красного фосфора с хлоратом калия настолько нестабильна, что взрывается даже от надавливания резиновой пробкой. Большинство профессиональных пиротехников считают ее самой чувствительной из известных пиротехнических смесей. Составы, содержащие одновременно красный фосфор и хлорат калия, нельзя готовить сухим способом, т.к. при этом происходит взрыв. Поэтому для возможности практического применения часть фосфора заменяют другими менее активными горючими, а для формирования монолитного заряда добавляют связующее, разведенное водой. Для смешения сначала готовят декстриновый или гуммиарабиковый клейстер из хлората калия и других компонентов и только потом в смесь, доведенную до состояния сметаны средней густоты, вносят красный фосфор. Затем каплю помещают на картонный кружок или бумажную подложку и сушат.

Табл. 19.30. Ударные составы для пистонов

Состав	1	2	3	4	5	6	7
$\text{KClO}_3$	75	56	39	60	43	68	67,5-80,6
красный фосфор	8	-	19	8	-	6	12,3-8,0
сера	-	13	-	32	-	25	8,9-5,7
антимоний	15	27	-	-	26	-	-
алюминий	-	-	-	-	31	-	-
декстрин	2	-	-	+	+	1	-
окись свинца	-	-	39	-	-	-	-
прочее*	-	6	3	-	-	-	11,3-6,7

1. Отечественный состав для пистонов и пробок к пугачам, используется до сих пор [1].
  2. Отечественный состав для пробок к пугачам: \* – 4% древесного угля и 2% гуммиарабика [1].
  3. Отечественный состав для пистонов: \* – смола [1].
  4. Английский состав [5].
  5. Известен в Японии под названием «вспышка грома», т.к. взрыв этого состава сопровождается яркой вспышкой [10].
  6. Японский состав [10].
  7. Немецкий состав, оптимизированный для использования в накольных КВ для ручных гранат времен Второй мировой войны (замена дефицитных гремучертутных составов): \* – мел [77].
- Составы для снаряжения мини-хлопушек (*cracker balls* или *шарики-хлопушки*), которые срабатывают от удара о твердую поверхность. Обычно их готовят смешиванием в смоченном состоянии небольшого количества гремучего серебра с минеральной основой типа песка и/или гипса. Состав во влажном состоянии заворачивают в специальную бумагу и сушат, получая небольшой шарик. При метании о твердую поверхность он разрывается с треском. Такие хлопушки популярны в странах Латинской Америки, например в Бразилии. В Японии их издавна изготавливают из смеси хлората калия с реальгаром 2:1 и с добавкой крупного песка [1, 6, 10].
  - «Змеи». Фейерверк, при сжигании которого формируется длинный «хвост» из пористого шлака. Шлак вытягивается в длинное образование, похожее на извивающуюся змею, в 50 и более раз превосходящее длину начального заряда. Небольшие фейерверки, выделяющие шлак светлого цвета, еще называют «*фараоновыми змеями*». Впервые были открыты Берцелиусом и Веллером в 1821 году. Смесь состоит из тиоцианата двухвалентной ртути с добавкой небольшого количества нитрата калия и аравийской камеди. Ее запрессовывают в таблетки, которые сгорают синим пламенем, с образованием ленты светло-оранжевого цвета снаружи и серой изнутри. Продукты сгорания этой композиции весьма токсичны из-за наличия соединений ртути. Более крупные «змеи» изготавливают с использованием особой смолы, образующейся как остаток при дистилляции нафтола. Согласно Дэвису, вместо нафтоловой смолы пригодна смесь кровельного битума с сирийским асфальтом. Смолу смешивают с льняным маслом и особым образом обрабатывают концентрированной азотной кислотой. Образующаяся т.н. «нитрованная смола» отделяется в виде хрупкой массы, перемалывается в порошок, промывается водой и тщательно просушивается.

Shimizu приводит следующие композиции:

«Нитрованная смола» – 75%, перхлорат аммония – 25% (прессуется от руки).

«Нитрованная смола» – 72%, перхлорат аммония – 28%, рисовый декстрин – 2% св. 100% (прессуется пресс-автоматом) [3, 6].

- «Снежный конус» – изделие в виде конуса, наполненное смесью из 40-50% магния, 5-10% нитрата калия и около 40% муки или древесных опилок. При воспламенении она образует большое количество оксида магния в виде хлопьев, которое увлекается горячим воздухом, а потом падает подобно снегу [6].

- При воспламенении дихромата аммония можно получить эффект «вулкан». В этом эффекте навеска дихромата аммония начинает выбрасывать раскаленный оксид трехвалентного хрома, который имитирует «пепел вулкана» по реакции:  $(\text{NH}_4)_2\text{Cr}_2\text{O}_7 \rightarrow \text{N}_2 + 4\text{H}_2\text{O} + \text{Cr}_2\text{O}_3$ .
- В сценических эффектах и огненных шоу могут применяться пирофорные вещества. Пирофорные порошки металлов слишком пожароопасны, поэтому в профессиональных эффектах в настоящее время практически не используются. Единственное практическое применение имеет ликоподий – семена растения булавистого плауна. Ликоподий имеет вид легкой желтой пыли и при продувании его через трубку в спиртовое пламя возникает эффект, напоминающий сверкание молнии [1].

## 19.5. Смеси для проведения огненных шоу и изготовления декоративных свечей

### Различают:

- Жидкие композиции, сгорающие окрашенным пламенем за счет кислорода воздуха (спиртовые огни). Издавна используются в различных огненных шоу, пригодны для механического распыления через форсунки. В результате формируется окрашенный столб пламени. Представляют собой легковоспламеняющиеся жидкие горючие с растворенными в них добавками солей-цветообразователей.
- Композиции, из которых изготавливают свечи, подобные парафиновым, медленно сгорающие окрашенным пламенем.

Наилучшим горючим-растворителем для жидких композиций цветного огня является метанол (метиловый спирт).

### Преимуществами метанола являются:

- сравнительная дешевизна;
- высокая растворимость в нем неорганических солей, способных окрашивать пламя;
- способность эффективно образовывать с этими солями летучие комплексы;
- практически бесцветное прозрачное пламя без копоти, которое легко окрашивается.

Серьезным недостатком метанола является очень высокая токсичность, относящая его к сильнодействующим ядовитым веществам (СДЯВ) и вытекающая из этого ограниченная доступность. К тому же вкус метанола очень близок к вкусу обычного этилового спирта, что значительно повышает риск его случайного потребления персоналом, не прошедшим специальный инструктаж.

По этой причине иногда вместо метанола используют этанол [1]. Однако этанол не так эффективен из-за меньшей растворимости окрашивающих добавок, поэтому цвет пламени получается довольно бледным. Этанол особенно пригоден для стационарных огненных шоу, когда используются специальные декоративные

спиртовые лампы. В этом случае фитиль пропитывается окрашивающей пламя солью и опускается в емкость, содержащую этанол.

Кроме того, в состав могут вводиться добавки: доноры хлора (орг. хлор-содержащие растворители), комплексообразователи, усиливающие растворимость окрашивающих добавок, и загустители (в том случае, если нужен горючий гель для формирования надписей). В патенте [67] описан загуститель для спиртовых огней, содержащий дибензилиденсорбитол, эфир целлюлозы и этиленгликоль.

Углеводородные горючие типа бензина или керосина практически не применяются, т.к. их пламя содержит большое количество раскаленных частиц углерода и поэтому окрашивается чрезвычайно трудно.

Кроме классических жидких топлив и парафиновых композиций, могут применяться смеси сжиженных газов с цветопламенными добавками и комплексообразователем. Эти составы пригодны для распыления из специальных устройств. Так, например, в заявке [68], наряду с классическими жидкими смесями, рассматривается композиция из 80% сжиженного пентана, 15% монометилового эфира пропиленгликоля и 5% ацетилацетоната лития.

**В качестве окрашивающих солей для спиртов используют:**

- красный цвет (малиновый) – хлорид стронция;
- алый – хлорид лития;
- желтый цвет – хлорид натрия;
- желто-зеленый – хлорид бария;
- зеленый – борная кислота или более предпочтительно – метилборат;
- синий – сульфат или хлорид меди с хлоросодержащим растворителем;
- голубой – хлорид калия;
- сиреневый – растворимые соли калия, кроме хлорида;
- белый – добавка до 20% скипидара.

### ***Примечание.***

*Хотя в [1] заявлено, что добавка скипидара обеспечивает белый цвет спиртового пламени, в реальности пламя сильно коптит и имеет желтый оттенок.*

Для простейших декоративных ламп с цветным пламенем может быть использован 3% раствор соли-цветообразователя в этиленгликоле [69].

Декоративные настольные свечи окрашенного пламени подобны обычным восковым. Только в состав парафиновой либо этиленгликолевой основы вводят соли, окрашивающие пламя, либо раствором таких солей пропитывают сам фитиль. Этиленгликолевая основа является более предпочтительной для свечей, т.к. дает пламя с малой степенью загрязнения частицами сажи. В качестве окрашивающих солей могут быть использованы как неорганические, так и органические соли (например, стеараты).

1. Красное пламя по патенту [70]: парафин – 150 ч., стеарин – 50 ч., пчелиный воск – 10 ч., нитрат стронция – 7 ч. Синее пламя: парафин – 40 ч., стеарин – 15 ч., сульфат меди (медный купорос) – 1 ч. Желтое пламя: парафин – 156 ч., стеарин – 36 ч., карбонат натрия – 11 ч.

2. По корейскому патенту [71], предложено использование свечной основы, состоящей из суспензии соли-цветообразователя в смеси пропиленгликоля, этилового спирта и стеарина с добавкой сшивающего агента.
3. В патенте [72] предложено использование свечной основы, содержащей 5-30% коллоидного раствора соединения стронция в керосине, 60-90% пропиленгликоля, 5-30% диметилформамида.

## Литература

1. В.М. Солодовников. Пиротехника (Производство и сжигание фейерверков). - М.: Оборонгиз, 1938.
2. Фатеев В.М., Лапин С.М., Давыдова Е.О. Пиротехника. - Киев: Университетское изд-во «Пульсары», 2005.
3. Tenney L. Davis. Chemistry of Powders and Explosives. NY. 1943.
4. Шидловский А.А. Основы пиротехники. - М.: Машиностроение, 1973.
5. Ф.П. Мадьякин. Пиротехнические составы цветных огней. КХТИ им. Кирова. - Казань, 1978.
6. Ronald Lancaster. Fireworks. Principles and Practice. 3rd Edition. Chemical Publishing Co., Inc. New York, N.Y. 1998.
7. A.P. Hardt. Pyrotechnics. Pyrotechnica Publications. 2001.
8. Ellern H. Military and Civilian Pyrotechnics. Chemical Publishing Company Inc. New York. 1968.
9. G.W.Weingart. Pyrotechny. 1947.
10. Takeo Shimizu. Fireworks: the Art, Science and Technique. Pyrotechnica Publication. 1981.
11. Westech Fireworks Manual. Westech. 1970.
12. Brebera Stanislav etc. Specialni Technika. I Dil. Гл. ред. Urban Ladislav. Praha 1976.
13. Conkling J.A. Chemistry of Pyrotechnics. Basic Principles and Theory. NY. 1985.
14. M.S. Russel. The Chemistry of Fireworks. 2000.
15. The Best Of AFN II. Edited by Jack & Dorothy Drewes. American Fireworks News. 2001.
16. PATR 2700. Encyclopedia of Explosives and Related Items./ Seymour M. Kaye. Vol 8 - Piccattiny Arsenal Dover, New Jersey, USA - 1978.
17. The Best Of AFN V. Edited by Jack & Dorothy Drewes. American Fireworks News. 2005.
18. Платов Г.А. Пиротехник. Искусство изготовления фейерверков. - М., 2004.
19. The Best Of AFN III. Edited by Jack & Dorothy Drewes. American Fireworks News. 1995.
20. Ucební Podklady. Pro Odbornou Přípravu Odpalovací Ohnostroju. Odborný Institut Specialní Techniky. Policka. CZ. 2000.
21. Материалы Интернет-ресурса [www.pyrotechnika.ruhelp.com](http://www.pyrotechnika.ruhelp.com).
22. K.L. And B.J. Kosanke, and C.Jennings-White. Lecture Notes for Pyrotechnic Chemistry. Journal of Pyrotechnics (1997, pp 162-172).
23. Clive Jennings-White. Strobe Chemistry. Journal of Pyrotechnics. Issue 20, Winter 2004.
24. R. K. Wharton, R. J. Rapley, and J. A. Harding. The Mechanical Sensitiveness of Titanium/Blackpowder Pyrotechnic Compositions. Propellants, Explosives, Pyrotechnics 18,25-28 (1993).
25. R. Winokur. The Pyrotechnic Phenomenon Of Glitter. Pyrotechnica II. 1978.
26. A.V. Belyakov, A.I. Khatsrinov, G.S. Baturova, L.A. Kiprova, E.N. Panferova. Sparking Compositions for Garden Fireworks. Journal of Pyrotechnics. Issue 20. Winter 2004.
27. Пат. DE102005053849 от 2005 г.
28. Пат. US6312537 от 2000 г.
29. Пат. GB881731 от 1957 г.
30. Пат. UA8431 от 2004 г.
31. Пат. UA8429 от 2004 г.
32. Пат. US4377426 от 1980 г.
33. Пат. DE102005053849 от 2005 г.
34. Пат. DE1646316 от 1968 г.
35. А.с. СССР SU390054 от 1971 г.
36. Пат. RU2331619 от 2007 г.
37. Пат. CN100999430 от 2007 г.
38. Пат. US4341573 от 1980 г.
39. Пат. GB2153809 от 1984 г.
40. Пат. DE2164437 от 1971 г.
41. Пат. DE3313521 от 1983 г.
42. Пат. DE4420106 от 1994 г.
43. Пат. SU1820908 от 1991 г.
44. Пат. GB614189 от 1946 г.
45. Пат. US3862865 от 1972 г.
46. Пат. SU1821468 от 1991 г.
47. Пат. RU2176231 от 1999 г.

48. Пат. SU1816748 от 1991 г.
49. Пат. SU1821467 от 1991 г.
50. Пат. US4719856 от 1982 г.
51. А.с. СССР SU390055 от 1971 г.
52. Пат. GB754666 от 1954 г.
53. А.с. СССР 201179 от 1967 г.
54. Пат. US6599379 от 2001 г.
55. Пат. SU1740359 от 1990 г.
56. Пат. RU2170223 от 2000 г.
57. Пат. RU2192406 от 2000 г.
58. Пат. RU2018507 от 1991 г.
59. Пат. RU2379273 от 2008 г.
60. Пат. RU2009131437 от 2009 г.
61. Пат. RU2046119 от 1991 г.
62. Пат. GB1605426 от 1976 г.
63. Пат. GB687790 от 1951 г.
64. Пат. RU2031898 от 1992 г.
65. Пат. SU1833354 от 1991 г.
66. Пат. US6718882 от 2002 г.
67. Пат. US4997457 от 1989 г.
68. Заявка US2003/0009929.
69. Пат. WO9800480 от 1996 г.
70. Пат. CN101050400 от 2007 г.
71. Пат. KR20010001679 от 2001 г.
72. Пат. KR20010001240 от 2001 г.
73. Пат. CN1420109 от 2002 г.
74. Пат. RU2448936 от 2010 г.
75. Tomasz Sałaciński, Waldemar Witkowski, Andrzej Maranda, Stanisław Cudziło, Leszek Szymańczyk, Mateusz Szala. Wpływ składu chemicznego na właściwości niebezpieczne wyrobów pirotechniki widowiskowej. High-Energetic Materials, Volume 2. Institute of Industrial Organic Chemistry. Warszawa, 2010.
76. Micaela Demichela. Self-triggering reaction kinetics between nitrates and aluminium powders. Journal of Hazardous Materials. 148 (2007) 241-252.
77. Basil T Fedoroff etc. Dictionary of Explosives, Ammunition and Weapons (german section) Dover, New Jersey. 1958.

## Глава 20. Звуковые, светозвуковые и имитационные составы

Пиротехнические составы, сжигание которых в корпусах определенной конструкции сопровождается значительным звуковым и световым эффектом, называются светозвуковыми.

### Области применения звуковых и светозвуковых смесей:

- Для создания специальных шумовых эффектов в увеселительных целях (петарды), сигнальных целях (железнодорожные петарды – изделия, снабженные капсулем-воспламенителем и устанавливаемые на ж/д рельсы для подачи сигнала машинисту).
- Создание светоакустических эффектов в фейерверках для усиления эмоционального действия «flash thunder» или «flash report» (вспышка-сигнал), в том числе и с цветной вспышкой (rainbow report).
- Создание светоакустических эффектов с целью оглушения и ослепления противника при штурмовых операциях военными и группами захвата (светошумовые гранаты). Такие боеприпасы формально относят к нелетальному оружию и спецсредствам, хотя в непосредственной близости они могут вызывать тяжелые поражения и травмы.
- Создание светоакустических эффектов с целью относительно безопасной для личного состава имитации выстрелов, разрывов боеприпасов и т.п. на военных учениях, а также с целью дезориентации противника и имитации различных эффектов в кино. Это так называемые «имитационные составы».
- Создание эффекта свиста в увеселительных целях, а также с целью имитации полета снарядов или психологического воздействия на противника (т.н. «свистящие составы»).

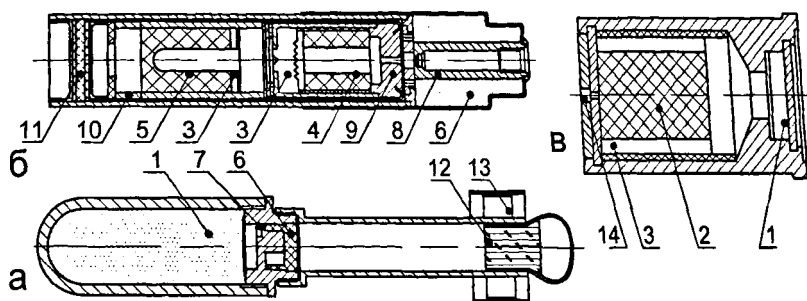
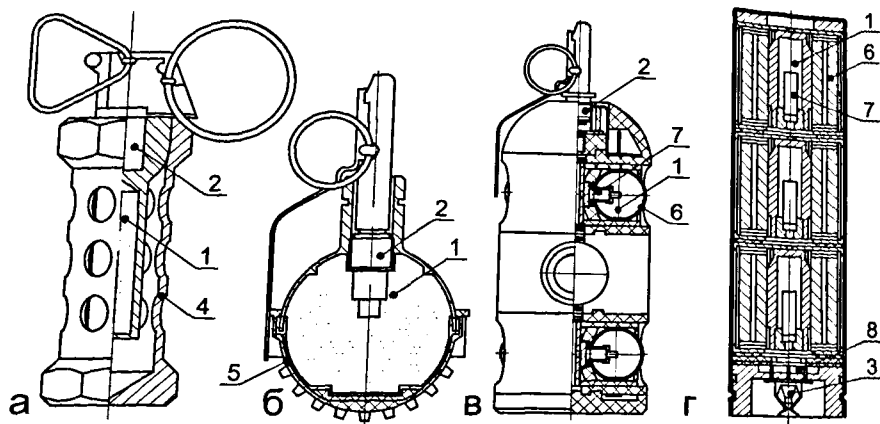


Рис. 20.1. Имитационные изделия [15, 16].

а) – американский имитатор разрыва снаряда в воздухе M27A1B1 (выполнен в виде винтовочной гранаты), б) – чешский имитатор выстрела ПТУР-а SRS-40, в) – американский имитатор выстрела из ПТУР-а TOW, M22 ATWESS.

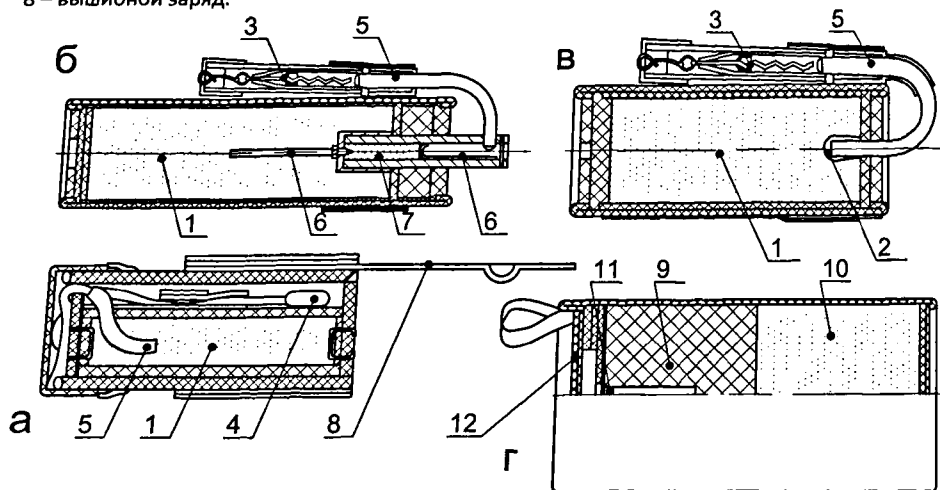
1 – светозвуковой состав, 2 – гранулированный дымовой состав, 3 – воспламенительный состав, 4 – шашка твердого ракетного топлива, 5 – трассирующий состав, 6 – метательный заряд, 7 – замедлитель, 8 – гнездо под воспламенитель, 9 – сопло, 10 – корпус ракеты, 11 – крышка, 12 – пробка, 13 – стабилизатор, 14 – капсуль-воспламенитель.



**Рис. 20.2. Светозумовые гранаты [13, 14].**

а) – ручная светозумовая граната М84 (США). Граната отличается наличием массивного корпуса, который удерживает фрагменты оболочки внутреннего разрывного заряда, б) – светозумовая граната «Заря-2» (Россия), в) – ручная светозумовая граната «Факел» (Россия), г) – 66 мм светозумовая граната М86, отстреливаемая с транспортного средства (США).

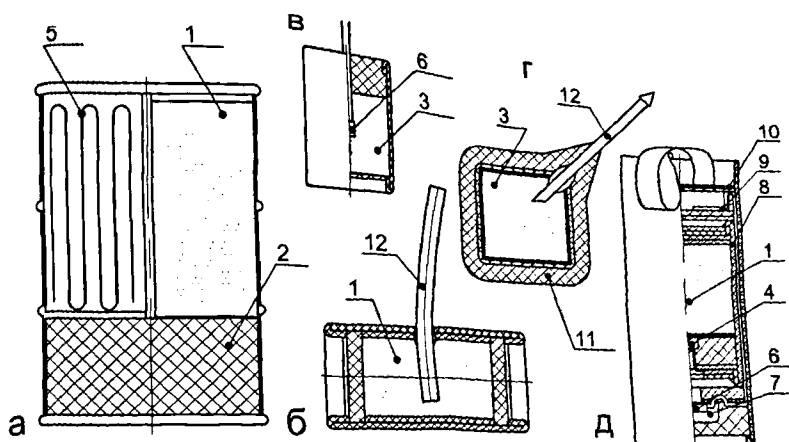
1 – светозумовой пиротехнический заряд, 2 – запал, 3 – электровоспламенитель, 4 – массивный корпус, 5 – резиновая рубашка, 6 – индивидуальные светозумовые заряды, 7 – замедлитель, 8 – вышибной заряд.



**Рис. 20.3. Имитационные изделия [13, 15].**

а) – имитатор мины-ловушки М117 (США), б) – имитатор разрыва снаряда М115А2 (США), в) – имитатор разрыва ручной гранаты М116А (США), г) – отечественный имитационный патрон ИМ-100 (имитация выстрела из 100 мм пушки или 122 мм гаубицы).

1 – светозвуковой состав, 2 – воспламенительный состав, 3 – вытяжной воспламенитель, 4 – терочный воспламенитель, 5 – огнепроводный шнур, 6 – стопин, 7 – свистящий состав, 8 – кронштейн, 9 – заряд тротила, 10 – заряд хлорида аммония, 11 – гнездо под ЭД, 12 – крышка.



**Рис. 20.4. Имитационные изделия [13, 15].**

а) – схема имитатора взрыва тактического ядерного боеприпаса М142, выполненного в корпусе 55-галлонной стальной бочки (США), б) – имитатор выстрела из винтовки М80, содержит 3 г светозвуковой смеси (США), в) – отечественная петарда для отсека и палубы (Россия), г) – устаревший кубический взрывпакет (СССР), д) – имитатор разрыва снаряда в воздухе (Россия).

1 – светозвуковой заряд, 2 – дымовой заряд, 3 – дымный порошок, 4 – замедлительная втулка, 5 – 150 футов кабеля, 6 – электровоспламенитель, 7 – вышибной заряд, 8 – корпус мортирки, 9 – электрический провод, 10 – крышка, 11 – оболочка (гудрон с опилками), 12 – огнепроводный шнур.

## 20.1. Светозвуковые составы

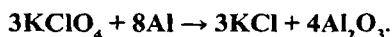
В иностранной литературе пиротехнические композиции, сгорающие со светозвуковым эффектом, называют «flash powders», т.е. буквально – «пороха с эффектом вспышки». В отличие от бризантных и инициирующих взрывчатых веществ, химическое превращение таких составов обычно протекает в режиме быстрого горения (дефлаграции), а не детонации.

При инициировании штатным детонатором светозвуковые составы демонстрируют несколько больший разрушительный эффект, чем при простом огневом инициировании. Несмотря на, казалось бы, низкие параметры светозвуковых смесей по сравнению с действием штатных бризантных ВВ, эффективная имитация действия боеприпасов возможна благодаря эффекту «опрокидывания» фронта, когда волна сжатия воздушной среды переходит в ударную. Этот эффект проявляется для воздушных волн с амплитудой порядка 100 кПа и выше, в результате на больших расстояниях происходит уменьшение разницы давлений на фронте волны для источников с разным темпом энерговыделения. Поэтому на расстояниях в несколько десятков метров и более взрыв светозвукового имитационного средства воспринимается почти так же, как и взрыв аналогичного заряда бризантного ВВ. При этом дробящий эффект у имитационного изделия в непосредственной близости от заряда незначителен по сравнению со взрывом штатного ВВ [1].

**Табл. 20.1. Сравнение чувствительности к удару штатных ВВ и типичных светозвуковых смесей [17]**

Состав	Т вспышки, °С	Трение, Н	Удар, Дж
тротил	295-300	>360	15
гексоген	220-230	120	7,5
ТЭН	202-203	60	3
ПХА	-	>360	25
KClO <sub>4</sub> /Al = 70/30	>360	60	15
KClO <sub>4</sub> /Al = 75/25	>360	120	5
Ba(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> /Al/S = 64/20/16	~240	160	8
Ba(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> /Al/S = 66/25/9	>360	160	6
BaO <sub>2</sub> /Al = 80/20	>360	360	>50

Сгорание простейшей смеси перхлората калия с порошком алюминия можно представить следующим уравнением:



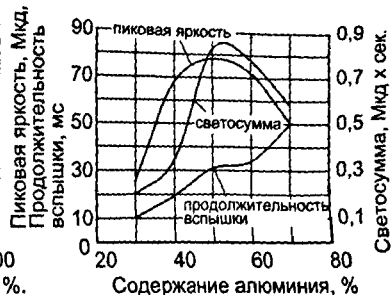
Как видно из уравнения сгорания, газообразные продукты формально отсутствуют, однако – это не совсем верное утверждение. При реальных температурах, характерных для сгорания этого состава, часть компонентов находится в газообразном состоянии. После разрушения оболочки температура падает, продукты сгорания конденсируются в частицы дыма. Локальное возмущение вызывает ударную волну, которая на определенном расстоянии вырождается в звуковую. Простейшей и традиционной композицией для создания шумовых эффектов является обычный гранулированный дымный порошок. Этот состав до сих пор используют в изделиях как гражданского, так и военного назначения. Однако дымный порошок не удовлетворяет современным требованиям по силе звука при разрыве корпуса.

Наиболее эффективной и универсальной с точки зрения максимальных светозвуковых показателей является смесь 30-40% алюминиевого порошка и 70-60% перхлората калия. Ее используют не только в светозвуковых гранатах и имитационных изделиях военного назначения, но и в фейерверках. Процесс протекания взрывной реакции в смесях KClO<sub>4</sub>/Al при инициировании капсюлем-детонатором можно охарактеризовать, как дефлаграцию со скоростью до 1000 м/с [20]. Для успешного светозвукового эффекта такой смеси необходим очень прочный корпус и невысокая степень уплотнения пиротехнического состава [2].

Наиболее быстро в смесях с окислителями сгорает темный пироалюминий марки «dark pyro». Однако его допустимо использовать только в гражданских изделиях, т.к. готовые составы из-за развитой поверхности порошка алюминия плохо хранятся. Зачастую в состав вводят серу, это позволяет добиваться более громкого звука. Впрочем, усиление звукового эффекта за счет введения серы наблюдается лишь для самых доступных сортов алюминия сравнительно грубой фракции: в ряде случаев сера может выступать и как балласт, ухудшая показатели смеси [3, 4].



**Рис. 20.5. Работоспособность двойных смесей ПХК/алюминий в зависимости от содержания ПХК (чувствительность к удару имеет аналогичную зависимость) [18].**



**Рис. 20.6. Световые параметры двойных смесей ПХК/алюминий в зависимости от содержания алюминия [19].**

Находили применение составы на основе хлората калия, которые наиболее эффективны в небольших изделиях. В настоящее время их производство, похоже, прекращено даже в Китае. Недостатками хлоратных смесей являются высокая чувствительность к механическим воздействиям, опасность производства и ограниченный срок хранения. Эти композиции настолько активны, что при огневом инициировании могут воспламеняться с переходом в низкоскоростную детонацию даже в слабых корпусах, что не характерно для составов на перхлоратах и нитратах. Настоятельно не рекомендуется использовать составы на хлоратах по соображениям безопасности. Эти смеси являются причиной большинства несчастных случаев при производстве гражданских пиротехнических изделий [4].

Среди светозвуковых смесей, издавна изготавливаемых пиротехниками-любителями, следует отметить смесь перманганата калия с порошками алюминия или магния, а также смесь свинцового сурика с алюминием (иногда с добавкой серы). Указанные смеси весьма чувствительны к механическим воздействиям, а композиции с перманганатом плохо хранятся. В связи с тем, что изготовление этих составов обычно ведется в кустарных условиях, при недостаточных практических навыках может приводить к несчастным случаям и ожогам. С юридической точки зрения кустарно изготовленные изделия, начиненные светозвуковыми смесями, часто рассматриваются российским законодательством, как самодельные взрывные устройства со всеми вытекающими последствиями.

Известны составы, которые при взрыве не дают вспышки (dark report). Используются в салютах или в изделиях типа кросеттов.

### **Примечание.**

*Имитационные изделия военного назначения не обязательно основаны лишь на пиротехнических смесях. Они могут содержать заряды взрывчатых веществ типа флегматизированного гексогена или тротила и средства взрывания.*

**Табл. 20.2. Светозвуковые смеси для сигнализации, имитационных и светозвуковых изделий. Соотношения компонентов для 1-7 приведены в частях**

Состав	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
KClO <sub>4</sub>	-	-	12	6	32	6	12	50	35	40	57,5	-	64	-	63	-	50	-	-	64	40
KClO <sub>3</sub>	4	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Ba(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	-	-	-	-	-	-	-	-	15	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	6
KNO <sub>3</sub>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	63	-	-	-	53,5	-	-	-
Sr(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	53,7	-	-
др. уголь	1	-	-	-	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
сера	1	-	8	2	-	1	3	-	-	-	-	-	10	-	-	-	-	5	5	8	-
антимоний	-	1	-	3	-	5	9	33	-	-	-	-	3,5	-	-	-	-	-	-	-	-
сахар	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
канифоль	-	-	-	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
магний	-	-	-	-	-	-	-	17	45	34	-	-	-	30	-	75	-	-	-	-	-
алюминий	-	-	-	-	-	-	-	-	26	42,5	9	22,5	-	37	-	48	40	40	20	26	-
графит	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
прочее*	-	-	-	-	-	-	-	-	4	-	-	91	-	7	-	25	2	1,5	1,3	8	28

- 1 - 2. Хлоратные смеси для звуковых ракет (maroons) времен Первой мировой войны. Очень опасны в обращении [8].
- 3 - 5. Перхлоратные смеси для звуковых ракет в период между Первой и Второй мировыми войнами [8].
- 6 - 7. Сравнительно безопасные перхлоратные композиции для железнодорожных петард времен до Второй мировой войны [8].
8. Состав для американского имитатора мины-ловушки M117. Температура вспышки 562°C. Теплота реакции 4,36 МДж/кг [22].
9. Состав для американского имитатора артиллерийской вспышки M110: \* – 3% оксалата бария, 1% оксалата кальция. Температура вспышки 596°C. Теплота реакции 4,35 МДж/кг. Плотность снаряжения 1,19 г/см<sup>3</sup> [22].
10. Состав для американского имитатора действия ручной гранаты M116A1. Температура вспышки 762°C. Плотность снаряжения 1,3 г/см<sup>3</sup>. Критический диаметр детонации около 5 см [22].
11. Состав для американского имитатора разрыва артиллерийского снаряда M115A2 [22].
12. Состав для американского имитатора разрыва зенитных снарядов M74A1 и M74: \* – дымный порох. Температура вспышки 300°C. Теплота реакции 3,56 МДж/кг. Плотность снаряжения 1,09 г/см<sup>3</sup>. Скорость горения на воздухе 11 мм/сек [22].
13. Состав для американского имитатора действия взрывчатого вещества M80. Температура вспышки 360°C. Теплота реакции 3,3 МДж/кг. Плотность снаряжения 1,16 г/см<sup>3</sup>. Скорость горения на воздухе более 100 мм/сек [22].
14. Взрывпакет для отсека и палубы и т.п.: \* – криолит. Индустриальное масло сверх 100% [13].
15. Состав 88-40 для светозвуковых гранат типа «Заря» и прочих изделий. Алюминий: АСД-1 [13].
16. Состав для M22 ATWESS (имитатор выстрела ПТУР «TOW»): \* – 15% ПТФЭ, 10% фторкаучука. Температура вспышки 469°C. Теплота реакции 9,27 МДж/кг. Скорость горения на воздухе 38,4 мм/сек [23].
17. Отечественный состав, предназначен для рыхления мерзлых сыпучих материалов, может использоваться в светозвуковых изделиях: \* – дисульфид молибдена. В отличие от обычных смесей перхлорат калия + алюминий, обладающих высокой чувствительностью к трению (1-2 кл. опасности), данный состав относится к 11 классу опасности [29].
18. «Композиция 604» для замены перхлоратных имитационных смесей: \* – 1% борной кислоты, 0,5% азосила. Используется специальный чешуйчатый алюминий, покрытый графитом [24, 30].

19. «Композиция 603» для замены перхлоратных имитационных смесей. В 2 раза превосходит по светосумме «композицию 604»: \* – 1% борной кислоты, 0,3% азосила. Используется специальный чешуйчатый алюминий, покрытый графитом [24, 30, 40].
20. Звуковая композиция в американском имитаторе ядерного взрыва XM142E1: \* – опилки. Используется темный пироалюминий [9].
21. Отечественный состав для светозвуковых гранат с пониженным дымообразованием: \* – бездымный порох [35].

**Табл. 20.3. Светозвуковые смеси для использования в петардах [3, 4, 5, 39].**

**Соотношения компонентов пп. 1-8 приведены в частях**

Состав	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
KClO <sub>4</sub>	-	-	-	-	6	1	7	-	-	50
KClO <sub>3</sub>	2	3	-	7	-	-	-	-	-	-
Ba(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	-	-	-	-	3	1	-	4	-	-
KNO <sub>3</sub>	-	-	5	-	-	-	-	-	48,7	-
алюминий	1	4	2	1	5	1	5	2	20	20
антимоний	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-
сера	1	3	3	2	-	1	-	1	24,3	30
ПАМ	-	-	-	-	-	-	-	-	7	-

- 1-4. Типичные составы для китайских петард.
- 5-8. Типичные составы для американских петард.
9. снаряжение для небольших современных петард китайского производства.
10. снаряжение для крупных современных петард китайского производства.

### **Примечание.**

*Смеси 3 и 8 являются наиболее безопасными из перечисленных.*

**Табл. 20.4. Светозвуковые «Flash report» смеси для использования в салютах (1-19) и звуковые смеси, практически не дающие вспышки (dark report) 20-24**

Состав	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
KClO <sub>4</sub>	66	70	-	67	63	60	38	-	50	64	72	-	-	45	-	-	55	35	60	69	-	-	-	-
KClO <sub>3</sub>	-	-	-	-	-	-	-	43	-	-	-	30	-	-	44	52	-	-	-	-	50	66	54	64
Ba(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	-	-	68	-	-	-	-	-	-	-	-	-	57	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
алюминий	34	30	-	17	27	25	-	31	23	23	28	10	29	-	44	26	28	10	25	-	-	-	-	-
антимоний	-	-	23	-	-	15	-	-	-	-	-	10	-	-	12	16	7	5	-	50	17	31	27	-
сера	-	-	9	16	10	-	26	27	13	-	-	14	-	-	-	-	-	15	-	-	17	-	-	-
магний	-	-	-	-	-	57	-	-	-	-	-	10	-	-	50	-	-	-	-	-	-	-	-	-
сажа	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
K <sub>2</sub> Fe(CN) <sub>6</sub>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	31	-	-	-	-	9
канифоль	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	15	-
прочее*	-	-	-	-	-	5	-	-	-	-	1	-	5	-	6	10	50	-	-	-	-	-	-	-

- 1-3. Составы, используемые в странах Европы. Алюминий «dark pyro» [3].
- 4-6. Составы, используемые в США [3].
7. Магний флэш: \* – графит [3].
8. Типичная хлоратная композиция. Алюминий: чешуйчатый [5].
- 9-11. Алюминий: чешуйчатый [5].
12. Алюминий «dark pyro»: \* – карбонат бария. Соотношения приведены в частях [6].

13. Алюминий «dark pyro». Одна из самых безопасных композиций подобного типа [4].
14. Флэш с добавкой диоксида калия, повышающего стойкость состава: \* –  $K_2Cr_2O_7$  [4].
15. Эффект розочки «rosette» (гранулированный хлоратный флэш). Связка – пшеничная мука [4].
16. Rosette: \* – декстрин [4].
17. Rosette с применением титановых опилок для повышения зрелищности: \* – титан [4].
18. Японский аналог rosette, с применением ферротитана (эффект «hanarai») : \* – ферротитан [4].
19. Современный китайский состав [39]
20. Обладает пониженной чувствительностью к удару и трению [4].
- 21 – 24. Американские составы [4].

### Примечание.

Композиция 10 в Табл. 20.4 дает наибольшую громкость звука из всех сочетаний перхлората калия, алюминия и серы; композиция 9 является предпочтительной с точки зрения соотношения эффективности и безопасности.

**Табл. 20.5. Светозвуковые смеси с цветной вспышкой для салютов «Rainbow heron». Соотношения компонентов для 1-11 приведены в частях**

Состав	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
$KClO_4$	-	-	1-2	10	-	20	8	1	10	10	30	-	-	54	-	-	30
$KClO_3$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	46	-
$Sr(NO_3)_2$	1	-	-	3	8	-	-	-	65	-	-	-	30	-	-	-	-
$Ba(NO_3)_2$	-	8-10	-	-	-	-	-	-	-	65	-	40	-	-	-	-	20
ПВХ	-	1	-	1	1	1	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
парлон	-	-	-	-	-	-	-	-	14	16	14	-	-	-	-	-	-
$CuO$	-	-	-	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	20
магний	1	8-10	1-2	10	16	20	8	1	36	36	30	-	-	15	-	-	-
парижская зелень	-	-	-	-	8	6	8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
сера	-	-	-	-	-	-	-	-	6	-	10	20	30	-	12,5	5	10
ПАМ	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	40	40	-	-	-	20
алюминий	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	25	23	-
антимоний	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	12,5	10	-
прочее*	-	-	1	-	-	-	-	-	3	7	32	-	-	31	50	16	-

1. Красная вспышка [6].
2. Зеленая вспышка [6].
3. Желтая вспышка: \* – оксалат натрия [6].
- 4 – 5. Фиолетовые вспышки [6].
- 6 – 7. Синие вспышки [6].
8. Белая вспышка [6].
9. Красная вспышка: \* – акароидная смола [7].
10. Зеленая вспышка: \* – акароидная смола [7].
11. Желтая вспышка: \* – 2 ч. акароидной смолы, 30 ч. нитрата натрия [7].
- 12 – 13. Смесь предназначена для изготовления микрозвезд, в качестве связки на 100 г смеси берется 20 г 10% р-ра нитроцеллюлозы в ацетоне [3].
14. Красная вспышка: \* – 11,5% оксалата стронция, 11,5%  $SrCO_3$ , 8% акароидной смолы [4].
15. Зеленая вспышка: \* – хлорат бария [4].
16. Желтая вспышка: \* – криолит [4].
17. Зеленая вспышка [21].

## 20.2. Свистящие составы

Свистящие составы сгорают в бумажных и картонных трубках диаметром 6-20 мм, вызывая звуковые колебания, воспринимаемые, как громкий свист. Смеси, предназначенные для увеселительных целей, запрессовывают в бамбуковые трубки, что еще более эффективно. Частота издаваемого звука, в первую очередь, зависит от длины свободного пространства, остающегося после прессования состава в трубку.

Первые свистящие композиции обычно содержали нитрат калия и различные пикраты, однако, из-за высокой чувствительности к механическим воздействиям и свойства окрашивать органические материалы, они были частично заменены на хлоратные и перхлоратные композиции. В настоящее время находят применение смеси с использованием перхлората калия и специфического горючего типа солей кислот ароматического ряда, например салициловой, бензойной и т.д.

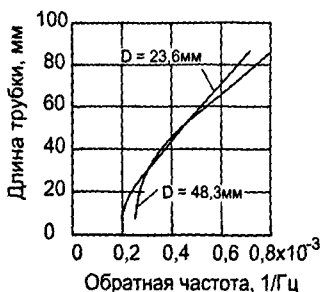


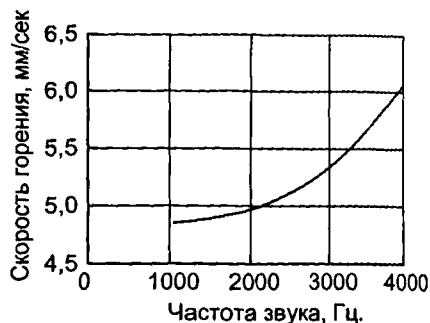
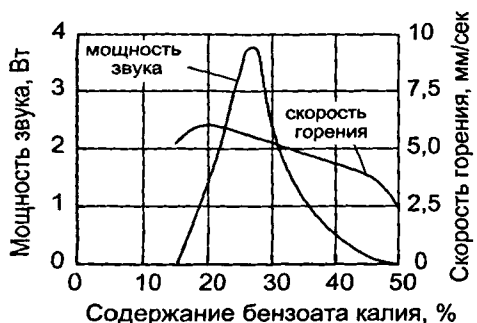
Рис. 20.7. Зависимость частоты звуковых колебаний от длины свободного пространства в свистке [9].

Табл. 20.6. Свистящие составы (whistles)

Состав	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
KClO <sub>4</sub>	-	-	70	-	-	69	59	51-86	24	-	75,2	57	60
KClO <sub>3</sub>	-	75	-	-	73	-	-	-	-	76	-	-	-
KNO <sub>3</sub>	40	-	-	30	-	-	12	-	-	-	-	-	-
пикрат К	60	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
галловая к-та	-	25	-	-	24	-	-	-	-	-	-	-	-
бензоат К	-	-	30	-	-	-	24	10-25	-	-	-	30	40
бензоат Na	-	-	-	-	-	-	-	-	-	20	-	-	-
динитрофенолят К	-	-	-	70	-	-	-	-	-	-	-	-	-
салицилат Na	-	-	-	-	-	28	-	-	14	-	19,8	-	-
металлические опилки	-	-	-	-	-	-	-	2-16	0,34	-	-	10	-
прочее*	-	-	-	-	3	3	5	2-8	-	4	5	3	2

1. Смесь применялась до Второй мировой войны в свистящих ракетах увеселительного характера и в фейерверках. В настоящее время еще находят применение смеси пикрата калия с добавкой до 20% нитрата калия и 3-15% асфальта или стеарина [8].
2. Используется в ряде свистящих фейерверков [8].
3. Английский состав SR-136 времен Второй мировой войны [9, 26].
4. Состав времен Второй мировой войны [9].
5. Состав для снаряжения имитатора мины-ловушки M119: \* — акароидная смола. Стоит отметить, что смесь галловой кислоты с хлоратом калия довольно устойчива, а с перхлоратом калия ее применение недопустимо из-за высокой чувствительности к мех. воздействиям [9, 22].
6. Состав для американского имитатора разрыва артиллерийского снаряда M115A2: \* — акароидная смола. Смеси с салицилатами отличаются пониженной скоростью горения [27].
7. Отечественный состав для сигнала химической тревоги СХТ-40: \* — идитол [13].

8. Свистящий искрофорсовый состав для летающих игрушек: \* – идитол [31].
9. Свистящий искрофорсовый состав для летающих игрушек. Используются титановые опилки [32].
10. \* – 3% петролатума, 1% красной окиси железа [28].
11. \* – 3% парафинового масла, 2% красной окиси железа [28].
12. Китайский состав: \* – резинокс. Металл: титан [21].
13. Английский состав: \* – полистирол сверх 100% [34].



**Рис. 20.8.** Мощность звука и скорость горения составов ПХК/бензоат калия в зависимости от содержания бензоата калия [25].

**Рис. 20.9.** Зависимость скорости горения свистящих составов от частоты звука [25].

### 20.3. Имитационные композиции, применяемые для киносъемок и обучения персонала

1. Состав для создания рассеянных туманов в павильонах: алюминий или магниевый — 50%, хлорат калия — 50% (сжигают предварительно в железных противнях, на дно которых насыпан песок). Порошки должны быть довольно грубо перемолоты и только потом смешаны. При тонком измельчении они превращаются в очень опасный в обращении состав. Воспламенение осуществляют электрозапалом [10].
2. Для имитации дымов и туманов (в том числе и цветных) преимущественно используют нетоксичные дымовые составы на основе хлората калия и хлорида аммония, описанные в соответствующей главе. Изредка применяют металлохлоридные композиции [10].
3. Для имитации разрывов снарядов часто используют заряды дымного пороха, засыпанные хорошо пылящим грунтом. В ряде случаев применяются заряды бризантных взрывчатых веществ типа тротила или аммиачноселитренных ВВ [10].
4. Имитацию взрыва в кино, согласно [11], проводят путем раздельного заряжания хлората калия и смеси тиомочевина/обезжиренный антрацен в полиэтиленовом рукаве. Для этого сначала в рукав засыпают смесь антрацена с тиомочевинной, затем рукав перетягивают веревкой или ниткой, засыпают бертолетову соль, помещают в нее разрывной заряд. После чего завязывают рукав, пропу-

ская провода от электровоспламенителя наружу. Перед применением нитку, которая разделяет вещества, развязывают, перемешивают компоненты руками непосредственно в полиэтиленовом рукаве. Основной состав содержит: хлорат калия – 41%, обезжиренный антрацен – 45%, тиомочевину – 14%. В качестве разрывного состава используют смесь из нитрата калия – 38%, магния МПФ-4 – 35%, криолита – 7%, идитола – 2% (сверх 100%). Хранению такой рукав не подлежит. На 50 г разрывного состава берется 236 г смеси антрацена с тиомочевинной и 164 г хлората калия.

5. Состав для изделий, имитирующих разрывы зенитных боеприпасов при натурных киносъемках [33]: хлорат калия – 46%, нафталин – 38%, тиомочевина – 16%. Состав весьма чувствителен к мех. воздействиям и при инициировании образует облако черного дыма. При отсутствии нафталина можно использовать антрацен, однако сырой антрацен для этого непригоден из-за наличия примесей масел, связывающих состав и замедляющих горение. Удобно применять очищенный кристаллический продукт либо проводить обезжиривание антрацена при помощи бензина.
6. Состав для изделий, имитирующих разрывы зенитных боеприпасов при натурных киносъемках (с выделением белого дыма), также может быть использован для имитации вспышки молнии: 50% нитрата бария и 50% магния МПФ-4 [10].
7. Подрыв и горение военной техники часто имитируется сочетанием бездымного пороха с нафталином (70:30). При воспламенении заряда выброшенный нафталин воспламеняется, образуя клубящееся пламя и черный дым, похожие на эффект сгорания жидких нефтепродуктов [10].
8. Искристые вспышки при съемках фильмов сказочного жанра готовились путем электровоспламенения заряда, состоящего из 60% дымного пороха и 40% чугунных опилок [10].
9. В некоторых случаях при киносъемке могут быть полезны различного рода вспышки [11], так, например, вспышка черного дыма: ПАМ-4 – 16%, магний МПФ-4 – 4%, гексахлорбензол – 60%, политетрафторэтилен – 20%. Осветительная вспышка белого цвета: нитрат калия – 30%, ПАМ-4 – 65%, идитол – 5%. Красная вспышка: хлорат калия – 10%, магний МПФ-4 – 30%, нитрат стронция – 60%.
10. Имитатор парашютных осветительных факелов: нитрат бария – 16 ч., сера – 2,5 ч., пудра алюминиевая – 10 ч., алюминий порошок – 8 ч., связующее (фенольно-резорциновая смола ФР-12 93% + параформ 7%) – 3,5% [11].
11. Эффект фотовспышки для имитации вспышки магния при съемках фотоаппаратами старых конструкций: нитрат бария – 55%, магний МПФ-4 – 45%. Воспламеняется электровоспламенителем [10].
12. Имитация падения горящей кровли (вспышка с образованием большого кол-ва искр). Порох дымный – 60%, магний МПФ-3 – 30%, опилки древесные – 10% [11].

13. Создание искусственных облаков при сжигании навески на земле или отстрела заряда из мортиры: нитрат калия – 30%, МПФ-4 – 70%, идитол – 0,5% сверх 100% [11].

14. Красный факел: нитрат стронция: – 65%, магний – 11%, уротропин – 19%, бороугольный воск – 5%, масло индустриальное (сверх 100%) – 2,5% [11].

**Табл. 20.7. Рецепты составов для фальшфейеров в кинопиротехнике [11]**

Состав	Красный	Желтый	Зеленый	Белый
$\text{Sr}(\text{NO}_3)_2$	60	-	-	-
магний	20	14	15	7,2
гексахлорбензол	10	-	15	-
идитол	10	7	5	12
инд. масло	2 (св. 100%)	1	2 (св. 100%)	2,4
$\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$	-	55	65	52
алюминий (пудра)	-	-	-	14,4
$\text{KNO}_3$	-	-	-	12
криолит	-	23	-	-

15. Для создания фейерверков в кинофильмах могут быть использованы следующие простые составы с тиомочевинной:

**Табл. 20.8. Простейшие фейерверочные составы [11]**

Состав	Красный	Желтый	Зеленый
$\text{Sr}(\text{NO}_3)_2$	40,5	-	-
$\text{NaNO}_3$	-	39	-
$\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$	-	-	42
$\text{KClO}_3$	38,5	38,5	38,5
тиомочевина	11,5	11,5	11,5
шеллак	9,5	11	8

16. Для правдоподобной имитации попадания пули в человека на киносъемках классические имитационные пиротехнические составы непригодны, т.к. их взрыв сопровождается вспышкой, искрами или дымом. Для этих целей обычно применяют малые навески (50-250 мг) чувствительных взрывчатых веществ наподобие перекиси ацетона или гексаметилентрипероксиддиамина, инициируемых электровоспламенителем. Причем реальной альтернативы у этих веществ практически не существует.

17. В имитационном изделии «Очаг пожара», используемом для имитации возгорания на кораблях, применяется состав, содержащий 52%  $\text{Sr}(\text{NO}_3)_2$ , 30% магния, 4% криолита, 4% ПВХ, 10% смолы СФ-340А [12].

18. В американском постановщике ложной цели, отстреливаемом с подлодки, применяется смесь из 79,2% гидрида лития, 19,8% парафина и 1% поверхностно активного вещества. При контакте с водой состав образует облако из пузырей водорода, которое при облучении сонаром имеет тот же порядок магнитуды отраженного сигнала, что и подлодка [36].

19. Для имитации горения дров в декоративных каминах с середины 80-х годов 20 века применяются горючие гели на основе изопропилового спирта и загустителей. Особенностью таких каминов является отсутствие дымохода, поэтому к подобным составам предъявляются повышенные требования по отсутствию дыма, нагара, посторонних запахов и ядовитых продуктов горения. Металлическую банку с гелем помещают в камин за панелью, визуально имитирующей дрова, и инициируют горение. Кроме изопропилового спирта, могут быть использованы этиловый и метиловый спирт. В качестве загустителей распространены этилгидроксизтилцеллюлоза и полиэтиленгликоль. Добавками обычно служат красители и поваренная соль. Соль под воздействием температуры издает треск, имитирующий горение дров. Такие гели известны в США под торговыми марками «Realflame», «Sungel» и др. [37, 38].

## Литература

1. Физика взрыва /Под ред. Л.П. Орленко. Изд. 3-е переработанное, в 2 томах. - М.: Физматлит, 2002.
2. Шидловский А.А. Основы пиротехники. - М.: Машиностроение, 1973.
3. Ronald Lancaster. Fireworks. Principles and Practice. 3rd Edition. Chemical Publishing Co., Inc. New York, N.Y. 1998.
4. A.P. Hardt. Pyrotechnics. Pyrotechnica Publications. 2001.
5. Takeo Shimizu. Fireworks: the Art, Science and Technique. Pyrotechnica Publication. 1981.
6. Westech Fireworks Manual. Westech. 1970.
7. The Best Of AFN V. Edited by Jack & Dorothy Drewes. American Fireworks News. 2005.
8. Tenney L. Davis. Chemistry of Powders and Explosives. NY. 1943.
9. Engineering Design Handbook. Military Pyrotechnics Series. Part Four. Design for Ammunition for Pyrotechnic Effects. US Army Materiel Command. AMCP 706-188. 1974.
10. Лихачев В.А. Пиротехника в кино. - М.: Искусство, 1963.
11. Платов Г.А. Пиротехник. Искусство изготовления фейерверков. - М., 2004.
12. В.Н. Дик. Взрывчатые вещества, пороха и боеприпасы отечественного производства. Ч.1. - Минск: Охотконтракт, 2009.
13. Материалы Интернет-ресурса dzromon.narod.ru.
14. Army Ammunition Data Sheets for Grenades. TM 43-0001-29. Headquarters Department of the Army. Washington, DC, 30 June 1994.
15. Army Ammunition Data Sheets: Military Pyrotechnics. TM 43-0001-37. Headquarters Department of the Army. Washington, DC, 6 January 1994.
16. Pirotechnicke Imitacni Prostredky. Del-27-18. Ministerstvo Narodni Obrany. Praha 1985.
17. U. Krone. Pyrotechnic Flash Compositions. Propellants, Explosives, Pyrotechnics 15, 115-120 (1990).
18. R. Wild, «Blast Waves Produced by a Pyrotechnic Flash Mixture Compared to those Produced by High Explosives», Minutes of the Eighteenth Explosives Safety Seminar, San Antonio, USA, 13. 9. 1978. pp. 727-738.
19. M Bishop. N Davies. The Luminous and Blast Performance of Flash Powders. Proceedings of Twenty-Eighth International Pyrotechnics Seminar. Adelaide, South Australia. 2001.
20. Arno Hahma. On the Deflagration of Aluminium/KClO<sub>4</sub> Mixtures. Propellants, Explosives, Pyrotechnics 21, 100-105 (1996).
21. Материалы Интернет-ресурса www.pirotehnika.ruhelp.com.
22. F. L. McIntyre, R.M. Rindner. A Compilation of Hazard and Test Data for Pyrotechnic Compositions. ARLCD-CR-80047. 1980.
23. L. M. Aikman, T. E. Shook, R. M. Lehr, E. Robinson, F. McIntyre. Improved Mixing, Granulation and Drying of Highly Energetic Pyromixtures. Propellants, Explosives, Pyrotechnics 12, 17-25 (1987).
24. Gary Chen, Mark Motyka, James Wejsa. Perchlorate Free Pyrotechnic Composition and its Application in M115A2 Ground Burst Simulator and M116A1 Hand Grenade Simulator. Proceedings of the Thirty-Third International Pyrotechnics Seminar. July 16-21. 2006.
25. Matthew L. Davies. A Review of the Chemistry and Dynamics of Pyrotechnic Whistles. Journal of Pyrotechnics, Issue 21, Summer 2005.

26. D. J. Whelan and R. P. Ellischer. Potassium Benzoate for Pyrotechnic Whistling Compositions. Propellants, Explosives, Pyrotechnics 9,45-47 (1984).
27. MIDAS database 2007.
28. Selcuk Oztap. The Pyrotechnic Whistle and its Application. Pyrotechnica XI. June 1987.
29. Pat. RU2018506 ot 1991 r.
30. Pat. US7578895 ot 2005 r.
31. Pat. RU2305675 ot 2006 r.
32. Pat. US3712223 ot 1970 r.
33. A.e. CCCP 199728 ot 1966 r.
34. B. Cook. Novel Powder Fuel For Firework Display Rocket Motors. Proceedings of the Twenty-First International Pyrotechnics Seminar. September. 11-15. 1995.
35. Pat. RU2426714 ot 2009 r.
36. Technical Manual. Ordnance Data for Toxic Hazards Associated with Pyrotechnic Items. NAVSEA SW050-AC-ORD-010. 2005.
37. Pat. US4575379 ot 1984 r.
38. Pat. US5584283 ot 1993 r.
39. Tomasz Sałaciński, Waldemar Witkowski, Andrzej Maranda, Stanisław Cudziło, Leszek Szymańczyk, Mateusz Szala. Wpływ składu chemicznego na właściwości niebezpieczne wyrobów pirotechniki widowiskowej. High-Energetic Materials. Volume 2. Institute of Industrial Organic Chemistry. Warszawa, 2010.
40. Pat. US8161883 ot 2010 r.

# Предметный указатель (кириллица)

## А

агент CN 336  
агент CR 336  
агент CS 336  
агент DM 337  
адамсит 337  
азокрасители 92  
азопентон 81  
алюминий 61  
аммоний хлористый 99  
аммония дихромат 102  
аммония нитрат 50  
аммония перхлорат 52  
антимоний 69  
антрацен 99  
арабийская камедь 78  
асфальтит 78  
аэрозольный генератор 346

## Б

бария карбонат 86  
бария нитрат 48  
бария оксалат 85  
бария перекись 54  
бария хлорат 54  
бария хромат 57  
BBB 9  
бенгальские огни 416, 443  
бензоаты 84  
берлинская лазурь 102  
бертолетова соль 53  
бихроматы 46  
бор 72  
борная кислота 98  
бризантные взрывчатые вещества 9, 46  
бурак 414  
бурак простой 414

## В

ВА-15 395  
взвешивание 141  
взрывпакеты 40, 415  
висмута окись 56  
висмута хромат оксид 58  
водопады 442  
водяная мортара 416  
водяной фонтан 416  
вольфрам 68  
воспламенение 17, 104  
вспышка-сигнал 459  
выход льдообразующих ядер 344

## Г

гающая концентрация 347  
ГГС 12  
гейзеры 443

гексаметиленetetрамин 73  
гексахлоран 90  
гексахлорбензол 89  
гексахлорэтан 89  
гигроскопичность 120  
гильсонит 78  
глиттер 441  
горение 14, 18, 104  
горючие 59  
грануляция 141  
графит 71  
греческий огонь 21, 210  
гуанидина нитрат 51  
гуаровая камедь 78  
ГХБ 89  
ГХЦГ 90  
ГХЭ 89

## Д

ДБФ 83  
двойные смеси 124  
декстрин 77  
детонация 19  
дефлаграция 20  
дехлоран 89  
диатомит 101  
дибутилфталат 83  
дифференциально-термический анализ 117  
дициандиамид 74  
доноры хлора 88  
доработка 144  
древесный уголь 70  
дробление 138  
ДТА 117  
дукер 416  
ДЦДА 74  
дымозажигательные боеприпасы 227, 309  
дымообразователи 97  
дымообразующая способность 295

## Ж

жаворонки 414  
железа трехокись 55  
железная окалина 55  
железнодорожные петарды 459  
железо 67  
жидкие углеводороды 60

## З

загущенные зажигательные смеси 226  
зажигание 18  
звездки гранитные 442  
звездки корпусные 419  
звездки круглые 419  
звездки круглые сложные 419  
звездки кубические 418  
звездки прессовые 418

звездки серебристые 441  
звездки фейерверочные 418  
звездки цинковые 442  
звездки экструзируемые 419

## И

ИВВ 9  
идитол 80  
измельчение 139  
изумрудная зелень 87  
имитационные составы 459  
импульс давления 270  
инициирующие взрывчатые вещества 9  
ирританты 335  
искрение форсовое 437  
искрение шлаковое 437  
искристые свечи 416, 443  
искрообразователи 438  
искры 437  
история пиротехники 20

## К

калия дихромат 58  
калия нитрат 47  
калия перманганат 58  
калия перхлорат 52  
калия хлорат 53  
каломель 92  
кальция карбонат 86  
кальция оксалат 86  
кальция резинат 79  
кальция силицид 68  
кальция фосфид 100  
канифоль 79  
капсюли-воспламенители 148  
карбонаты 84  
катализаторы 97  
квекаръ 416  
кизельгур 101  
китайское колесо 417  
классификация пиротехнических составов 11  
классы опасности пиротехнических изделий 27  
коктейль Молотова 216  
кометы 418  
контроль качества 144  
контурная свеча 415  
красители 92, 322  
красители антрахиноновые 92  
красители ксантроновые 93  
крахмал 75  
кремний 68  
криолит 87  
критический диаметр горения 194  
кроссеты 440

## Л

лактоза 75  
ламинак 80  
ланс 415

ликоподий 455  
литьевые композиции 395  
литые заряды 143  
ложные тепловые цели 366  
ЛТЦ 366  
люсткугель 414  
люсткугель цилиндрический 414

## М

магналий 63  
магний 60  
магния карбонат 98  
магния оксид 101  
малахит 87  
марганец 67  
марганца двуокись 55  
маскирующая способность 295  
масло индустриальное 101  
МГП 195  
МГС 189  
меди I сульфид 87  
меди закись 57  
меди карбонат основной 87  
меди окись 57  
медь 88  
мел 86  
металлы активные 59  
металлы малоактивные 60  
метеоры 418  
микрокапсулирование 139  
милори 102  
мишени-ловушки 366  
молибден 67  
мортира 414  
мышьяка сульфид 70

## Н

набивка 143  
напалм 215  
напалм Б 218  
натрия азид 101  
натрия гексафтороалюминат 87  
натрия нитрат 47  
натрия оксалат 85  
нафталин 100  
нашатырь 99  
неметаллы 60  
нитраты 45  
нитроцеллюлоза 82  
НЦ 82

## О

огневые мешки 216  
огненное колесо 415  
окислители 44  
оксалаты 84  
оксиды металлов 46  
олифа 77  
ОП-2 216

оп-3 217  
органические горючие 60  
офорит 211

## П

ПАМ 63  
парафин 98  
параформ 73  
парижская зелень 87  
парлон 91  
пассивация 61, 122, 139  
ПВХ 90  
пентаэритрит 100  
пероксиды 45  
перхлораты 45  
петарда 415  
пигменты 93  
пирогели 227  
пиролюзит 55  
пиронагреватели 245  
пиринол 244  
пиропатроны 267  
пирорезак 268  
пироструйные резак 243  
пиротехника 8  
пиротехнический источник тока 247  
пирофорные металлы 15, 455  
пирознергодатчик 267  
пистоны 416  
ПИТ 247  
пламегасители 97, 325  
пламенные добавки 84, 352, 405  
пластификаторы 83  
плотность 114  
ПМ 264  
подушки безопасности автомобилей 272  
полибутадиеновый каучук 81  
поливинилацетат 80  
поливинилхлорид 90  
полиизобутилен 81  
полистирол 81  
полисульфидный каучук 81  
политетрафторэтилен 59  
порог льдообразующего действия 344  
порох «Canyon Powder» 263  
порох «Pyrodex» 263  
пороха и твердые ракетные топлива 9  
пороха трубчатые 195  
пороха цветные пироксилиновые 316, 332  
порох дымный 257  
порох дымный, изготовление 265  
пороховая мякоть 264  
пороховые намазки 182  
порох шоколадный 261  
потрескивающие микровзрывы 419, 436  
прессование 142  
проявление 141  
ПТФЭ 59  
ПХА 52

ПХК 52  
пчелки 417

## Р

разделение по фракционному составу 140  
ракеты фейерверочные 414  
распадающиеся кометы 418, 440  
рассев 140  
расчет пиротехнических составов 124  
реакции горения 110  
реакционные материалы 12, 232  
реальгар 70  
римская свеча 414  
рубидия нитрат 49

## С

саран 91  
сахароза 74  
сборка изделий 144  
сварка термитная 238  
светляки 442  
свинца диоксид 56  
свинца стифнат 147  
свинца тетраоксид 56  
свинца хромат 57  
свинцовый сурок 56  
СВС 12  
СВС-реакции 252  
СВС-сварка 243  
СВС-технологии 253  
связующие 75  
селективные излучатели 84, 352, 405  
сера 69  
сила света 353  
сила состава 270  
силикокальций 68  
системы самораспространяющегося высокотемпературного синтеза 12, 251  
сита, типоразмеры 140  
скорость горения 113, 193  
смеси МТН 367  
смеси МТВ 367  
смеси Армстронга 453  
смесь ВМ 292, 301  
смесь НС 293, 301  
смесь Z-2 246  
смесь Берже 292, 300  
смесь КС 217  
смесь ТРА 229  
смешение 141  
смола 211 80  
смола 214 80  
смола акариодная 78  
смола перхлорвиниловая 90  
смола СФ-112А 80  
смола СФ-340А 80  
смола СФ-342А 80  
смолы фенолформальдегидные 80  
совместимость компонентов 121

солнечное колесо 415  
 составы аэрозольгенерирующие 13, 335  
 составы безгазовые 190  
 составы воспламенительные 11, 174  
 составы воспламенительные тусклые 179, 403  
 составы газогенерирующие 12, 257  
 составы дымовые маскирующие 13, 292  
 составы дымовые сигнальные 13, 315  
 составы зажигаемые 12, 210  
 составы замедлительные 11, 189  
 составы звуковые 14, 459  
 составы имитационные 14, 459  
 составы инфракрасного излучения 13, 366  
 составы малогазовые 189  
 составы металлохлоридные 300  
 составы напольные 11, 145  
 составы осветительные 13, 351  
 составы передаточные 268  
 составы переходные 174  
 составы периодического излучения 432  
 составы пироконтактные 248  
 составы пиротехнические 9  
 составы пластизольные 395  
 составы светозвуковые 14, 459  
 составы свистящие 14, 467  
 составы сигнальные 13, 374  
 составы теплогенерирующие 12, 238  
 составы термитно-зажигаемые 212, 220  
 составы терочные 11, 158  
 составы трассирующие 13, 402  
 составы ударные 11, 145  
 составы фейерверочные 14, 413  
 составы фейерверочные сильные 413  
 составы фейерверочные слабые 413  
 составы фотоосветительные 361  
 составы электровоспламенительные 11, 166  
 спекание 251  
 спиртовые огни 455  
 спички 159  
 спички SAW 159  
 спички охотничьи 159  
 сплав AM 63  
 сплав K-20 68  
 сплав цирконий-никель 66  
 сплав «электрон» 214  
 сплиттеры 443  
 стабилизаторы 97  
 стеарин 98  
 стеариновая кислота 98  
 стопин 417  
 стримеры 440  
 стронция карбонат 86  
 стронция нитрат 48  
 стронция оксалат 85  
 стронция перекись 54  
 сульфаты 46  
 суммарная кроющая способность 296  
 сурьмы трисульфид 69  
 сушка 141  
 сушка и предварительная подготовка 138

## Т

тальк 102  
 ТБФ 84  
 ТГА 117  
 температура вспышки 116  
 температура горения 115  
 температурный коэффициент 194  
 тенерес 147  
 тепловой источник тока 245  
 теплота сгорания 115  
 термит 211, 220, 238  
 термическая бумага 246  
 термогравиметрический анализ 117  
 термопластичные композиции 395  
 тефлон 59  
 техника безопасности 26  
 техника безопасности при использовании пиротехники бытового назначения 28  
 техника безопасности при производстве пиротехнических изделий 30  
 технологические добавки 97  
 технология изготовления пиротехнических изделий 138  
 титанол 81  
 тиомочевина 73  
 ТИТ 245  
 титан 64  
 титана диоксид 99  
 титана карбид 64  
 ТКФ 83  
 ТНРС 147  
 топлива гидрореагирующие 284  
 топлива для скважинных аппаратов 283  
 топлива лазерные 282  
 топлива ПВРДТ 285  
 топлива плазменные 282  
 топлива ракетные пиротехнические 279  
 топлива РПДТ 285  
 топлива специальные 10, 281  
 топливо карамельное 280  
 торпеды 415  
 транспортировка 138  
 трассеры 402  
 трещотка 415  
 трибутилфосфат 84  
 трикрезилфосфат 83  
 тринитрорезорцинат свинца 147  
 турбилоны 414

## У

УВС 145  
 углерод 70  
 ударно-воспламенительные составы 145  
 удельная газопроизводительность 274  
 удельная интенсивность излучения 353, 380  
 удельная светосумма 353, 380  
 удельный вес 114  
 уротропин 73

## Ф

факел 415  
фальшфейер 415  
фараоновы змеи 417, 454  
фейерверочные изделия высотные 414  
фейерверочные изделия для использования в помещениях 416  
фейерверочные изделия для использования на воде 416  
фейерверочные изделия наземные 415  
фейерверочные изделия парковые 414  
фейерверочные изделия простейшие 417  
ферросилиций 69  
фитиль 418  
флиттеры 441  
фонтаны 415, 443  
фонтаны комнатные 416  
фонтаны конусные 416  
формирование зарядов 142  
форс 417, 442  
фосфор белый 71, 228  
фосфор белый пластифицированный 308  
фосфор красный 72  
фосфор черный 72  
ФОТАБ 361  
фотографические авиабомбы 361  
ФС-75 69  
фторграфит 368  
фторкаучук СКФ-26 83  
фторкаучук СКФ-32 82  
фторопласт-4 59  
фугас 414  
ФФС 80

## Х

ХАФ 336  
хлопушки 416  
хлораты 45  
хлорацетофенон 336  
хлорбензальмалодинитрил 336  
хлориды 84  
хлоркаучук 91  
хлорнаирит 395  
хлорорганические соединения 88  
хлорпарафины 91  
хлорсодержащие соединения 88  
ХПВХ 90  
хранение 138  
хроматы 46

## Ц

цветовой круг 380  
цветопламенные добавки 84  
цезия нитрат 49

цементаторы 75  
цинк 66  
цинка оксид 99  
цирконий 65  
циркония гидрид 65  
циркония карбид 66  
ЦПП 316, 332

## Ч

чистота цвета 379  
чувствительность к механическим воздействиям 118

## Ш

шарики-хлопушки 417, 454  
швермеры 417  
шеллак 76  
шлак 417  
шнурфейер 418  
шутихи 415

## Щ

щавелевой кислоты соли 84

## Э

ЭВ 166  
экструзия 143  
электровоспламенители безмостиковые 167  
электровоспламенители искровые 167  
электровоспламенители мостиковые 166  
электровоспламенители с взрывающимся мостиком 167  
электровоспламенители с полупроводниковым мостиком 168  
электровоспламенители с токопроводящим составом 167  
электровоспламенительные головки 166  
энергонасыщенные материалы 8  
энтальпия реакции горения 127  
этилцеллюлоза 82  
эффект «вулкан» 455  
эффект «горшок с цветами» 443  
эффект «двойной ленты» 439  
эффект «жемчужины» 441  
эффект «мерцания» 441  
эффект «пальмы» 440  
эффект «парчи» 440  
эффект «паучьей сети» 440  
эффект «плакучей ивы» 440  
эффект «снежный конус» 454  
эффект «тремоланта» 441  
эффект «хризантемы» 440

## Я

японские искристые свечи 444

## Предметный указатель (латиница)

### A

Al 61  
alloprene 91  
As<sub>2</sub>S<sub>2</sub> 70

### B

B 72  
BaC<sub>2</sub>O<sub>4</sub> 85  
Ba(ClO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> 54  
BaCO<sub>3</sub> 86  
BaCrO<sub>4</sub> 57  
ball shell 414  
BAMO 81  
Ba(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> 48  
BaO<sub>2</sub> 54  
bengal illumination 423  
Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 56  
(BiO)<sub>2</sub>CrO<sub>4</sub> 58  
black lead 71  
box stars 419  
brilliant stars 423  
brocade 440

### C

CaC<sub>2</sub>O<sub>4</sub> 86  
CaCO<sub>3</sub> 86  
CAD 267  
Cartridge Actuated Devices 267  
cascades 442  
CaSi<sub>2</sub> 68  
celebration cracker 415  
cherry bomb 415  
chlorowax 91  
chrysanthemum 440  
colophony 79  
comets 418  
cones 416  
cracker balls 417, 454  
crackers 415  
crackling microstars 436  
crossettes 418  
CsNO<sub>3</sub> 49  
Cu 88  
Cu<sub>2</sub>O 57  
Cu<sub>2</sub>S 87  
CuO 57  
cut stars 418  
cylinder shell 414

### D

dark report 463  
decoy 366  
delay compositions 189  
dim 179  
dragon eggs 436  
drivers 417

### E

EBW-электровоспламенители 167  
electric match 166  
electric squib 267  
electric stars 423

### F

Fe 67  
Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 55  
firecracker 415  
fire dust 437  
firefly 442  
fire sticks 444  
first fire 174  
flash powders 461  
flash report 459  
flash thunder 459  
flitters 441  
flower pot 443  
flying squibs 417

### G

gerb 417, 442  
gilsonite 78  
glitter 441  
gum arabic 78

### H

H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub> 98  
hummers 417

### I

ignition mixtures 174  
impulse cartridge 267

### J

japanese torpedoes 417

### K

K<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub> 58  
KClO<sub>3</sub> 53  
KClO<sub>4</sub> 52  
Kel-F 82  
KMnO<sub>4</sub> 58  
KNO<sub>3</sub> 47

### L

lac 76  
laminac 80  
lampblack 71  
lime rosin 79  
linseed oil 77

### M

maroon 414  
metastable interstitial composites

meteors 418  
Mg 60  
MgCO<sub>3</sub> 98  
MgO 101  
minium 56  
Mn 67  
MnO<sub>2</sub> 55  
Mo 67

## N

Na<sub>2</sub>C<sub>2</sub>O<sub>4</sub> 85  
Na<sub>2</sub>AlF<sub>6</sub> 87  
NaN<sub>3</sub> 101  
NaNO<sub>3</sub> 47  
NH<sub>4</sub>Cl 99  
NH<sub>4</sub>ClO<sub>4</sub> 52  
(NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub> 102  
NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub> 50

## P

PAD 267  
«palm tree» effect 440  
parade torch 415, 423  
Pb<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 56  
PbCrO<sub>4</sub> 57  
PbO<sub>2</sub> 56  
«pearl» effect 441  
percussion primers 145  
pinwheel 415  
portfires 423  
Propellant Actuated Devices 267  
prussian blue 102  
pumped stars 418  
PVC 90  
PVDC 91  
pyrofuze 198  
pyronol 244  
pyroswitch 268

## Q

quickmatch 417

## R

rainbow report 459  
RbNO<sub>3</sub> 49  
reactive materials 232  
red gum 78  
resinox 80  
rice starch 77  
rockets 414  
rosin 79  
round stars 419

## S

S 69  
saltpeter 47  
saran 91  
saxon 417  
Sb<sub>2</sub>S<sub>3</sub> 69

Sb<sub>2</sub>S<sub>3</sub> 70  
SCB-воспламенители 167  
Senko Hanabi 444  
serpents 417  
Si 68  
solid fuel ramjet engine 285  
solid fuel rocket ramjet engine 285  
sparklers 416, 443  
sparks 437  
spider web 440  
splitters 443  
spreaders 442  
squib 267  
SrC<sub>2</sub>O<sub>4</sub> 85  
SrCO<sub>3</sub> 86  
Sr(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> 48  
SrO<sub>2</sub> 54  
stab primers 145  
star compositions 423  
starter mixtures 174  
streamers 440  
strike anywhere 159  
strobes 432  
super-floss 101

## T

thermate 220  
Ti 64  
TiC<sub>x</sub> 64  
TiO<sub>2</sub> 99  
TOP 296  
torch 415  
torpedoes 415  
Total Obscuring Power 296  
tourbillions 414  
toy caps 416  
twinklers 432

## U

uintaite 78

## V

VAAR 80  
viton A 83

## W

W 68  
waterfall 442  
water shell 416  
weeping willow 440  
wheel 415  
wire dips 444

## Z

Zn 66  
ZnO 99  
Zr 65  
ZrC<sub>x</sub> 66  
ZrH<sub>x</sub> 65

Подписано в печать 19.03.2014. Формат 70×100/16.

Бумага офсетная. Печать офсетная. Печ. л. 30.

Тираж 1000 экз. Заказ №461

Отпечатано в ППП «Типография» Наука»

121099, Москва, Шубинский пер., 6

## Замеченные ошибки и опечатки

Страница	Строка	Напечатано	Следует читать
18, табл.	2 снизу	$0 - 5 \cdot 10^3$	$0 - 10^4$
69	17 сверху	моноклинической	моноклинной
72	2 сверху	770 Вт/(м·К)	0,56 Вт/(м·К)
75	5 снизу	горючих	цементаторов
91	1 сверху	полиизопрпилен	полиизопрен
100	16 сверху	1398 кДж/моль	42,8 кДж/моль
100	1 снизу	-2112,5 кДж/моль	-543 кДж/моль
125, табл.	6 сверху	$\text{Me}_2\text{SO}_4/\text{K}_2\text{S}, \text{SO}_2^*$	$\text{Me}_2\text{SO}_4, \text{N}_2, \text{SO}_2^*$
128	12 снизу	$3 \cdot (\text{N}_2)$	$3 \cdot \Delta \text{Hf}(\text{N}_2)$
143	16 снизу	более	порядка
161	19 снизу	спичка	спички
166	19 снизу	4 основных типа	5 основных типов
211	17 снизу	считалось	считалось
276	14 сверху	графит	* - графит
287	1 снизу	фтора	соединений фтора
317	10 сверху	конфликтом	конфликтами
349	1 сверху	минеральное, масло	минеральное масло
349	3 сверху	минеральное, масло	минеральное масло
360	20 сверху	диглицилилового	диглицидилового
372	11 сверху	17.	18.
425, табл.	4 снизу	8	-
425, табл.	1 снизу (п. 18)	-	8
425	2 снизу	пропущена надпись	** - парлон
437	18 сверху	искристым	фейерверочным
437	21 сверху	искристым	фейерверочным
464	14 снизу	действия взрывчатого вещества	выстрела из винтовки