



ОПОРНЫЙ ВУЗ

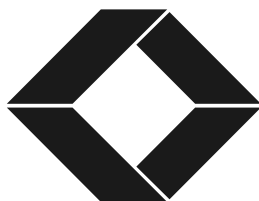
**В. В. АНДРЕЕВ, А. В. ГУСЬКОВ,
К. Е. МИЛЕВСКИЙ**

ЭКСПЛОЗИВНЫЕ ВЕЩЕСТВА

СЕРИЯ



УЧЕБНИКИ
НГТУ



УЧЕБНИКИ НГТУ

Серия основана в 2001 году

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ СЕРИИ «УЧЕБНИКИ НГТУ»

д-р техн. наук, проф. (председатель) *А.А. Батаев*

д-р техн. наук, проф. (зам. председателя) *Г.И. Расторгуев*

д-р техн. наук, проф. *А.Г. Вострецов*

д-р техн. наук, проф. *А.А. Воевода*

д-р техн. наук, проф. *В.А. Гридчин*

д-р техн. наук, проф. *В.И. Денисов*

д-р физ.-мат. наук, проф. *В.Г. Дубровский*

д-р экон. наук, проф. *К.Т. Джурабаев*

д-р филос. наук, проф. *В.И. Игнатьев*

д-р филос. наук, проф. *В.В. Крюков*

д-р техн. наук, проф. *Н.В. Пустовой*

д-р техн. наук, проф. *Х.М. Рахимьянов*

д-р филос. наук, проф. *М.В. Ромм*

д-р техн. наук, проф. *Ю.Г. Соловейчик*

д-р физ.-мат. наук, проф. *В.А. Селезнев*

д-р техн. наук, проф. *А.А. Спектор*

д-р техн. наук, проф. *А.Г. Фишов*

д-р экон. наук, проф. *М.В. Хайруллина*

д-р техн. наук, проф. *А.Ф. Шевченко*

д-р техн. наук, проф. *Н.И. Щуров*

**В. В. АНДРЕЕВ, А. В. ГУСЬКОВ,
К. Е. МИЛЕВСКИЙ**

ЭКСПЛОЗИВНЫЕ ВЕЩЕСТВА

Допущено Федеральным учебно-методическим
объединением в системе высшего образования
по укрупненной группе специальностей
и направлений подготовки 17.00.00
«Оружие и системы вооружения»
в качестве учебного пособия для студентов,
обучающихся по основным образовательным программам
высшего образования специальности 17.05.01
«Боеприпасы и взрыватели»



**НОВОСИБИРСК
2018**

УДК 662.1/.4(075.8)
А 655

Рецензенты:

д-р физ.-мат. наук, профессор *В.Е. Зарко*
д-р техн. наук, профессор *Е.А. Хмельников*

Андреев В.В.

А 655 Взрывчатые вещества : учебное пособие / В.В. Андреев, А.В. Гуськов, К.Е. Милевский. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2018. – 342 с. – (Серия «Учебники НГТУ»).

ISBN 978-5-7782-3695-0

Приведены основные сведения о теории взрывчатых веществ, а также о порохах, инициирующих и бризантных взрывчатых веществах и методах снаряжения боеприпасов. Описаны основные методы определения характеристик высокоэнергетических веществ, применяемых как при теоретических расчетах, так и используемых для решения практических задач, а также методы расчета напряжений, возникающих в разрывном заряде при выстреле. Изложены сведения об электродетонаторах и особенности применения средств взрывания.

УДК 662.1/.4(075.8)

ISBN 978-5-7782-3695-0

© Андреев В.В., Гуськов А.В.,
Милевский К.Е., 2018
© Новосибирский государственный
технический университет, 2018

Оглавление

Принятые сокращения	9
Предисловие	11
Глава 1. Эксплозивные вещества. Элементы теории взрыва	17
1.1. Общие сведения об explosивных веществах	17
1.2. Классификация ВВ и требования, предъявляемые к ним.....	21
1.2.1. Классификация ВВ	21
1.2.2. Требования, предъявляемые к взрывчатым веществам	34
1.3. Состав продуктов взрыва, теплота взрыва.....	35
1.3.1. Состав продуктов взрыва	35
1.3.2. Теплота взрыва	40
1.4. Расчет термодинамических параметров продуктов взрыва	43
1.5. Возникновение и распространение детонации	48
1.5.1. Общее представление о механизме распространения детонации.....	48
1.5.2. Общие сведения об ударной волне	49
1.5.3. Основные параметры ударной волны	50
1.5.4. Гидродинамическая теория детонации	55
1.5.5. Опытное определение скорости детонации	58
1.6. Зависимость скорости и устойчивости детонации от свойств взрыв- чатых веществ и характеристик заряда	63
1.6.1. Влияние свойств ВВ	63
1.6.2. Влияние диаметра заряда	64
1.6.3. Влияние плотности заряда	68
1.6.4. Влияние наличия и прочности оболочки заряда на изменение величин $d_{кр}$ и $d_{пр}$	69
1.7. Чувствительность ВВ	72
1.7.1. Начальный или инициирующий импульс	72
1.7.2. Передача детонации через влияние	82
1.7.3. Факторы, влияющие на чувствительность ВВ	83
Вопросы для самоконтроля	86
Библиографический список.....	87
Глава 2. Общее и местное действие взрыва	89
2.1. Виды действия взрыва	89
2.2. Работоспособность и потенциал ВВ	90
2.2.1. Бризантное действие	97
2.2.2. Активная часть заряда и направленное действие взрыва	100
2.2.3. Кумулятивное действие взрыва	101
2.3. Действие взрыва на расстоянии и безопасные расстояния	103
Вопросы для самоконтроля	105
Библиографический список.....	106

Глава 3. Иницирующие взрывчатые вещества	107
3.1. Общая характеристика иницирующих ВВ	107
3.2. Индивидуальные иницирующие ВВ	109
3.3. Иницирующие смеси	113
3.3.1. Назначение и классификация иницирующих смесей	113
3.3.2. Компоненты воспламенительных составов	115
3.3.3. Состав и применение основных иницирующих смесей	116
Вопросы для самоконтроля	118
Библиографический список	118
Глава 4. Средства иницирования	119
4.1. Назначение и классификация средств иницирования	119
4.2. Требования к средствам иницирования	122
4.3. Патронные капсули-воспламенители	123
4.4. Трубочные капсули-воспламенители	126
4.5. Электрические средства воспламенения	128
4.5.1. Назначение и классификация	128
4.5.2. Электровоспламенители, применяемые в подрывном деле	130
4.5.3. Патронные электровоспламенители	131
4.5.4. Трубочные электровоспламенители	134
Вопросы для самоконтроля	135
Библиографический список	136
Глава 5. Средства взрывания	137
5.1. Лучевые капсули-детонаторы	138
5.2. Накольные капсули-детонаторы	140
5.3. Электрические средства взрывания	140
5.3.1. Подрывные электродетонаторы	141
5.3.2. Боеприпасные электродетонаторы	142
5.4. Средства передачи иницирующих импульсов	144
5.4.1. Огнепроводный шнур	144
5.4.2. Детонирующий шнур	146
Вопросы для самоконтроля	148
Библиографический список	148
Глава 6. Бризантные взрывчатые вещества	149
6.1. Общая характеристика бризантных ВВ	149
6.2. Индивидуальные бризантные ВВ	152
6.2.1. Физические и химические свойства бризантных ВВ	153
6.2.2. Взрывчатые свойства и применение бризантных ВВ	155
6.3. Получение бризантных ВВ	157
6.4. Общая характеристика смесевых бризантных ВВ	160
6.4.1. Смеси и сплавы индивидуальных ВВ (ВВ + ВВ)	161
6.4.2. Флегматизированные ВВ	165

6.4.3. Металлосодержащие взрывчатые смеси	167
6.4.4. Пластичные ВВ	169
6.5. Аммонийно-селитренные ВВ	173
6.5.1. Общая характеристика аммонийно-селитренных ВВ	173
6.5.2. Характеристика АСВВ	174
Вопросы для самоконтроля	177
Библиографический список	177
Глава 7. Снаряжение боеприпасов	179
7.1. Общая характеристика разрывных зарядов	179
7.1.1. Требования, предъявляемые к разрывным зарядам	180
7.1.2. Причины преждевременных взрывов разрывных зарядов	184
7.2. Способы снаряжения боеприпасов	188
7.2.1. Общая характеристика способов снаряжения	188
7.2.2. Снаряжение боеприпасов заливкой	190
7.2.3. Снаряжение боеприпасов прессованием	195
7.2.4. Снаряжение боеприпасов шнекованием	201
7.3. Технологический процесс снаряжения боеприпасов	206
7.4. Контроль качества разрывных зарядов	209
Вопросы для самоконтроля	211
Библиографический список	212
Глава 8. Расчет энергетических характеристик взрывчатых веществ	213
8.1. Энергетические характеристики взрывчатых веществ	213
8.2. Метод расчета энергетических характеристик ВВ	224
8.3. Экспресс-методы оценки энергетических характеристик конденсированных ВВ	234
8.4. Примеры расчета энергетических характеристик ВВ различных групп	237
8.4.1. Расчет энергетических характеристик бризантного ВВ 3-й группы	237
8.4.2. Расчет энергетических характеристик бризантного ВВ 1-й группы	246
8.4.3. Расчет энергетических характеристик метательного ВВ	250
Вопросы для самоконтроля	262
Библиографический список	263
Глава 9. Современные системы взрывания, взрывчатые материалы и технологии взрывания, используемые в промышленности при ведении взрывных работ	265
9.1. Основные типы взрывчатых материалов, применяемых при проведении взрывных работ	265
9.2. Индивидуальные ВВ для КД	270

9.3. Системы инициирования ВВ.....	272
9.3.1. Неэлектрическая система взрыва.....	272
9.3.2. Неэлектрическая система взрыва на основе ударно-волновой трубки	273
9.4. Электродетонаторы.....	277
9.4.1. Электродетонаторы с электронным замедлением	279
9.4.2. Детонатор промежуточный малогабаритный	281
9.4.3. Заряды мягкого взрыва	282
9.5. Особенности применения средств взрыва	283
9.5.1. Короткозамедленное взрывание (КЗВ).....	283
9.5.2. Интерференция	284
9.5.3. Создание новых поверхностей	285
9.5.4. Соударение.....	286
9.5.5. Электрическое взрывание	287
9.5.6. Взрывание зарядов с применением детонирующих шнуров и пиротехнических реле.....	289
9.5.7. Неэлектрическое и комбинированное взрывание.....	292
9.5.8. Неэлектрическое взрывание в шахтах, опасных по взрыву газа и пыли.....	297
9.5.9. Взрывание с применением электронных систем	300
9.5.10. Влияние систем взрыва на сейсмическое воздействие	305
9.6. Перспективные разработки средств взрыва.....	306
9.6.1. Электробезопасная лазерная световолоконная система инициирования ВВ	306
9.6.2. Нешумящие пиротехнические системы замедления и разводки детонации	308
9.6.3. Системы инициирования с УВТ и цифровым замедлением	310
Вопросы для самоконтроля	312
Библиографический список.....	313
Приложения.....	315
Приложение 1. Расчет максимальных напряжений в разрывном заряде.....	315
Приложение 2. Теплота образования некоторых взрывчатых веществ и компонентов порохов	326
Приложение 3. Таблица перевода величин из технической системы единиц (дм, кгс, кал) в систему СИ	327
Приложение 4. Варианты домашнего задания	328
Приложение 5. Массовое взрывание на земной поверхности с применением традиционных средств	330
Приложение 6. Классификация взрывчатых материалов по группам совместимости.....	338
Библиографический список	339

ПРИНЯТЫЕ СОКРАЩЕНИЯ

АВВ	– аммиачные взрывчатые вещества
АСВВ	– аммиачно-селитренные взрывчатые вещества
БП	– баллиститный порох
ВВ	– взрывчатые вещества
ВМ	– взрывчатый материал
ДП	– дымный порох
ДНН	– динитронафталин
ДПМ	– детонатор промежуточный малогабаритный
ДШ	– детонирующий шнур
ЗМВ	– заряд мягкого взрывания
ИВВ	– инициирующие взрывчатые вещества
ИУ	– инициирующие устройства
КБ	– кислородный баланс
КД	– капсюль-детонатор
КЗВ	– короткозамедленное взрывание
КЧ	– кумулятивная часть
ЛНС	– линия наименьшего сопротивления
МВВ	– мощные взрывчатые вещества
НЦ	– нитрат целлюлозы
ОШ	– огнепроводный шнур
ПВ	– продукты взрыва
ПВВ	– пластические взрывчатые вещества
ПВП	– продукты взрывчатого превращения
ПП	– пироксилиновый порох
ПС	– пиротехнические составы
ПХА	– перхлорат аммония
РДТТ	– ракетный двигатель твердого топлива
РЗ	– разрывные заряды
РП	– пиротехнические реле

СИНВ	– система инициирования неэлектрического взрыва
СКГ	– скоростное конвективное горение
СТТ	– смесевые твердые топлива
СТРТ	– смесевые твердые ракетные топлива
СФП	– сферический порох
ТГ	– тротил-гексоген
ТНТ	– тринитротолуол
ТНРС	– тринитрорезорцинат свинца
ТРТ	– твердые ракетные топлива
УВТ	– ударно-волновая трубка
ЭД	– электродетонатор
ЭДП	– подрывной электродетонатор
ЭДЭЗ	– электродетонатор с электронным замедлением
ЭЦ	– электровзрывная цепь

ПРЕДИСЛОВИЕ

Авторы предлагают читателю окунуться в историю формирования знаний об взрывчатых веществах, цитируя первоисточники и сохраняя их терминологию в первых главах. Термин «взрывчатые вещества» используется всем научным сообществом. Рассматривая развитие исследований свойств взрывчатых веществ, ученые обращаются к современным знаниям в этой области. Понимание механизма взрыва служит основой для практического применения его энергии в создании боеприпасов, средств инициирования, горючих материалов для ракетных топлив и взрывных работ. Показывая технологии применения взрывчатых материалов, авторы обращают внимание на соблюдение мер безопасности, основанных на знании их физико-химических свойств. Примеры экспериментальных исследований и теоретических оценок изученных параметров взрывчатых веществ определяют традиционные и перспективные возможности практического применения взрывчатых материалов и конструкций из них в различных сферах деятельности человека. Авторы надеются, что ознакомление с фактическим материалом поможет студентам, аспирантам и другим исследователям в формировании цельного представления о взрывчатых веществах и подвигнет их на новые исследования и конструкторские разработки в этой области знаний.

Книга включает предисловие, девять глав и приложения, содержащие общие понятия о взрывчатых материалах, расчет максимальных напряжений в разрывном заряде с примерами, величины теплоты взрыва некоторых взрывчатых веществ и компонентов порохов, варианты домашнего задания, методику массового взрыва на земной поверхности с применением традиционных

средств и классификации взрывчатых материалов по группам совместимости.

В главе 1 **«Эксплозивные вещества. Элементы теории взрыва»** изложены общие сведения о взрывчатых веществах. Даны определения взрыва, а также факторы, определяющие способность веществ к взрывчатому превращению. Приведены энергетические характеристики некоторых взрывчатых веществ. Представлена их классификация и описание каждого класса, а также требования по эффективности, чувствительности, стойкости, качеству, производственно-экономические требования и др. Описаны признаки и реакции взрывчатого превращения в общем виде для каждой группы взрывчатых веществ по кислородному балансу. Введено определение теплоты взрыва и образования взрывчатых веществ, продуктов взрыва. Представлена методика расчета термодинамических параметров продуктов взрыва. Глава знакомит читателя с детонацией, ее возникновением и общими сведениями о механизме распространения. Приводятся общие сведения об ударных волнах и схемы их распространения. Рассказывается об основных параметрах ударной волны и законах сохранения. Излагается гидродинамическая теория детонации, механизм распространения детонации в конденсированных взрывчатых веществах, зависимости между параметрами детонационной волны; кроме того, приводятся параметры детонационной волны для некоторых взрывчатых веществ. Рассматриваются сравнительный, оптический и хронометрический методы определения скорости детонации. Описывается влияние свойств взрывчатых веществ, диаметра и плотности заряда, а также наличия и прочности оболочек заряда на скорость и устойчивость детонации. Дается понятие о чувствительности взрывчатых веществ, начальном и инициирующем импульсе. Рассказывается о чувствительности к тепловому, механическому, взрывчатому начальному импульсу, о результатах испытаний на чувствительность некоторых взрывчатых веществ. Приводятся факторы, влияющие на чувствительность (физическая структура и плотность заряда, форма и размеры кристаллов, начальная температура, примеси и добавки, химические факторы). Рассказывается об инициировании взрыва порошковых материалов.

Основная задача главы 2 **«Общее и местное действие взрыва»** – ознакомить читателя с видами действия взрыва, теоретическим определением полной работы взрыва, практическим опреде-

лением работоспособности (фугасности). Приводятся ее значения для некоторых взрывчатых веществ, описывается действие взрыва в грунте и фугасное действие артиллерийских снарядов. Дается теоретическая оценка бризантного действия, опытное определение бризантности по величине обжата свинцового цилиндра, оценка бризантности по осколочности боеприпасов и данные по величине бризантности некоторых взрывчатых веществ. Излагается материал об активной части заряда и направленном действии взрыва. Изложено кумулятивное действие взрыва, его определение, схема действия, фокусное расстояние и масса непосредственно кумулятивной части. Описывается действие взрыва на расстоянии, характеристики механического действия ударной волны, различные виды действия взрыва на расстоянии, излагается методика определения безопасного расстояния.

Глава 3 **«Иницирующие взрывчатые вещества»** посвящена веществам, применяемым для возбуждения процессов взрыва зарядов взрывчатых веществ или горения пороховых и ракетных зарядов. Представлена общая характеристика иницирующих веществ, их особенности, физические и химические свойства, взрывчатые свойства, получение и применение. Дается классификация иницирующих смесей и их назначение. Описываются компоненты воспламенительных составов, горючие вещества и окислители, применение и состав основных иницирующих смесей, индивидуальных иницирующих взрывчатых веществ и воспламенительных составов.

В главе 4 **«Средства иницирования»** изложено назначение и классификация средств иницирования и воспламенения (капсюли, шнуры, огнепроводы). Представлены требования к средствам иницирования: безопасность в обращении, безотказность и надежность действия, стойкость при хранении, однообразие действия, простота устройства и универсальность конструкции, а также дешевизна и доступность материалов. Рассказывается о назначении, принципе действия, конструкции, проверке боевых и эксплуатационных качеств патронных, трубочных и электрических капсюлей-воспламенителей. Описываются электрические средства воспламенения, их назначение и классификация, характеристики основных типов воспламенителей. Описываются электровоспламенители, применяемые в подрывном деле, патронные и трубочные электровоспламенители.

В главе 5 **«Средства взрывания»** говорится о капсюлях-детонаторах, создающих взрывной импульс и используемых для возбуждения взрыва разрывных зарядов: артиллерийских, ракетных, авиационных, морских и инженерных боеприпасов. Представлены их виды по назначению, принципу действия и характеру снаряжения. Далее читатель знакомится с характеристиками, принципом действия, конструкцией лучевых и наклонных капсюлей-детонаторов, электрических средств взрывания, а также со средствами передачи инициирующих импульсов – огнепроводным и детонирующим шнурами, их конструкцией и применением.

В главе 6 **«Бризантные взрывчатые вещества»** описывается их общая характеристика, особенности и химическая природа. Излагается материал о физических, химических и взрывных свойствах индивидуальных бризантных веществ, их методах получения и применения. Рассказывается о смесевых бризантных веществах. Дается информация о смесях и сплавах индивидуальных взрывчатых веществ, их состав, взрывчатые характеристики и физико-механические свойства. Приводятся некоторые данные о смесевых взрывчатых веществах, которые могут использоваться для снаряжения различных боеприпасов, особенно в военное время. Описываются флегматизированные взрывчатые вещества, приводится пример составов и характеристик для некоторых наиболее известных из них. Представлена характеристика и состав металлосодержащих взрывчатых веществ. Затем речь идет о пластичных взрывчатых веществах, приводятся компоненты и характеристики веществ на основе нитратов целлюлозы, нитроглицерина и суррогатных веществ. Подробно рассматриваются аммонийно-селитренные взрывчатые вещества. Дается их общая характеристика и классификация, взрывчатые и физические свойства, а также применение в мирное и военное время.

В главе 7 **«Снаряжение боеприпасов»** изложены характеристики разрывных снарядов, требования, предъявляемые к их зарядам (эффективность, безотказность и т. д.), объясняются причины преждевременных взрывов. Дается классификация разрывных зарядов. Приводятся значения критических и максимально допустимых напряжений для некоторых взрывчатых веществ. Разъясняются основные дефекты боеприпасов и зарядов, приводящих к преждевременному взрыву. Приводится общая характеристика

способов снаряжения боеприпасов и используемых технологических процессов снаряжения боеприпасов. Даются определения, подробное описание и физические основы снаряжения боеприпасов заливкой, прессованием и шнекованием. Представлена технологическая оснастка и особенности каждого способа. Описывается технологический процесс снаряжения боеприпасов, его основные этапы (группы операций), а также контроль качества готовой продукции и его виды.

Глава 8 **«Расчет энергетических характеристик взрывчатых веществ»** подробно излагает читателю исходные данные, необходимые для определения физических характеристик взрывчатых веществ (кислородного баланса, параметра расширения и др.), методы расчета, значения и размерности эмпирических коэффициентов и примеры. Представлены экспресс-методы оценки энергетических характеристик конденсированных взрывчатых веществ, основные расчетные зависимости, в том числе приведены примеры расчета энергетических характеристик различных групп бризантных и метательных веществ.

В главе 9 **«Современные методы взрывания, взрывчатые материалы и технологии взрывания, используемые в промышленности при ведении взрывных работ»** изложены основные типы взрывчатых материалов, применяемых при проведении взрывных работ, их основные классы, вопросы влияния наполнения водой взрывчатых веществ, выводы об ее влиянии и водосодержащие составы. Представлены эмульсионные составы. Рассказывается об индивидуальных веществах, используемых в капсулях-детонаторах. Излагаются особенности перехода горения вторичных взрывчатых веществ в процесс детонации. Описываются неэлектрические системы взрывания на основе детонирующего шнура и ударно-волновой трубки, их достоинства и недостатки, конструкция. В этой главе речь идет также об электродетонаторах с электронным замедлением, детонаторах промежуточных малогабаритных и зарядах мягкого взрывания. Излагаются особенности использования средств взрывания при короткозамедленном взрывании, интерференции, соударении, электрическом взрывании, взрывании зарядов с применением детонирующих шнуров и пиротехнических реле. Представлено неэлектрическое и комбинированное взрывание, неэлектрическое взрывание в шахтах (опасных по

взрыву газа и пыли) и взрывание с применением электронных систем. Информация дополняется схемами применяемых устройств и монтажа взрывных цепей. В конце главы рассказывается о перспективных разработках средств взрывания. Приводится функциональная схема, технические характеристики и области применения электробезопасной лазерной световолоконной системы инициирования. Рассказывается о нешумящих пиротехнических системах замедления и разводки детонации с использованием узла замедления и разветвителя. Описывается система инициирования с ударно-волновыми трубками и цифровым замедлителем, а также конструкция модуля цифровой задержки системы.

К каждой главе прилагаются вопросы для самоконтроля и библиографический список.

Исследование взрывчатых веществ (далее ВВ) и их применения является активно развивающимся разделом современной науки. Регулярно организуются международные конференции в США, России, Европе, Китае и других странах. Издаются международные научные журналы по этому направлению, например: «Физика взрыва и удара» и «Detonation Dynamics».

Учебное пособие ориентировано на студентов, магистрантов, аспирантов, специализирующихся в области изучения ВВ, взрывных явлений и взрывобезопасности.

ГЛАВА 1

ЭКСПЛОЗИВНЫЕ ВЕЩЕСТВА ЭЛЕМЕНТЫ ТЕОРИИ ВЗРЫВА

1.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ЭКСПЛОЗИВНЫХ ВЕЩЕСТВАХ

Определим понятие «взрывчатые вещества». Это химические соединения, их механические смеси или растворы друг в друге, способные под влиянием механического, теплового или ударно-волнового внешнего воздействия к самораспространяющемуся, быстрому, экзотермическому превращению, сопровождающемуся выделением большого количества тепла газообразных продуктов, нагретых до высокой температуры.

Взрыв в широком смысле слова представляет собой процесс весьма быстрого физического или химического превращения системы, сопровождающийся переходом ее потенциальной энергии в механическую работу. Работа, совершаемая при взрыве, обусловлена расширением газов или паров, независимо от того, существовали ли они до или образовались во время взрыва. Самый существенный его признак – это резкий скачок давления в среде, окружающей место взрыва, что служит непосредственной причиной его разрушительного действия.

Взрывы могут быть вызваны различными физическими или химическими явлениями, например: взрыв парового котла, взрыв угольной пыли.

Внезапное изменение физического состояния системы, например, разрыв сосуда со сжатым газом. При расширении газа совершается работа разрыва оболочки, сообщения скорости осколкам и разрушения или повреждения окружающих предметов. Взрывы, вызванные подобными физическими процессами, называются физическими взрывами.

Быстрая экзотермическая химическая реакция, протекающая с образованием сильно сжатых газообразных или парообразных продуктов; примером может служить взрыв дымного пороха, при котором происходит быстрая химическая реакция между селитрой, углем и серой, сопровождающаяся выделением значительного количества теплоты. Образовавшиеся газообразные продукты, нагретые за счет теплоты реакции до высокой температуры, обладают высоким давлением и, расширяясь, производят механическую работу.

Взрывы, происходящие в результате быстрой химической реакции, носят название химических. Химическую реакцию, сопровождающуюся или способную сопровождаться взрывом, называют реакцией взрывчатого превращения. Вещества, способные к взрывчатым превращениям, называют взрывчатыми веществами (ВВ). Способность химических веществ к реакциям взрывчатого превращения определяется следующими тремя факторами: экзотермичностью процесса, большой скоростью его распространения и образованием большого количества газообразных (парообразных) продуктов реакции. Эти свойства могут быть у различных ВВ выражены по-разному, однако только их совокупность придает давлению характер взрыва.

Рассмотрим значение каждого из этих факторов.

Экзотермичность реакции. Выделение теплоты – это первое необходимое условие, без которого возникновение взрывного процесса невозможно. Если бы реакция не сопровождалась выделением теплоты, то самопроизвольное развитие ее, а следовательно, и самораспространение взрыва было бы исключено. За счет тепловой энергии реакции происходит разогрев газообразных продуктов до температуры в несколько тысяч градусов и последующее их расширение. Чем больше теплота реакции и скорость ее распространения, тем больше разрушительное действие взрыва.

Теплота реакции служит критерием работоспособности ВВ и важнейшей их характеристикой. Для современных ВВ, наиболее широко применяемых в технике, теплота взрывчатого превращения колеблется в пределах от 900 до 1800 ккал/кг.

Большая скорость процесса. Наиболее характерным признаком взрыва, резко отличающим его от обычных химических реакций, стала большая скорость процесса. Переход к конечным продуктам взрыва происходит в течение $10^{-5} \dots 10^{-6}$ с, а скорость распространения взрыва по массе ВВ достигает нескольких кило-

метров в секунду. Большая скорость выделения энергии определяет преимущества взрывчатых веществ по сравнению с обычными источниками энергии, хотя по общему запасу энергии, отнесенной к равным весовым количествам, даже наиболее богатые энергией ВВ не превосходят обычные горючие системы, однако при взрыве достигается несравненно более высокая объемная концентрация, или плотность энергии (табл. 1.1а).

Горение обычных горючих веществ протекает сравнительно медленно, что приводит к значительному расширению продуктов реакции в ходе процесса и существенному рассеиванию выделяемой энергии посредством теплопроводности и излучения. По этим причинам достигается лишь относительно низкая объемная плотность энергии в продуктах горения.

Взрывные процессы, наоборот, протекают столь быстро, что вся энергия практически успевает выделиться в объеме, занятом самим ВВ, и это приводит к таким высоким концентрациям, которые недостижимы в условиях обычных химических реакций.

Особенно большие плотности энергии достигаются при взрыве конденсированных (твердых или жидких) ВВ, которые, собственно, только и применяются в технике. Объясняется это тем, что такие ВВ обладают по сравнению с горючими газообразными смесями меньшим удельным объемом (табл. 1.1б).

Таблица 1.1а

Энергетические характеристики некоторых ВВ и горючих смесей

Название ВВ и горючих смесей	Теплота взрыва, или теплотворная способность, ккал/кг	Объемная плотность энергии, ккал/кг
Пироксилин $N = 13,3 \%$	1040	1350
Нитроглицерин	1485	2380
Смесь бензола с кислородом	2330	4,4
Смесь углерода с кислородом	2130	4,1
Смесь водорода с кислородом	3230	1,7

Таблица 1.16

Энергетические характеристики некоторых ВВ и горючих смесей

Название ВВ и горючих смесей	Теплота взрыва, МДж/кг	Плотность см ³ /г
ТНТ	4,18	0,6
Гексоген	5,548	0,56
Октоген	6,029	0,53
ТГ-40	5,192	0,59
Окфол	5,23	0,56
МС	5,945	0,59

Цифры, приведенные для горючих веществ (углерод, бензол), рассчитаны в предположении, что их сгорание полностью завершается в начальном объеме, занятом соответствующей смесью.

Из сказанного видно, что объемная плотность энергии, достигаемая при взрыве стандартных ВВ, превосходит объемную плотность для обычных горючих в сотни и тысячи раз. Этим и обусловлена большая мощность взрыва и способность к разрушительному действию.

Газообразование. Высокие давления, возникающие при взрыве, и обусловленный ими разрушительный эффект не смогли бы быть достигнуты, если химическая реакция взрывчатого превращения не сопровождалась бы образованием достаточно большого количества газообразных продуктов. Эти продукты, находящиеся в момент взрыва в чрезвычайно сжатом состоянии, становятся теми физическими агентами, в процессе расширения которых потенциальная энергия ВВ крайне быстро переходит в механическую работу или кинетическую энергию движущихся газов.

Объем газообразных продуктов взрыва некоторых ВВ приведен в табл. 1.2.

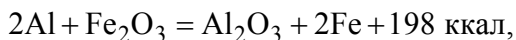
Таким образом, на 1 л обычных ВВ образуется около 1000 л газообразных продуктов, которые находятся в момент взрыва под очень большим давлением.

Таблица 1.2

Объем продуктов взрыва

Название ВВ	Объем газообразных продуктов взрыва, л	
	на 1 кг ВВ	на 1 л ВВ
Пироксилин $N = 13,3 \%$	765	995
Нитроглицерин	690	1105

Максимальное давление в объеме заряда при взрыве конденсированных ВВ достигает сотен тысяч атмосфер. Подобные давления, естественно, не могут быть реализованы в условиях протекания обычных химических реакций или физических процессов. Значение фактора газообразования для взрывных процессов может быть установлено на примере реакций, при которых не образуются газообразные продукты. В качестве простейшей реакции такого типа приведем хорошо известную термитную реакцию:



протекающую, как правило, без взрыва, несмотря на то что тепловой эффект реакции достаточен для нагревания конечных продуктов (Fe , Al_2O_3) до температуры 3000°C , при которой они находятся в жидком состоянии.

Таким образом, на основе рассмотренных качественных закономерностей можно заключить, что только одновременное сочетание трех основных факторов – экзотермичности, скорости процесса и газообразования – может обеспечить те совокупные свойства, которые придают ему характер взрыва.

1.2. КЛАССИФИКАЦИЯ ВВ И ТРЕБОВАНИЯ, ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫЕ К НИМ

1.2.1. КЛАССИФИКАЦИЯ ВВ

Взрывчатые вещества – это термодинамически относительно неустойчивые системы, способные под влиянием внешних воздействий (импульсов) к чрезвычайно быстрым экзотермическим

превращениям с образованием газообразных продуктов, обладающих разрушающим действием.

В настоящее время известно огромное количество взрывчатых веществ, отличающихся большим разнообразием как по составу, так и по физико-химическим, а также взрывчатым свойствам. Для удобства изучения существующих ВВ необходимо их рационально классифицировать.

По агрегатному состоянию ВВ бывают твердые (тротил, гексоген и др.), жидкие (нитроглицерин и др.) и газообразные (смесь). В технике и военном деле применяются в основном твердые ВВ, а жидкие используются как компоненты сложных ВВ и порохов.

По применению (назначению) и особенностям взрывчатых свойств все ВВ подразделяют на четыре группы (рис. 1.1).

1. Иницирующие.
2. Бризантные.
3. Пороха и ракетные топлива.
4. Пиротехнические составы.

Иницирующие ВВ (от лат. *initium* – начало) применяются для инициирования (возбуждения) процессов взрыва разрывных зарядов или горения пороховых и твердотопливных зарядов. Эти вещества часто называют первичными. Иницирующие ВВ чрезвычайно чувствительны к видам начального импульса, таким как удар, трение, накол, нагрев, и способны к взрыву в весьма малых количествах: сотых, а иногда – тысячных долях грамма.

Бризантные ВВ (от франц. *briser* – дробить) применяются для совершения разрушительной работы (дробления оболочки на осколки, выброса грунта и т. д.) в виде разрывных зарядов – элементов боеприпасов и подрывных средств. Бризантные ВВ называют вторичными. Они характеризуются сравнительно невысокой чувствительностью к начальным импульсам и достаточно восприимчивы к взрывному импульсу, имеют более высокую энергетику и способны взрываться в значительно больших количествах (десятые доли грамма и выше), чем иницирующие ВВ.

Как иницирующие, так и бризантные ВВ бывают:

- 1) индивидуальные (отдельные химические соединения);
- 2) смесевые или сложные (смеси, сплавы взрывчатых и невзрывчатых в отдельности соединений).

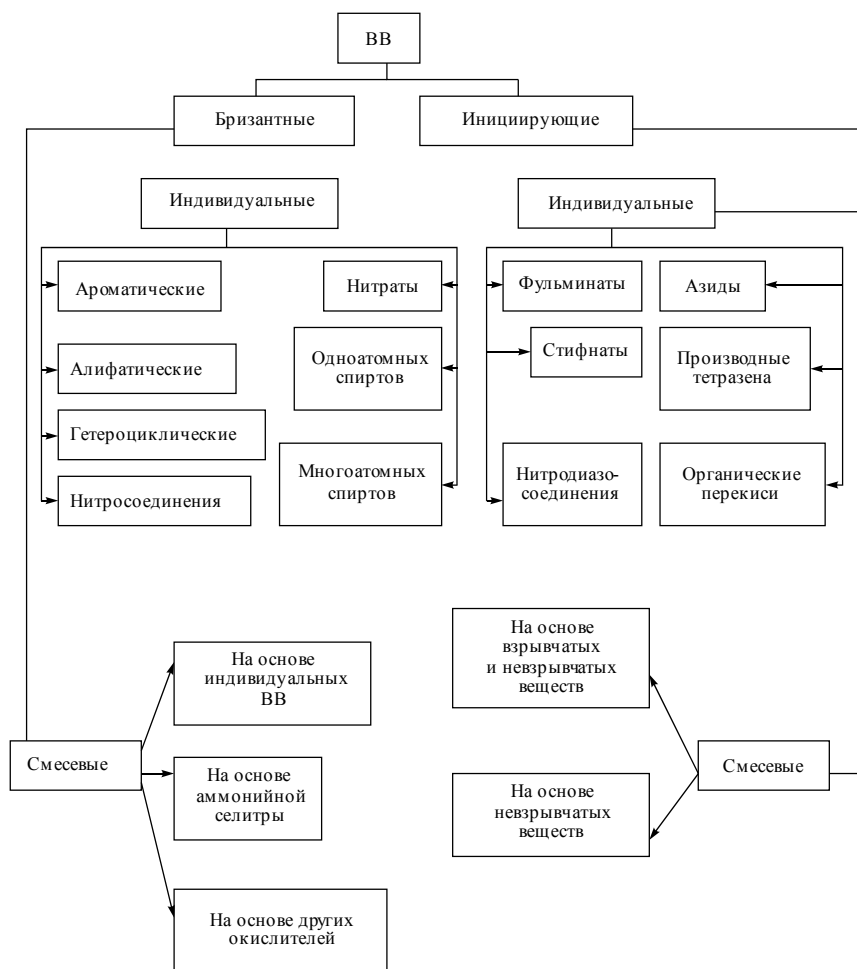


Рис. 1.1. Классификация ВВ

Группу иницирующих ВВ составляют:

- 1) соли тяжелых металлов гремучей кислоты (фульминаты) $\text{Hg}(\text{ONC})_2$, AgONC и др.;
- 2) соли тяжелых металлов азотисто-водородной кислоты (азиды) $\text{Pb}(\text{N}_3)_2$, AgN_3 , $\text{Cd}(\text{N}_3)_2$ и др.;
- 3) соли стифниновой кислоты (стифнаты, тринитрорезорцина-ты) $\text{C}_6\text{H}(\text{NO}_2)_3\text{O}_2\text{Pb}$, $\text{C}_6\text{H}(\text{NO}_2)_3\text{O}_2\text{Ba}$ и др.;
- 4) производные непредельного азотоводорода (тетразен) $\text{C}_2\text{H}_8\text{ON}_{10}$;

- 5) органические перекиси (пероксиды) $(\text{CH}_2\text{O})_6\text{N}_2$ и др.;
- 6) металлические производные ацетилена (ацетилениды, карбиды) CuC_2 , Ag_2C_2 и др.;
- 7) нитроароматические диазосоединения и некоторые другие классы соединений.

Группа бризантных ВВ включает в себя:

- 1) нитросоединения, из которых наиболее характерны:
 - а) ароматические,
 - б) алифатические,
 - в) гетероциклические;
- 2) нитраты (сложные эфиры азотной кислоты и одно- или многоатомных спиртов).

Класс ароматических нитросоединений составляют:

- 1) нитроароматические углеводороды – тротил $\text{C}_6\text{H}_2(\text{NO}_2)_3\text{CH}_3$, динитробензол $\text{C}_6\text{H}_4(\text{NO}_2)_2$, динитронафталин $\text{C}_{10}\text{H}_6(\text{NO}_2)_2$ и т. д.;
- 2) нитрофенолы – пикриновая кислота $\text{C}_6\text{H}_2(\text{NO}_2)_3\text{OH}$, стифниновая кислота $\text{C}_6\text{H}(\text{OH})_2(\text{NO}_2)_3$ и др.;
- 3) нитроароматические амины – тетрил $\text{C}_6\text{H}_2(\text{NO}_2)_3\text{NNO}_2\text{CH}_3$, тринитроанилин $\text{C}_6\text{H}_2(\text{NO}_2)_3\text{NH}_2$;
- 4) нитроароматические кислоты – тринитробензойная кислота $\text{C}_6\text{H}_2(\text{NO}_2)_3\text{COOH}$ и др.

К алифатическим нитросоединениям относятся:

- 1) нитропарафины – нитрометан CH_3NO_2 и др.;
- 2) нитроспирты – тринитроэтанол $\text{C}(\text{NO}_2)_3\text{CH}_2\text{OH}$ и др.;
- 3) нитроамины – метилендинитроамин $\text{CH}_2(\text{HNO}_2)_2$ и др.

Класс гетероциклических нитросоединений насчитывает сравнительно небольшое количество представителей. Изучены и применяются гексоген $(\text{CH}_2\text{NNO}_2)_3$ и октоген $(\text{CH}_2\text{NNO}_2)_4$.

В классе нитросоединений (ароматических и алифатических) следует различать две их разновидности: С-нитросоединения, для которых характерна связь нитрогрупп непосредственно с атомом углерода $\text{C}-\text{NO}_2$, и N-нитросоединения, у которых нитрогруппа связана с атомом азота $\text{N}-\text{NO}_2$. Например, тротил – типичный представитель С-нитросоединений, гексоген – N-нитросоединений.

Существуют и ВВ, объединяющие оба этих признака (комбинированные), например тетрил.

Нитраты $R-O-NO_2$, которые можно формально, по чисто внешнему сходству, отнести к О-нитросоединениям, – менее обширный, но весьма важный класс бризантных ВВ, включающий азотнокислые эфиры:

1) многоатомных спиртов – ТЭН $C(CH_2ONO_2)_4$, нитроглицерин $C_3H_5(ONO_2)_3$ и др.;

2) одноатомных спиртов – метилнитрат CH_3ONO_2 и др.

Существует значительное количество бризантных ВВ, которые формально не попадают в какой-либо конкретный класс, поскольку являются производными многофункциональных или сложных соединений.

Из всего разнообразия химических соединений, обладающих взрывчатыми свойствами, широкое применение в качестве ВВ получили сравнительно немногие из инициирующих ВВ: гремучая ртуть, азид свинца, ТНПС, тетразен; из бризантных: тротил, тетрил, гексоген, октоген, ТЭН, ТАТБ. Это – штатные ВВ.

Такая ограниченность номенклатуры штатных индивидуальных ВВ объясняется, прежде всего, высоким уровнем требований безопасности при изготовлении, хранении и эксплуатации, по отношению к технологическим эксплуатационным свойствам ВВ. Поэтому на практике больше применяются не чистые ВВ, а их смеси или сплавы и взрывчатые вещества, содержащие различные невзрывчатые добавки, благодаря чему стало возможным получать взрывчатые системы с необходимыми технологическими, эксплуатационными и взрывчатыми свойствами.

В инициирующих смесях на основе ВВ содержатся горючие и окислители. В качестве горючих применяются трехсернистая сурьма Sb_2S_3 , роданистый свинец $Pb(CNS)_2$, силицид кальция $SiCa$ и другие. Окислителями служат хлорат калия $KClO_3$, нитрат бария $Ba(NO_3)_2$, перекись бария BaO_2 , свинцовый сурик Pb_3O_4 и др. Иницирующие вещества (гремучая ртуть, тенерес, тетразен, стифнаты калия и др.) придают составу необходимую чувствительность к простым начальным импульсам и создают условия для взаимодействия горючего с окислителем.

В качестве инициирующих смесей, не содержащих ВВ, используются дымные пороха и пиротехнические составы.

Все смесевые бризантные ВВ можно разделить на три группы:

- 1) на основе индивидуальных бризантных ВВ;
- 2) на основе аммонийной селитры;
- 3) на основе других окислителей.

К первой группе относятся:

- смеси и сплавы индивидуальных бризантных ВВ;
- флегматизированные ВВ;
- алюминийсодержащие ВВ;
- пластичные ВВ.

Аммонийно-селитренные ВВ могут содержать ВВ и не содержать их.

К третьей группе относятся хлораты, перхлораты, динамиты, окисливиты и жидкие взрывчатые смеси.

Пороха – вещества, способные к устойчивому закономерному горению без доступа извне кислорода воздуха или других окислителей с выделением значительного количества тепла и газообразных продуктов. Пороха могут быть достаточно просты по составу (включать три-четыре компонента) или представлять собой сложные системы, содержащие более 10 компонентов. Пороха используются в качестве источника энергии для метания снарядов и для приведения в движение ракет, а также в генераторах газа высокого давления, воспламенителях, огнепроводных шнурах, фейерверочных устройствах и для других целей. Пороха, применяемые в ракетных двигателях, называют обычно твердыми ракетными топливами (ТРТ).

Возможность горения пороха без доступа окислителей извне обеспечивается содержанием в их составе одновременно как горючего, так и окислителя в виде неорганических веществ (например, соли азотной или хлорной кислоты) или органических соединений, содержащих кислород (нитроэфиры, нитросоединения), а также соединений, содержащих кроме кислорода атомы галогенов.

Пороха используют в виде зарядов, состоящих из элементов различных размеров и геометрической формы (пластина, зерно или трубка с одним или несколькими каналами, одноканальная или многоканальная шашка и т. п.). Горение пороха в стволе орудия,

ракетной камере или газогенераторе происходит под давлением образующихся газообразных продуктов. В ствольных системах давление растет от 2 до 7 тыс. атмосфер (200...700 МПа), а в ракетных двигателях и газогенераторах оно, как правило, лежит в интервале ~ 40...200 атм (4...20 МПа).

Пороха по своей природе являются взрывчатыми веществами (ВВ) и относятся к классу метательных ВВ, одно из главных свойств которых – способность к устойчивому горению без перехода во взрыв или детонацию. Это обеспечивает возможность и безопасность широкого применения пороха.

Устойчивость горения пороха, т. е. способность к сгоранию в большинстве случаев параллельными слоями без перехода во взрыв, достигается главным образом за счет монолитности пороховых зерен или шашек (т. е. за счет отсутствия в них пор, трещин, раковин) и достаточной их прочности, обеспечивающей горение без разрушения заряда под воздействием давления пороховых газов, инерционных и центробежных сил, ультразвуковых колебаний и других нагрузок, возникающих в стволе орудия или ракетной камере. В некоторых случаях в пороховых элементах (зарядах) для ускорения их сгорания создают определенную пористость, за счет которой происходит устойчивое объемное (конвективное) горение.

Скорость газообразования при горении порохового заряда пропорциональна скорости горения u и величине горячей поверхности S . Последняя определяется размерами и формой пороховых элементов (зерен и шашек). В зависимости от их формы размер горячей поверхности в процессе горения может изменяться различным образом. Если поверхность уменьшается, то обычно уменьшается и скорость газообразования – такое горение называют депрессивным. Если она увеличивается (многоканальное зерно, бронированная шашка, горящая только со стороны канала), то растет скорость газообразования. Такое горение называют прогрессивным. Поверхность горения может оставаться постоянной, например, в случае канальной шашки, горящей с наружной и с внутренней стороны при бронировании ее торцов для предотвращения их горения.

При высоких давлениях (сотни мегапаскалей) артиллерийские пороха горят со скоростью 100...400 мм/с.

Время сгорания заряда пороха определяется скоростью горения и наименьшим размером зерна или шашки. Этот размер называют толщиной горящего свода. В артиллерийских орудиях и стрелковом оружии, где используются элементы с толщиной горящего свода от десятых долей до нескольких миллиметров, время сгорания пороха составляет тысячные и сотые доли секунды. В ракетных двигателях, где применяются крупногабаритные заряды, время горения может составлять десятки секунд.

Основные энергетические характеристики пороха – это удельная теплота сгорания (Q) и удельное количество газообразных продуктов горения (V_0), приведенные к нормальным условиям. Работоспособность порохов, используемых в артиллерии и стрелковом оружии, оценивают силой пороха (f) и его потенциалом.

Существующие пороха можно разделить в основном на три вида.

1. **Пороха на основе нитратов целлюлозы (НЦ).** Во многих нитроцеллюлозных порохах вторым компонентом могут быть пластификаторы НЦ. Они бывают как взрывчатыми, так и инертными веществами. Третий компонент – это стабилизаторы химической стойкости (дифениламин, производные мочевины и др.), которые существенно замедляют скорость разложения НЦ и увеличивают, таким образом, гарантийные сроки хранения пороха.

В зависимости от свойств применяемых пластификаторов, а также от способов производства нитроцеллюлозные пороха можно разделить на пять групп.

а) *Пироксилиновые пороха* (ПП) – пороха на основе высоко- и среднеазотной НЦ (пироксилина). При их изготовлении используются пластификаторы, почти полностью удаляемые из пороховых элементов на последних стадиях производства. В качестве таких пластификаторов используются, как правило, летучие спиртоэфирные смеси. Из ПП изготавливают элементы различной геометрической формы (например, многоканальные зерна и т. п.), но лишь с небольшой толщиной горящего свода (от десятых долей миллиметра до 6 мм). Пироксилиновые пороха обладают высокой прочностью. Эти пороха в основном применяются в стрелковом оружии и артиллерийских системах различного калибра. Теплота взрывчатого превращения ($Q_{\text{ж}}$) ПП лежит в пределах 3300...3800 кДж/кг.

б) *Баллиститные пороха* (БП). Состоят из НЦ и труднолетучих высокоэнергетических пластификаторов (или их смесей), не удаляемых из пороха. Поэтому БП относят к двухосновным топливам. В качестве высокоэнергетического (основного) пластификатора используются жидкие нитроэфиры – нитроглицерин или их смеси.

Кроме НЦ и пластификаторов, БП содержат стабилизаторы химической стойкости (ДФА и др.), технологические добавки.

Для увеличения энергетики порохов в их состав вводят порошкообразное металлическое горючее (алюминий или его сплавы с магнием), мощные ВВ (гексоген, октоген). Теплота взрывчатого превращения ($Q_{\text{ж}}$) БП лежит в пределах 2400...5800 кДж/кг. Из БП изготавливают заряды различных форм и размеров: толщина горящего свода изменяется от десятых долей до нескольких сотен миллиметров. Баллиститные пороха используются как в артиллерийских, так и в ракетных системах.

в) *Кордитные пороха*, при изготовлении которых используются высокоазотная НЦ и смесевый пластификатор: летучий (например, ацетон) удаляется из пороховых элементов на последних стадиях производства, а труднолетучий остается в составе пороха.

г) *Сферические пороха* (СФП) – пороха мелких марок сферической или эллипсоидной формы. Они получают эмульсионным способом. По составу они могут быть близки к БП или ПП.

д) *Пороха без пластификатора*. К ним можно отнести вязкие пороха, которые по химической природе являются разновидностью ПП, т. е. состоят почти из одной НЦ. Однако по способу производства они принципиально отличаются от ПП.

Все указанные пороха на основе нитратов целлюлозы в отличие от дымного (черного пороха) при горении практически не образуют дыма, поэтому называются бездымными.

2. Пороха на основе синтетических полимеров и окислителя – смесевые пороха. Они представляют собой гетерогенные высоконаполненные полимерные системы, состоящие из окислителя, органического связующего – горючего, металлического горючего и добавок различного назначения.

В качестве окислителя в смесевых порохам в основном используется перхлорат аммония (ПХА), а в качестве связующего – каучукоподобные соединения, пластифицированные различными жидкими веществами. Эти компоненты, как и металлы, являются

горючими веществами, окисляющимися за счет избыточного кислорода ПХА или другого окислителя.

Смесевые пороха на основе ПХА используются преимущественно в ракетной технике, поэтому их называют смесевыми твердыми ракетными топливами (СТРТ) или просто смесевыми твердыми топливами (СТТ). Заряды из СТТ могут иметь различную форму и размеры (до нескольких метров в диаметре).

3. Пороха – механические смеси. К ним относится дымный порох (ДП), который состоит из 75 % окислителя – калийной селитры и горючего – 15 % угля и 10 % серы, выполняющей также роль цементатора. Дымный порох, изобретенный в Китае еще в XI веке, был первым порохом, который длительное время широко использовался в огнестрельном оружии, до тех пор, пока не были разработаны гораздо более мощные и бездымные пороха на основе НЦ.

Смесевые твердые ракетные топлива (СТРТ) представляют собой гетерогенные высоконаполненные полимерные системы, состоящие из твердых порошкообразных наполнителей (окислителей, металлических горючих) и жидких компонентов горючих связующих, технологических, баллистических и других добавок.

Основу СТРТ составляет окислитель, который входит в его состав в количестве до 90 %. Основные требования, предъявляемые к окислителю: высокие значения энтальпии образования, максимальное содержание свободного кислорода, высокая плотность, отсутствие полиморфных превращений при температурах технологического процесса изготовления и эксплуатации топлив, термическая и гидrolитическая стабильность, низкая чувствительность к механическим воздействиям. Наибольшее распространение получил перхлорат аммония, более полно удовлетворяющий предъявляемым требованиям. В некоторых видах СТРТ используются в качестве окислителей также нитраты щелочных металлов и др. Для повышения энергетического уровня СТРТ применяются органические MBV – гексоген и октоген, которые вводятся в количестве до 26 % за счет уменьшения содержания перхлората аммония. Дальнейшее увеличение количества MBV нецелесообразно из-за существенного ухудшения взрывчатых характеристик СТРТ.

В качестве металлического горючего практическое применение нашли алюминий, который вводится в состав до 21 %, и гидрид

алюминия. Конденсированные продукты сгорания уменьшают удельное газообразование топлив, но высокие тепловые эффекты при горении металлов приводят к повышению энергии топлив. Гидриды металлов также служат источниками и легкого газа – водорода. Полимерное горючее-связующее, состоящее из органического полимера, пластификатора, отвердителей и поверхностно-активных веществ, является дисперсионной средой, в которой распределены порошкообразные компоненты. Полимеры подразделяются на низкомолекулярные (непредельные с концевыми карбоксильными, гидроксильными, эпоксидными группами, без функциональных групп) и высокомолекулярные (полибутадиеновые, полиуретановые, нитрильные и другие каучуки). Пластификаторы бывают полярными (эферы, нитрилы органических кислот и др.), неполярными (углеводороды) и «активными» (с высокой энергонасыщенностью, содержащие нитро-, нитратные азидо-, нитраминные и другие группы).

Помимо названных основных компонентов в состав СТРТ входят технологические добавки – различные поверхностно-активные вещества, сажа, графит, аэросил и др. Для регулирования скорости горения СТРТ в широких пределах (примерно от 2 до 150 мм/с) в них вводят катализаторы и ингибиторы горения. В качестве катализаторов горения наибольшее распространение получили элементо-органические соединения и окислы поливалентных металлов, а также сложные комплексные соединения. Для замедления скорости горения в частности используется фтористый литий.

Температурный диапазон применения СТРТ определяется уровнем механических характеристик, конструкцией заряда и РДТТ. Для скрепленного заряда определяющими являются деформации на поверхности канала, в местах концентрации напряжений и адгезионная прочность в зоне крепления заряда с корпусом. Для таких зарядов применяются СТРТ на основе высокомолекулярных и стереорегулярных полибутадиенов, бутилкаучука, функциональных поливинилизопренов.

Механические, взрывчатые и реологические свойства СТРТ, а также отработанные технологические процессы обеспечивают возможность изготовления крупногабаритных зарядов (диаметром свыше 2,5 м, массой более 50 т). Гарантийные сроки эксплуатации зарядов СТРТ превышают 10...15 лет.

Комплекс свойств СТРТ позволил решить проблему создания твердотопливных ракет стратегического назначения с дальностью полета свыше 10 000 км, что не удавалось при использовании баллистических порохов из-за недостаточного уровня энергомассовых характеристик и технологических ограничений по максимальному размеру зарядов (диаметр не более 1 м). СТРТ широко используются также в ракетных системах оперативно-тактического назначения, в ракетах сухопутных войск, военно-морского флота, системах противовоздушной обороны, в космической технике и народном хозяйстве, в частности в перспективных системах аэрозольного пожаротушения. Это обусловлено широким диапазоном энергетических и баллистических характеристик СТРТ различных классов.

Пиротехнические составы – это гетерогенные смеси, способные к самостоятельному горению и дающие при горении световой, тепловой, дымовой или динамический эффект. ПС используются в военном деле и народном хозяйстве (в промышленности, на транспорте, для фейерверков и салютов, при научных исследованиях). В зависимости от назначения ПС подразделяются на осветительные, фотоосветительные (фотосмеси), трассирующие, инфракрасного излучения, зажигательные, сигнальные, дымовые, безгазовые, газогенерирующие, воспламенительные, свистящие, имитационные, целеуказательные и т. д. Многие из этих составов применяются в различных средствах, например, осветительные составы можно использовать в трассирующих и сигнальных средствах. Среди ПС, применяемых в народном хозяйстве, следует выделить фейерверочные, термитные, для воздействия на переохлажденные облака и туманы, газогенерирующие, пестицидные, для получения тугоплавких металлов и соединений, чистых газов, подогрева пищи и защиты садов, спичечные, составы для уменьшения усадки и образования раковин в процессе охлаждения расплавленного металла, подогрева металла перед сваркой, создания плазмы и выработки электроэнергии, снятия напряжения в сварных швах и т. д. ПС также разделяются на пламенные (белопламенные, цветопламенные, составы с преимущественным излучением в ультрафиолетовой или в ИК-области спектра), тепловые (термитно-зажигательные, безгазовые, малогазовые), аэрозолеобразующие (белого и черного, цветного, инсектицидного дыма, для воздействия на облака и туманы и т. д.), газогенери-

рующие, с равномерным и периодическим излучением. По технологическим свойствам ПС подразделяют на порошкообразные, включая и гранулированные, термоэластопластичные и литые.

Независимо от назначения ПС должны давать при сгорании максимальный специальный эффект при минимальном расходе состава. Специальный эффект определяется назначением состава, его природой и условиями сжигания. Вещество или вещества, определяющие специальный эффект, вводятся в состав в готовом виде (краситель, реагент и т. д.) или образуются в результате горения; они должны легко воспламеняться от воспламенительного состава или продуктов сгорания вышибного заряда, но не воспламеняться при небольшом повышении температуры или попадании искры; сгорать равномерно или в пульсирующем режиме с определенной скоростью; обладать химической и физической стойкостью при длительном хранении (получаемый при горении эффект не должен ухудшаться в течение заданного времени хранения); иметь возможно меньшую чувствительность к механическим импульсам и минимальные взрывчатые характеристики; обладать минимальной зависимостью скорости горения от давления и температуры, не содержать в себе дефицитных, токсичных и не имеющих широкой отечественной сырьевой и производственной базы компонентов. Технологический процесс подготовки компонентов, приготовления составов, формирования пирозлементов и снаряжения изделий на их основе должен быть простым, безопасным и допускать возможность механизации и автоматизации производства. Изделия из ПС должны обладать достаточной механической прочностью и не разрушаться при тряске, транспортировании и эксплуатации. Кроме общих требований, к ПС в зависимости от их назначения и условий применения предъявляется ряд специальных требований, например устойчивость горения в вакууме при больших скоростях обдува и вращения, при низких температурах и т. д.

Наиболее важные технологические свойства пиротехнического состава (ПС):

- насыпная плотность – отношение массы пиротехнического состава к его объему в свободно насыпанном (без уплотнения) состоянии;
- сыпучесть – способность ПС вытекать из калиброванных отверстий с определенной скоростью;

- угол естественного откоса α характеризует подвижность сыпучих ПС, оценивается величиной угла между образующей поверхностью свободно засыпанного порошка и горизонтальной плоскостью;
- угол внешнего трения $\alpha_{\text{вн}}$ – минимальный угол наклона плоскости, при котором частицы материала свободно скатываются с поверхности под действием сил гравитации;
- коэффициент внутреннего трения ($K_{\text{в.тр}}$);
- коэффициент внешнего трения ($K_{\text{вн.тр}}$);
- формуемость (Φ) – характеристика, учитывающая способность ПС к сохранению формы после уплотнения;
- прессуемость – оценивается по давлению уплотнения, которое необходимо для получения пирозлемента с заданной плотностью, или по степени уплотнения состава при заданном давлении прессования;
- слёживаемость (C) – склонность ПС к агрегации при хранении и транспортировке.

1.2.2. ТРЕБОВАНИЯ, ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫЕ К ВЗРЫВЧАТЫМ ВЕЩЕСТВАМ

Независимо от конкретного назначения и вида ВВ к ним предъявляются общие весьма жесткие требования.

1. Высокая эффективность действия (для бризантных ВВ – разрушительное действие, для инициирующих ВВ – инициирующая способность).

2. Определенная чувствительность к внешним импульсам, обеспечивающая, с одной стороны, безотказность при боевом применении, с другой – безопасность при производстве, в обращении и снаряжении боеприпасов.

3. Высокая химическая, термическая, физическая стойкость, химическая инертность по отношению к различным материалам, гарантирующие постоянство взрывчатых характеристик в течение длительного времени хранения.

4. Удовлетворительные технологические качества (умеренная прессуемость, плавление без разложения), дающие возможность изготавливать разрывные заряды высокого качества.

5. Производственно-экономические требования – дешевизна и доступность сырья, простота и безопасность производства, невысокая себестоимость готового продукта.

Требования по физико-химическим свойствам обуславливают возможность применять ВВ, по взрывчатым характеристикам – целесообразность этого применения. Так, если ВВ имеет весьма низкую химическую стойкость, легко взаимодействует с металлами, то даже при высоких энергетических характеристиках использование его может оказаться неосуществимым. Напротив, если ВВ имеет высокую физико-химическую стабильность, химически инертно, но обладает низкой энергетикой, то применение его, хотя и возможно, однако едва ли целесообразно, особенно на современном уровне требований по эффективности действия.

Следует обратить внимание на взаимосвязь и взаимообусловленность ряда требований. Так, повышение эффективности через возрастание энергетики, как правило, сопровождается увеличением чувствительности, что с точки зрения безопасности далеко не всегда допустимо.

Обеспечение безотказности действия ВВ предполагает достаточно высокую чувствительность, а гарантированная безопасность требует низкой чувствительности. Требования, как видно, противоречивы, и для их удовлетворения необходимо отыскать оптимальное решение, что представляет сложную задачу.

Кроме общих требований, к ВВ предъявляются и специальные требования, в зависимости от конкретных форм и условий применения различных ВВ.

1.3. СОСТАВ ПРОДУКТОВ ВЗРЫВА, ТЕПЛОТА ВЗРЫВА

1.3.1. СОСТАВ ПРОДУКТОВ ВЗРЫВА

Для оценки возможного разрушительного действия взрыва необходимо знать количество и качество продуктов взрывчатого превращения, являющихся непосредственными передатчиками энергии взрыва и исполнителями внешней работы. Количество и качество (состав) продуктов взрыва, в свою очередь, определяются реакцией взрывчатого превращения ВВ.

Реакция взрывчатого превращения может быть описана, как и любая химическая реакция, уравнением, выражающим распад молекул ВВ и образование продуктов взрыва по схеме:



где Q – тепловой эффект взрывчатого превращения.

Само уравнение уже непосредственно дает состав и объем продуктов, а также теплоту взрывчатого превращения. Теоретическими расчетами можно по уравнению вычислить и другие характеристики взрыва: температуру, давление, скорость, импульс.

Таким образом, уравнение взрывчатого превращения дает возможность, не производя опыта, оценить ожидаемое разрушительное действие зарядов ВВ.

Для написания уравнений необходимо знать левую часть уравнения, т. е. формулу исходного ВВ, и правую часть – формулы молекул конечных продуктов взрывчатого превращения. Кроме того, уравнение должно учесть тепловой эффект превращения как основной признак любой химической реакции. Формула ВВ дает элементарный состав молекул, который в значительной степени предопределяет характер правой части – состав ПВ. Однако состав ПВ зависит также от способа возбуждения реакции, температуры и давления, при которых протекает реакция, от взаимодействия промежуточных продуктов распада, плотности заряда, величины совершаемой работы, материала оболочки заряда, степени однородности взрывчатых смесей и ряда других факторов.

Написание уравнений взрывчатых превращений является весьма сложным, так как направление и характер химических реакций, составляющих взрывчатое превращение в целом, не поддаются точному экспериментальному и теоретическому исследованию. Имеющиеся способы расчетов, а также опытное определение состава ПВ дают более или менее приближенные представления о действительном уравнении взрыва.

Написание теоретических уравнений производится на основе результатов расчетов с применением различных строгих приемов и допущений, в зависимости от элементарного состава молекул ВВ и главным образом – от содержания кислорода в молекулах ВВ.

Большинство индивидуальных ВВ в своих молекулах имеет следующие элементы: С, Н, О, N. Лишь некоторые (преимущественно иницирующие ВВ) имеют иной состав, например, гремучая ртуть $\text{Hg}(\text{ONC})_2$, азид свинца $\text{Pb}(\text{N}_3)_2$ и др. Смесевые ВВ могут содержать металлы (например, Al) или их соли (нитраты, хлораты, перхлораты). Бризантные же ВВ (индивидуальные) в основном состоят из приведенных выше четырех элементов. Соотношение между этими элементами может быть различным.

В основе химических превращений ВВ лежат окислительно-восстановительные реакции, протекающие за счет собственного кислорода. В результате превращения образуются продукты реакции внутримолекулярного окисления ВВ. Так, количество кислорода в основном определяет характер взрывчатого превращения, т. е. возможный состав продуктов взрыва.

В зависимости от кислородного баланса принято разделять ВВ на три группы:

1) ВВ с положительным или нулевым кислородным балансом, т. е. с количеством кислорода, избыточным и достаточным для полного окисления горючих элементов, например, нитроглицерин, нитродигликоль, некоторые аммонийно-селитренные ВВ и др.;

2) ВВ с отрицательным кислородным балансом, т. е. с количеством кислорода, недостаточным для полного окисления и для превращения всего углерода в газы, например, гексоген, ТЭН, пироксилин и др.;

3) ВВ с существенно отрицательным кислородным балансом, т. е. с количеством кислорода, недостаточным для окисления всего углерода в CO , в результате чего в продуктах взрыва образуется свободный углерод, например, тротил, тетрил и др.

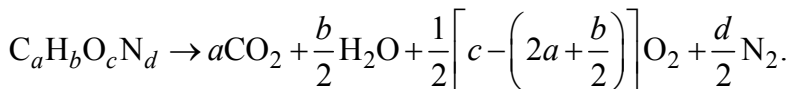
Деление ВВ на группы условно, так как при взрывчатом превращении ВВ, относящихся к первой группе, могут образоваться в небольших количествах продукты неполного окисления (CO и H_2) и выделяться одновременно свободный кислород, а в продуктах взрывчатого превращения ВВ второй группы в зависимости от условий может образоваться некоторое количество свободного углерода. Наиболее просто и достаточно близко к опытным данным написание уравнений для ВВ с положительным или нулевым кислородным балансом, когда образуются продукты полного окисления.

В этом случае пользуются правилом неограниченного расхода кислорода на полное окисление углерода и водорода. Это правило базируется на допущении, что наиболее вероятно то химическое превращение, при котором выделяется максимальное количество энергии (тепла).

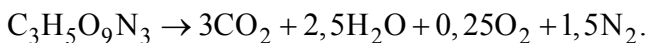
Признаком ВВ первой группы будет неравенство

$$c \geq 2a + \frac{b}{2}.$$

Реакция взрывчатого превращения ВВ этой группы в общем виде записывается так:



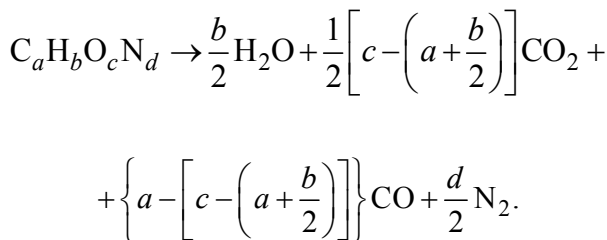
Пример уравнения взрывчатого превращения нитроглицерина:



Признаком ВВ второй группы является неравенство

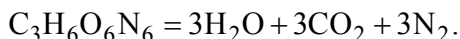
$$c \geq a + \frac{b}{2}.$$

Реакция взрывчатого превращения ВВ этой группы в общем виде записывается так:





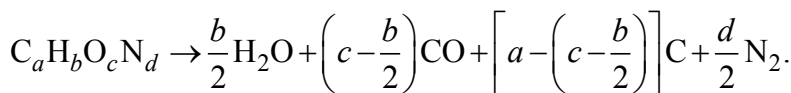
Пример уравнения взрывчатого превращения гексогена:



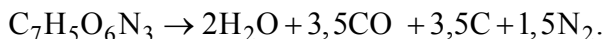
Признаком ВВ третьей группы является неравенство

$$a + \frac{b}{2} > c.$$

Реакция взрывчатого превращения ВВ этой группы в общем виде записывается так:

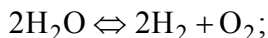
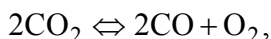


Пример уравнения взрывчатого превращения тротила:



Приведенные примеры уравнений взрыва приближенные, так как между продуктами взрыва происходят различные вторичные реакции, например:

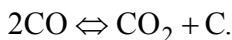
- диссоциация углекислого газа и воды



- реакция водяного газа



- реакция доменного газа



Для точных расчетов необходимо учитывать эти вторичные реакции.

Таблица 1.3

Состав продуктов взрыва в молях на 1 грамм-моль тротила

Продукты взрыва	По приближенному уравнению	Уточненный расчетный состав
CO ₂	–	1,2
CO	3,5	2,0
C	3,5	3,8
H ₂ O	2,5	1,6
H ₂	–	0,9
N ₂	1,5	1,5

В табл. 1.3 приведены составы продуктов взрыва для тротила по приближенному уравнению и уточненному расчету.

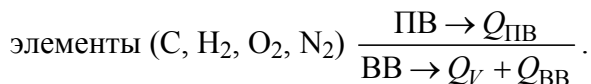
1.3.2. ТЕПЛОТА ВЗРЫВА

Тепловые эффекты превращения веществ зависят от элементарного состава вещества, его химического строения, физического состояния продуктов превращения и от условий протекания химических реакций в процессе превращения.

Тепловые эффекты реакций взрывчатых превращений принято оценивать величиной Q_V . Это объясняется тем, что из-за кратковременности взрывчатого превращения продукты взрыва не успевают сколько-нибудь существенно расшириться, и поэтому можно полагать, что выделение энергии при взрыве ВВ происходит при постоянном объеме, равном первоначальному объему заряда ВВ.

Теплотой взрыва называется количество тепла, которое выделяется при взрыве 1 моля или 1 кг взрывчатого вещества, происходящем в инертной атмосфере или вакууме при постоянном объеме. Теплота взрыва $Q_{V(ж)}$ служит для сравнительной оценки различных ВВ по их энергоемкости. Теплота взрыва $Q_{V(п)}$ или Q_V используется для расчета температуры продуктов взрыва при постоянном объеме.

Вычислить теплоту взрыва можно, если известно уравнение взрывчатого превращения и теплоты образования (или сгорания) ВВ и продуктов взрыва, с помощью схемы:



Из схемы следует, что (согласно закону Гесса)

$$Q_V = Q_{\text{ПВ}} - Q_{\text{ВВ}},$$

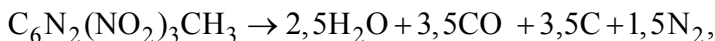
где Q_V – теплота взрыва; $Q_{\text{ПВ}}$ – теплота образования ПВ; $Q_{\text{ВВ}}$ – теплота образования ВВ.

Следовательно, теплота взрыва Q_V равна разности между теплотой образования продуктов взрывчатого превращения и теплотой образования взрывчатого вещества.

Теплотой образования химического соединения называется количество выделяющегося или поглощающегося тепла при реакции образования из простых веществ 1 моля или 1 кг этого соединения. При этом теплота образования простых веществ, т. е. веществ, отвечающих наиболее устойчивому состоянию при данной температуре, принимается равной нулю. К таким веществам относятся H_2 , O_2 , N_2 , С (графит). Ниже приводится таблица теплоты образования некоторых веществ при температуре +18 °С (табл. 1.4).

Для определения $Q_{\text{ПВ}}$ необходимо знать состав ПВ, который, в свою очередь, определяется по уравнению взрывчатого превращения.

Пример вычисления теплоты взрыва тротила:



$$Q_{\text{ВВ}} = 10,1 \text{ ккал/моль};$$

$$Q_{\text{ПВ}} = 2,5 \cdot 57,5 + 3,5 \cdot 26,7 = 237,2 \text{ ккал};$$

$$Q_V = 237,2 - 10,1 = 227,1 \text{ ккал/моль, или } 1000 \text{ ккал/кг.}$$

Таблица 1.4

Теплота образования некоторых веществ при температуре +18 °С

Формула	Молекулярный вес	Теплота образования $Q_{ПВ}$, ккал/моль	
		$V = \text{const}$	$P = \text{const}$
CO	28	26,7	26,4
CO ₂	44	94,0	94,0
H ₂ O (пар)	18	57,5	57,8
H ₂ O (жидк)	18	67,5	68,3
NO	30	–21,6	–21,6
NO ₂	46	–8,3	–8,0
NH ₃ (газ)	43	10,4	11,0
CH ₄	16	17,2	17,9
C ₆ H ₂ (NO ₂) ₃ CH ₃ (тротил)	227	10,1	14,2
(CH ₂ NNO ₂) ₃ (гексоген)	222	–22,3	–17,1
C ₆ H ₂ (NO ₂) ₃ NNO ₂ CH (тетрил)	287	–13,3	–8,0
C(CH ₂ ONO ₂) ₄ (ТЭН)	316	120,0	127,0
NH ₄ NO ₃	80	84,7	87,4
Al ₂ O ₃	92	398	–

Количество тепловой энергии, высвобождающейся при взрывчатом превращении для различных ВВ, изменяется в пределах 350...1500 ккал/кг (табл. 1.5).

Таблица 1.5

Теплота взрыва (опытные данные)

ВВ	ρ_0 , г/см ³	$Q_{V(n)}$, ккал/кг
Тротил	1,60	1010
	0,85	810
Гексоген	1,60	1320
	0,95	1270
Тетрил	1,60	1090
	1,00	920
ТЭН	1,60	1360
Нитроглицерин	1,60	1485
Аммотол 80/20	1,30	990
Аммонийная селитра	—	379
Гремучая ртуть	4,0	415
Азид свинца	4,0	390

Теплота взрывчатого превращения – важнейшая энергетическая характеристика, определяющая работоспособность и мощность ВВ. Чем больше выделяется тепла, тем выше работоспособность, мощность ВВ и разрушительное действие продуктов взрыва.

1.4. РАСЧЕТ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРОДУКТОВ ВЗРЫВА

Газообразные продукты взрыва являются носителем энергии, высвобождаемой в процессе превращения ВВ, и тем агентом, при помощи которого осуществляется разрушительное действие взрыва. Для окончательной оценки показателей действия взрыва необходимо знать термодинамические параметры и физические характеристики продуктов превращения ВВ.

Важнейшие термодинамические параметры продуктов взрыва:

- 1) число молей $\sum n_i$ газообразных продуктов взрыва, приходящееся на 1 моль или 1 кг исходного вещества;
- 2) средняя молекулярная масса продуктов взрыва;
- 3) удельный объем газообразных продуктов взрыва;

4) теплоемкость;

5) температура взрыва и температура детонации.

Большинство из этих параметров можно рассчитать на основе данных о составе продуктов взрыва.

Рассмотрим методику их расчета.

1. Число молей газообразных продуктов взрыва, образующихся при взрыве 1 моля ВВ, определяется по формуле

$$\sum_{i=1}^k n_{\text{CO}_2} + n_{\text{CO}} + n_{\text{H}_2\text{O}} + n_{\text{H}_2} + n_{\text{O}_2} + n_{\text{N}_2}. \quad (1.1)$$

Для ВВ состава $\text{C}_a\text{H}_b\text{O}_c\text{N}_d$ величина $\sum n_i$ может быть рассчитана следующим образом:

$$\sum n_i = a + \frac{b+d}{2} - n_c - n_{\text{O}_2}. \quad (1.2)$$

Число молей газообразных продуктов взрыва, приходящееся на 1 кг ВВ, определяется по формуле

$$n_1 = \frac{\sum_{i=1}^k n_i}{M} 10^3, \quad (1.3)$$

где M – молекулярная масса ВВ.

2. Средняя молекулярная масса M_Σ газообразных продуктов взрыва представляет собой массу, приходящуюся в среднем на 1 моль продуктов взрыва. Величина M_Σ рассчитывается по формуле

$$M_\Sigma = \frac{M = 12n_{\text{C}}}{\sum_{i=1}^k n_i}, \quad (1.4)$$

или

$$M_\Sigma = \frac{1000 - 12n'_{\text{C}}}{n_i}, \quad (1.5)$$

где n'_{C} – количество грамм-молекул атомов свободного углерода в 1 кг продуктов взрыва.

3. Удельный объем газообразных продуктов взрыва – важнейшая характеристика ВВ, поскольку она служит мерой газообразования в процессе взрывчатого превращения и позволяет косвенно судить о работоспособности продуктов взрыва.

Под удельным объемом понимается объем газов, образующихся при взрыве 1 кг ВВ, занимаемый ими после расширения до давления 1 атм и охлаждения до температуры 0 °С. Удельный объем обозначают W_1 и измеряют в литрах на килограмм (л/кг).

Для расчета W_1 используется закон Авогадро, согласно которому 1 моль любого газа при нормальных условиях ($P = 1$ атм, $T = 0$ °С) занимает объем 22,4 л. Следовательно,

$$W_1 = 22,4 \sum_{i=1}^k n_i. \quad (1.6)$$

Удельный объем зависит от элементарного состава ВВ, плотности заряда и условий взрыва. Для ВВ, продукты взрыва которых не содержат конденсированных веществ, удельный объем обратно пропорционален средней молекулярной массе продуктов взрыва: чем меньше M_Σ , тем больше W_1 . Молекулярная масса M_Σ тем меньше, чем больше в продуктах взрыва содержится легких газов – продуктов неполного окисления H_2 и CO . Если ВВ имеет $KB < 0$, то образование в составе продуктов взрыва твердого углерода приводит к снижению величины W_1 . Однако у таких ВВ удельный объем может увеличиваться за счет снижения плотности заряда. Чем меньше начальная плотность заряда, тем меньше давление, развивающееся при взрыве. При меньшем давлении равновесие реакции $2CO \rightleftharpoons CO_2 + C$ сдвигается в сторону увеличения объема, т. е. в сторону образования CO (табл. 1.6).

4. Температура взрыва, теплоемкость продуктов взрыва и температура детонации. Под температурой взрыва понимается то значение температуры, которым будут обладать продукты взрыва, если вся энергия, выделившаяся в результате взрывчатого превращения ВВ, пойдет на их нагрев.

Понятие температуры детонации вводится для оценки тепловой части энергии продуктов взрыва конденсированных ВВ.

Таблица 1.6

**Значение удельных объемов продуктов
взрыва для ряда ВВ**

ВВ	ρ_0 , г/см ³	Удельный объем, л/кг
Тротил	1,5	750
Тетрил	1,55	740
ТЭН	1,65	790
Гексоген	1,5	890
Аммотол 80/20	1,3	890
Сплав ТГ-50	1,68	800

Начальная плотность конденсированного ВВ обычно больше 1 г/см³. Продукты взрыва таких ВВ, занимая в первый момент после их образования начальный объем вещества, находятся в сильно уплотненном состоянии, поэтому их плотность может превысить 2 г/см³. Естественно, что при такой высокой плотности продукты взрыва нельзя рассматривать как обычные газы, температура которых обуславливается энергией движения молекул. Часть энергии продуктов детонации конденсированных ВВ имеет упругий характер, так как обусловлена действием сил притяжения и отталкивания между молекулами сильно уплотненных продуктов превращения. Другая часть энергии продуктов взрыва имеет тепловой характер. Именно эту часть энергии и учитывает температура детонации T_d , которая, очевидно, всегда меньше $T_{взр}$. Согласно Г.А. Авакяну, температура детонации может быть рассчитана по формуле

$$T_{взр} = \frac{Q_{V(n)}}{\bar{C}_V} + 290 \text{ К}, \quad (1.7)$$

где \bar{C}_V – величина мольной теплоемкости продуктов взрыва, которая определяется соотношением

$$C_V = \sum_{i=1}^k \bar{C}_{Vi} n_i, \quad (1.8)$$

где \bar{C}_{Vi} – средняя в интервале температур от T_0 до $T_{взр}$ мольная теплоемкость i -го компонента продуктов взрыва.



Однако в формулу расчета температуры детонации вместо $Q_{V(п)}$ необходимо подставить величину тепловой части энергии взрыва Q_T . Авакян Г.А. показал, что величина Q_T составляет некоторую часть от теплоты взрыва:

$$Q_T = K_T Q_{V(п)}, \quad (1.9)$$

где $K_T < 1$ – коэффициент, зависящий от теплоты взрыва ВВ; его величина может быть рассчитана по эмпирической формуле

$$K_T = 0,77 \left(1 + 10^{-4} Q_{V(п)} \right). \quad (1.10)$$

Расчет температуры детонации по методу Г.А. Авакяна ведется в два этапа. Сначала по величине теплоты взрыва $Q_{V(п)}$ определяется ориентировочное значение температуры T_d :

$$T_d = \frac{Q_{V(п)}}{\bar{C}_{Vэф}} + 290 \text{ К}, \quad (1.11)$$

где $\bar{C}_{Vэф}$ – средняя эффективная теплоемкость продуктов взрыва, вычисленная по формуле, аналогичной (1.8), в которой значение эффективной теплоемкости для каждого компонента продуктов взрыва берется из табл. 1.7.

Таблица 1.7

Эффективная теплоемкость

Компоненты продуктов взрыва	Эффективная теплоемкость $\bar{C}_{Vэф}$, кал/моль · К
CO ₂	13,5
H ₂ O	11,5
H ₂ , O ₂ , N ₂ , CO	7,1
C (тв)	6,4

Затем по найденному значению T_d вычисляется теплоемкость продуктов взрыва и находится температура детонации во втором приближении:

$$T_d = \frac{K_T Q_{V(p)}}{\bar{C}_V} + 290 \text{ К.} \quad (1.12)$$

Вычислим T_d для нитроглицерина:

$$K_T = 0,77(1 + 0,1475) = 0,883;$$

$$Q_T = 0,883 \cdot 335 = 296 \text{ ккал/моль};$$

$$T_d = \frac{Q_{V(p)}}{\bar{C}_V} + 290 = \frac{335 \cdot 10^3}{83,1} + 290 = 4320 \text{ К.}$$

Таким образом мы определим температуру детонации.

1.5. ВОЗНИКНОВЕНИЕ И РАСПРОСТРАНЕНИЕ ДЕТОНАЦИИ

1.5.1. ОБЩЕЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ О МЕХАНИЗМЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ДЕТОНАЦИИ

При горении последовательность явлений включает повторяющиеся процессы передачи тепла от реагирующего слоя к соседнему, разогрева и химической реакции с выделением энергии в последующем слое. Процесс горения распространяется со скоростью значительно меньшей, чем скорость звука, поэтому давление во всем объеме, где находится ВВ, остается практически постоянным.

Существенно иной механизм у взрывчатого превращения ВВ, который связан с прохождением по заряду ВВ резкого скачка давления – ударной волны. При этом очередной слой заряда ВВ подвергается очень резкому удару со стороны продуктов разложения предыдущего слоя, имеющих весьма высокое давление. Быстрое и сильное сжатие вызывает нагрев ВВ до высокой температуры, при которой реакция его разложения идет с большой скоростью. Теплота, выделяющаяся при этой реакции, обуславливает поддержание энергии ударной волны, которая сжимает следующий слой ВВ,

и т. д. Итак, взрывчатое превращение распространяется как совокупность последовательных механических (удар), физических (нагрев) и химических (реакция разложения) процессов. Скорость распространения взрывчатого превращения процесса по ВВ определяется скоростью ударной волны в данном веществе и составляет несколько километров в секунду.

Такой вид взрывчатого превращения характерен для детонации.

Для того чтобы понять явление детонации, необходимо ознакомиться с характеристиками ударных волн.

1.5.2. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ УДАРНОЙ ВОЛНЕ

Если каким-либо источником в среде вызваны смещения частиц значительной амплитуды и соответственно изменения величины давления и плотности по сравнению со звуковыми параметрами, то возникает волна, существенно отличающаяся по свойствам от звуковой волны. Такие волны образуются, например, при движении самолетов и снарядов со скоростью, большей скорости звука, или при детонации ВВ.

Рассмотрим распространение в газе волн сжатия конечной амплитуды. Пусть движением поршня в трубе в газе создано местное повышенное давление. Очевидно, что сжатый слой газа, расширяясь, будет сжимать прилегающие слои. От поршня пойдет волна сжатия. На рис. 1.2 показаны кривые распространения давления вдоль оси трубы со скоростью, равной местной скорости звука. При сжатии газ нагревается и скорость звука в нем становится больше, чем в невозмущенном газе.

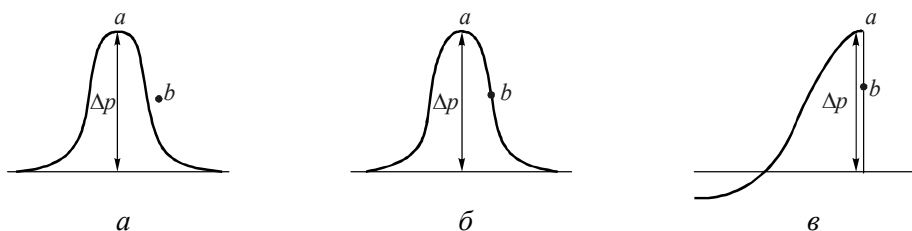


Рис. 1.2. Схемы распространения волн сжатия в газе:

a , $б$, $в$ – распространение давлений во фронте волны в последовательные моменты

Состояние, соответствующее точке a на рис. 1.2, распространяется по газу быстрее, чем, например, состояние, соответствующее

точке b . По мере распространения волны фронт ее становится все круче и наконец обращается в «поверхность разрыва» (рис. 1.2, $в$). На этой поверхности имеет место резкое скачкообразное изменение параметров состояния газа (давление, плотность, температура, скорость движения). Такую волну, характеризующуюся наличием поверхности разрыва основных параметров среды, называют ударной.

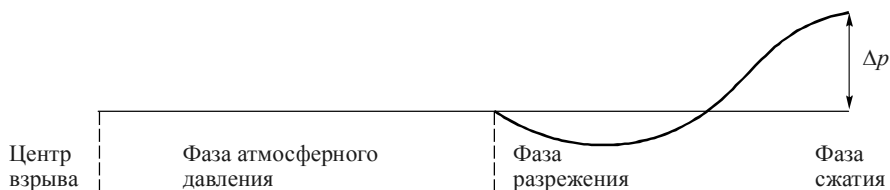


Рис. 1.3. Схема распространения ударной волны, вызванной взрывом в воздухе

Характерной особенностью ударной волны является движущийся позади нее поток среды, направленный в сторону движения волны. Возникающее при образовании ударной волны уплотнение среды получается за счет перемещения частиц газа из слоев, лежащих непосредственно за зоной сжатия, поэтому здесь образуется зона разрежения, в которой давление меньше начального (рис. 1.3).

1.5.3. ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ УДАРНОЙ ВОЛНЫ

Для количественной характеристики ударной волны надо определить следующие величины (параметры): скорость распространения ударной волны, скорость движения потока среды, давление, плотность и температуру возмущенной среды. Приводимые ниже соображения в принципе справедливы не только для газов, но и для конденсированных сплошных сред. Рассмотрим (рис. 1.4) трубу с поперечным сечением 1 см^2 , заполненную покоящимся газом, давление которого p_0 и плотность ρ_0 . В трубу вдвигается поршень с постоянной скоростью U .

Если бы в трубе находилось несжимаемое вещество, то внезапное движение поршня мгновенно передалось бы всей массе вещества, заполняющей трубу. В сжимаемом же газе возбуждение, вызванное движением поршня, передается с конечной скоростью, поэтому впереди поршня образуется конечная зона газа, сжатого до

давления p и плотности ρ . При движении системы «поршень–сжатый газ» все новые массы невозмущенного газа сжимаются до давления p и плотности ρ и приобретают скорость U , вследствие чего зона сжатого газа непрерывно увеличивается.

Граница этой зоны (плоскость AA на рис. 1.4) перемещается вдоль трубы с некоторой скоростью D .

Справа от AA – неподвижный газ с начальными параметрами (давление p_0 , плотность ρ_0 , температура T_0), слева – газ, сжатый до давления p с плотностью ρ и движущийся со скоростью поршня U . На границе раздела (фактически представляющей собой не плоскость, а некоторую область конечной, хотя и весьма малой ширины), называемой фронтом ударной волны, значения параметров, характеризующих состояние газа, изменяются очень резко, скачкообразно.

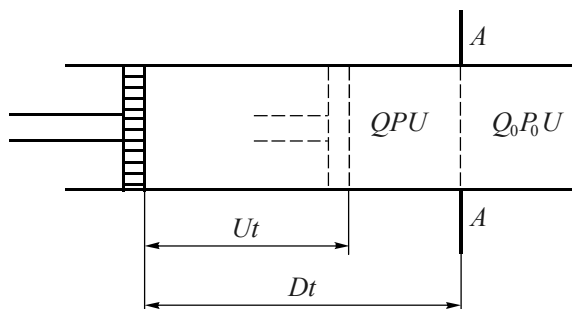


Рис. 1.4. Схема образования ударной волны в трубе движением поршня

Если сжатие газа происходит настолько быстро, что можно пренебречь потерями энергии за счет теплопроводности, и если не учитывать внутреннее трение в газе и трение между движущимся газом и поверхностью трубы, то легко получить уравнения, связывающие параметры ударной волны. Для этой цели используем основные законы механики и термодинамики:

- 1) уравнение сохранения массы (уравнение неразрывности);
- 2) уравнение сохранения импульсов;
- 3) уравнение сохранения энергии;
- 4) уравнение состояния газа.

Уравнение сохранения массы. За время t граница AA (рис. 1.4) уйдет от начального положения поршня на расстояние Dt . Масса

вещества, которая подвергалась сжатию за это время, равна $\rho_0 Dt$. Она равна массе газа, сжатого до плотности ρ , между поршнем, продвинувшимся на расстояние Ut , и плотностью ρ :

$$\rho(D - U)t.$$

По закону сохранения массы запишем:

$$\rho_0 Dt = \rho(D - U)t,$$

или

$$\rho_0 D = \rho(D - U). \quad (1.13)$$

Уравнение сохранения импульсов. Указанная масса вещества приобрела скорость, равную скорости движения поршня U .

Импульс, приобретенный массой газа, заключенной между поршнем и фронтом волны за время t , равен $\rho_0 DtU$. Этот импульс равен импульсу сил давления за это же время $(p - p_0)t$. Поэтому

$$\rho_0 DtU = (p - p_0)t, \quad (1.14)$$

или

$$\rho_0 DU = p - p_0.$$

Уравнение сохранения энергии. Приращение энергии вещества при сжатии равно работе внешней силы, перемещающей поршень за время t .

При давлении p на поршень, прошедший путь Ut , работа внешней силы равна pUt . Приращение энергии для единицы массы газа равно

$$E - E_0 + \frac{U^2}{2},$$

где $E - E_0$ – приращение внутренней энергии; $\frac{U^2}{2}$ – приращение кинетической энергии единицы массы вещества.

Для массы газа $\rho_0 Dt$, подвергшейся сжатию, приращение энергии составит $\rho_0 Dt \left(E - E_0 + \frac{U^2}{2} \right)$.

По закону сохранения энергии

$$\rho_0 D t \left(E - E_0 + \frac{U^2}{2} \right) = p U t,$$

или

$$\rho_0 D \left(E - E_0 + \frac{U^2}{2} \right) = p U. \quad (1.15)$$

Общие соотношения для ударных волн. Адиабата Гюгонио.
Преобразуем полученные уравнения. Уравнение (1.13) можно представить в виде

$$D = \frac{\rho}{\rho - \rho_0} U. \quad (1.16)$$

Так как при сжатии газа $\rho > \rho_0$, то из (1.16) непосредственно следует, что D и U направлены в одну сторону, причем $D > U$. Определим D и U :

$$D = \sqrt{\frac{\rho}{\rho_0} \frac{p - p_0}{\rho - \rho_0}}; \quad (1.17)$$

$$U = \sqrt{\frac{(p - p_0)(\rho - \rho_0)}{\rho \rho_0}}. \quad (1.18)$$

После простых преобразований получим

$$E - E_0 = \frac{p + p_0}{2} (V_0 - V), \quad (1.19)$$

где $V = \frac{1}{\rho}$ – удельный объем.

Этому уравнению, показывающему, какие состояния могут получиться из данного начального состояния $(p_0 V_0)$ однократным сжатием при переходе через фронт ударной волны, соответствует в плоскости (p, V) кривая, называемая адиабатой Гюгонио.

Адиабата Гюгонио для идеального газа. Считая, что для вещества, сжатого в волне, справедливо уравнение состояния идеального газа, можно записать:

$$p = \rho RT. \quad (1.20)$$

Как известно, для идеального газа с постоянной теплоемкостью

$$E = C_V T = \frac{R}{k-1} \frac{pV}{R} = \frac{1}{k-1} \frac{p}{\rho},$$

где R – газовая постоянная; $k = \frac{C_p}{C_V}$ – отношение теплоемкостей, следовательно,

$$E - E_0 = \frac{1}{k-1} \left(\frac{p}{\rho} - \frac{p_0}{\rho_0} \right). \quad (1.21)$$

Подставив значение $E - E_0$ из уравнения (1.21) в уравнение (1.19), получим

$$\frac{\rho}{\rho_0} = \frac{k+1}{k-1}. \quad (1.22)$$

Таким образом, даже при неограниченном росте давления в ударной волне плотность газа сохраняет конечное значение. Это обстоятельство существенно отличает ударное сжатие от обратимого сжатия, например, по закону изоэнтропы (адиабаты Пуассона).

Из уравнения (1.22) можно также видеть, что сжатие в ударной волне необратимо. Так, если из одного и того же начального состояния (p_0, ρ_0) газ сжимается в ударной волне в одном случае сразу до давления p_1 , а в другом – сначала до некоторого давления p' ($p < p' < p_1$), а затем второй ударной волной до того же давления p_1 , то конечные состояния сжатого газа будут различны.

1.5.4. ГИДРОДИНАМИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ ДЕТОНАЦИИ

Общие сведения. Согласно гидродинамической теории детонация распространяется по взрывчатому веществу в результате прохождения по нему ударной волны, возбуждающей взрывчатое превращение в каждом слое вещества, по которому она проходит. *Скорость детонации есть та скорость распространения ударной волны по веществу, при которой скачок давления оказывается достаточным, чтобы вызвать взрывчатое превращение вещества в охваченном волной слое.*

Детонация распространяется по ВВ с постоянной скоростью, поскольку потеря энергии ударной волны непрерывно восполняется энергией химического превращения новых частиц вещества.

Механизм распространения детонации по конденсированным ВВ. При прохождении ударной волны по массе ВВ слой ВВ, охваченный волной, подвергается очень быстрому и сильному сжатию. Температура этого слоя поднимается намного выше температуры вспышки, и в ВВ возникает интенсивная химическая реакция. Продукты реакции, нагретые за счет ее теплового эффекта до высокой температуры и находящиеся соответственно под большим давлением, поддерживают дальнейшее распространение ударной волны, компенсируя потери ее энергии.

Скорость ударной волны (зависящая только от природы и свойств ВВ), а следовательно, и скорость детонации не зависят от интенсивности начального импульса, если только последний достаточен для возбуждения устойчивой реакции. В конденсированных ВВ возможны два различных механизма возбуждения реакции взрывчатого превращения. В первом механизме реакция может возникать в результате подъема температуры в слое вещества, сжатого ударной волной. Однако из-за малой сжимаемости ВВ разогрев, достаточный для достижения скорости реакции, может возникнуть только при скорости детонации примерно 6...8 километров в секунду.

В случае ВВ, детонирующих с меньшей скоростью, разогрев за счет описанного механизма гомогенного сжатия оказывается недостаточным для того, чтобы реакция разложения имела большую скорость. Гипотеза, предложенная А.Я. Апиным, объясняет распространение детонации и в таких случаях.

По Апину, детонация порошкообразных ВВ представляет собой своеобразное «взрывное горение» отдельных частиц ВВ. Эти

частицы воспламеняются в результате адиабатического сжатия газовых включений или струями горячих продуктов взрыва, проникающими в поры порошкообразного ВВ и охватывающими его частицы пламенем; при воспламенении этих частиц они сгорают под большим давлением с большой скоростью, достаточной для поддержания интенсивной ударной волны. Нагрев и воспламенение могут происходить также при трении частиц друг о друга при сжатии их во фронте детонационной волны. Это второй механизм возбуждения реакции взрывчатого превращения.

Зависимость между параметрами детонационной волны.

Если рассматривать распространение детонации как результат прохождения ударной волны по ВВ, то можно применить соотношения, выведенные в данном разделе. Очевидно, что уравнения (1.17) и (1.18), выражающие скорости сохранения массы импульсов, справедливы и для детонационной волны. Величина D здесь приобретает новый физический смысл – скорость детонации.

Уравнение (1.19) примет новый вид:

$$E_1 - E_0 = \frac{1}{\rho\rho_0} \frac{p + p_0}{2} (\rho - \rho_0) + Q_V, \quad (1.23)$$

где Q_V – теплота взрывчатого превращения.

В случае детонации имеет место соотношение из гипотезы Чепмена–Жуге

$$D - U = C = (\partial p / \partial \rho)^{1/2},$$

использованное в так называемой модели детонации Зельдовича–Неймана–Деринга, в которой рассматривается детонация с химическими реакциями с учетом реального течения реакций.

$$D = U + C. \quad (1.24)$$

В качестве уравнения состояния, как показали Л.Д. Ландау и К.П. Станюкович, для продуктов детонации, находящихся под давлением свыше $100\,000\text{ кг/см}^2$, служит зависимость

$$pV^k = \text{const}, \quad (1.25)$$

где коэффициент политропы $k \cong 3$.



Уравнение (1.25) можно записать в виде

$$p = B\rho^k = B\rho^3, \quad (1.26)$$

а из уравнения (1.17), возводя обе части в квадрат и пренебрегая начальным давлением p_0 по сравнению с давлением в детонационной волне, найдем

$$D^2 = \frac{p\rho}{\rho_0(\rho - \rho_0)}. \quad (1.27)$$

Подставив (1.26) в (1.27), получим

$$D^2 = B \frac{\rho^4}{\rho_0(\rho - \rho_0)}. \quad (1.28)$$

Как доказывается в теории ВВ, условие (1.24) означает, что на опыте достигается наименьшая возможная скорость детонации. Чтобы найти то значение ρ , при котором для данных B и p_0 скорость детонации минимальна, дифференцируем (1.28) и приравняем производную нулю:

$$\frac{d(D^2)}{d\rho} = \frac{B}{\rho_0(\rho - \rho_0)} [4\rho^3(\rho - \rho_0) - \rho^4] = \frac{B\rho^3(3\rho - 4\rho_0)}{\rho_0(\rho - \rho_0)^2} = 0,$$

откуда следует, что

$$\rho = \frac{4}{3}\rho_0. \quad (1.29)$$

Далее, разрешая (1.27) относительно p и подставляя значение ρ из формулы (1.29), найдем

$$p = \frac{1}{4}\rho_0 D^2. \quad (1.30)$$

Подставляя полученное значение p в уравнение (1.14) и снова пренебрегая величиной p_0 по сравнению с p , получаем

$$U = \frac{D}{4}. \quad (1.31)$$

Таблица 1.8

Параметры детонационной волны

Название ВВ	Плотность, г/см ³		Скорость детонации D , м/с	Давление во фронте детонации P_d , кгс/см ²	Массовая скорость U , м/с
	началь- ная ρ_0	во фронте детонаци- онной волны			
Тротил	1,59	2,15	6900	193 000	1725
Тротил	1,45	1,93	6500	157 000	1625
Гексоген флегма- тизиро- ванный	1,63	2,16	8100	296 000	2025
Тетрил	1,61	2,15	7470	229 000	1865
ТЭН	1,60	2,13	7900	225 000	1975

Уравнения (1.29), (1.30), (1.31) позволяют рассчитать основные параметры детонационной волны по определяемой опытным путем скорости детонации. Результаты таких расчетов для некоторых ВВ приведены в табл. 1.8.

1.5.5. ОПЫТНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ ДЕТОНАЦИИ

В настоящее время применяются следующие методы определения скорости детонации:

- сравнительный;
- оптический;
- хронометрический.

Сравнительный метод (метод Дотриша) наиболее прост и широко используется на практике, в особенности для определения скорости детонации зарядов непосредственно в изделиях (снарядах, авиабомбах), т. е. в случаях, затрудняющих или вовсе исключающих применение других методов. По этому методу скорость детонации определяется сравнением известной скорости детонации детониру-

ющего шнура (скорость детонации шнура измеряется другим способом) со скоростью детонации испытываемого заряда ВВ. На рис. 1.5 показана схема Дотриша. В испытываемом заряде ВВ длиной 40...50 см на расстоянии $L = 20...30$ см просверливаются два отверстия А и Б, в которые вводятся концы петли детонирующего шнура длиной около 1 м. Средняя часть петли укладывается на свинцовой или латунной пластинке, на которой проводится черта (О), соответствующая середине шнура. Детонация испытываемого ВВ, возбужденная электрическим капсюлем-детонатором, последовательно вызовет детонацию концов шнура А и Б, причем конец А будет детонировать ранее конца Б. Две волны детонации, идущие по шнуру навстречу друг другу, сойдутся не на середине петли (точка О), а в точке В, несколько смещенной влево (на расстоянии a).

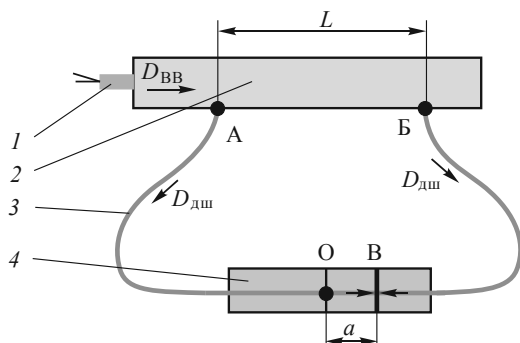


Рис. 1.5. Схема метода Дотриша:

1 – электродетонатор ВВ; 2 – заряд; 3 – детонирующий шнур; 4 – пластинка; $D_{ВВ}$ – скорость фронта детонационной волны в заряде ВВ; $D_{дш}$ – скорость детонации шнура

При столкновении двух детонационных волн происходит резкий скачок давления, вследствие чего точка встречи четко получается в виде своеобразного отпечатка на пластинке. По расстояниям L , l и скорости детонации шнура $D_{дш}$ вычисляется искомая скорость детонации по формуле

$$D_{ВВ} = D_{дш} \frac{L}{2a}. \quad (1.32)$$

Точность описанного метода примерно 3...5 %.

Оптический метод заключается в фотографировании распространения фронта детонационной волны на светочувствительную пленку. При этом на пленке отмечается свечение, сопутствующее распространению волны по заряду ВВ. Имеется несколько разновидностей техники оптического метода. Наиболее современными являются фоторегистраторы, в которых пленка неподвижна, а изображение перемещается с помощью зеркала вдоль пленки: это так называемая зеркальная развертка. Схема зеркальной фоторазвертки показана на рис. 1.6.

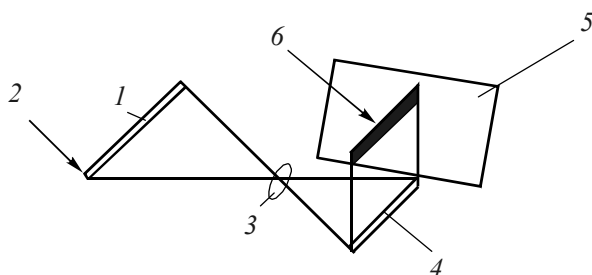


Рис. 1.6. Схема оптического метода:

1 – заряд ВВ ($L = 12 \dots 15$ см); 2 – капсюль-детонатор; 3 – оптическая система; 4 – плоское вращающееся зеркало; 5 – фотопленка; 6 – изображение

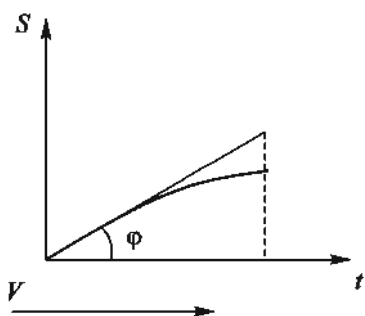


Рис. 1.7. След детонации на пленке

Зеркало вращается с определенной скоростью (~ 1000 об/с). Изображение детонирующего заряда ВВ, отражаясь от зеркала, попадает на фотопленку. При неподвижном зеркале на пленке будет вертикальная полоса, соответствующая изображению заряда. При вращении зеркала изображение на пленке будет в виде наклонной прямой, отвечающей светящемуся следу продуктов взрыва (рис. 1.7).

Скорость детонации вычисляется по формуле

$$D = \frac{4\pi R n}{\beta} \operatorname{tg} \varphi, \quad (1.33)$$

где φ – угол наклона касательной к кривой путь–время; β – коэффициент увеличения прибора (как правило, $\beta < 1$); R – радиус развертки; n – скорость вращения зеркала.

$$\frac{4\pi R}{\beta} = C,$$

где C – постоянная прибора,

$$D = Cn \operatorname{tg} \varphi.$$

Точность зеркальной фоторазвертки 1...1,5 %.

В настоящее время применяется *электронно-оптический преобразователь*, который состоит из оптического, электронного и фотографического узлов. Схематическое изображение его дано на рис. 1.8.

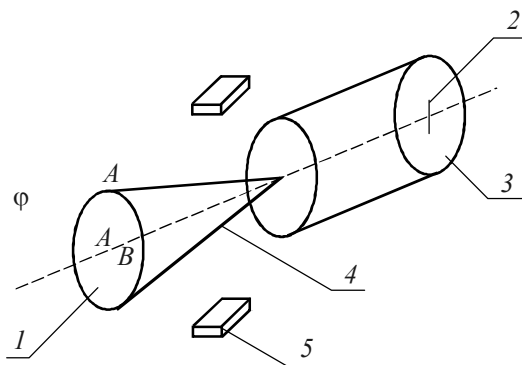


Рис. 1.8. Схема электронного узла:

1 – флуоресцирующий экран; 2 – изображение заряда ВВ от объектива; 3 – светочувствительный экран; 4 – линза, фокусирующая поток электронов; 5 – отклоняющее устройство

Оптический узел состоит из плоского зеркала, воспринимающего изображение детонирующего заряда, и объектива, направляющего это изображение на экран электронного узла. Электронный узел включает в себя светочувствительный экран, линзу, фокусирующую поток электронов, отклоняющее электронный поток устройство, создающее магнитное поле, напряженность которого линейно меняется во времени, и флуоресцирующий экран.

Фотографический узел представляет собой фотоаппарат. При перемещении вдоль линии AB светящейся точки (т. е. фронта детонации) с постоянной скоростью, что соответствует постоянной скорости движения фронта волны по заряду ВВ, на флуоресцирующем экране появится наклонная светящаяся линия. Изображение наклонного следа и первоначального положения линии AB фотографируется. Тангенс угла φ между наклонной линией и вертикальной осью AB равен отношению скорости разветки к скорости детонации в некотором масштабе β :

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{V}{\beta D}, \quad (1.34)$$

где V – скорость разветки электронного пучка магнитным полем.

Хронографический метод (рис. 1.9) заключается в фиксировании времени детонации двумя точками (a , b) заряда ВВ.

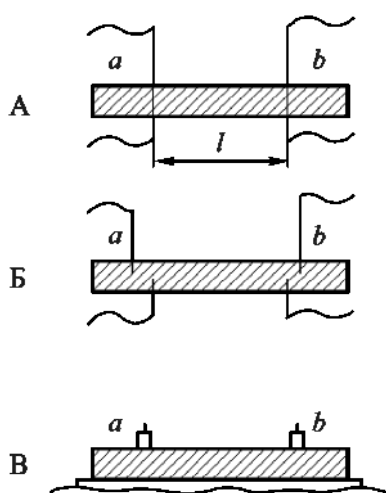


Рис. 1.9. Устройство для фиксирования точек детонации:

положение А – замкнутая цепь;
положение Б – разомкнутая цепь;
положение В – ионогазовая цепь

В точках a и b помещаются проводники, замкнутые или разомкнутые. В момент прохождения детонационной волны происходит разрыв или замыкание проводников, в результате чего подаются сигналы в регистрирующие приборы, в качестве которых применяются шлейфовые осциллографы. Точность измерения этим методом примерно 2 % при длине заряда около 5 см.

Для определения времени детонации на участке ВВ используется высокая проводимость ионизационных ПВ. Для этого на определенном расстоянии друг от друга на поверхности испытываемого заряда помещаются две пары проводников, два так называемых ионизационных датчика (рис. 1.9, изображение В).

При достижении детонационной волной этих датчиков между их электродами возникает проводимость. Если на датчики подано определенное напряжение, то в момент замыкания потенциал на

них мгновенно изменится. Импульсы, возникающие за счет резкого изменения потенциала на датчиках, используются для измерения отрезка времени при прохождении детонации от одного датчика к другому. Точность такого способа примерно 0,5 % при длине измеряемого участка заряда 2...5 см.

1.6. ЗАВИСИМОСТЬ СКОРОСТИ И УСТОЙЧИВОСТИ ДЕТОНАЦИИ ОТ СВОЙСТВ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ И ХАРАКТЕРИСТИК ЗАРЯДА

1.6.1. ВЛИЯНИЕ СВОЙСТВ ВВ

Основным свойством ВВ, определяющим скорость детонации, является теплота взрыва. Установлено, что скорость детонации пропорциональна корню из теплоты, т. е. $D = \sqrt{Q_V}$. Из этой пропорциональности следует, что чем больше Q_V , тем больше D . Для конденсированных ВВ получена формула $D = 225\sqrt{Q_V}$, которая дает достаточно близкие к опыту результаты при плотности заряда, равной 1,6 г/см³.

На скорость детонации существенно влияет чистота ВВ. Примеси в ВВ могут быть различные: взрывчатые и невзрывчатые, взаимодействующие с основным ВВ или совершенно инертные, горючие и негорючие и т. д.

При разбавлении одного ВВ другим скорость детонации такой смеси (сплава) определяется процентным соотношением составных частей и их теплотой взрыва. Например, скорость детонации взрывчатой смеси из тротила и гексогена ТГ-50

$$D = 225\sqrt{0,5 \cdot 1010 + 0,5 \cdot 1320} = 7650 \text{ м/с.}$$

Если к одному ВВ добавляется другое ВВ, существенно влияющее на характер взрывчатого превращения и, следовательно, на теплоту взрыва, то рассчитать скорость детонации даже приближенно не удастся вследствие неопределенности происходящих реакций при взрыве таких смесей. Например, скорость детонации смеси А-80, содержащей 80 % NH_4NO_3 и 20 % тротила, по опытным

данным, примерно 5100 м/с. Скорость же детонации чистой NH_4NO_3 примерно 3000 м/с, а чистого тротила – 7000 м/с.

Введение в состав заряда ВВ невзрывчатых, инертных веществ, как правило, снижает скорость детонации. Инертные примеси затрудняют передачу детонации по массе ВВ. Они препятствуют распространению ударной волны и берут на себя часть энергии, понижая тепловой эффект взрывчатого превращения, а значит, и скорость детонации. Например, чистый гексоген при плотности $\rho_0 = 1,5 \text{ г/см}^3$ имеет скорость детонации $D = 7900 \text{ м/с}$, а флегматизированный гексоген, содержащий 5 % парафина, 7600 м/с.

Невзрывчатые примеси, вступающие в химическое взаимодействие с молекулами ВВ или ПВ, могут повышать скорость детонации. Например, сухой прессованный пироксилин со скоростью детонации $D = 6300 \text{ м/с}$ при увлажнении до содержания 5 % воды имеет скорость детонации 6800 м/с. При дальнейшем увлажнении скорость детонации понижается. Металлические добавки (Al, Mg) к ВВ, хотя и увеличивают суммарный тепловой эффект, но уменьшают скорость детонации. Например, смесь 74 % тротила +26 % Al имеет Q_V примерно на 40 % больше, чем у чистого тротила, а скорость детонации при плотности 1,8 – около 6500 м/с.

Объясняется это тем, что скорость реакции взаимодействия алюминия с продуктами взрыва весьма незначительна, вследствие этого энергия этой реакции не сказывается на распространении детонационной волны по заряду. Кроме того, следует иметь в виду, что алюминий в процессе детонации служит инертной примесью.

1.6.2. ВЛИЯНИЕ ДИАМЕТРА ЗАРЯДА

Из характеристик заряда на скорость детонации прежде всего влияет диаметр заряда. Оказывается, что для зарядов, имеющих форму длинного цилиндра, устойчивый режим детонации возможен лишь при диаметрах, равных некоторым критическим ($d_{кр}$) и больших. При $d_{кр}$ скорость детонации для данных условий наименьшая. При дальнейшем уменьшении диаметра распространение детонационного процесса становится невозможным. Для однородных ВВ (октоген, гексоген, тротил, тетрил, пентрит) наименьшая скорость детонации изменяется в пределах $D_{\min} = 2200 \dots 3000 \text{ м/с}$, а для

аммонитов $D_{\min} = 1000 \dots 1200$ м/с. Существование критических диаметров определяет границы устойчивого распространения детонации. При расчете критического диаметра нужно сослаться на принцип Ю.Б. Харитона, который заключается в следующем.

Детонация может устойчиво распространяться по заряду, если продолжительность реакции в волне (τ) меньше времени разброса вещества в радиальном направлении (Θ).

Исходя из этого можно найти такой минимальный диаметр заряда, при котором еще возможно устойчивое распространение детонации, т. е. найти критический диаметр заряда ВВ.

Условия устойчивости определяют следующим образом. Продолжительность химической реакции (рис. 1.10) в детонационной волне τ будет равна

$$\tau = \frac{U}{D - \delta},$$

или, учитывая, что $U = D/4$:

$$\tau = \frac{D}{k+1} \approx \frac{1}{4} D,$$

будем иметь

$$\tau = \frac{4}{3} \frac{\delta}{D}. \quad (a)$$

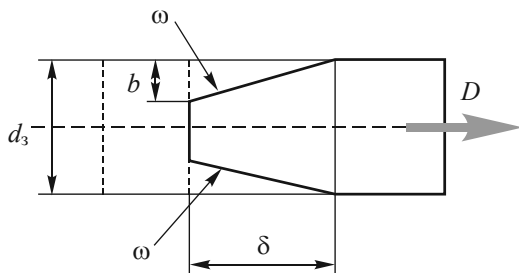


Рис. 1.10. Зона химической реакции в детонационной волне:

d_3 – диаметр заряда ВВ; ω – волна разрежения; $\omega = 0,5D$ ВВ; b – глубина проникания волны разрежения; δ – ширина зоны реакции; D – скорость детонации ВВ

Время разброса вещества в радиальном направлении составит

$$\Theta = \frac{d_3}{2\omega},$$

следовательно,

$$d_{кр} = 2\omega\tau. \quad (б)$$

С учетом выражения (а) и того, что $\omega = D/2$, формулу (б) можно переписать следующим образом:

$$d_{кр} = 2 \frac{1}{2} D \frac{4}{3} \frac{\delta}{D} = \frac{4}{3} D,$$

т. е. критический диаметр близок по величине к ширине зоны химической реакции. При $d_3 > d_{кр}$ потери энергии в детонационной волне должны уменьшаться, а параметры волны соответственно возрастет, асимптотически приближаясь к максимуму.

Детонацию с максимальными параметрами для данного ВВ и данной плотности называют идеальной детонацией или детонацией в идеальном режиме. Диаметр заряда, при котором параметры детонации близки к максимальным (рис. 1.11), т. е. к $D_{и}$, называют предельным диаметром ($d_{пр}$).

Детонацию, протекающую в зарядах с $d_{кр} < d_3 < d_{пр}$, называют неидеальной или детонацией в неидеальном режиме. Связь между скоростью идеальной детонации, шириной зоны реакции и диаметром заряда выражается формулой, предложенной А. Дубновым:

$$D = D_{и} \left(1 - \frac{\delta}{d_3} \right).$$

Величина критического диаметра зависит от плотности ВВ, наличия оболочки и ее материала, внешнего давления, температуры и других параметров.

Время τ химической реакции превращения ВВ и ПВ мало зависит от свойств ВВ. Образовавшиеся ПВ разлетаются во все стороны вследствие большого градиента давления (давление детонации примерно 10^5 кгс/см²).

Время разброса заряда t определяется главным образом его диаметром и в меньшей степени прочностью самого заряда. Чем меньше диаметр, тем меньше время разброса. Очевидно, для устойчивого распространения детонации надо соблюдать следующие неравенства: 1) $\tau < t$ и 2) $t > \theta$. Первое неравенство означает, что для обеспечения устойчивой детонации заряда необходимо, чтобы время химической реакции было меньше времени разброса ВВ. Второе неравенство означает, что для обеспечения устойчивой детонации заряда необходимо, чтобы время химической реакции было меньше времени разлета ПВ.

Из второго неравенства, как и из первого, следует, что существует какой-то критический диаметр заряда $d_{кр} = 2a\tau$, менее которого детонация невозможна.

При увеличении заряда скорость детонации повышается, достигая своего максимального значения при некотором предельном диаметре $d_{кр}$ (рис. 1.11). Рост скорости детонации в этом случае объясняется тем, что с увеличением диаметра заряда снижаются относительные потери энергии вовне, так как уменьшается разброс ВВ и разлет ПВ. В интервале $d_{кр}$ и $d_{пред}$ зависимость скорости детонации от диаметра заряда математически не установлена; как показывает опыт, предельные диаметры в несколько раз больше критических (табл. 1.9 и 1.10).

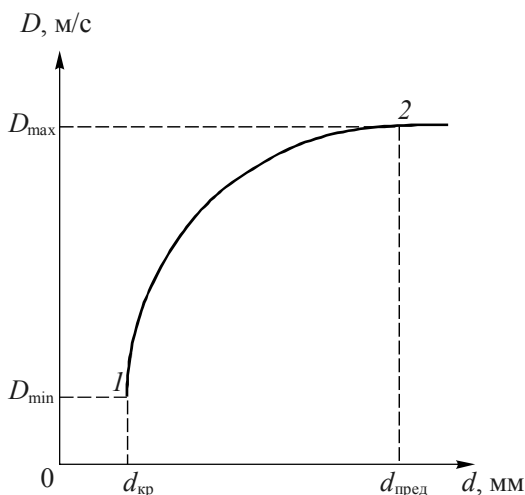


Рис. 1.11. Зависимость скорости детонации ВВ от диаметра заряда

Таблица 1.9

Зависимость критического диаметра от ВВ

ВВ	$d_{кр}$, мм
Азид свинца	0,01...0,02
ТЭН	1,0...1,5
Гексоген	1,0...1,5
Аммонийная селитра	80...100

Таблица 1.10

Зависимость предельного диаметра от материала ВВ

ВВ	ρ_0 , г/см ³	$d_{пр}$, мм
Гексоген	1,0	3...4
Тротил прессов	1,6	10
Тротил литой	1,6	10
Аммотол 50/50 литой	–	120

Максимальные скорости детонации, соответствующие предельным диаметрам, для однородных ВВ примерно 6000...9000 м/с, а для аммонитов 4000...5000 м/с.

1.6.3. ВЛИЯНИЕ ПЛОТНОСТИ ЗАРЯДА

Известно, что критические и предельные диаметры уменьшаются, а границы между ними сужаются при увеличении плотности заряда и уменьшении размеров частиц ВВ. Это объясняется тем, что с ростом плотности и уменьшением размеров частиц снижается время химической реакции. Следовательно, разрывные заряды должны быть по возможности мелкокристаллическими, а этого легче всего достигнуть методом прессования. Поэтому лучше использовать прессованные заряды, а не литые, так как для заряда прессованного тротила (при $\rho_0 = 1,58$ г/см³) $d_{кр}$ равен 2,5 мм, а для литого заряда крупнокристаллического строения – 30 мм.

С увеличением плотности заряда скорость детонации монотонно возрастает – сначала быстро, а затем более медленно (табл. 1.11). Повышение скорости детонации объясняется тем, что с возрастанием плотности уменьшается относительное рассеивание энергии

вовне и с меньшей потерей энергии осуществляется переход детонационной волны от слоя к слою.

Таблица 1.11

Зависимость скорости детонации от плотности ВВ

Тротил		Тетрил		ТЭН		Гексоген флегматизированный	
ρ_0 , г/см ³	D , м/с	ρ_0 , г/см ³	D , м/с	ρ_0 , г/см ³	D , м/с	ρ_0 , г/см ³	D , м/с
1,0	4700	1,0	5480	0,65	4400	1,25	6660
1,29	5900	1,28	6510	0,80	4900	1,30	6875
1,46	6500	1,45	7220	1,0	3500	1,35	7125
1,59	6900	1,54	7350	1,20	6300	1,40	7315
		1,61	7470	1,40	7100	1,50	7690
				1,60	7900	1,55	7820
						1,60	7995

В интервале плотностей от 1,0 до 1,6...1,7 г/см³ зависимость скорости детонации от плотности для таких ВВ может быть выражена приближенной формулой Б.И. Шехтера:

$$D = A\rho_0^\alpha, \quad (1.35)$$

где A – коэффициент, зависящий от свойств ВВ. Значение A изменяется в пределах 5000...6000. Так, для тротила $A = 5000$, для гексогена $A = 5720$; α – показатель степени. Для многих бризантных ВВ $\alpha = 0,7$. Так, для тротила $\alpha = 0,67$, а для гексогена $\alpha = 0,71$.

1.6.4. ВЛИЯНИЕ НАЛИЧИЯ И ПРОЧНОСТИ ОБОЛОЧКИ ЗАРЯДА НА ИЗМЕНЕНИЕ ВЕЛИЧИН $d_{кр}$ И $d_{пр}$

На величину $d_{кр}$ и $d_{пр}$ существенно влияет оболочка заряда. Оболочка препятствует разбросу ВВ и разлету ПВ и тем самым способствует более полному использованию энергии химической реакции в детонационной волне. Однако это заметно проявляется

лишь при относительно небольших диаметрах и малых плотностях ВВ. При высоких плотностях и больших диаметрах влияние оболочки сравнительно мало или вовсе не проявляется, так как в этом случае относительный разброс ВВ и разлет ПВ невелики. Оболочка не влияет на изменение скорости детонации зарядов, диаметры которых больше предельных или равны им.

Влияние оболочки определяется, прежде всего, ее массой, а прочность служит лишь добавочным фактором. Так, при одинаковой толщине свинцовая оболочка повышает эффект действия заряда больше, чем стальная, несмотря на значительно большую прочность последней.

При больших давлениях существенны главным образом инерционные свойства оболочки и ее сжимаемость, а прочностные весьма второстепенны и практически относительно малозначимы. Инерционные же свойства материала определяются плотностью и толщиной. Оболочка влияет так же, как влияет соответствующее увеличение диаметра заряда: расширяет область устойчивой детонации. Аммонийная селитра в стальной оболочке толщиной 20 мм устойчиво детонирует от капсюля-детонатора при диаметре всего 7 мм, а без оболочки – при диаметре более 80 мм и то при достаточно мощном детонаторе.

Тротил в виде сухого порошка при плотности $\rho_0 = 1,0 \text{ г/см}^3$ детонирует со скоростью 4700 м/с, а если его залить водой, то вокруг частичек тротила образуется оболочка из воды. При этом скорость детонации возрастает до 5100 м/с. Если $d_{\text{зар}} \geq d_{\text{пр}}$, то единственным фактором, способным влиять на скорость детонации, будут теплота взрывчатого превращения Q_V и плотность заряда ρ_0 .

Разработанная И.Ф. Кобылкиным с соавторами теория критического диаметра, иллюстрируемая рис. 1.10, исходит из следующих предположений и фактов:

1) детонационная волна представляет собой комплекс из ударного скачка с последующей зоной химической реакции. Разложением ВВ непосредственно в ударном скачке пренебрегают;

2) в цилиндрическом (плоском) заряде ВВ фронт детонационной волны искривлен. Возможность распространения самоподдерживающейся детонации определяется структурой течения на оси (плоскости) симметрии заряда, а стационарность формы фронта

детонации – структурой течения в поверхностном слое заряда непосредственно за ударным скачком.

Основополагающий вывод рассмотренной модели – это установление критической кривизны детонационного фронта $R_{кр}$, при которой скорость выделения энергии в результате химической реакции равна скорости уменьшения внутренней энергии реагирующего ВВ вследствие расходимости потока за фронтом сферической детонационной волны. Для зарядов ВВ, не заключенных в оболочку, условие стационарности формы детонационного фронта состоит в равенстве угла наклона фронта к образующей заряда звуковому углу Φ_* , при котором течение за фронтом ударной волны в поверхностном слое заряда является звуковым. Для того чтобы связать критический диаметр детонации $d_{кр}$ с критическим радиусом кривизны волнового фронта $R_{кр}$, будем считать, что на пределе распространения детонации фронт детонационной волны сферический, но в отличие от утверждения Харитона радиус его не $d_{кр}/2$, что заведомо ошибочно, а определится из условия стационарности фронта $\Phi = \Phi_*$

$$R_{кр} \cos \Phi_* = d_{кр} / 2.$$

Тогда для критического диаметра имеем

$$d_{кр} = 4uc^2 \cos \Phi_* / Q_{pv} \Gamma w.$$

Здесь Γ – параметр Грюнайзена; w – начальная скорость разложения ВВ после ударного сжатия, Q_{pv} – изобарно-изохорный тепловой эффект.

Полученное соотношение определяет влияние критического диаметра на изменения структуры заряда. Действительно, при одном и том же времени химической реакции критические диаметры литого и прессованного тротила различаются в несколько раз.

Все остальные факторы (величина кристалла, физическая структура ВВ, оболочка) в этом случае могут сказаться лишь на восприимчивости заряда детонации и условиях ее возбуждения (мощность инициирующего импульса, величина начального участка).

Зная зависимости скорости детонации от различных факторов, можно объяснить протекание взрыва с постоянной и возможно большей скоростью детонации, что весьма важно для практики. Чем устойчивее и выше скорость детонации, тем полнее используется энергия заряда ВВ и тем, следовательно, эффективнее действие боеприпаса у цели. Устойчивость детонации связана с полной и неполной детонацией заряда.

1.7. ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ ВВ

1.7.1. НАЧАЛЬНЫЙ, ИЛИ ИНИЦИИРУЮЩИЙ, ИМПУЛЬС

Взрывчатые вещества в зависимости от состава обладают большей или меньшей чувствительностью – способностью противостоять внешним воздействиям, не подвергаясь взрывчатому, т. е. самопроизвольно развивающемуся, химическому превращению. Чем меньшее воздействие необходимо для возбуждения в веществе взрывчатого превращения, тем больше его чувствительность. В соответствии с этим чувствительность ВВ к внешним воздействиям характеризуется величиной того начального, или инициирующего, импульса, который при определенных условиях требуется для возбуждения взрыва.

В качестве начального импульса могут быть использованы различные формы энергии: механическая, тепловая, электрическая, лучистая, а также энергия другого (инициирующего) ВВ.

Количество энергии, необходимое для возбуждения взрыва, даже для одного и того же ВВ при заданном его состоянии, – величина непостоянная и может заметно колебаться в зависимости от формы начального импульса и характера передачи воздействия ВВ.

Так, например, в условиях быстрого нагревания ВВ, осуществляемого при высоких температурах, инициирование взрыва может быть достигнуто при значительно меньшей затрате энергии, чем в условиях медленного разогрева, происходящего при более низких температурах.

При медленном сжатии некоторых ВВ, обладающих относительно невысокой чувствительностью, взрыв, как правило, не воз-

никает даже в том случае, если в процессе сжатия произведена большая работа и при этом достигнуты весьма значительные давления, в то время как в условиях быстрого удара инициирование взрыва некоторых ВВ может быть вызвано при значительно меньших затратах энергии.

Кроме того, форма и величина начального импульса существенно влияют на характер и развитие взрывных процессов. Так, например, под действием теплового импульса при некоторых условиях обеспечивается лишь горение ВВ, а под влиянием удара, в особенности взрыва инициирующих ВВ, – преимущественно его детонация. Все виды начального импульса, за исключением взрывного, носят название простого начального импульса. Сюда относятся луч пламени, искра, удар, трение и др.

Между различными формами начального импульса не наблюдается строгой эквивалентности в отношении результатов их воздействия на одно и то же ВВ. Так, например, азид свинца более чувствителен к механическим воздействиям, чем к тепловому импульсу, а у стифната свинца наблюдается обратная картина.

Избирательная способность ВВ к восприятию внешнего импульса определяется совокупным проявлением их химических и физических свойств, которые могут существенным образом влиять на условия поглощения энергии ВВ и возбуждения в них химической реакции под воздействием того или иного инициирующего импульса.

Чувствительность ВВ к тепловым импульсам

Рассмотрим две разновидности теплового начального импульса:

- а) нагрев ВВ источником тепла без пламени;
- б) нагрев ВВ пламенем, или огневой начальный импульс. Типичная его разновидность – это возникновение самовоспламенения в результате подъема температуры при медленном химическом распаде до момента нарушения изотермичности.

Чувствительность к «беспламенному» нагреву принято характеризовать температурой вспышки. Практически температуру вспышки определяют как наименьшую температуру, до которой

надо нагреть ВВ для того, чтобы вызвать в нем химическое превращение со скоростью, достаточной для получения звукового эффекта и пламени.

Температура вспышки не бывает строго постоянной для каждого вещества, а зависит от ряда причин, в первую очередь от условий, определяющих соотношение между теплоприходом и теплоотводом. Она зависит:

а) от температуры источника тепла, следовательно, от температуры испытываемого ВВ (чем меньше эта температура, тем ниже температура вспышки);

б) от величины навески ВВ, например: при уменьшении величины навески растет температура вспышки, а начиная с некоторой навески разложение вещества происходит без вспышки (теплоприход пропорционален объему, а теплоотвод – поверхности). Чтобы получить сравнимые результаты, температуру вспышки или самовоспламенения, т. е. воспламенения без поджигания, рассчитывают в строго заданных условиях и используют прибор для определения температуры вспышки (рис. 1.12), который представляет собой специальный нагреватель (например, баню со сплавом Вуда),

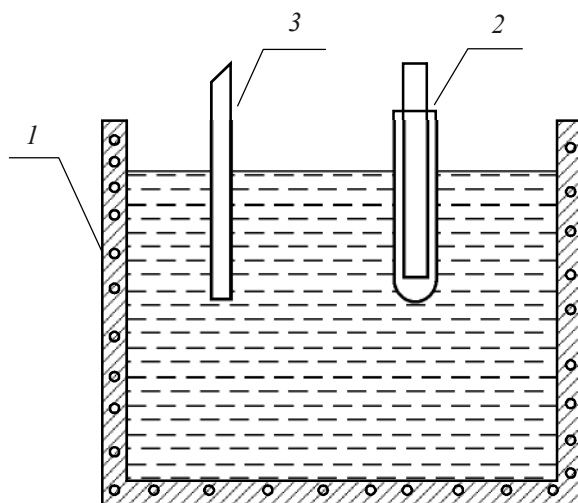


Рис. 1.12. Прибор для определения температуры вспышки:

1 – металлическая баня с электронагревом;
2 – пробирка с навеской ВВ; 3 – термометр

имеющий гнезда для термометра и металлической гильзы с навеской ВВ. Баню нагревают до заданной температуры, в гильзу помещают 0,06 г бризантного ВВ и фиксируют время от момента внесения ВВ до вспышки (звук, пламя, дым). Повторными опытами при разных температурах определяют с точностью до 5° минимальную температуру, ниже которой при выдержке 5 с (5 мин) вспышки не наблюдается (табл. 1.12);

Т а б л и ц а 1.12

Температуры вспышки ВВ

Взрывчатое вещество	Температура вспышки, °С	Взрывчатое вещество	Температура вспышки, °С
Гремучая ртуть	175...180	Тетрил	195...200
Азид свинца	340	Пикриновая кислота	290...300
ТНРС	275		
Пироксилин	195	Тротил	290...295
Нитроглицерин	200	Аммониты	220...240
ТЭН	215	Бездымные пороха	180...200
Гексоген	230	Дымный порошок	290...310

в) от огневого начального импульса. Чаще всего огневой начальный импульс применяется:

- для зажигания порохового заряда при стрельбе и при запуске ракетных или реактивных систем;
- для возбуждения детонации капсюля-детонатора и других целей.

Для оценки чувствительности пользуются приборами, в которых испытываемый порох подвергают действию луча пламени постоянной интенсивности. Находят минимальную продолжительность воздействия луча пламени, необходимую для зажигания. Чувствительность лучевых капсюлей-детонаторов оценивается процентом отказов при воспламенении огнепроводным шнуром из

определенного числа испытаний. В лабораторных условиях воспламеняющая способность патронных и трубочных капсюлей воспламенителей определяется по длине луча пламени, создаваемого капсюлем. Вычисляется максимальное расстояние между капсюлем и зарядом (лепешкой) дымного пороха, на котором происходит безотказное воспламенение последнего.

Чувствительность ВВ к механическим импульсам

Существует несколько разновидностей механического импульса; наибольшее практическое значение имеют удар, трение, накол (для инициирующих ВВ).

По современным взглядам, возбуждение взрыва при механических воздействиях происходит по тепловому механизму: энергия удара, трение, накат трансформируются в теплоту. Считается доказанным, что при механическом воздействии и переходе механической энергии в теплоту не происходит равномерного нагревания всей массы ВВ, подвергшейся удару, а возникают мельчайшие локальные участки (очаги) разогрева, в которых температура может подняться до нескольких сотен градусов.

В очагах разогрева происходит воспламенение, возникшее затем горение быстро ускоряется до скорости взрывчатого превращения.

По мнению английского ученого Ф. Боудена и его школы, очагами разогрева могут быть мельчайшие пузырьки воздуха, содержащиеся в ВВ (между его кристаллами). При ударе эти пузырьки быстро сжимаются и газ в них нагревается до значительной температуры. Нагретые пузырьки зажигают прилегающий к ним слой ВВ. Точечные очаги разогрева могут, по Ф. Боудену, возникать также вследствие трения на поверхностях, между которыми находится ВВ, на частицах посторонних примесей, содержащихся в нем, и на самих кристаллах ВВ.

Из последних теорий (Г.Т. Афанасьева, В.К. Боболева), разогрев возникает при неоднородной неупругой деформации ВВ под действием напряжений, превосходящих некоторое критическое их значение ($\sigma \geq \sigma_{кр}$).

Исследователь Н.А. Холево показал, что при смещении относительно друг друга слоев ВВ, например, при пластическом (вязком) течении вещества или продавливании его ударом через зазоры роликового приборчика может произойти воспламенение вследствие трения между слоями веществ.

Чувствительность бризантных ВВ к удару определяют на вертикальном копре К-44-П (рис. 1.13), который состоит из двух или трех направляющих, закрепленных в вертикальном положении.

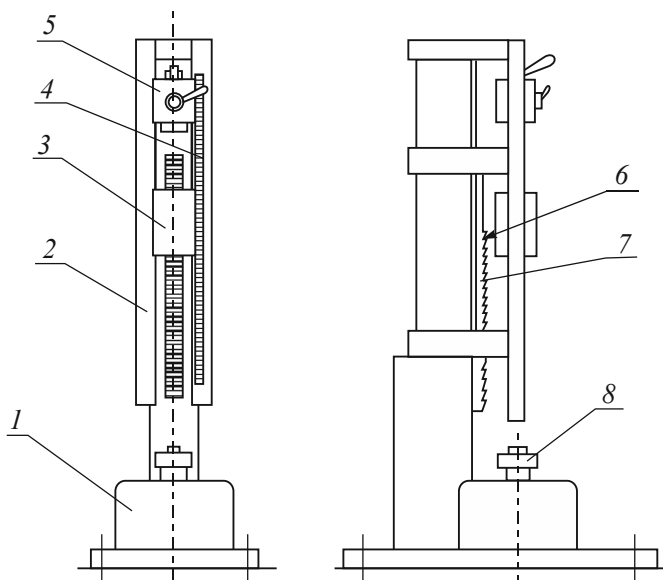


Рис. 1.13. Схема копра К-44-П:

1 – наковальня; 2 – колонна; 3 – груз; 4 – линейка; 5 – устройство для зацепления и сбрасывания груза; 6 – ограничитель движения; 7 – рейка зубчатая; 8 – роликовый прибор

Между направляющими может свободно скользить стальной груз массой в 2,5 или 10 кг. Верхняя часть груза снабжена головкой, зажимаемой между лапками пружинного выключателя. Последний может быть установлен на желаемой высоте, которую измеряют с помощью шкалы. Внизу, на массивном фундаменте, имеется массивное стальное основание копра; на него устанавливают роликовый прибор (рис. 1.14), в котором наковальней и бойком служат стальные ролики (от подшипников) диаметром 10 мм. Навеску

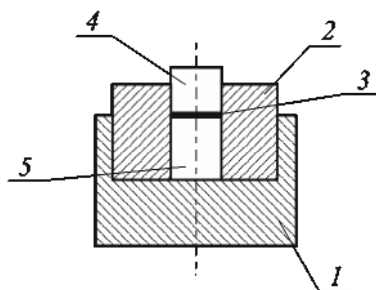


Рис. 1.14. Роликовый приборчик:

1 – наковальня копра; 2 – направляющая муфта; 3 – навеска ВВ; 4 – ролик-боек; 5 – ролик-наковальня

массой в 0,06 г испытываемого ВВ равномерно распределяют между поверхностями наковальни и бойка роликового прибора. Проводят некоторое число опытов при постоянных высоте падения и массе груза и определяют процент (частотность) взрывов (отношение числа опытов).

Обычно применяют груз 10 кг; высоту падения 25 см, число испытаний не менее 25. Характеристики чувствительности некоторых бризантных ВВ, полученные по этому методу, приведены в табл. 1.13.

Таблица 1.13

Характеристики чувствительности некоторых бризантных ВВ

ВВ	Процент взрывов	ВВ	Процент взрывов
Тротил	4...8	Гексоген	70...80
Аммотолы	20...30	Нитроцеллюлозный порох	70...80
Пикриновая кислота	24...32	ТЭН	100
Тетрил	50...60		

Испытания чувствительности к удару инициирующих ВВ проводят на вертикальном копре по типу К-44-П, но меньшего размера или на рычажном копре (рис. 1.15).

Навеску ВВ массой в 0,02 г запрессовывают в колпачок капсюля-воспламенителя, покрывают оловянной фольгой и помещают на наковальне копра. На колпачок с навеской устанавливают боек, по которому ударяет при падении груз массой от 0,5 до 1,8 кг.

Чувствительность инициирующих ВВ характеризуется нижним и верхним пределом, а именно:

а) максимальной высотой падения груза, при которой не получается ни одного взрыва из определенного числа опытов (нижний предел);

б) минимальной высотой падения того же груза, при которой получают 100 % взрывов (верхний предел).

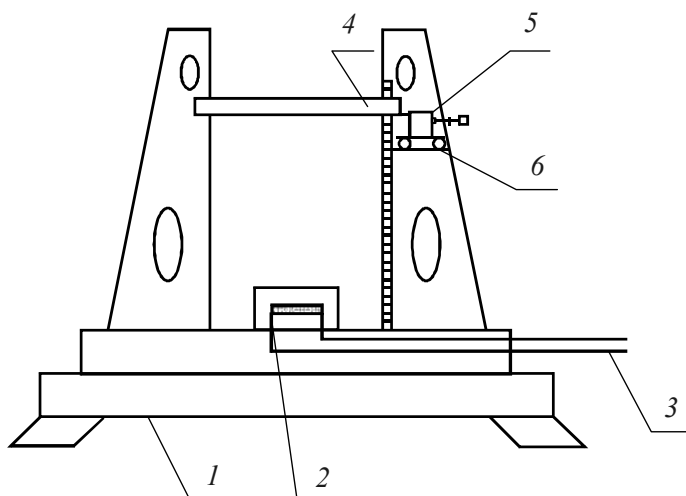


Рис. 1.15. Копер для испытания инициирующих ВВ:

1 – плита; 2 – стальная наковальня; 3 – измерительная дуга;
4 – груз; 5 – шарнир; 6 – рычаг; 7 – винт для закрепления рычага

Верхний предел служит условной мерой чувствительности (надежности действия) инициирующих ВВ и изделий, снаряженных ими, нижний предел – мерой безопасности при обращении с инициирующими ВВ или изделиями (табл. 1.14).

Чувствительность ВВ к трению определяется на приборе Бодуна–Козлова, рабочий узел которого показан на рис. 1.16.

При испытаниях на этом приборе тонкий слой ВВ, сжатый между двумя роликами, подвергается быстрому воздействию трением при смещении (сдвиге) подвижного (верхнего) ролика, происходящем под действием удара маятником.

Таблица 1.14

Результаты испытания

ВВ	Груз, кг	Пределы, см	
		нижний	верхний
Гремучая ртуть	0,69	5,5	8,5
Тетразен	0,69	7,0	12,5
Азид свинца	0,98	7,0	23,0
ТНРС	1,43	14,0	25,0

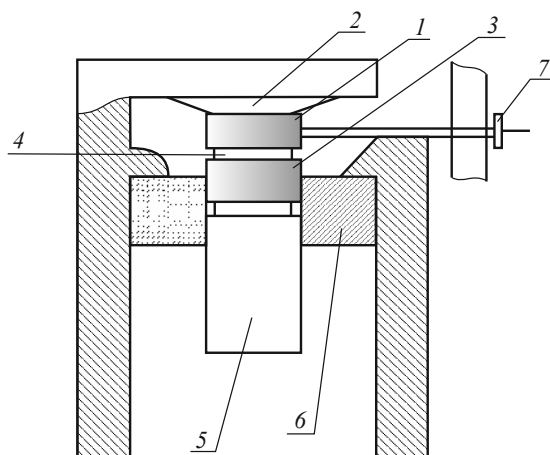


Рис. 1.16. Узел прибора Брудена-Козлова для определения чувствительности ВВ к трению:

1 – подвижный ролик; 2 – упор; 3 – неподвижный ролик; 4 – ВВ; 5 – поршень для передачи давления пресса на ролик; 6 – муфта; 7 – стержень с головкой, передающий удар

Характеристикой чувствительности при этом испытании может служить давление на ВВ, при котором получается 50 %-я или другая заданная частота взрывов.

Чувствительность ВВ к взрывчатому начальному импульсу

Чувствительность испытываемого вторичного ВВ к взрывчатому импульсу можно характеризовать массой минимального заряда инициирующего ВВ, обеспечивающего полную детонацию испытываемого вещества в определенных условиях. Такой заряд называют предельным зарядом инициирующего ВВ по отношению к испытываемому ВВ. Данные по величине предельного инициирующего заряда представлены в табл. 1.15.

Величина предельного заряда зависит от условий опыта: материала, размера и формы оболочки, в которую запрессовано инициирующее ВВ, от плотности обоих зарядов – инициирующего и вторичного, от величины кристаллов обоих ВВ и др.

Таблица 1.15

Результаты испытаний

БВВ	Предельный инициирующий заряд, г	
	Гремучая ртуть	Азид свинца
Тротил	0,360	0,090
Тетрил	0,290	0,025
ТЭН	0,225	0,020

Заряд инициирующего ВВ, служащий для возбуждения детонации бризантного ВВ, называют инициатором, а изделие из гильзы с запрессованным в нем зарядом инициирующего ВВ – капсюлем-детонатором. Некоторые заряды ВВ (например, литой тротил) не детонируют непосредственно от капсюля-детонатора. Чтобы взорвать такие ВВ, применяют капсюль-детонатор в соединении

с дополнительным зарядом более чувствительного вторичного ВВ (например, тетрила), называемым промежуточным детонатором или просто детонатором.

1.7.2. ПЕРЕДАЧА ДЕТОНАЦИИ ЧЕРЕЗ ВЛИЯНИЕ

При детонации ВВ второй заряд может взорваться не только при его расположении вплотную к первому, но и тогда, когда он находится от него на некотором расстоянии. Такая передача детонации называется детонацией через влияние (или передачей детонации на расстояние). Первый заряд называют активным зарядом, а расположенный на некотором расстоянии от первого – пассивным.

Расстояние, на которое передается детонация, зависит от ряда факторов: величины, расположения и формы активного заряда, чувствительности к детонации и плотности пассивного заряда, общей оболочки, характера среды, разделяющей заряды.

ТЭН и гексоген передают детонацию на большее расстояние, чем тротил, повышение веса и плотности активного заряда увеличивает расстояние передачи детонации.

ВВ, более чувствительные к детонации, детонируют при большем расстоянии от активного заряда, при увеличении плотности пассивного заряда дальность передачи детонации через влияние уменьшается (вследствие снижения чувствительности). Дальность передачи увеличивается при заключении зарядов в общую оболочку, например в трубу.

На основе принципа передачи детонации на расстояние введено испытание чувствительности ВВ к восприятию детонации (рис. 1.17). Это испытание заключается в определении максимального расстояния между двумя патронами диаметром 31...32 мм, при котором взрыв активного заряда вызывает безотказную детонацию пассивного заряда ВВ. Для каждого промышленного ВВ установлены минимумы таких расстояний (x).

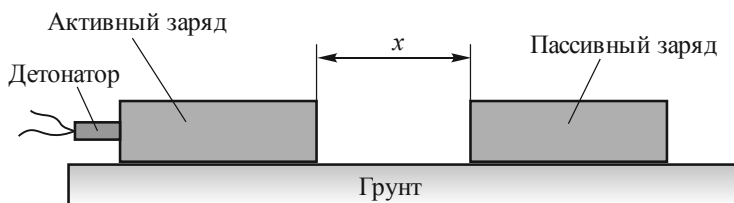


Рис. 1.17. Схема испытания ВВ на передачу детонации

На грунте укладывают два патрона на расстоянии, указанном в ТУ. Если при двух взрывах отказов не произошло, то ВВ считают выдержавшим испытания. Если произошел отказ, то количество испытаний увеличивают вдвое. При повторном отказе бракуется вся партия ВВ. При испытаниях ВВ, поступивших в мешках, изготавливают патроны диаметром 31 ± 1 мм, длиной 200 ± 10 мм при плотности заряда ВВ $0,95 \dots 1,05$ г/см³. Водоустойчивые ВВ испытывают после их выдержки в воде в течение 1 ч на глубине 1 м.

1.7.3. ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ ВВ

Физическая структура и плотность заряда. Как правило, при увеличении давления прессования порошкообразного ВВ и соответственно его плотности чувствительность к удару и детонации уменьшается. Чувствительность к детонации литого ВВ значительно меньше, чем того же вещества, но прессованного.

При повышении плотности аммиачно-селитренных ВВ их чувствительность к детонации снижается. Своеобразно действует изменение плотности на некоторые иницирующие ВВ, в частности на гремучую ртуть: с ростом плотности чувствительность ее к лучу пламени увеличивается, достигая максимума при плотности, соответствующей давлению прессования $250 \dots 350$ кг/см². При дальнейшем повышении плотности чувствительность постепенно снижается. Аналогично изменяется чувствительность гремучей ртути к наколу жалом и удару. В то же время увеличение плотности не влияет на чувствительность гремучей ртути к детонации.

Имеющиеся данные не позволяют пока что установить единую, пригодную для всех ВВ, количественную характеристику влияния структуры вещества и плотности на чувствительность.

В качестве вероятных причин этого влияния можно указать следующие:

- при увеличении плотности и переходе к сплошной структуре уменьшается возможность относительного перемещения кристаллов и, следовательно, возникновения местных разогревов, приводящих к воспламенению и взрыву;
- с изменением плотности изменяется количество и величина воздушных пузырьков, что влияет на чувствительность;

- увеличение плотности и уменьшение пор затрудняют проникновение горячих продуктов горения между частицами ВВ, что влияет на переход горения в детонацию.

Форма и размеры кристаллов. Для некоторых ВВ установлено заметное различие чувствительности различных кристаллических форм.

Азид свинца был получен в двух кристаллических формах: короткостолбчатой и игольчатой. Обыкновенный азид свинца имеет короткостолбчатую форму. Он менее чувствителен к удару и другим видам внешнего воздействия, чем выполненный в виде кристаллов игольчатой формы. Образование крупных кристаллов игольчатой формы сопровождается иногда самопроизвольными взрывами.

Начальная температура ВВ. С повышением температуры вещества растет число активных молекул, соответственно уменьшается количество энергии, необходимой для возбуждения взрывчатого превращения. Поэтому повышение температуры ВВ увеличивает его чувствительность. Так, нитроглицерин при температуре 162 °С взрывается от ничтожного толчка. Целлулоид (пироксилин) при обыкновенной температуре нечувствителен, а при 160...180 °С взрывается от удара.

Примеси и добавки. Примеси влияют на чувствительность ВВ к механическим воздействиям. Частицы с высокой температурой плавления, твердость которых больше твердости ВВ (песок, стекло, металлические порошки), повышают чувствительность к механическим воздействиям. Так, чувствительность тротила к удару существенно возрастает (до 30 %) даже при незначительных (0,2...0,25 %) примесях песка. Причиной повышения чувствительности в этих случаях служит разогрев при трении песчинок друг о друга.

По данным Боудена, наряду с твердостью заметную роль играет также температура плавления примеси. Примесь повышает чувствительность в том случае, если температура ее плавления выше некоторого минимума (400...500 °С).

В противоположном направлении действуют добавки легкоплавких веществ, покрывающих кристаллы ВВ тонкой пленкой. На нагрев и расплавление этих добавок расходуется часть тепла участков разогрева, возникших при механическом воздействии на

ВВ, поэтому при наличии таких добавок работа удара, необходимая для возбуждения взрыва ВВ, больше, чем при ее отсутствии.

Вещества, которые в сравнительно небольших количествах понижают чувствительность ВВ, называют флегматизаторами, вещества, повышающие эту чувствительность, называют сенсibilизаторами.

Химические факторы. Наряду с описанными физическими факторами на чувствительность ВВ влияет его химическое строение. Чувствительность азотно-кислых эфиров, спиртов и углеводов возрастает с увеличением числа нитратных групп и молекул эфира.

В случае нитросоединения чувствительность к механическим воздействиям и к детонации тем выше, чем больше число нитрогрупп в молекуле. Например, моонитрофенол взрывается от двухграммового капсюля-детонатора, а для взрыва тринитрофенола достаточно капсюля с 0,3 г гремучей ртути.

Инициирование взрыва порошковых материалов

Печальная статистика несанкционированных взрывов распыленных в воздухе порошков (Тайвань), газопылевых взвесей в шахтах (Распадская и др.), россыпи порошковых компонентов промышленных ВВ (Тулуза), вспышек порошковых ВМ в снаряжательном производстве, взрывов мучной пыли предопределяет изучение механизма развития таких процессов для выработки рекомендаций безопасного обращения с порошковыми ВМ и их применения.

В начале 70-х годов прошлого века В.В. Андреевым был выявлен режим скоростного конвективного горения (СКГ), возникновение которого в порошковых ВВ приводило к переходу горения в детонацию в зарядах ВМ с малопрочной оболочкой.

Такой режим СКГ возникает в порошковых ВМ, если скорость распространения СКГ превышает скорость уплотнения порошка. В работах исследовалось развитие переходных процессов в индивидуальных вторичных порошковых ВВ насыпной плотности в оболочках из стекла и оргстекла. Инициировался процесс потоком продуктов горения того же ВВ, формируемым электрическим взрывом проводника или искровым разрядом либо разрушением калиб-

рованных диафрагм, определяющих величину давления торможения продуктов горения, втекающих в инициируемое порошковое ВВ и возбуждающих развивающийся переходной процесс.

Вопросы для самоконтроля

1. Что такое взрыв?
2. Явления, вызывающие взрыв. Приведите примеры.
3. Первое необходимое условие для протекания взрывного процесса.
4. Чем взрыв отличается от химической реакции?
5. Почему химическая реакция должна сопровождаться выделением большого количества газообразных продуктов?
6. Величина максимального давления при взрыве конденсированных взрывчатых веществ (ВВ).
7. Что такое взрывчатое вещество?
8. Какие бывают взрывчатые вещества по агрегатному состоянию?
9. Классификация взрывчатых веществ. На какие группы подразделяют взрывчатые вещества по применению и особенностям?
10. Какие взрывчатые вещества называются инициирующими? Приведите примеры.
11. Какие взрывчатые вещества относят к группе бризантных?
12. Какими свойствами обладают бризантные ВВ?
13. Что такое порох?
14. Какие виды порохов вы знаете?
15. Отличие пироксилинового пороха от баллиститного.
16. Основные компоненты смесевых ракетных твердых топлив.
17. Что представляют собой пиротехнические составы?
18. Требования, предъявляемые к ВВ.
19. Объясните схему образования продуктов взрыва (ПВ).
20. Назовите группы, на которые разделяют ВВ в зависимости от кислородного баланса.
21. Что называется теплотой взрыва?
22. Какие параметры относят к важнейшим термодинамическим параметрам ПВ?

23. Схемы распространения волн сжатия в газе.
24. Параметры, характеризующие ударную волну.
25. Сформулируйте гидродинамическую теорию детонации.
26. Механизм распространения детонации по конденсирован-
ным ВВ.
27. Методы определения скорости детонации. Краткая характе-
ристика любого из методов.
28. Почему диаметр заряда влияет на скорость детонации?
29. Как влияет плотность заряда на скорость детонации?
30. Предназначение оболочки снаряда.
31. Что такое чувствительность ВВ?
32. Чувствительность ВВ к тепловым импульсам.
33. Чувствительность ВВ к механическим импульсам.
34. Чувствительность ВВ к взрывчатому начальному импульсу.
35. Факторы, влияющие на чувствительность ВВ.

Библиографический список

1. Взрывчатые вещества и пороха / М. А. Будников [и др.]. – Моск-
ва : Госиздат, 1955. – 364 с.
2. Горст А. Г. Пороха и взрывчатые вещества / А. Г. Горст. –
2-е изд., перераб. – Москва : Оборонгиз, 1957. – 188 с.
3. Андреев К. К. Теория взрывчатых веществ / К. К. Андреев,
А. Ф. Беляев. – Москва : Оборонгиз, 1960. – 422 с.
4. Милевский К. Е. Теория взрывчатых веществ : учебное пособие /
К. Е. Милевский, А. В. Гуськов. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2001. –
139 с.
5. Энергетические конденсированные системы : краткий энциклопе-
дический словарь / под ред. Б. П. Жукова. – Москва : Янус-К, 2000. –
596 с.
6. Взрывчатые вещества. Т. 2. Основные свойства. Технология изго-
товления и переработки / под ред. Л. В. Фомичевой. – Саров : РФЯЦ-
ВНИИЭФ, 2007. – 452 с.
7. Пороха, твердые топлива и взрывчатые вещества / [В. К. Марьин
и др.]. – Москва : Минобороны, 1975. – 466 с.
8. Физика взрыва. Т. 1 / под ред. Л. П. Орленко. – 3-е изд., испр. –
Москва : Физматлит, 2004. – 832 с.

9. Об одном из режимов детонации в порошковых ВВ малой плотности / В. В. Андреев, П. И. Зубков, Г. И. Киселев, Л. А. Лукьянчиков // Динамика сплошной среды. – Новосибирск, 1972. – Вып. 10. – С. 183–188.

10. Андреев В. В. К механизму распространения детонации с малой скоростью в порошковом ТЭНе при искровом инициировании / В. В. Андреев, Л. А. Лукьянчиков // Физика горения и взрыва. – 1974. – Т. 10, № 6. – С. 912–919.

11. Соболев В. В. Технология и безопасность выполнения взрывных работ (краткий курс лекций) / В. В. Соболев. – Днепропетровск : Национальный горный университет, 2008. – 40 с.

12. Высокоэнергетические материалы : учебное пособие / В. В. Андреев, А. В. Гуськов, К. Е. Милевский, Е. Ю. Слесарева. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2013. – 326 с.

ГЛАВА 2

ОБЩЕЕ И МЕСТНОЕ ДЕЙСТВИЕ ВЗРЫВА

2.1. ВИДЫ ДЕЙСТВИЯ ВЗРЫВА

В зависимости от характера детонационной волны, от характера и расположения окружающей среды относительно фронта волны могут возникать различные формы действия взрыва.

1. Сильное дробление, измельчение и пробивание непосредственно примыкающей к заряду прочной плотной среды, например крепкой горной породы, металлической оболочки в боеприпасах.

2. Раскалывание, отбрасывание среды, выброс грунта с образованием воронки. Образование и распространение воздушных ударных волн и сейсмических волн в грунте.

Различают два основных вида внешней работы взрыва: фугасное и бризантное действие. Фугасное действие представляет собой работу взрыва в форме:

- раскалывания и отбрасывания среды, в которой происходит взрыв;
- разброса грунта с образованием воронки.

Фугасное действие обусловлено расширением продуктов детонации до сравнительно невысоких давлений и прохождением ударной волны в окружающей среде. За пределами зоны фугасного действия лежит еще значительно более глубокая область распространения слабых ударных волн, наконец, за пределами области ударных волн лежит область звуковых волн (рис. 2.1).

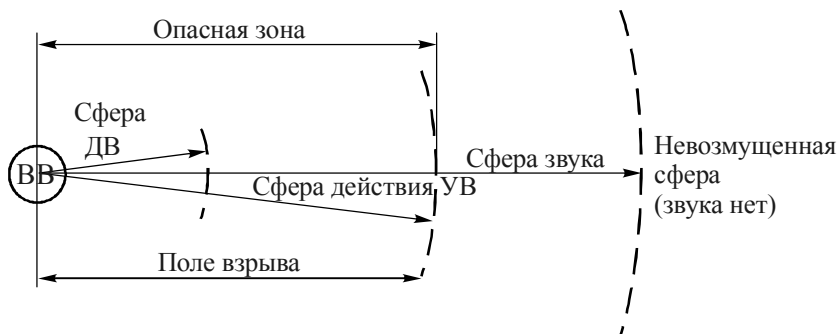


Рис. 2.1. Схема поля взрыва в воздухе

Бризантным действием называют действие взрыва в форме дробления, измельчения или пробивания среды, соприкасающейся с зарядом ВВ. Эта форма работы обусловлена ударом продуктов детонации, находящихся при очень высоком давлении, и проявляется лишь в непосредственной близости к заряду (на расстояниях, не превышающих $2 \dots 2,5$ радиуса заряда).

2.2. РАБОТОСПОСОБНОСТЬ И ПОТЕНЦИАЛ ВВ

Теоретическое определение полной работы взрыва. Теоретическое исследование полной работы взрыва впервые проведено русским ученым И.М. Гельцовым, а затем получило дальнейшее развитие в работах А.Ф. Беляева.

Гельцов И.М. рассматривал работу взрыва как работу адиабатного расширения продуктов взрыва.

Согласно первому закону термодинамики

$$-du = dQ + dA,$$

где du – уменьшение внутренней энергии системы; dQ – уменьшение выделенной при взрыве теплоты за счет теплотерь; dA – произведенная работа.

При $dQ = 0$ (при адиабатном процессе) имеем $dA = -du = -C_V dT_0$. Отсюда

$$A = \int_{T_2}^{T_1} C_V dT = \bar{C}_V (T_1 - T_2), \quad (2.1)$$

где A – полная работа взрыва, выраженная в тепловых единицах; T_1 – начальная температура взрыва; T_2 – конечная температура после расширения продуктов взрыва; \bar{C}_V – средняя теплоемкость продуктов взрыва в интервале от T_1 до T_2 .

Очевидно, что максимальная работа совершалась бы, если продукты взрыва охлаждались бы до абсолютного нуля, т. е. $T_2 = 0$, что практически неосуществимо.

Для теоретического рассмотрения этого вопроса допустим, что при взрыве газы охлаждаются до абсолютного нуля. Тогда

$$A_1 = \bar{C}_V T_1 = Q_V + \bar{C}_V \cdot 290 \text{ К}, \quad (2.2)$$

где Q_V – теплота взрыва; A_1 – представляет работу, которую совершили бы продукты взрыва при условии, что вся их внутренняя энергия, рассчитанная до абсолютного нуля, превратилась бы в механическую работу. Эту работу называют потенциалом ВВ; 290 К – стандартная температура калориметрических определений и, следовательно, $\bar{C}_V \cdot 290 \text{ К}$ – внутренняя энергия газа при 290 К.

Так как величина $\bar{C}_V \cdot 290 \text{ К}$ составляет всего лишь 3...5 % от A , то с точностью, достаточной для практики, можно ею пренебречь и принять работу взрыва (в механических единицах)

$$W = EQ_V, \quad (2.3)$$

где E – механический эквивалент теплоты.

Поэтому в практике потенциалом ВВ считают ту механическую работу, которую могут совершить продукты взрыва 1 кг ВВ при их адиабатном расширении и охлаждении не до абсолютного нуля, а до стандартной температуры 290 К.

Очевидно, что работа адиабатного расширения n молекул газа может быть выражена формулой

$$A = n\bar{C}_V(T_1 - T_2) = n\bar{C}_V T_1 \left(1 - \frac{T_2}{T_1}\right) = Q_V \left(1 - \frac{T_2}{T_1}\right). \quad (2.4)$$

Исходя из уравнения адиабаты $PV^k = \text{const}$ и уравнения состояния идеального газа находим

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{K-1} = \left(\frac{P_1}{P_2} \right)^{\frac{K-1}{K}}, \quad (2.5)$$

где V_1 и V_2 – начальный и конечный объем газов; P_1 и P_2 – начальное и конечное давление газов.

Следовательно,

$$A = Q_V \left[1 - \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{K-1} \right] = Q_V \left[1 - \left(\frac{P_1}{P_2} \right)^{\frac{K-1}{K}} \right]. \quad (2.6)$$

Уравнение, выражающее зависимость полной работы взрыва A от отношения объемов газа, выведено Гельцовым. Оно удобно для теоретического рассмотрения влияния различных факторов на величину A . Хотя уравнение Гельцова получено для идеальных газов, тем не менее рассмотрение его позволяет сделать пусть приближенные, но полезные выводы:

- при $V_2 \geq V_1$ $A \cong Q_V$, т. е. работоспособность ВВ приближается к величине потенциала Q_V ;

- так как $K-1 = \frac{R}{C_V}$, то чем меньше теплоемкость продуктов взрыва, тем больше $K-1$ и тем меньше $\left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{K-1}$, а следовательно,

тем больше работа взрыва A ;

- поскольку теплоемкость растет с увеличением числа атомов в молекуле, выгоднее иметь в составе продуктов взрыва больше двухатомных газов; вместе с тем, чем больше двухатомных газов, тем больше объем продуктов взрыва, что тоже приводит к увеличению A ;

- чем больше в продуктах взрыва твердых веществ, обладающих большой теплоемкостью, тем больше общая теплоемкость продуктов взрыва и меньше работоспособность A .

Пользуясь уравнением (2.6), выражающим зависимость полной работы взрыва от отношения давлений, и предполагая, что взрыв происходит в воздухе и расширение идет до атмосферного давления, т. е. до $P_2 = 1 \text{ кгс/см}^2$, найдем

$$A = Q \left[1 - \left(\frac{1}{P_1} \right)^{\frac{K-1}{K}} \right] = Q - q. \quad (2.7)$$

Разность $Q - A = q$ определяет потерянную теплоту, представляющую собой то тепло, которое остается в продуктах взрыва при достижении ими атмосферного давления.

Практическое определение работоспособности (фугасности) ВВ. По А.Ф. Беляеву, величина работоспособности пропорциональна работе адиабатического расширения продуктов взрыва при определенной степени этого расширения, зависящей от условий взрыва и характера производимой работы. Найти работоспособность по этому принципу можно с помощью баллистического маятника. Схема конструкции маятника показана на рис. 2.2. При взрыве заряда ВВ поток продуктов взрыва или ударной волны, действуя на торец носка маятника, сообщает маятнику импульс и отклоняет его на некоторый угол, определяемый по горизонтальному отклонению маятника. Щит служит для защиты основной массы маятника от непосредственного воздействия продуктов взрыва и ударной волны.

Обозначим: M – масса маятника, L – длина подвеса, g – ускорение силы тяжести, h – высота поднятия центра тяжести маятника, φ – угол отклонения маятника.

Импульс, воспринимаемый маятником при взрыве:

$$J = M \sqrt{2gL(1 - \cos \varphi)}, \quad (2.8)$$

так как $h = L(1 - \cos \varphi)$. Эта формула справедлива для углов отклонения φ не более $15 \dots 20^\circ$.

Пользуясь непосредственно величиной X горизонтального отклонения маятника, можно определить импульс для малых углов из соотношения

$$J = M \frac{2\pi}{T} X, \quad (2.9)$$

где T – период колебания маятника.

Учитывая зависимость между энергией движения и величиной импульса, сообщенного маятнику, $E = Mgh \frac{J^2}{2M}$, можно вычислить суммарную энергию ударной волны. Однако, как указывает К.К. Андреев, практически использовать метод баллистического маятника для определения работоспособности ВВ можно, только преодолев многие трудности; в частности, необходимо уточнить вопрос о связи импульса при отражении с импульсом идущей ударной волны. Поэтому в промышленности для оценки работоспособности наибольшее распространение имеет метод, при котором измеряется расширение, образуемое взрывом в свинцовой бомбе (рис. 2.2).

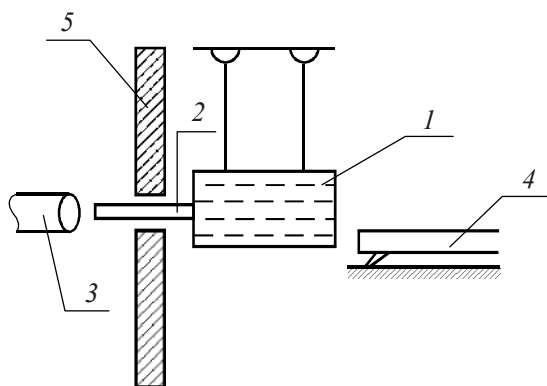


Рис. 2.2. Схема баллистического маятника для определения импульса ПВ ударной волны:

1 – груз маятника; 2 – носок маятника; 3 – испытываемый заряд ВВ; 4 – устройство для измерения отклонений; 5 – щит

Для этой цели применяют свинцовую бомбу (рис. 2.3, а) с цилиндрическим гнездом. В бумажную гильзу помещают 10 г ВВ и прессуют в специальной матрице в виде патрона, с гнездом для капсюля-детонатора. Патрон с капсюлем вводят в гнездо бомбы (рис. 2.3, б). Свободный объем гнезда засыпают кварцевым песком. При взрыве гнездо бомбы расширяется и приобретает грушевидную форму (рис. 2.3, в). Разность между объемом гнезда до и после взрыва служит практической мерой работоспособности испытываемого ВВ (ГОСТ 4546–48). Эта величина характеризует только относительную работоспособность ВВ, а не абсолютное ее значение.

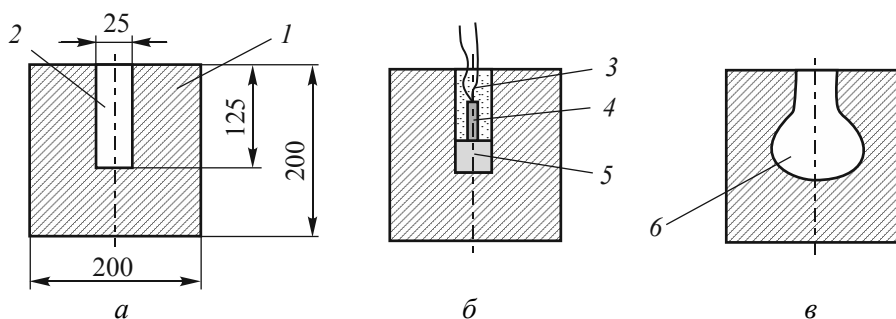


Рис. 2.3. Свинцовая бомба для определения работоспособности ВВ:

1 – свинцовая бомба; 2 – канал; 3 – сухой кварцевый песок; 4 – электродетонатор; 5 – испытываемое ВВ; в – полость, образовавшаяся при взрыве ВВ и ЭД

В табл. 2.1 приведены значения работоспособности ВВ, измеренные по описанному методу.

Действие взрыва в грунте. При взрыве в грунте разлет газообразных продуктов ограничен по всем направлениям стенками шпура (скважин) и забойкой.

Таблица 2.1

Работоспособность ВВ

ВВ	Расширение в бомбе, см ³	ВВ	Расширение в бомбе, см ³
Нитроглицерин	515	Аммотол 40/60	350
Гремучий студень	520	Аммотол 80/20	430
Тротил	285	Гремучая ртуть	110
Пикриловая кислота	305	Дымный порох	30
Тетрил	340		

Если забойки нет, продукты взрыва, произведя удар по стенкам, вырываются в атмосферу через открытую часть шнура и не участвуют дальше в работе взрыва. При наличии же забойки продукты не могут быстро вырваться в атмосферу, раздвигая материал стенок шнура, спрессовывают его и сами многократно отражаются от этих стенок. Образуется быстро увеличивающаяся полость. В результате многократных отражений давление распределяется равномерно по различным направлениям и первоначальные особенности движения продуктов взрыва, зависящие от формы заряда и положения детонатора, теряют свое значение.

Вокруг образовавшейся полости в грунте распространяется ударная волна (волна сжатия). Когда эта волна достигает поверхности грунта, то последний начинает подниматься. Скорость движения грунта получается наибольшей по линии наименьшего сопротивления, т. е. там, где расстояние от заряда до поверхности грунта наименьшее. По мере подъема грунта он становится неплотным и через него прорываются струи продуктов взрыва. Эти струи, увлекая за собой твердые частицы, образуют фонтан грунта, поднимающегося вверх и частично разлетающегося в стороны.

Продолжительность этого процесса во много раз больше, чем самого взрыва. Поэтому не имеет значения, насколько быстро происходит детонация заряда. Следовательно, для взрыва в грунте могут быть применены ВВ с различными скоростями детонации, т. е. имеющие различную бризантность. Возможен случай, когда энергии, переданной грунту, будет недостаточно для его выброса (образования воронки). Такой взрыв без выброса грунта называют камуфлетом.

Описанное здесь действие взрыва, заключающееся в разрушении и выбросе среды или в расширении объема, занимаемого ВВ при взрыве в замкнутом пространстве, представляет собой наиболее важный случай фугасного действия.

Фугасное действие артиллерийских снарядов. При взрыве снаряда в грунте происходит выброс грунта и образование воронки, характеристикой фугасного действия боеприпаса служит объем воронки, отнесенный к 1 кг разрывного заряда. Фугасное действие боеприпаса зависит главным образом от природы разрывного заряда, условий взрыва и свойств грунта. Важнейшей характеристикой условий взрыва является расстояние от центра тяжести разрывного

заряда до ближайшего участка свободной поверхности грунта, называемого линией наименьшего сопротивления (ЛНС).

Проследим зависимость фугасного действия постоянного заряда от ЛНС. При взрыве снаряда на поверхности грунта (ЛНС равна нулю) фугасное действие мало. По мере углубления боеприпаса в землю фугасное действие растет, достигает при некотором значении ЛНС максимума, а при дальнейшем углублении уменьшается. Далее, начиная с определенного значения ЛНС, выброс грунта отсутствует – получаются камуфлеты.

Глубина проникновения снаряда в преграду к моменту его взрыва решающим образом влияет на фугасное действие; в свою очередь, глубина проникновения зависит от скорости и угла падения снаряда, механических свойств преграды и конструкции взрывателя (мгновенного, инерционного или замедленного действия).

Наибольшее фугасное действие в грунте, получаемое при оптимальном значении ЛНС, составляет для обычных ВВ 2,2...2,5 м³/кг.

2.2.1. БРИЗАНТНОЕ ДЕЙСТВИЕ

Теоретическая оценка бризантного действия. Действие взрыва на какую-либо среду определяется количеством движения, которое приобретают частицы среды в результате удара по ней продуктов детонации. По второму закону механики это количество движения равно импульсу сил давления. Удельный импульс давления продуктов детонации определяется по формуле

$$i = \int_{t_N}^{t_k} p dt, \quad (2.10)$$

где t_N – время начала расширения продуктов детонации; t_k – время завершения основного удара продуктов детонации по среде, соприкасающейся с зарядом.

Бризантное действие обусловлено в основном «головной» частью полного импульса, т. е. работой продуктов детонации при падении их давления в сравнительно узком интервале времени от давления детонации P_g до конечного давления. Можно приближенно допустить, что величина этой головной части импульса

пропорциональна начальному давлению, и принять последнее за критерий бризантного действия. Как известно,

$$P_g = \frac{1}{k+1} \rho_0 D^2, \quad (2.11)$$

где $k = 3$ – коэффициент политропы.

Таким образом, бризантное действие должно увеличиваться с ростом плотности ВВ и пропорционально возрастать с повышением скорости детонации. Опыт подтверждает этот вывод.

Опытное определение бризантности по величине обжатия свинцового цилиндра. Для контроля производства и для практического применения ВВ бризантность оценивают по стандартной пробе по величине обжатия свинцового цилиндра при взрыве на нем заряда (рис. 2.4). В бумажную гильзу с внутренним диаметром 40 мм помещают 50 г испытываемого ВВ и закрывают сверху картонным кружком. В центре кружка делают отверстие для капсюля-детонатора. В специальной матрице прессованием доводят заряд до плотности 1 г/см^3 . Подготовленный таким образом патрон ставят на стальной диск диаметром 41 мм и толщиной 10 мм, который положен на цилиндр из чистого свинца диаметром 40 мм и высотой 60 мм, установленный на стальной плите.

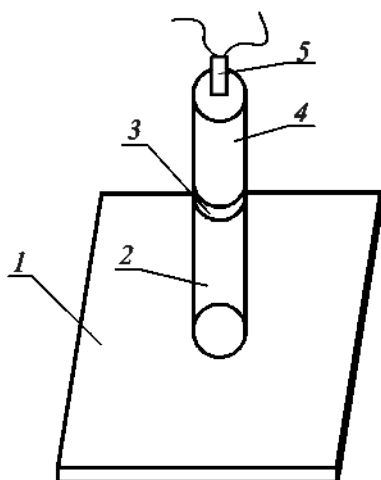


Рис. 2.4. Установка для определения бризантности обжатием свинцового цилиндра:

1 – стальная плита; 2 – свинцовый цилиндр; 3 – стальная пластина; 4 – патрон с испытываемым ВВ; 5 – электродетонатор

Всю систему центрируют и укрепляют на плите, после чего производят взрыв.

При взрыве свинцовый цилиндр обжимается и приобретает форму гриба. Разность высот цилиндра до и после взрыва служит мерой бризантности ВВ (ГОСТ 5984–51) (табл. 2.2).

Таблица 2.2

Значения бризантности некоторых ВВ

ВВ	Величина обжятия, мм	ВВ	Величина обжятия, мм
Гремучий студень	26	Пикриловая кислота	17...19
Гексоген (25 г)	18	Тротил	16...17
ТЭН (25 г)	16	Ксилил	12...13
Тетрил	20...22	Аммотолы	11...14

Величина обжятия, получающаяся по этой пробе, не дает абсолютного значения бризантности, а служит только для относительной ее оценки. Тем не менее она имеет большое значение для практической оценки бризантности ВВ. В последнее время для этой цели используют прямое определение импульса взрыва при помощи баллистического маятника.

Оценка бризантности ВВ по осколочности снаряженных им боеприпасов. Оценить бризантность можно и по степени дробления металлической оболочки, окружающей заряд, или металлической плиты, на которой он установлен. В артиллерийской практике издавна принято судить о бризантности ВВ и о качестве снаряжения по результатам определения осколочности снаряженных им боеприпасов. Для этой цели боеприпас устанавливают в бронееме, в ящике с песком или окружают ящиками с песком для предохранения осколков от дробления при ударе о стенки бронеемы. После взрыва собирают все осколки, взвешивают и подсчитывают число полезных осколков. Полезными обычно считают осколки, вес которых равен 1 г или превышает его.

Критерием бризантности служит число полезных осколков, отнесенное к 1 кг разрывного заряда. При заданных конструкции корпуса и взрывчатом веществе это число, называемое числом A , будет критерием качества снаряжения боеприпаса; при заданных ВВ число A используют для оценки осколочности боеприпаса.

Так как осколочность зависит не только от качества ВВ, но и от калибра и конструкции боеприпаса и качества металла, то результаты нового вида снарядов сравнивают с результатами испытания известных боеприпасов.

2.2.2. АКТИВНАЯ ЧАСТЬ ЗАРЯДА И НАПРАВЛЕННОЕ ДЕЙСТВИЕ ВЗРЫВА

Бризантное действие взрыва зависит при прочих равных условиях от формы заряда, места расположения детонатора и в общем случае неодинаково в разных направлениях от места инициирования детонации. Это происходит потому, что от указанных факторов зависит количество продуктов детонации, двигающихся в том или ином направлении.

Для оценки динамического действия взрыва на близлежащую среду необходимо определить активную часть заряда, т. е. ту часть его, продукты взрыва которой разлетаются в заданном направлении. Схема разлета продуктов взрыва цилиндрического заряда, по данным Г.И. Покровского, показана на рис. 2.5.

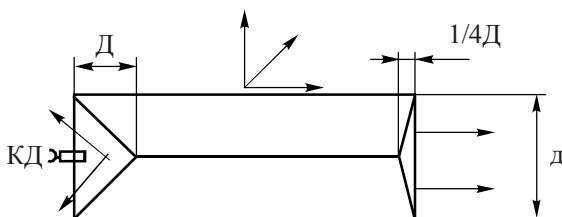


Рис. 2.5. Схема разлета продуктов взрыва цилиндрического заряда

Как видно из схемы (рис. 2.6), доля продуктов, летящих в направлении распространения детонации, меньше, чем в противоположном. Тем не менее вследствие перераспределения энергии наибольшее действие взрыва наблюдается в направлении распространения детонации. По данным Г.И. Покровского, энергия продуктов, летящих в этом направлении, может приблизительно в четыре раза превзойти энергию, которую несет более значительная масса продуктов, летящих в сторону детонатора.

В момент прихода детонационной волны в точку поверхности заряда образующаяся здесь частица продуктов взрыва получает одновременно скорость по двум направлениям: по нормали к поверхности вследствие разлета сжатых продуктов в атмосферу и в направлении распространения детонации из-за наличия потока продуктов за фронтом детонации. Складывая эти два вектора скорости, получаем равнодействующую скорость. Продолжая такие построения,

найдем, что наибольшие скорости приобретут частицы, летящие в направлении от детонатора к противоположному основанию заряда, а наименьшие – летящие в обратном направлении.

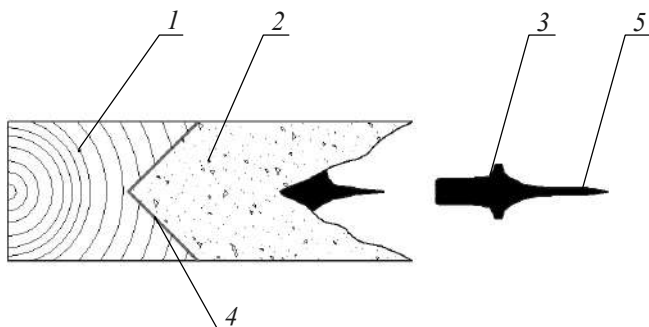


Рис. 2.6. Сущность образования металлической струи:

1 – фронт детонации; 2 – продукты детонации; 3 – песок (0,5 км/с); 4 – металлическая воронка; 5 – игла-струя (8...10 км/с)

При увеличении длины цилиндрического заряда до двух диаметров действие взрыва в направлении от детонатора к противоположному основанию растет. Дальнейшее увеличение длины заряда слабо влияет на действие взрыва в этом направлении.

Описанные особенности действия взрыва, обусловленные формой заряда и местом расположения детонатора в заряде, называют направленным действием взрыва; действие, обусловленное выемкой в заряде (рис. 2.6) и наиболее разрушительное по сравнению с другими видами направленного действия, называют кумуляцией.

2.2.3. КУМУЛЯТИВНОЕ ДЕЙСТВИЕ ВЗРЫВА

Кумулятивный эффект открыл в 1864 году русский военный инженер генерал М.М. Андриевский, который использовал это явление при создании капсюля-детонатора. Значительный вклад в теорию кумулятивного эффекта внесли русские ученые М.Я. Сухареvский, М.А. Лаврентьев, Е.И. Забабахин, Г.И. Покровский, Ф.А. Баум и др.

Схема действия кумулятивного заряда показана на рис. 2.6. Детонатор помещают в противоположной от кумулятивной выемки

стороне для создания направленного действия в сторону выемки. Поток продуктов взрыва сжимается в месте выемки в весьма плотную среду.

Кумулятивный эффект – существенное повышение направленного бризантного действия взрыва, является характерной формой действия взрыва зарядов ВВ. Как показывают результаты исследований, максимальная скорость кумулятивной струи (скорость ее головной части) для зарядов из высокобризантных ВВ достигает 12...15 км/с.

Фокусное расстояние f , на котором достигается наибольшая плотность продуктов взрыва в кумулятивной струе, зависит от формы выемки и свойств ВВ, главным образом от скорости детонации. Чем меньше кривизна кумулятивной выемки и меньше скорость детонации ВВ, тем больше фокусное расстояние. Как правило, размеры кумулятивной струи имеют следующую взаимосвязь с

диаметром заряда: $f = \frac{d_{\text{зар}}}{2}$; $d_{\text{стр}} = \frac{d_{\text{зар}}}{5}$. При заданном профиле

выемки и выбранном ВВ фокусное расстояние может быть изменено введением внутрь заряда специально подобранных «линз» из инертного материала или другого ВВ (рис. 2.7).

Существенная особенность взрыва кумулятивного заряда состоит в том, что в создании кумулятивной струи участвует лишь небольшая часть массы, непосредственно примыкающая к поверхности кумулятивной выемки. Эта часть заряда называется непосредственно кумулятивной частью (НКЧ).

Масса НКЧ зависит от формы и размеров заряда и выемки, плотности ВВ и заключается в тонком поверхностном слое, толщина которого уменьшается в направлении от вершины к основанию выемки (рис. 2.8).

Для цилиндрического заряда с конической выемкой, который показан на рис. 2.7, масса НКЧ определяется по формуле

$$m_{\text{НКЧ}} = \frac{5}{27} \pi h r^2 \rho_0, \quad (2.12)$$

где h – глубина выемки; r – полукалибр заряда, равный радиусу основания конуса выемки.

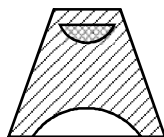
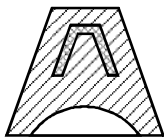


Рис. 2.7. Схема кумулятивных зарядов с линзой

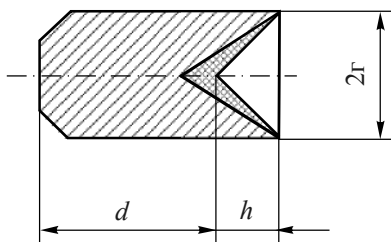


Рис. 2.8. НКЧ кумулятивного заряда

Расчеты показывают, что минимальный объем цилиндрического заряда с конической выемкой получается при таких соотношениях между размерами заряда: $d = 2h$, $2r = \frac{3}{4}a$. НКЧ в этом случае составляет не более 7 % массы всего заряда. Кумулятивный эффект используется в боеприпасах не только для бронепробития, но и для инициирования зарядов обычных ВВ и возбуждения термоядерных цепных реакций. Широкое применение кумулятивные заряды нашли в подрывных работах для пробития большой толщины, прочных сооружений и перерезания толстых металлических листов.

2.3. ДЕЙСТВИЕ ВЗРЫВА НА РАССТОЯНИИ И БЕЗОПАСНЫЕ РАССТОЯНИЯ

Характеристика механического действия ударной волны. Разрушительное действие взрыва на значительных расстояниях связано с распространением в воздухе ударной волны. За критерий механического действия ударной волны на преграду можно принять величину импульса, сообщаемого волной преграде. Садовский М.А. предложил следующую зависимость удельного импульса ударной волны от массы заряда и расстояния от очага взрыва до преграды:

$$i = A \frac{m_{\text{зар}}^{2/3}}{r}, \quad (2.13)$$

где i – величина удельного импульса; A – коэффициент, зависящий от свойств ВВ; $m_{\text{зар}}$ – масса заряда; r – расстояние от преграды до места взрыва.

Величина полного импульса, действующего на преграду, равна

$$J = is, \quad (2.14)$$

где s – площадь преграды в сечении, перпендикулярном направлению распространения ударной волны.

Зная величину полного импульса, действующего на преграду, можно определить энергию, сообщаемую преграде при действии ударной волны. Обозначим через m массу преграды, приведенную в движение действием взрыва, и через v – ее скорость.

Очевидно, что

$$\frac{mv^2}{2} = \frac{m^2 v^2}{2m} = \frac{i^2}{2m}. \quad (2.15)$$

Различные виды действия взрыва на расстоянии. Безопасные расстояния. Ударная волна, распространяющаяся при взрыве в окружающем воздухе, может вызвать разрушение зданий или сооружений. В зависимости от природы ВВ и массы заряда, а также расстояния до места взрыва и рельефа местности интенсивность этих разрушений может быть различна.

При взрыве одного заряда возможен взрыв другого, расположенного на некотором расстоянии от первого. Это явление называют передачей детонации на расстояние. Наконец, возможно поражение людей воздушной ударной волной на значительном расстоянии от места взрыва.

Разрушения, производимые взрывом, подразделяют по интенсивности на три категории: а) сильные – разрушения каменных сооружений; б) умеренные или средние – разрушения деревянных построек и толстых оконных стекол; в) малые – разрушения обыкновенных оконных стекол, деформация деревянных филенок, подъем черепицы крыши.

Район вокруг места взрыва, в пределах которого наблюдаются сильные и умеренные разрушения, называется опасной зоной, за пределами последней лежит безопасная зона. Следовательно, безопасная зона включает область малых разрушений. Расстояния, на которых не имеют места те или иные разрушительные действия

взрыва, называют безопасными. Безопасные расстояния для различных видов воздействия определяют по формуле

$$r = K_i \sqrt{m_{\text{зар}}}, \quad (2.16)$$

где r – безопасное расстояние, м; K_i – коэффициент, различный для разных видов воздействия и зависящий от рода ВВ, места нахождения заряда (на поверхности земли или под землей) и других факторов.

Значения коэффициентов K_i , а также коэффициентов для расчета безопасных расстояний по передаче детонации указаны в «Единых правилах безопасности при ведении взрывных работ» (утвержденных постановлением Госгортехнадзора РФ от 30 января 2001 г. № 3).

Вопросы для самоконтроля

1. Опишите формы действия взрыва.
2. Что представляют собой виды внешней работы взрыва?
3. Объясните схему поля взрыва в воздухе.
4. Первый закон термодинамики.
5. Что такое C_V ?
6. Что принимают в качестве потенциала ВВ в практике?
7. Для чего необходим баллистический маятник? Его конструкция.
8. Назначение забойки.
9. Действие взрыва в грунте.
10. От чего зависит фугасное действие боеприпаса?
11. Что такое линия наименьшего сопротивления?
12. Теоретическая оценка бризантного действия.
13. Методика оценки бризантности ВВ.
14. Оценка бризантности ВВ при подрыве на осколочность.
15. Что такое направленное действие взрыва?
16. Что такое кумулятивный эффект?
17. Фокусное расстояние f . Формула, требования.

18. Что такое НКЧ (непосредственно кумулятивная часть)?
19. Характеристика механического действия ударной волны.
20. Различные виды действия взрыва на расстоянии.

Библиографический список

1. *Корнер Дж.* Внутренняя баллистика орудий : пер. с англ. / Дж. Корнер ; под ред. И. П. Граве. – Москва : Иностранная литература, 1953. – 462 с.
2. *Горст А. Г.* Пороха и взрывчатые вещества / А. Г. Горст. – 2-е изд., перераб. – Москва : Оборонгиз, 1957. – 188 с.
3. *Милевский К. Е.* Теория взрывчатых веществ : учебное пособие / К. Е. Милевский, А. В. Гуськов. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2001. – 139 с.
4. Энергетические конденсированные системы : краткий энциклопедический словарь / под ред. Б. П. Жукова. – Москва : Янус-К, 2000. – 596 с.
5. Физика взрыва / под ред. К. П. Станюковича. – 2-е изд., перераб. – Москва : Наука, 1975. – 704 с.
6. Физика взрыва. В 2 т. Т. 2 / под ред. Л. П. Орленко. – 3-е изд., перераб. – Москва : Физматлит, 2002. – 656 с.
7. Физика взрыва В 2 т. Т. 1 / под ред. Л. П. Орленко. – 3-е изд., перераб. – Москва : Физматлит, 2002. – 832 с.
8. Взрывчатые вещества. Т. 2. Основные свойства. Технология изготовления и переработки / под ред. Л. В. Фомичевой. – Саров : РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2007. – 452 с.
9. *Соболев В. В.* Технология и безопасность выполнения взрывных работ (краткий курс лекций) / В. В. Соболев. – Днепропетровск : Национальный горный университет, 2008. – 40 с.
10. Высокоэнергетические материалы : учебное пособие / В. В. Андреев, А. В. Гуськов, К. Е. Милевский, Е. Ю. Слесарева. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2013. – 326 с.

ГЛАВА 3

ИНИЦИИРУЮЩИЕ ВЗРЫВЧАТЫЕ ВЕЩЕСТВА

3.1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ИНИЦИИРУЮЩИХ ВВ

Инициирующие ВВ (от лат. *initium* – начало) – это такие взрывчатые вещества, которые характеризуются чрезвычайно высокой чувствительностью к простым видам начального импульса, способностью детонировать в весьма малых количествах и применяются для инициирования (возбуждения) процессов взрыва зарядов ВВ или горения пороховых и ракетных зарядов. По положению в цепях инициирования эти ВВ часто называют первичными.

Основные особенности инициирующих ВВ, отличающие их от бризантных:

- 1) весьма высокая чувствительность к простым начальным импульсам (удар, накал, трение, нагрев);
- 2) высокое ускорение развития процесса взрывчатого превращения, определяющее способность инициирующих ВВ детонировать в весьма малых количествах (сотые – тысячные доли грамма);
- 3) сравнительно невысокие значения взрывчато-энергетических характеристик (теплоты взрыва, скорости детонации, фугасности, бризантности).

В табл. 3.1 приведены сравнительные данные по взрывчатым свойствам некоторых инициирующих и бризантных ВВ. Различие, как видно, существенное. Сочетание высокой чувствительности и низкой энергетики делает невозможным и нецелесообразным применение инициирующих ВВ для изготовления разрывных зарядов. Но высокая чувствительность их к простым импульсам в совокупности со способностью детонировать или сгорать с высокой скоростью в малых количествах определила единственно возможное

направление использования этих ВВ – возбуждение процессов взрыва зарядов или горения зарядов порохов и ТРТ.

Таблица 3.1

Характеристика ВВ

Название ВВ		Чувствительность		Взрывчато-энергетические характеристики			
		Высота падения груза 2 кг, обеспечивающая взрыв	$T_{всп}, ^\circ\text{C}$	Q_v , ккал/кг	W , л/кг	D , м/с	ΔW , мл
Иницирующие	Гремучая ртуть	2	160...165	349	316	5400 ($\rho = 4,2 \text{ г/см}^3$)	130
	Азид свинца	—	320...340	390	308	5300 ($\rho = 4 \text{ г/см}^3$)	113
Бризантные	Нитроглицерин	4	200...205	1480	715	9000	600
	Пикриновая кислота	35...95	300...310	1050	730	7350 ($\rho = 1,6 \text{ г/см}^3$)	305
	Тротил	60...200	295...300	1000	730	7000 ($\rho = 1,6 \text{ г/см}^3$)	285...305

Все известные иницирующие ВВ, применяемые для воспламенения и взрывания, подразделяются на индивидуальные и смешанные. Индивидуальные иницирующие ВВ представлены различными классами неорганических и органических соединений. Из всего этого многообразия лишь немногие имеют практическое применение. Наиболее распространены иницирующие ВВ: гремучая ртуть – из класса фульминатов, азид свинца – из солей азотистоводородной кислоты, стифнат свинца (ТНРС) – из солей стифниновой кислоты, тетразен. Другие соединения или имеют ограниченное применение, или являются перспективными, или, напротив, бесперспективными из-за недопустимо высокой чувствительности и малой химической стойкости.

3.2. ИНДИВИДУАЛЬНЫЕ ИНИЦИИРУЮЩИЕ ВВ

В средствах инициирования различных видов боеприпасов применяются следующие инициирующие штатные ВВ:

- гремучая ртуть, или фульминат ртути $\text{Hg}(\text{ONC})_2$;
- азид свинца $\text{Pb}(\text{N}_3)_2$;
- стифнат, или тринитрорезорпинат свинца $\text{C}_6\text{H}(\text{NO}_2)_3\text{O}_2\text{Pb}$;
- тетразен, или в общем виде $\text{C}_2\text{H}_8\text{N}_{10}\text{O}$.

Физические и химические свойства инициирующих ВВ

Инициирующие ВВ – кристаллические вещества, имеющие, за исключением ТНРС, большой удельный вес. В табл. 3.2 приведены некоторые характеристики физических свойств инициирующих ВВ. Штатные инициирующие ВВ обладают невысокой растворимостью в воде и малой гигроскопичностью. Ни одно из них не растворяется в обычных органических растворителях – бензоле, ацетоне, дихлорэтане и др.

Химическая стойкость инициирующих ВВ достаточна для их практического применения. Наименее стоек тетразен, разложение которого начинается при температуре 60 °С. Наибольшей стойкостью обладает ТНРС, не разлагающийся до температуры 200 °С. Температура начала разложения гремучей ртути 90...95 °С, азид свинца 110 °С. Азид свинца разлагается водой в присутствии углекислого газа CO_2 , всегда содержащегося в атмосфере. Поэтому азид свинца и изделия, содержащие его, хранятся в герметичных условиях.

По отношению к металлам инициирующие ВВ ведут себя по-разному, ТНРС и тетразен с металлами не взаимодействуют и могут помещаться в любые металлические оболочки.

В отсутствие влаги гремучая ртуть не взаимодействует со свинцом, оловом и никелем, но активно реагирует с алюминием, магнием, железом, цинком и их сплавами. Особенно энергично протекает реакция гремучей ртути с алюминием, которая обычно заканчивается взрывом. В присутствии влаги гремучая ртуть взаимодействует с большинством металлов, образуя высокочувствительные соединения.

Для изготовления оболочек под гремучую ртуть применяются медь и латунь, но от контакта с гремучей ртутью они предохраняются никелированием и лакировкой.

Таблица 3.2

Некоторые характеристики физических свойств инициирующих ВВ

Характеристика		Обо- значе- ние	Размер- мер- ность	Взрывчатое вещество			
				гремучая ртуть	азид свинца	ТНРС	тетразен
Плотность		ρ	г/см ³	Значения характеристик			
				4,42	4,7..4,8	3,08	1,64
Гравиметрическая плот- ность		$\rho_{гр}$	г/см ³	1,22...1,6	—	—	0,45
Плотность, достигаемая при преобразовании		$\rho_{пр}$	г/см ³	4	4,6	3	1,47
Растворимость в воде	$T = 15...20\text{ }^{\circ}\text{C}$	Г/100		0,07	0,023	0,02	0,02
	$T = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$			—	—	0,07	—
	$T = 70\text{ }^{\circ}\text{C}$			—	0,09	—	—
	$T = 80\text{ }^{\circ}\text{C}$			—	—	—	—
	$T = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$			0,07	—	—	—
Гигроскопичность		Н	%	0,02	0,7	0,05	0,77
Чувствитель- ность к удару, груз 0,6 кг	Верхний предел	H_v	см	8,5	23,5(x)	18,5	6,5
	Нижний предел	H_n		5,5	7,0(x)	12,5	4,5
Температура вспышки	$\tau = 5\text{ мин}$	$t_{всп}$	$^{\circ}\text{C}$	160...170	315	275	140
	$\tau = 5\text{ с}$			210	340	282	154
Теплота взрыва		Q_V	ккал/кг	349	390	372	550
Удельный объем продук- тов взрыва		W	л/кг	316	308	—	400..450
Температура взрыва		T	$^{\circ}\text{K}$	4500	4300	2370	—
Скорость детонации	$\rho = 4,2\text{ г/см}^3$	D	м/с	5400	—	—	—
	$\rho = 4,6\text{ г/см}^3$			—	5300	—	—
	$\rho = 2,9\text{ г/см}^3$			—	—	5200	—
	$\rho = 1,47\text{ г/см}^3$			—	—	—	5000
Работоспособность по рас- ширению в свинцовом блоке		ΔW	мл	130	113	122	—
Предельный инициирую- щий заряд	По тротилу	—	г	0,36	0,09	—	—
	По тетрилу			0,29	0,025	2,0	1,0
	По ТЭНу			0,225	0,020	—	—

Примечание. (x) – груз 0,975 кг.

Азид свинца в сухом виде с металлами не взаимодействует, влажный – реагирует не менее активно, чем гремучая ртуть. С алюминием, никелем и свинцом азид свинца химически не взаимодействует, поэтому оболочки изделий под азид свинца изготовлены обычно из алюминия.

Взрывчатые свойства и применение иницирующих ВВ

Среди штатных иницирующих ВВ наиболее высокочувствителен ко всем видам начального импульса тетразен, которому несколько уступает гремучая ртуть. Азид свинца – наименее чувствительное иницирующее ВВ из числа штатных.

Иницирующая способность, напротив, наиболее высокая у азида и самая малая – у тетразена и ТНРС.

По энергетике штатные иницирующие ВВ несущественно отличаются одно от другого. Различие в иницирующей способности, а также в чувствительности и определило области применения иницирующих ВВ.

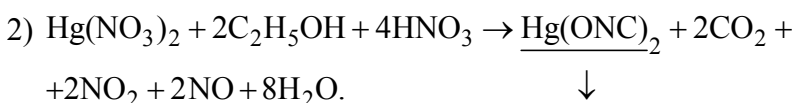
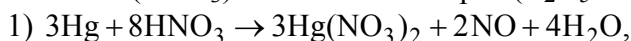
Азид свинца (чистый или флегматизированный парафином) применяется исключительно в средствах возбуждения взрыва.

Гремучая ртуть из-за пониженной иницирующей способности в средствах возбуждения взрыва имеет ограниченное применение, причем используется только в подрывных капсюлях-детонаторах. Наиболее широкое применение гремучая ртуть находит в средствах воспламенения пороховых и ракетных зарядов. При этом используется не чистая гремучая ртуть, а в виде смеси с хлоратом калия (KClO_3) и трехсернистой сурьмой (Sb_2S_3).

ТНРС и тетразен из-за весьма низкой иницирующей способности самостоятельного применения практически не имеют и являются вспомогательными иницирующими ВВ, обеспечивающими либо повышение чувствительности изделий к простым видам начального импульса, либо усиление их воспламеняющей способности.

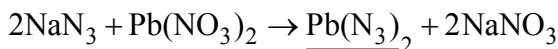
Получение иницирующих ВВ

Гремучая ртуть получается из металлической ртути (Hg) азотной кислоты (HNO_3) и этилового спирта ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$) в две стадии:



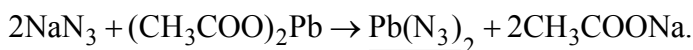
При этом в осадок выпадает продукт серого цвета. Для получения белой гремучей ртути, применяемой в военном деле, в реакционную смесь на первой стадии добавляют немного меди в виде стружки и соляной кислоты HCl.

Азид свинца получается по обменной реакции между азидом натрия (NaN_3) и какой-либо свинцовой солью, обычно нитратом $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ или ацетатом $(\text{CH}_3\text{COO})_2\text{Pb}$:



↓

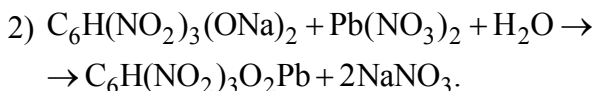
или



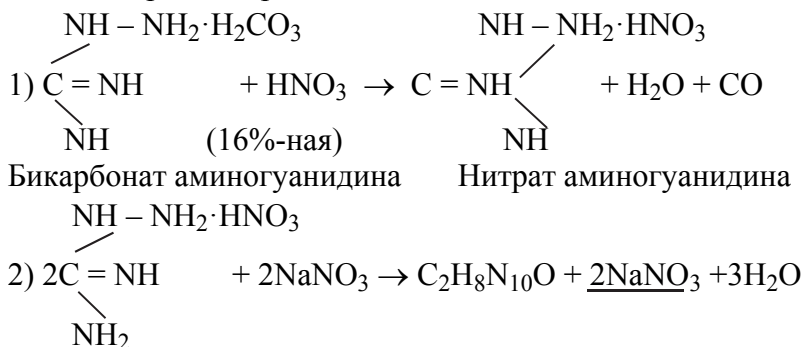
↓

В промышленности предпочтение отдается получению азид свинца через его азотно-кислую соль $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$.

Для получения ТНПС используются стифниновая кислота (тринитрорезорцин) $\text{C}_6\text{H}(\text{NO}_2)_3(\text{OH})_2$, бикарбонат натрия NaHCO_3 и азотно-кислый свинец $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$. Из этих материалов ТНПС получается в две стадии:



Тетразен получается из бикарбоната амингуанидина, азотной кислоты и нитрита натрия NaNO_2 :



(тетразен)

Каждое из выпавших в осадок инициирующих ВВ отфильтровывается от раствора, промывается водой и спиртом, затем подвергается сушке, после чего подается сразу на переработку в изделия либо на временное хранение в специальные погребки. Гремучая ртуть, если она не идет на переработку, временно хранится под водой и подвергается сушке по мере необходимости.

При получении азида свинца и ТНРС они в зависимости от требований подвергаются флегматизации (парафином и воском соответственно) и грануляции путем протирания через шелковое сито. Это необходимо для улучшения сыпучести и прессуемости указанных ВВ.

3.3. ИНИЦИИРУЮЩИЕ СМЕСИ

3.3.1. НАЗНАЧЕНИЕ И КЛАССИФИКАЦИЯ ИНИЦИИРУЮЩИХ СМЕСЕЙ

Инициирующие смеси (смесевые ИВВ) – это многокомпонентные взрывчатые системы с высокой чувствительностью к простым импульсам, обладающие инициирующей или воспламеняющей способностью.

Назначение инициирующих смесей такое же, как и индивидуальных инициирующих ВВ: возбуждение (инициирование) процессов взрыва разрывных зарядов или горения пороховых и ракетных зарядов твердого топлива. Смесей, предназначенные для возбуждения взрыва (детонации), называются детонирующими, а для возбуждения процесса горения – воспламенительными.

По принципу действия различают ударные, накольные, тёрочные и тепловые составы инициирующих смесей.

Ударные составы, действующие от удара бойком, применяются в средствах воспламенения пороховых зарядов патронов стрелкового оружия, артиллерийских минометных выстрелов.

Действие накольных составов происходит от накола жалом. Эти составы применяются в средствах воспламенения и средствах возбуждения взрыва артиллерийских трубок и взрывателей.

Тёрочные составы срабатывают от трения и применяются в средствах воспламенения пороховых зарядов крупнокалиберных артиллерийских систем (в вытяжных трубках), а также ракетных зарядов пиротехнических средств ближнего боя.

Тепловые составы действуют от тепла, подводимого лучом пламени, нагретым газом, проводником, нагретым электрическим

током, электрической искрой и др. Эти смеси применяются в средствах воспламенения и средствах взрыва артиллерийских трубок и взрывателей, взрывательных устройствах инженерных боеприпасов, а также в средствах воспламенения пороховых и ракетных зарядов. Наиболее широко используются тепловые составы, действующие от тепла, создаваемого электрическим током, в электрических средствах инициирования.

Широкое применение инициирующих смесей обусловлено двумя наиболее важными причинами:

- 1) необходимостью повышать чувствительность средств инициирования к определенному виду начального импульса;
- 2) необходимостью увеличивать инициирующую (обычно воспламеняющую) способность средств инициирования.

Так, например, из-за недостаточно высокой чувствительности азида свинца к тепловым импульсам возможно ненадежное действие азидных капсюлей-детонаторов, срабатывающих от нагрева. Поэтому в ряде случаев для снаряжения этих изделий применяются смеси 60...80 % азид свинца и 40...20 % ТНРС, в данном случае играющие роль сенсibilизатора к нагреву и снижающие температуру воспламенения смеси до 160 °С.

Поскольку и к наколу азид свинца имеет недостаточную чувствительность, в накольных капсюлях-детонаторах используется дополнительный заряд сенсibilизирующего накольного состава, содержащего 50 % ТНРС, 5 % тетразена, 25 % $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$ и 20 % антимония Sb_2S_3 . Этот состав помещается поверх азид свинца и обеспечивает необходимую чувствительность капсюлей к наколу.

Детонирующие смеси применяются сравнительно редко, наиболее широко распространены воспламенительные составы, т. е. смеси, создающие импульс в форме луча пламени. Это обусловлено тем, что большинство индивидуальных инициирующих ВВ (гремучая ртуть, диазодинитрофенол) обладают недостаточной воспламеняющей способностью, поскольку при сгорании не дают твердых частиц. Твердые раскаленные частицы, задерживаясь на поверхности воспламеняемого заряда, обеспечивают высокую теплоотдачу от продуктов сгорания воспламенительного устройства, чем и достигается безотказное и надежное воспламенение последующих элементов цепи инициирования.

В связи с этим и применяются воспламенительные составы, содержащие такие компоненты, которые обеспечивают наряду с газообразными образование твердых продуктов сгорания.

3.3.2. КОМПОНЕНТЫ ВОСПЛАМЕНИТЕЛЬНЫХ СОСТАВОВ

В самом общем виде воспламенительные составы представляют собой механические смеси горючих и окислителей, содержащих, как правило, иницирующие ВВ для повышения чувствительности смесей к простым начальным импульсам. Существуют также составы, содержащие только иницирующие ВВ (в качестве горючего) и окислители, и составы, не содержащие иницирующих ВВ.

В качестве горючих иницирующих смесей применяются вещества, дающие при сгорании большое количество твердых или жидких продуктов. К таким веществам относятся соединения металлов или металлы: трехсернистая сурьма (антимоний) Sb_2S_3 , роданистый свинец $\text{Pb}(\text{CNS})_2$, силицид кальция SiCa , ферросилиций FeSi , алюминий и др. При сгорании этих веществ образуются не только газы (CO_2 ; SO_2 и др.), но также и твердые или жидкие при температуре горения продукты (Al_2O_3 ; Fe_2O_3 ; Sb_2O_3 и др.), обеспечивающие высокую воспламеняющую способность смесей.

Окислителями в воспламенительных составах служат вещества, богатые кислородом, способные сравнительно легко его отдавать в окислительно-восстановительных реакциях. Это прежде всего соли: хлорат калия (бертолетова соль) KClO_3 , нитраты бария $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$, калия KNO_3 , а также окислы металлов и перекиси Pb_3O_4 ; BaO_2 и др. Окислители обеспечивают сгорание компонентов воспламенительного состава практически без участия кислорода воздуха.

В ряде случаев иницирующие смеси содержат цементирующие компоненты для придания составам необходимой прочности. Это сера, столярный клей, нитролаки. Одновременно цементаторы являются горючими.

Конкретное содержание компонентов в смеси определяется назначением смесей, видом импульса, от которого они действуют, и другими факторами.

3.3.3. СОСТАВ И ПРИМЕНЕНИЕ ОСНОВНЫХ ИНИЦИИРУЮЩИХ СМЕСЕЙ

Ударные, накольные и тёрочные составы содержат обычно гремучую ртуть, хлорат калия и антимоний. Находят применение составы, содержащие в качестве иницирующих ВВ диазодинитрофенол, тетразен и др. (табл. 3.3).

Таблица 3.3

Виды составов

Вид составов		Содержание, %					
		гремучая ртуть	диазодинитрофенол	тетразен	Sb ₂ S ₂	S	KClO ₃
Ударные	Артиллерийский	25,05	—	—	37,5	—	37,5
	Минометный	35,0	—	—	25,0	—	25,0
	К патронам стрелкового оружия	16,7	—	—	27,8	—	55,5
Тёрочные	№ 1	—	8,0	2,0	25,0	—	65,0
	№ 2	—	—	—	30,0	10,0	60,0
	№ 3	16,0	—	—	28,5	—	55,5
Накольные	№ 1	25,0	—	—	37,5	—	37,5
	№ 2	28,0	—	—	36,0	—	36,0
	№ 3	50,0	—	—	25,0	—	25,0

Накольные гремучертутные составы, применяющиеся во взрывательных устройствах, отличаются от ударных и тёрочных, как правило, повышенным содержанием гремучей ртути. Это связано с тем, что накол жалом, по сравнению с ударом бойка, — более слабый импульс и это требует от накольных составов повышенной чувствительности.

Кроме того, при срабатывании накольного состава продукты сгорания должны пробить обычно дно капсюля, что требует повышения бризантности состава, достигаемого также за счет увеличения содержания гремучей ртути в смеси.

Гремучертутные ударные составы, содержащие хлорат калия, вызывают коррозию материальной части (ствол, затвор) вследствие образования в продуктах сгорания хлоридов, диссоциирующих в присутствии влаги на ионы. Ионы хлора вызывают интенсивное окисление железа и образование ржавчины.

Поэтому наряду с хлоратными составами применяются так называемые неоржавляющие (некорродирующие) ударные составы, не содержащие гремучей ртути и хлората калия. В этих составах вместо гремучей ртути применяются ТНПС и тетразен, в качестве окислителей – нитрат бария $Ba(NO_3)_2$ и двуокись свинца PbO_2 , а в качестве горючих – антимоний, силицид кальция, алюминий, ферросилиций.

В электрических средствах инициирования могут применяться как индивидуальные инициирующие ВВ (ТНПС, ацетилениды и др.), так и инициирующие смеси. Характерно, что воспламенительные составы электрических средств инициирования часто не содержат инициирующих ВВ (табл. 3.4 и 3.5).

Таблица 3.4

Состав индивидуальных инициирующих ВВ

Номер состава	Содержание компонентов						
	ТНПС	Тетразен	$Ba(NO_3)_2$	PbO_2	SiCa	Sb_2S_3	Al
1	38,5	3,0	38,5	–	–	10,0	–
2	40,0	–	35,0	5,0	20,0	–	–
3	11,0	2,0	74,0	–	–	8,0	5,0

Таблица 3.5

Воспламенительные составы

Номер состава	Содержание компонентов, %						
	$KClO_3$	$Ba(NO_3)_2$	Pb_3O_4	ТНПС	$Pb(CNS)_2$	SiCa	Столярный клей
1	49,5	–	1,0	–	49,5	–	–
2	–	25,0	–	75,0	–	–	–
3	–	–	90,0	–	–	10,0	–
4	40,0	–	–	–	20,0	–	40,0

Воспламенительные составы (как содержащие инициирующие ВВ, так и не содержащие их) обладают высокой чувствительностью ко всем видам импульса, и поэтому обращение с ними требует строгого соблюдения правил техники безопасности.

Вопросы для самоконтроля

1. Особенности инициирующих ВВ, отличающие их от бризантных ВВ.
2. Индивидуальное инициирующее ВВ. Приведите пример.
3. Смесевые инициирующие ВВ. Приведите пример.
4. Физические свойства инициирующих ВВ.
5. Химические свойства инициирующих ВВ.
6. Взрывчатые свойства инициирующих ВВ.
7. Применение инициирующих ВВ.
8. Что такое инициирующие смеси?
9. Назначение инициирующих смесей.
10. Классификация инициирующих смесей.
11. Применение инициирующих смесей.
12. Что представляют собой инициирующие составы?
13. Гремучертутные составы. Применение. Состав.
14. Неоржавляющие ударные составы.

Библиографический список

1. *Андреев К. К.* Теория взрывчатых веществ / К. К. Андреев, А. Ф. Беляев. – Москва : Оборонгиз, 1960. – 422 с.
2. Физика взрыва В 2 т. Т. 1 / под ред. Л. П. Орленко. – 3-е изд., перераб. – Москва : Физматлит, 2002. – 832 с.
3. *Афанасьев Г. Т.* Иницирование твердых взрывчатых веществ ударом / Г. Т. Афанасьев, В. К. Боболев. – Москва : Наука, 1968. – 174 с.
4. Взрывчатые вещества. Т. 2. Основные свойства. Технология изготовления и переработки / под ред. Л. В. Фомичевой. – Саров : РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2007. – 452 с.
5. Теория горения и взрыва: высокоэнергетические материалы: учебное пособие / В. В. Андреев, А. В. Гуськов, К. Е. Милевский, Е. Ю. Слесарева. – Новосибирск : Юрайт, 2017. – 323 с.
6. *Милевский К. Е.* Теория взрывчатых веществ: учебное пособие / К. Е. Милевский, А. В. Гуськов. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2001. – 139 с.
7. Высокоэнергетические материалы : учебное пособие / В. В. Андреев, А. В. Гуськов, К. Е. Милевский, Е. Ю. Слесарева. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2013. – 326 с.

ГЛАВА 4

СРЕДСТВА ИНИЦИИРОВАНИЯ

4.1. НАЗНАЧЕНИЕ И КЛАССИФИКАЦИЯ СРЕДСТВ ИНИЦИИРОВАНИЯ

Средствами инициирования, или инициаторами, называются изделия (устройства), предназначенные для возбуждения детонации разрывных зарядов, горения пороховых и ракетных зарядов, а также для усиления передачи на расстояние: взрывного и воспламенительного импульса.

Средства инициирования снаряжаются индивидуальными иницирующими ВВ или иницирующими смесями, действуют преимущественно от простых начальных импульсов (удар, накол, трение, нагрев), создают соответствующий начальный взрывной или воспламенительный импульс, передаваемый последующим элементам цепи инициирования. Действие инициаторов можно уподобить работе усилителей-преобразователей. Например, сравнительно слабый импульс в форме накола вызывает несравненно более мощный импульс в форме взрыва, который обеспечивает безотказную детонацию разрывного заряда.

В простейшем случае цепь инициирования содержит инициатор и основной конечный элемент, например, в патронах стрелкового оружия – ударный капсюль-воспламенитель и пороховой заряд. Однако, как правило, цепи инициирования, помимо инициатора и конечного элемента (узла), содержат также промежуточные или дополнительные элементы (узлы, детали), предназначенные для усиления, замедления или преобразования импульса.

Средства инициирования по различным признакам классифицируются на группы, классы, виды.

По конструкции средства инициирования независимо от характера их действия подразделяются на капсули и шнуры.

Капсули (capsula – оболочка) – это изделия с жесткой оболочкой в виде чашечки, колпачка, короткой трубки, содержащие пресованный заряд ВВ и предназначенные непосредственно для инициирования взрыва или горения зарядов ВВ, пороховых и ракетных зарядов.

Шнуры – изделия с гибкой оболочкой в виде длинной трубки из хлопчатобумажных нитей или полимерного материала, содержащие заряд инициирующего состава или бризантного ВВ и предназначенные обычно для передачи взрывного и воспламенительного импульса на расстояние (до десятков – сотен метров).

По характеру создаваемого импульса (виду возбуждаемого процесса) средства инициирования подразделяются на две группы:

1) средства воспламенения (средства инициирования горения) и средства передачи воспламенительного импульса;

2) средства возбуждения взрыва (средства взрывания) и средства передачи взрывного импульса.

Средства воспламенения служат источниками теплового импульса (в виде луча пламени), используемого для воспламенения пороховых и ракетных зарядов, а также элементов взрывательных устройств.

Средства взрывания служат источниками взрывного импульса, используемого для возбуждения детонации зарядов бризантных ВВ.

По назначению и в зависимости от принципа действия каждая группа средств инициирования включает в себя несколько их классов, видов, разновидностей.

Группа средств воспламенения

1. Капсули-воспламенители патронные, предназначенные для воспламенения пороховых зарядов стрелкового оружия и артиллерийско-минометных выстрелов. В зависимости от принципа действия бывают:

а) ударные, б) тёрочные, в) электрические. При этом капсули-воспламенители могут применяться самостоятельно (патроны стрелкового оружия, минометные выстрелы) либо они входят в устройство более сложных узлов-капсюлей и электрокапсюльных втулок, ударных и вытяжных трубок.

2. Капсюли-воспламенители трубочные, используемые во взрывчатых устройствах артиллерийских снарядов, мин, боевых частей ракет, авиабомб. В зависимости от принципа действия бывают:

а) накольные, б) электрические, в) пневматические (тепловые).

3. Огнепроводы – средства передачи на расстояние импульса в виде луча пламени. По конструкции и характеру горения различают:

а) огнепроводный шнур, б) зажигательный фитиль, в) стопин.

4. Дополнительные воспламенители – воспламенители, изготавливаемые обычно из дымного пороха, – средства усиления воспламенительного импульса в тех случаях, когда мощности импульса основного инициатора недостаточно для надежного иницирования.

Группа средств взрыва

1. Капсюли-детонаторы трубочные, предназначенные для возбуждения детонации зарядов бризантных ВВ снарядов, мин, боевых частей ракет, авиационных бомб и других боеприпасов. В зависимости от принципа действия бывают:

а) лучевые, б) накольные, в) электрические, г) пневматические.

2. Капсюли-детонаторы подрывные, предназначенные для возбуждения детонации разрывных зарядов инженерных боеприпасов (подрывных средств). В зависимости от принципа действия бывают:

а) лучевые, б) электрические, в) накольные (реже).

3. Детонирующий шнур предназначается для передачи взрывного импульса на расстояние, реже используется как средство разрушения.

4. Детонаторы – средства усиления взрывного импульса в тех случаях, когда мощности импульса первичного инициатора (капсюля-детонатора) недостаточно для надежного иницирования взрыва.

Существуют средства иницирования как взрыва, так и горения, действующие от химического импульса. Например, если в капсюле поместить серную кислоту и гремучую ртуть, разделенные тонкой перегородкой, то по истечении некоторого времени, когда перегородка будет разрушена серной кислотой, произойдет взрыв

капсюля при контакте серной кислоты с гремучей ртутью. Такие капсюли применяются обычно в различных пиротехнических устройствах, взрывающихся через определенное время.

4.2. ТРЕБОВАНИЯ К СРЕДСТВАМ ИНИЦИИРОВАНИЯ

Безотказность, точность и эффективность действия боеприпасов, выстрелов и подрывных средств в значительной степени зависят от качества и надежности действия средств инициирования. Качество средств инициирования и структура цепей инициирования существенно влияют на безопасность обращения с боеприпасами при хранении, транспортировке и боевом применении.

В связи с этим к средствам инициирования предъявляются следующие общие требования:

- 1) безопасность в обращении (при изготовлении, хранении, транспортировке, боевом применении);
- 2) безотказность и надежность действия (высокая инициирующая способность);
- 3) стойкость при хранении (неизменность характеристик под действием внешних условий – влаги, тепла);
- 4) однообразие действия;
- 5) простота устройства и по возможности универсальность конструкции;
- 6) дешевизна и доступность материалов, невысокая себестоимость.

Безопасность в эксплуатации и безотказность действия средств инициирования – противоречивые требования. Они обеспечиваются определенными пределами чувствительности изделий – нижним и верхним. Первый – обеспечивает безопасность в обращении, второй – безотказность действия средств инициирования.

Особое значение имеет требование безопасности при стрельбе для артиллерийских средств инициирования, которое в данном случае предполагает отсутствие преждевременного срабатывания под действием сил инерции, возникающих при выстреле и при ударе (снаряда, мины, боевой части ракеты) в преграду.

Надежность действия средств инициирования состоит в их высокой инициирующей способности, которая обуславливается выбо-

ром природы инициирующего ВВ иди смеси, весом заряда, давлением запрессовки, характеристиками оболочки.

Однообразие действия средств инициирования обеспечивает и одинаковые действия боеприпасов: осколочного, фугасного, дистанционного и т. д. Причем имеется в виду главным образом однообразие по времени срабатывания инициаторов. Разброс времени срабатывания должен быть минимальным и для некоторых изделий не должен превышать долей микросекунды.

Однообразие действия инициаторов достигается прежде всего жестким соблюдением технологических режимов изготовления и однообразием конструктивных характеристик: веса, заряда, давления запрессовки, толщины оболочки и др.

Стойкость при хранении означает, что средства инициирования со временем не должны изменять своих характеристик под влиянием внешних условий. Для некоторых типов изделий требуется повышенная термическая стойкость – неизменность характеристик при температурах 200...300 °С. Кроме того, между зарядом инициатора и материалом оболочки не должно быть химического взаимодействия.

Стойкость средств инициирования обусловлена выбором природы ВВ и материала оболочки, герметизацией, применением защитных инертных покрытий, прочностью конструкции.

В зависимости от конкретного вида и назначения средств инициирования к ним предъявляются наряду с общими дополнительные специфические требования, обусловленные особенностями эксплуатации и характером действия изделий.

4.3. ПАТРОННЫЕ КАПСЮЛИ-ВОСПЛАМЕНИТЕЛИ

Патронные капсюли-воспламенители предназначены для воспламенения пороховых зарядов патронов стрелкового оружия, артиллерийских и минометных выстрелов, реактивных пиротехнических средств.

По принципу действия патронные капсюли-воспламенители бывают ударные, тёрочные и электрические. Наиболее типичные и распространенные – это ударные капсюли-воспламенители, действующие от удара бойком.

В дополнение к общим требованиям ударные патронные капсюли должны иметь достаточно прочную и одновременно пластичную оболочку, деформирующуюся без разрушения от удара бойком и выдерживающую высокое давление пороховых газов при выстреле.

Независимо от конкретного вида все ударные патронные капсюли-воспламенители имеют принципиально одинаковое устройство (рис. 4.1).

Основные конструктивные элементы патронного капсюля-воспламенителя – это оболочка (колпачок), заряд воспламенительного состава, покрытие. Некоторые виды ударных патронных капсюлей имеют наковаленку, о которую разбивается капсюльный состав при ударе бойком, что повышает надежность действия капсюля. Следует заметить, что наковаленка имеется всегда, но в одних случаях она входит в устройство капсюля, в других – является элементом гильзы или капсюльной втулки.

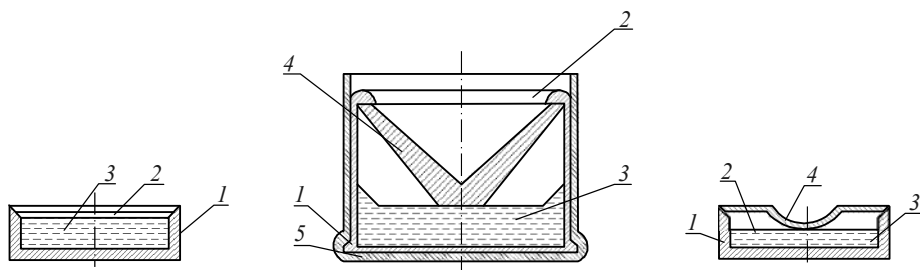


Рис. 4.1. Патронные ударные капсюли-воспламенители:

1 – оболочка; 2 – покрытие; 3 – ударный состав; 4 – наковаленка; 5 – корпус

Оболочка патронного капсюля служит для размещения воспламенительного состава и для предотвращения прорыва пороховых газов в сторону затвора. В качестве материалов для оболочек капсюлей используются латунь (Л-68), медь и иногда железо. Толщина стенки оболочки составляет в зависимости от конкретного вида капсюля 0,40...1,35 мм. Оболочки – цельнотянутые, изготавливаются методом холодной штамповки.

В качестве заряда ударных патронных капсюлей применяются гремучертутно-хлоратные или неоржавляющие ударные составы, запрессованные под давлением 800...2000 кгс/см².

Вес заряда в зависимости от конкретного вида капсюля составляет от 0,02 до 0,3 г. Покрытие служит для герметизации капсюля, для предохранения заряда капсюля от случайных механических воздействий и предотвращения выпадения заряда из оболочки. Для изготовления покрытий применяется в основном оловянная фольга с присадкой 3 % сурьмы, толщиной 0,03...0,05 мм. Со стороны заряда покрытие лакируется 45 %-м шеллачно-канифольным лаком. В некоторых случаях применяются покрытия из свинца или пергамента.

Тёрочные или фрикционные капсюли-воспламенители действуют от трения и применяются в артиллерийских вытяжных трубках для воспламенения пороховых зарядов, а также в реактивных пиротехнических средствах для воспламенения ракетного заряда. Тёрочный капсюль-воспламенитель (рис. 4.2) состоит из медной или латунной оболочки с отверстием в дне.

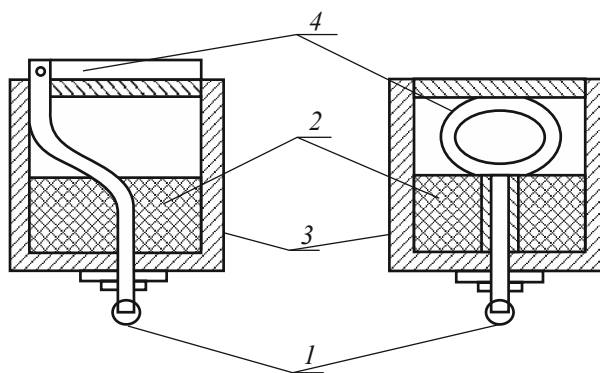


Рис. 4.2. Тёрочный капсюль-воспламенитель:

1 – тёрка; 2 – тёрочный состав; 3 – оболочка;
4 – вытяжное кольцо

В оболочку запрессовывается тёрочный состав, имеющий сквозной канал для размещения тёрочного приспособления – тёрки, представляющей собой зазубренную медную (или стальную) лопаточку или свернутую спиралью проволочку. Тёрка имеет чеку с кольцом, проходящую через отверстие в дне оболочки. При резком выдергивании тёрки она царапает тёрочный состав, вызывая его воспламенение.

Боевые и эксплуатационные качества патронных капсюлей-воспламенителей проверяются испытаниями, которым подвергаются

готовые партии изделий. При этих испытаниях проверяются или определяются: 1) чувствительность капсюлей к удару или трению; 2) воспламеняющая способность; 3) безопасность в обращении с капсюлями и при их транспортировке; 4) стойкость капсюлей к действию внешних условий.

Результаты испытаний капсюлей должны отвечать требованиям государственных стандартов, технологических условий и чертежей на готовые изделия.

4.4. ТРУБОЧНЫЕ КАПСЮЛИ-ВОСПЛАМЕНТЕЛИ

Трубочные капсюли-воспламенители предназначены для приведения в действие детонирующих цепей, дистанционных, предохранительных, замедлительных и усилительных механизмов взрывательных устройств (трубок и взрывателей) боеприпасов ствольной и реактивной артиллерии.

По принципу действия трубочные капсюли бывают накольные, тепловые и электрические. Наиболее типичны и широко распространены накольные капсюли-воспламенители, действующие от накола жалом.

Кроме общих требований трубочные капсюли-воспламенители должны обладать стойкостью к действию инерционных сил при выстреле (не воспламеняться и сохранять целостность конструкции) и иметь определенную однообразную чувствительность к соответствующему виду импульса (накол, нагрев).

Основные конструктивные элементы любого трубочного накольного капсюля-воспламенителя (рис. 4.3): 1) оболочка (колпачок), 2) покрытие, 3) заряд воспламенительного состава.

Особенности устройства и размеры элементов капсюля-воспламенителя определяются его назначением, расположением во взрывательном устройстве, характером действия последнего.

Оболочки трубочных капсюлей-воспламенителей представляют собой цельнотянутые колпачки из меди с толщиной стенки 0,15...0,50 мм, высотой 3,0...5,5 мм и диаметром 3,0...6,0 мм.

Как правило, оболочки никелируются для повышения их стойкости и предотвращения химического взаимодействия с зарядом.

Покрытие служит для прочного закрепления и герметизации капсюльного состава в оболочке. Представляет собой, как правило, чашечку из того же материала, что и оболочка, только с более тонкой стенкой (0,05...0,12 мм). Иногда покрытие имеет форму кружка, изготовляемого из фольги или пергаменты. Однако такая форма покрытия усложняет изготовление капсюлей, поскольку требуется закатка края оболочки на кружок для его прочного закрепления.

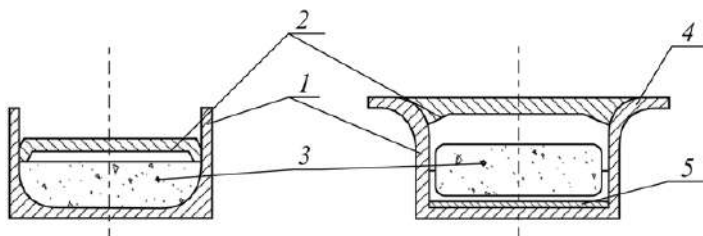


Рис. 4.3. Устройство трубчатого накольного капсюля-воспламенителя:

1 – оболочка; 2 – покрытие; 3 – накольный состав; 4 – бортик;
5 – фольга

В качестве заряда трубчатых капсюлей-воспламенителей применяются главным образом гремучертутно-хлоратные составы, запрессованные под давлением 1100...1300 кгс/см². Вес заряда составляет от 0,03 до 0,20 г.

Трубчатые капсюли-воспламенители обычно обозначаются по типу взрывателей или трубок, в которых они применяются (КТД, МД-5, Т-5), или номерами (№ 1, № 3 и т. д.)

Если капсюль применяется в нескольких типах или модификациях взрывателей или трубок, то он обозначается по тому типу или той модификации, для которых был первоначально разработан.

С целью проверки боевых и эксплуатационных качеств готовые партии трубчатых капсюлей-воспламенителей подвергают специальным испытаниям, при которых определяются (или проверяются): а) чувствительность к наколу жалом; б) воспламеняющая способность и время срабатывания; в) безопасность при транспортировке; г) стойкость к действию инерционных перегрузок; д) стойкость характеристик капсюлей при хранении. Результаты испытаний не должны иметь отклонений от норм, предусмотренных чертежами, техническими условиями и госстандартами.

4.5. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ВОСПЛАМЕНЕНИЯ

4.5.1. НАЗНАЧЕНИЕ И КЛАССИФИКАЦИЯ

Электрические средства воспламенения (электровоспламенители, электрозапалы) предназначены для тех же целей, что и капсули-воспламенители, действующие от механических импульсов (удара, трения, накола). По принципу действия электровоспламенители относятся к тепловым средствам инициирования, в которых тепловая энергия, необходимая для воспламенения капсульного состава, получается за счет преобразования электрической энергии.

В зависимости от способа преобразования электрической энергии электровоспламенители подразделяются на три основных типа (рис. 4.4): 1) мостиковые (электровоспламенители накаливания), 2) искровые и 3) щелевые.

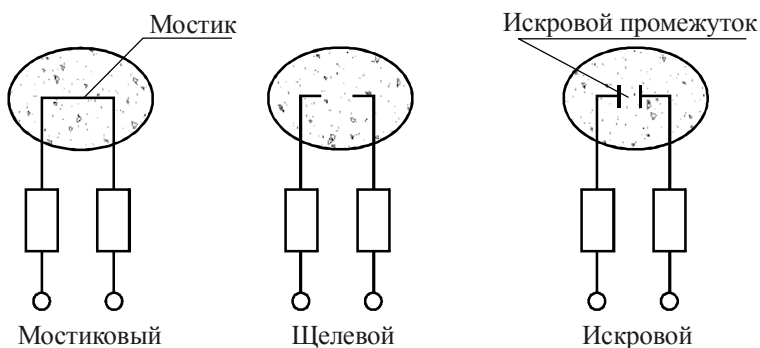


Рис. 4.4. Типы электровоспламенителей

Мостиковые электровоспламенители имеют мостик накаливания из тонкой проволоочки, погруженный в воспламенительный состав. При пропускании тока через мостик последний нагревается (за счет выделения джоулева тепла), и при достижении определенной температуры происходит воспламенение капсульного состава (пункт 1.7. «Теория зажигания» А.Г. Мержанова).

Для изготовления мостиков накаливания применяются нихром, платиноиридий, констант, молибден.

Искровыми называются электровоспламенители, в которых воспламенение состава осуществляется электрической искрой, возникающей в искровом промежутке между разомкнутыми проводниками. У искровых электровоспламенителей разомкнутые контакты

находятся в воспламенительном составе, не проводящем электрического тока.

Щелевые электровоспламенители также не имеют мостика, но разомкнутые контакты окружены электропроводящим воспламенительным составом. Благодаря этому при прохождении тока непосредственно через состав последний нагревается (за счет джоулева тепла) и воспламеняется при достижении определенной температуры.

Электровоспламенители разных типов отличаются друг от друга не только принципом действия, но и электрическими характеристиками (см. таблицу), что определенным образом влияет на возможности применения электровоспламенителей.

Характеристика типов воспламенителей

Тип электровоспламенителя	Сопротивление, Ом	Величина воспламеняющего тока, А	Величина воспламеняющего напряжения, В	Величина безопасного тока, А	Величина безопасного напряжения, В
Мостиковый	0,2...150	0,6...4,0	—	0,15...3	—
Искровой	$\sim 10^6$	—	$(3...5)10^3$	—	$2 \cdot 10^3$
Щелевой	$10^3...10^5$	0,8...2,0	40...50	—	~ 15

Из рассмотренных типов наиболее широко применяются мостиковые электровоспламенители, как более простые по конструкции, надежные в действии и требующие источников питания небольшого напряжения. Перспективны искровые электровоспламенители, характеризующиеся высокой мгновенностью действия. Щелевые электровоспламенители могут быть использованы в тех случаях, когда воспламенительный состав содержит металлическое горючее и, следовательно, является электропроводящим.

Независимо от принципа использования электрической энергии электровоспламенители могут обеспечивать различное время передачи воспламенительного импульса. По этому признаку (время срабатывания) они подразделяются на два вида:

- 1) мгновенного действия (милли-, микросекунды);
- 2) замедленного действия (сотые доли секунды, десятки секунд и более).

По применению (назначению) электровоспламенители можно разделить на три основных класса:

1) подрывные – применяются в подрывном деле для приведения в действие лучевых капсюлей-детонаторов (т. е. в конечном счете для взрывания зарядов ВВ);

2) патронные – применяются в ствольной артиллерии и ракетных системах для воспламенения пороховых и ракетных зарядов;

3) трубчатые – применяются во взрывательных устройствах (и трубках) для приведения в действие лучевых капсюлей-детонаторов или других элементов цепей взрывания.

4.5.2. ЭЛЕКТРОВОСПЛАМЕНИТЕЛИ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ В ПОДРЫВНОМ ДЕЛЕ

В подрывной технике применяются электровоспламенители одной и той же конструкции, мгновенного действия или замедленного, обеспечиваемого замедленным составом. На рис. 4.5 показана схема устройства подрывных электровоспламенителей замедленного действия.

До 1956 года электровоспламенитель состоял из медных проводников длиной 1,25 м и диаметром 0,8 мм, к оголенным концам которых припаян или приштампован константановый или платино-иридиевый мостик диаметром 0,035...0,050 мм и длиной 4...5 мм. В настоящее время электровоспламенитель состоит из нихромового проводника диаметром 30 мкм. Воспламенительный состав содержит нитролак на основе коллоксилина. Безопасный ток таких воспламенителей равен 0,18 А. Их недостаток – крайне высокая чувствительность к электрическому разряду. Срабатывания регистрируются при энергии разряда всего лишь 10^{-5} Дж. Для уменьшения этой чувствительности в последних конструкциях применяются более низкочувствительные составы, содержащие азид бария.

Сопротивление электровоспламенителя с константановым мостиком составляет 0,8...2,0 Ом, с платино-иридиевым – 1,0...1,5 Ом. На мостик нанесена твердая капля воспламенительного состава, содержащего 55 % хлората калия $KClO_3$, 32 % роданистого свинца и 13 % столярного клея.

Воспламенительная головка с мостиком помещена в медную гильзу диаметром 8 мм и длиной 35 мм. Закрепление концов проводников в гильзе и их изоляция осуществляются с помощью пластиковой втулки. Для герметизации воспламенительного состава его заливают специальной мастикой или гильзу с противоположного конца закрывают пробкой. Безотказный ток для подрывных электровоспламенителей составляет 0,5 А.

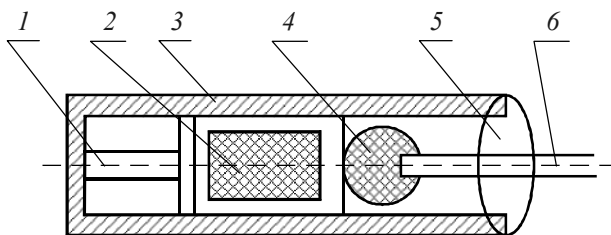


Рис. 4.5. Подрывные мостиковые электровоспламенители:

1 – пробка; 2 – замедлитель; 3 – гильза; 4 – мостик;
5 – изолятор; 6 – проводники

Устройство электровоспламенителя замедленного действия отличается от описанного наличием замедлителя в виде отрезка огнепроводного шнура или спрессованного столбика специального замедлительного состава.

Обычно применяется замедлительный состав, содержащий 70 % нитрата калия, 20 % перекиси бария и 10 % идитола (синтетическая смола).

Время замедления обеспечивается длиной отрезка огнепроводного шнура или высотой и плотностью запрессовки столбика замедлительного состава и может составлять 1...10 с и более.

4.5.3. ПАТРОННЫЕ ЭЛЕКТРОВОСПЛАМЕНИТЕЛИ

Патронные электровоспламенители применяются для воспламенения пороховых зарядов малокалиберной артиллерии и крупнокалиберных пулеметов, а также зарядов твердого топлива реактивных снарядов и ракет. Широко используются электровоспламенители пороховых зарядов в морской и авиационной артиллерии.

В зависимости от конкретного назначения патронные электровоспламенители могут быть конструктивно выполнены по-разному, однако общим у них будет жесткое крепление мостика. Наиболее распространен электровоспламенитель «спичечного» типа (рис. 4.6).

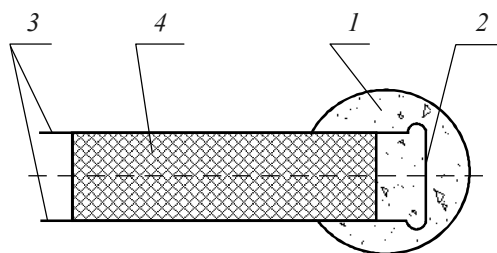


Рис. 4.6. Электровоспламенитель «спичечного» типа:

1 – воспламенительный состав; 2 – мостик;
3 – контакты; 4 – картонная пластинка

Такой электровоспламенитель состоит из картонной или пластмассовой пластинки, к которой с двух сторон приклеены медные фольговые контакты (подводящие проводники). С одной стороны к концам контактов припаян мостик. На мостик нанесен воспламенительный состав: первый, внутренний, слой – 0,035...0,050 г пикрата свинца $[C_6H_2(NO_2)_3O]_2 Pb$, второй, наружный, слой – пикрат свинца, замешанный на лаке (после высыхания лака воспламенительная головка приобретает достаточно высокую твердость). Готовый электровоспламенитель по внешнему виду напоминает спичку.

Сопротивление электровоспламенителя 3...12 Ом, воспламеняющий ток 0,3...0,4 А. Мощности импульса электровоспламенителя, как правило, недостаточно для надежного воспламенения порохового или ракетного заряда. Поэтому электровоспламенители входят в устройство более сложных изделий – капсюлей-воспламенителей, капсюльных втулок, пиропатронов, содержащих дополнительный (усилительный) заряд дымного пороха или пиротехнического состава. На рис. 4.7 показана схема устройства патронного электрического капсюля-воспламенителя. Капсюль состоит из корпуса, изолирующей втулки, в которую запрессован

центральный контакт, соприкасающийся с одной (нижней) из контактных пластинок электровоспламенителя. Вторая (верхняя) контактная пластинка с помощью контактной шайбы соединена с корпусом капсюля (на «массу»).

Свободное пространство капсюля заполнено дополнительным воспламенительным составом, загерметизированным фольговым покрытием. Для обеспечения надежности действия цепь воспламенения капсюля обычно дублируется двумя-тремя электровоспламенителями, включенными параллельно.

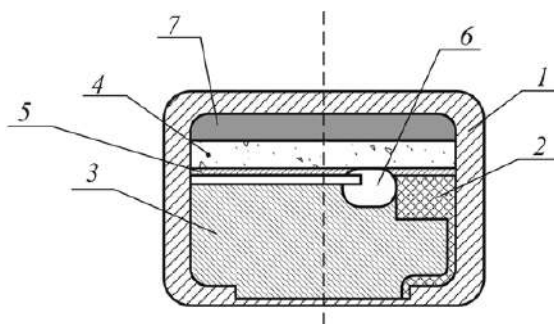


Рис. 4.7. Патронный электрический капсюль-воспламенитель:

1 – корпус; 2 – изолирующая втулка; 3 – контакт; 4 – воспламенительный состав; 5 – контактная шайба; 6 – электрозапал; 7 – покрытие

В момент выстрела при замыкании электрической цепи ток проходит через центральный контакт, нижнюю контактную пластину, мостик, верхнюю контактную пластину, контактную шайбу, корпус капсюля и далее – в цепь.

От луча пламени электровоспламенителя воспламеняется дополнительный воспламенительный состав капсюля и поджигает пороховой заряд или другой элемент цепи воспламенителя.

Совершенно аналогично устроено и пиропатронное средство воспламенения зарядов РДТТ. От патронного электрокапсюля пиропатрон отличается только формой и размерами и большей величиной дополнительного заряда воспламенительного состава (обычно ДРП).

4.5.4. ТРУБОЧНЫЕ ЭЛЕКТРОВОСПЛАМЕНИТЕЛИ

Трубочные электрические капсули-воспламенители предназначены для приведения в действие взрывательных устройств (трубок и взрывателей) артиллерийских и ракетных боеприпасов. Они представляют собой конструктивное сочетание мостикового электровоспламенителя и заряда воспламенительного состава, заключенных в одну оболочку.

На рис. 4.8 показана схема устройства одного из распространенных трубчатых электрокапсулей.

В оболочку капсуля запрессована изолирующая втулка с центральным контактом и контактной чашечкой. Контактная чашечка соприкасается с оболочкой (корпусом) капсуля. К центральному контакту и нижнему срезу контактной чашечки припаяны два-три мостика (радиально), которые плотно поджимаются к изолирующей втулке специальной шайбой.

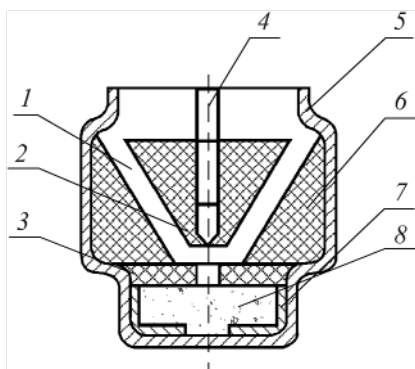


Рис. 4.8. Трубочный электрический капсуль-воспламенитель:

1 – контактная чашечка; 2 – мостик; 3 – шайба; 4 – центральный контакт; 5 – оболочка; 6 – изолирующая втулка; 7 – чашечка; 8 – воспламенительный состав

Такое крепление мостиков обеспечивает достаточную прочность и жесткость узла воспламенения, а наличие дублирования повышает безотказность и надежность действия капсуля.

Воспламенительный состав: 45 % железосинеродистого свинца $Pb_3[Fe(CN_6)_2]$, 55 % хлората калия $KClO_3$ и 3 % (сверх 100 %)

канифоли помещается в специальную чашечку, которая закрепляется непосредственно у мостиков капсуля.

При замыкании цепи ток идет через центральный контакт, мостики, контактную чашечку, корпус капсуля и далее – в цепь.



Вопросы для самоконтроля

1. Что такое средства инициирования?
2. Что содержит простейшая цепь инициирования ?
3. Что такое капсюли?
4. Шнуры как элементы инициирующей цепи.
5. Классификация средств инициирования по характеру создаваемого импульса.
6. Капсюли-воспламенители патронные. Назначение. Классификация.
7. Капсюли-воспламенители трубочные. Назначение. Классификация.
8. Огнепроводы. Классификация.
9. Что относят к дополнительным воспламенителям?
10. Капсюли-детонаторы трубочные. Назначение. Классификация.
11. Капсюли-детонаторы подрывные. Назначение. Классификация.
12. Назначение детонационного шнура.
13. Что такое детонаторы?
14. Требования, предъявляемые к средствам инициирования.
15. Основные конструктивные элементы патронного капсюля-воспламенителя.
16. Тёрочные или фрикционные капсюли-воспламенители.
17. Основные конструктивные элементы трубочного капсюля-воспламенителя.
18. Электрические средства воспламенения. Назначение. Классификация.
19. Мостиковые электровоспламенители.
20. Искровые электровоспламенители.
21. Щелевые электровоспламенители.
22. На какие виды по времени срабатывания подразделяются электровоспламенители?
23. Электровоспламенители, применяемые в подрывном деле.
24. Патронные электровоспламенители.
25. Трубочные электровоспламенители.

Библиографический список

1. Физика взрыва. В 2 т. Т. 2 / под ред. Л. П. Орленко. – 3-е изд., перераб. – Москва : Физматлит, 2002. – 656 с.
2. Физика взрыва В 2 т. Т. 1 / под ред. Л. П. Орленко. – 3-е изд., перераб. – Москва : Физматлит, 2002. – 832 с.
3. *Андреев К. К.* Теория взрывчатых веществ / К. К. Андреев, А. Ф. Беляев. – Москва : Оборонгиз, 1960. – 422 с.
4. *Милевский К. Е.* Теория взрывчатых веществ: учебное пособие / К. Е. Милевский, А. В. Гуськов. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2001. – 139 с.
5. *Матвейчук В. В.* Взрывные работы на земной поверхности. Часть 1. Взрывчатые материалы, оборудование, приборы / В. В. Матвейчук. – Москва : МГГА, 1997.
6. *Кутузов Б. Н.* Разрушение горных пород взрывом / Б. Н. Кутузов. – Москва : Изд-во Моск. горного ин-та, 1992.
7. Взрывчатые вещества. Т. 2. Основные свойства. Технология изготовления и переработки / под ред. Л. В. Фомичевой. – Саров : РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2007. – 452 с.
8. *Конон Ю. А.* Сварка взрывом / Ю. А. Конон, Л. Б. Первухин, А. Д. Чудновский ; под ред. В. М. Кудинова. – Москва : Машиностроение, 1987. – 216 с.
9. Высокоэнергетические материалы : учебное пособие / В. В. Андреев, А. В. Гуськов, К. Е. Милевский, Е. Ю. Слесарева. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2013. – 326 с.

ГЛАВА 5

СРЕДСТВА ВЗРЫВАНИЯ

К средствам взрываания относятся капсули-детонаторы, создающие взрывной импульс и используемые для возбуждения взрыва разрывных зарядов артиллерийских, ракетных, авиационных, морских и инженерных боеприпасов.

Существующие капсули-детонаторы можно разделить на следующие виды.

1. *По назначению (применению):*

- а) артиллерийские;
- б) подрывные (инженерные);
- в) для ручных гранат;
- г) специальные.

2. *По принципу действия:*

а) лучевые (в артиллерийских, ракетных и инженерных боеприпасах);

б) наконечные (преимущественно в артиллерийско-минометных боеприпасах);

в) двойного действия – наконечно-лучевые (в артиллерийских боеприпасах);

г) электрические (в артиллерийских, ракетных, инженерных и других боеприпасах).

3. *По характеру снаряжения (типу заряда):*

а) простые (содержат заряд только из инициирующего ВВ);

б) комбинированные (заряд состоит из двух частей – инициирующего и бризантного ВВ).

В ракетно-артиллерийской технике и инженерном деле наиболее распространены комбинированные лучевые и электрические капсули-детонаторы, наконечные имеют меньшее распространение, а остальные виды используются сравнительно редко.

5.1. ЛУЧЕВЫЕ КАПСЮЛИ-ДЕТОНАТОРЫ

Независимо от конкретного назначения лучевые капсули-детонаторы имеют принципиально одинаковое устройство. Основные конструктивные элементы лучевого капсуля-детонатора (рис. 5.1): 1) оболочка (колпачок); 2) покрытие (чашечка); 3) заряд.

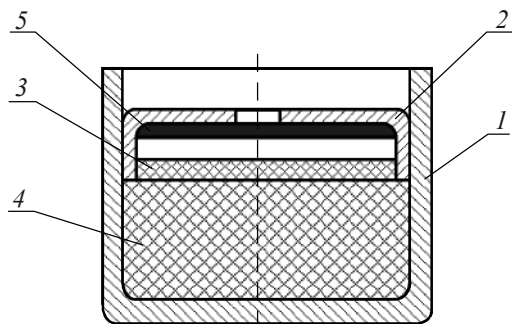


Рис. 5.1. Устройство лучевого капсуля-детонатора:

1 – оболочка; 2 – покрытие (чашечка);
3 – первичный заряд; 4 – вторичный заряд;
5 – фольга (шелковая сетка)

Оболочка представляет собой цельнотянутый или точечный колпачок из мельхиора, меди или алюминия. Высота оболочки (h), как правило, больше диаметра (d). Если отношение $h/d \geq (5...6)$, то такие оболочки называются гильзами. Толщина стенки оболочки различных образцов лучевых капсулей-детонаторов составляет в среднем $0,10...0,70$ мм.

В некоторых неответственных случаях применяются бумажные оболочки. Металлические оболочки могут быть без буртика, с буртиком или резьбой. Буртик или резьба предназначены для крепления капсуля по месту его размещения.

Покрытие в виде чашечки изготавливается холодной штамповкой из меди, алюминия, латуни или железа. Выбор материала покрытия обуславливается необходимостью исключить химическое взаимодействие между металлом и инициирующим ВВ, которое размещается в чашечке.

В дне чашечки имеется одно или несколько отверстий, закрываемых шелковой сеткой или нитролаком и предназначенных для

облегчения прорыва луча пламени к капсюльному заряду, т. е. для повышения надежности действия капсюлей.

Заряд лучевых капсюлей-детонаторов обычно комбинированный и состоит из первичного и вторичного заряда. Первичный заряд – преимущественно из азида свинца, в количестве 0,2...0,4 г. Для повышения чувствительности капсюля к лучу пламени (азид свинца недостаточно чувствителен) поверх первичного заряда помещается 0,02...0,08 г ТНРС. В некоторых конструкциях подрывных капсюлей-детонаторов первичный заряд изготавливается из гремучей ртути, вес которой может быть до 1,0 г. Первичный заряд, запрессованный под давлением 300...500 кгс/см², целиком располагается в чашечке.

Вторичный заряд чаще изготавливается из ТЭНа, вес его в артиллерийских капсюлях-детонаторах составляет 0,05...0,30 г, в подрывных – от 0,5 до 1,0 г. Широко применяется также гексоген, могут применяться тетрил, ДИНА, октоген и другие мощные высокочувствительные к взрывному импульсу бризантные ВВ.

Вторичный заряд располагается частично в чашечке и оболочке, давление его запрессовки составляет 600...1200 кгс/см².

Капсюлям-детонаторам дается наименование (обозначение) либо по типу взрывателей, в которых они применяются, либо (чаще всего) по конструкции оболочки и составу заряда.

Например, наименование ТАТ-1 означает: капсюль-детонатор первого образца, содержит ТНРС (первое «Т»), азид свинца («А»), ТЭН или тетрил (второе «Т»), оболочка капсюля имеет буртик. Если в качестве вторичного заряда используется гексоген, то обозначение примет вид ТАГ-1, в случае отсутствия буртика у оболочки перед обозначением номера ставится ноль: ТАТ-02.

Подрывные капсюли-детонаторы, по международному соглашению, обозначаются возрастающими номерами, в соответствии с увеличением веса заряда. Наиболее распространены подрывные капсюли-детонаторы № 8.

С целью проверки боевых и эксплуатационных качеств готовые партии лучевых капсюлей-детонаторов подвергают испытаниям, при которых проверяются или определяются: 1) иницирующая способность; 2) чувствительность к лучу пламени; 3) безопасность при транспортировке и в обращении; 4) стойкость к действию инерционных перегрузок (к сотрясениям); 5) время срабатывания.

5.2. НАКОЛЬНЫЕ КАПСЮЛИ-ДЕТОНАТОРЫ

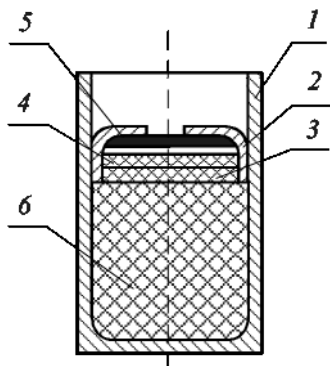


Рис. 5.2. Напольные капсюли-детонаторы:

1 – оболочка; 2 – чашечка;
3 – первичный заряд; 4 – напольный состав; 5 – фольга;
6 – вторичный заряд

Общее устройство напольных капсюлей-детонаторов ничем не отличается от устройства лучевых капсюлей-детонаторов: оболочка, покрытие (чашечка), заряд (рис. 5.2). Особенности состоят в следующем. Чашечка напольных капсюлей-детонаторов, как правило, имеет сплошное, но более тонкое, чем стенки чашечки, дно. Это облегчает накол жалом и повышает безотказность действия капсюля. Однако встречаются конструкции напольных капсюлей-детонаторов, имеющих чашечку с отверстиями, закрываемыми шелковой сеткой, как у лучевых капсюлей-детонаторов. Первичный заряд напольных капсюлей-детонаторов – из азид свинца.

Для повышения чувствительности капсюлей к наколу (азид свинца недостаточно чувствителен) поверх первичного заряда помещается 0,04...0,06 г напольного сенсibiliзирующего состава, содержащего ТНПС, тетразен, $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$, Sb_2S_3 . Вторичный заряд – из ТЭНа, тетрила или гексогена.

Напольные капсюли-детонаторы обозначаются либо по типу взрывателей, в которых они используются, либо номерами. Для проверки боевых и эксплуатационных качеств напольные капсюли-детонаторы подвергают тем же испытаниям, что и лучевые, с проверкой чувствительности к наколу.

5.3. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ВЗРЫВАНИЯ

Электрические средства взрыва (электродетонаторы) представляют собой капсюли-детонаторы, действующие за счет преобразования электрической энергии в тепловую. В конструкциях электродетонаторов так или иначе объединены электровоспламенители и лучевые капсюли-детонаторы. При этом в зависимости от типа электровоспламенителя различают электродетонаторы:

а) мостиковые и б) искровые. По назначению электродетонаторы бывают подрывные и боеприпасные, по времени срабатывания – мгновенного и замедленного действия.

5.3.1. ПОДРЫВНЫЕ ЭЛЕКТРОДЕТОНАТОРЫ

Обычно подрывные электродетонаторы представляют собой объединенные в одной конструкции лучевой капсюль-детонатор и электровоспламенитель с мостиком накаливания.

В войсках применяются электродетонаторы мгновенного действия ЭДП и ЭДП-Р (рис. 5.3). Оба они состоят из капсюля-детонатора № 8-А, электровоспламенителя с платиноиридиевым мостиком накаливания и имеют одинаковые характеристики.

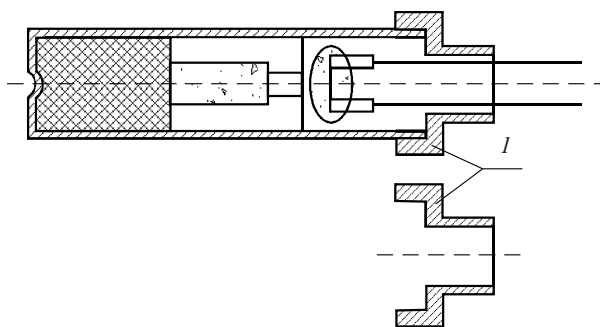


Рис. 5.3. Подрывные электродетонаторы:

1 – резьбовая втулка

Электродетонатор ЭДП-р (буква П означает «подрывной») отличается от ЭДП только наличием резьбовой муфты, служащей для закрепления электродетонатора в запальном гнезде заряда.

Если необходимо производить подрывы зарядов в определенной последовательности или через некоторое заданное время после замыкания цепи, то применяют электродетонаторы с замедлением, которые отличаются от детонаторов мгновенного действия наличием между электровоспламенителем и первичным зарядом капсюля-детонатора замедлительного узла. В качестве замедлителя используется дымный порох или пиротехнические составы, запрессованные под определенным давлением, необходимое время замедления обеспечивается длиной столбика замедлителя и давлением его запрессовки (поскольку скорость горения зависит от плотности заряда).

Замедляющие электродетонаторы выпускаются со временем замедления от 25 до 250 мс (короткозамедленного действия) и от 0,5 до 10 с (замедленного действия). Значительно большее время замедления можно обеспечить с помощью отрезка огнепроводного шнура, один конец которого заделывается в гильзе электрозапала, другой – в оболочке капсюля-детонатора.

В качестве источников тока для подрыва зарядов в войсках используются главным образом конденсаторные подрывные машины (КПМ-1, КПМ-2), а также сухие батареи (70-АМН, 100-АМН) и аккумуляторы (5НКИ-10, 10ЖН-100 и др.).

5.3.2. БОЕПРИПАСНЫЕ ЭЛЕКТРОДЕТОНАТОРЫ

К электродетонаторам, применяемым во взрывчатых устройствах артиллерийских снарядов, мин, боевых частей ракет и других боеприпасов, предъявляются особо жесткие требования по мгновенности и однообразию действия. Время срабатывания боеприпасных электродетонаторов, как правило, измеряется несколькими микросекундами, причем разброс его должен быть минимальным (сотые доли микросекунды).

Высокая мгновенность действия боеприпасных электродетонаторов обеспечивается, прежде всего, максимальным сближением электровоспламенителя с капсюлем-детонатором. Зарядом электровоспламенителя в данном случае является или воспламенительный слой (ТНРС) первичного заряда капсюля-детонатора, или непосредственно первичный заряд (рис. 5.4). Причем первичный заряд во втором случае обычно изготавливается из смеси 20...40 % ТНРС и 80...60 % азида свинца. Благодаря введению ТНРС чувствительность первичного заряда к нагреву от мостика резко увеличивается, обеспечивая высокую безотказность действия капсюлей.

Высокой мгновенностью действия отличаются искровые электродетонаторы, все более широко применяемые как в ракетных и артиллерийских боеприпасах, так и в подрывном деле.

В боеприпасах используются искровые электродетонаторы, разработанные на базе капсюлей-детонаторов ТАТ и специальной конструкции (рис. 5.5).

Для повышения надежности действия капсюля в промежуток между чашечкой и пластмассовой втулкой помещается 0,02 г азида свинца.

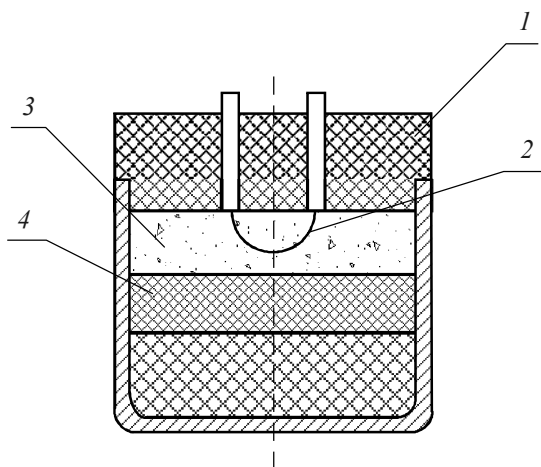


Рис. 5.4. Боеприпасные мостиковые электро-детонаторы:

1 – изолирующая втулка; 2 – мостик; 3 – воспламеняемый слой; 4 – первичный заряд

В первом случае обычный капсюль-детонатор ТАТ-2 снабжается искровым узлом в виде пластмассовой изолирующей втулки с центральным контактом. Искровой промежуток создается между контактом и чашечкой капсюля-детонатора (зазор 2 мм).

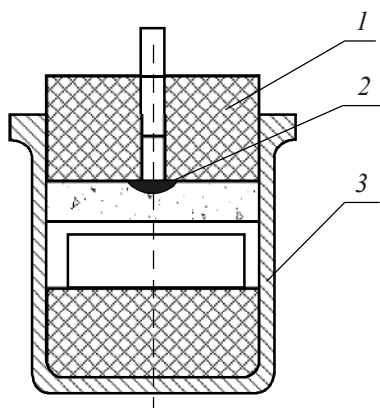


Рис. 5.5. Искровые электро-детонаторы:

1 – изолирующая втулка; 2 – контакт; 3 – ТАТ-2

Искровой электродетонатор специальной конструкции устроен в общем аналогично. Он состоит из металлической оболочки, в которую вставлены металлическая чашечка и пластмассовая втулка с центральным контактом, входящим в донное отверстие чашечки с зазором 0,2 мм (искровой промежуток). В чашечку запрессован чистый азид свинца или в смеси с 20 % ТНРС, в оболочку – ТЭН.

Искровой электродетонатор срабатывает при подаче на контакт и корпус капсюля высокого (2000...10 000 В) напряжения. Бортовыми источниками тока служат или батареи, энергия которых используется для зарядки конденсатора, разряжаемого затем через искровой промежуток, или пьезоэлектрические генераторы высокого напряжения.

5.4. СРЕДСТВА ПЕРЕДАЧИ ИНИЦИИРУЮЩИХ ИМПУЛЬСОВ

5.4.1. ОГНЕПРОВОДНЫЙ ШНУР

Огнепроводный шнур представляет собой гибкую оплетку (оболочку) из хлопчатобумажных (льняных) нитей с сердцевинной из дымного шнурового пороха (78 % селитры, 12 % серы и 10 % древесного угля). Оболочка шнура – двухслойная (рис. 5.6), покрытая или пропитанная влагозащитным составом (смолой, мастикой) для предотвращения увлажнения дымного пороха.

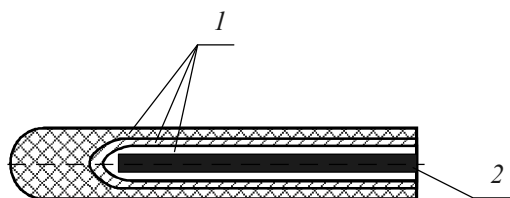


Рис. 5.6. Огнепроводный шнур:

1 – оплетка (три слоя); 2 – сердцевина из ДРП

Наружный диаметр огнепроводного шнура 5...6 мм. Скорость горения шнура при атмосферном давлении составляет 1 см/с. Под водой шнур горит быстрее. Находит также применение огнепроводный шнур с пластиковой оболочкой, обеспечивающей более надежную влагоизоляцию сердцевины шнура.

Основные типы (марки) огнепроводного шнура:

ОШП – огнепроводный шнур, пластиковый (белый);

ОШДА – огнепроводный шнур, двойной асфальтированный (серо-черного цвета);

ОША – огнепроводный шнур, асфальтированный (серо-черный).

Шнуры ОШП и ОПША имеют повышенную влагоизоляцию и применяются для проведения подрывных работ под водой и в сырых местах. Шнур ОША с менее надежной влагоизоляцией (только по наружному слою оболочки) применяется для работы только в сухих местах.

Перед использованием шнура всегда проверяется скорость его горения, для чего поджигается отрезок длиной 60 см и фиксируется время его сгорания, которое должно составлять 60...70 с (на воздухе). При этом не должно быть проскоков пламени, затухания шнура, воспламенения оболочки и других нарушений процесса горения.

Для поджигания огнепроводного шнура используют обыкновенные спички, воспламенительный фитиль, специальные механические или тёрочные воспламенители.

Для выполнения подрывов огнем способом применяют зажигательные трубки, состоящие из лучевого капсюля-детонатора (обычно № 8) и вставленного в него отрезка огнепроводного шнура. Зажигательные трубки бывают стандартные (заводского изготовления, обычно с механическим воспламенителем) и нестандартные, изготавливаемые непосредственно на месте проведения подрывных работ.

Отрезок ОШ должен быть не менее 50 см (если для воспламенения шнура применяется фитиль, то не менее 10 см). Конец шнура, вставляемый в капсюль-детонатор, непременно срезается под прямым углом. Шнур вводится в гильзу осторожно, до упора в чашечку (без нажима и вращения). Для закрепления капсюля на шнуре дульце гильзы обжимается специальным инструментом (обжимом). Если нет обжима, то конец ОШ, вставляемый в капсюль, обертывается изоляционной лентой (или бумагой) и вводится в гильзу с некоторым натягом.

При использовании для воспламенения ОШ спичек или фитиля свободный конец шнура срезается наискось (под острым углом).

При хранении зажигательных трубок свободные концы отрезков ОШ герметизируются воском, мастикой или изоляционной лентой.

Зажигательная трубка вставляется капсюлем-детонатором в гнездо заряда ВВ только после установки и закрепления его на месте подрыва.

При обращении с огнепроводным шнуром не допускается перегибать его, скручивать или сильно нажимать на него во избежание нарушения целостности пороховой сердцевины.

5.4.2. ДЕТОНИРУЮЩИЙ ШНУР

Детонирующий шнур (рис. 5.7) представляет собой гибкую оболочку, содержащую бризантное ВВ, и служит для передачи взрывного импульса на расстояние и возбуждения детонации разрывных зарядов.

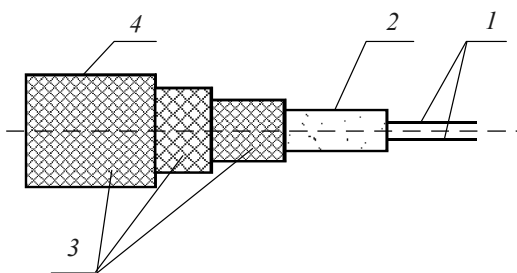


Рис. 5.7. Детонирующий шнур:

1 – направляющие нити; 2 – ВВ; 3 – оплетки;
4 – наружная изолирующая оболочка

Детонирующий шнур состоит из оболочки в виде тройной нитяной оплетки, внутри которой размещается сердцевина из бризантного ВВ. Наружная и средняя оплетка покрываются изолирующим составом и лаком для предохранения сердцевины от увлажнения и механических повреждений. Широко распространен также детонирующий шнур в оболочке из полимерных материалов (пластикат, политерафторэтилен или тефлон и др.).

Для снаряжения детонирующего шнура в зависимости от его конкретного назначения применяются ТЭН, А-IX-I, тетрил, тротил и другие бризантные ВВ в порошкообразном виде (слабоуплотненные) или в виде прессованных таблеток (таблетизированный шнур).

Оболочка детонирующего шнура окрашивается в красный цвет или в нее вплетаются красные нити, благодаря чему он по внешнему виду отличается от огнепроводного шнура.

В зависимости от степени влагоизоляции детонирующий шнур, применяемый в военном деле, бывает двух основных марок: ДШБ и ДШВ. В народном хозяйстве применяются детонирующие шнуры

ДША, ДШВ-К, ДШВ-Л, ВДШМ-3, имеющие защитные покрытия от действия воды и кислотнo-щелoчных сред.

Шнур ДШВ имеет усиленную влагоизоляцию в виде дополнительной полихлорвиниловой оболочки. Применяется для подводного взрыва, при этом не теряет своих качеств при пребывании в воде до 12 часов.

Шнур ДШБ снаружи покрывается специальной мастикой, обеспечивающей менее надежную влагоизоляцию. Этот тип шнура применяется для работы в сухих местах.

Снаряжаются шнуры ДШБ и ДШВ ТЭНом, вес которого составляет 11...13 г на 1 м длины шнура.

Наружный диаметр шнура 5...6 мм. Скорость детонации шнура, снаряженного ТЭНом, составляет 6500...7000 м/с. Детонирующие шнуры, снаряжаемые таблетками ВВ, имеют соответственно более высокую скорость детонации.

При работе с детонирующим шнуром его нельзя резко перегибать, скручивать, бросать на него какие-либо предметы, ударять чем-либо по шнуру.

Детонирующий шнур подрывается капсюлем-детонатором № 8 или электродетонатором, привязываемым к свободному концу детонирующего шнура. Одним капсюлем-детонатором (электродетонатором) можно взорвать до шести концов ДШ. При большем числе концов они привязываются к шашке ВВ, а последняя подрывается капсюлем-детонатором.

На конце отрезков ДШ, вставляемых во взрывные заряды, как правило, должны быть капсюли-детонаторы. Если капсюлей-детонаторов нет (недостаточно), то взрываемый заряд обертыается без пересечений четырьмя-пятью витками детонирующего шнура, плотно прилегающими один к другому.

Детонирующий шнур на отрезки разрезается стальным острым ножом.

Применение детонирующего шнура не ограничивается передачей взрывного импульса на расстояние. С помощью детонирующего шнура можно разрушать различные конструкции (мостовые фермы, опоры линий электропередач, рельсы и т. п.). Для этого шнур обертыается вокруг подрываемого объекта (без пересечений) и производится подрыв.

Вопросы для самоконтроля

1. Что такое средства взрыва?
2. Виды капсюлей-детонаторов по назначению.
3. Виды капсюлей-детонаторов по принципу действия.
4. Виды капсюлей-детонаторов по характеру снаряжения.
5. Лучевые капсюли-детонаторы. Устройство.
6. Первичный заряд лучевых капсюлей-детонаторов.
7. Вторичный заряд лучевых капсюлей-детонаторов.
8. Обозначение капсюлей-детонаторов. Примеры.
9. Определение боевых и эксплуатационных возможностей лучевых капсюлей-детонаторов.
10. Накольные капсюли-детонаторы.
11. Что такое электрические средства воспламенения?
12. Подрывные электродетонаторы.
13. Боеприпасные электродетонаторы.
14. Что такое огнепроводный шнур?
15. Основные типы огнепроводного шнура.
16. Что такое детонирующий шнур?
17. Основные марки детонирующих шнуров.

Библиографический список

1. Физика взрыва. В 2 т. Т. 2 / под ред. Л. П. Орленко. – 3-е изд., перераб. – Москва : Физматлит, 2002. – 656 с.
2. Физика взрыва В 2 т. Т. 1 / под ред. Л. П. Орленко. – 3-е изд., перераб. – Москва : Физматлит, 2002. – 832 с.
3. Андреев К. К. Теория взрывчатых веществ / К. К. Андреев, А. Ф. Беляев. – Москва : Оборонгиз, 1960. – 422 с.
4. Матвейчук В. В. Взрывные работы на земной поверхности. Часть 1. Взрывчатые материалы, оборудование, приборы / В. В. Матвейчук. – Москва : МГГА, 1997.
5. Кутузов Б. Н. Разрушение горных пород взрывом / Б. Н. Кутузов. – Москва : Изд-во Моск. горного ин-та, 1992.
6. Взрывчатые вещества. Т. 2. Основные свойства. Технология изготовления и переработки / под ред. Л. В. Фомичевой. – Саров : РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2007. – 452 с.
7. Конон Ю. А. Сварка взрывом / Ю. А. Конон, Л. Б. Первухин, А. Д. Чудновский ; под ред. В. М. Кудинова. – Москва : Машиностроение, 1987. – 216 с.
8. Милевский К. Е. Теория взрывчатых веществ: учебное пособие / К. Е. Милевский, А. В. Гуськов. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2001. – 139 с.
9. Высокоэнергетические материалы : учебное пособие / В. В. Андреев, А. В. Гуськов, К. Е. Милевский, Е. Ю. Слесарева. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2013. – 326 с.

ГЛАВА 6

БРИЗАНТНЫЕ ВЗРЫВЧАТЫЕ ВЕЩЕСТВА

6.1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА БРИЗАНТНЫХ ВВ

Бризантные ВВ в отличие от инициирующих имеют особенности:

- 1) значительно меньшую чувствительность к простым импульсам (удар, накол, трение, нагрев);
- 2) сравнительно небольшое ускорение развития процесса взрывчатого превращения, вследствие чего критический диаметр детонации бризантных ВВ значительно больше, чем у инициирующих;
- 3) существенно более высокие значения взрывчато-энергетических характеристик (теплоты взрыва, скорости детонации, удельного объема продуктов взрыва, бризантности, фугасности).

Из-за сравнительно низкой чувствительности бризантных ВВ к простым видам начального импульса в обычных условиях применения практически невозможно вызвать их детонацию с помощью простых импульсов. Возбуждение детонации разрывных зарядов осуществляется взрывным импульсом с помощью инициирующих (первичных) ВВ, поэтому бризантные ВВ часто называют вторичными.

Сочетание низкой чувствительности и высоких энергетических характеристик определило основную область применения бризантных ВВ – обеспечение разрушительного и поражающего действия боеприпасов в результате взрыва разрывного заряда.

Некоторые бризантные ВВ используются, кроме того, в детонаторах и детонирующих шнурах. Значительное количество бризантных ВВ применяется в качестве компонентов порохов и твердых ракетных топлив, и в этом случае они служат не для целей разрушения, а для сообщения движения снаряду или ракете.

Как и инициирующие, бризантные ВВ подразделяются: 1) на индивидуальные (простые) и 2) смесевые (сложные). Причем номенклатура бризантных ВВ значительно шире и разнообразнее, и она непрерывно пополняется новыми ВВ, поскольку требования к разрывным зарядам повышаются и расширяются, так что многие известные ВВ уже не могут их обеспечивать.

По химической природе индивидуальные бризантные ВВ представляют собой производные различных классов органических соединений. В зависимости от вида эксплозифорных групп бризантными ВВ будут:

- 1) *нитросоединения* – содержат в молекуле нитрогруппы NO_2 ;
- 2) *нитраты* (азотнокислые эфиры) – содержат нитратные группы ONO_2 ;
- 3) *нитронитраты* – содержат одновременно нитро- и нитратные группы.

Нитросоединения по природе радикала, связанного с нитрогруппами, подразделяются на следующие классы:

- ароматические;
- алифатические (или жирные);
- гетероциклические.

В свою очередь ароматические нитросоединения могут быть производными следующих классов веществ:

а) ароматических углеводородов – нитроароматические углеводороды: тринитробензол $\text{C}_6\text{H}_3(\text{NO}_2)_3$, тринитротолуол или тротил $\text{C}_6\text{H}_3(\text{NO}_2)_3\text{CH}_3$, тринитроксилол или ксилит $\text{C}_6\text{H}(\text{NO}_2)_3(\text{CP}_3)_2$ и др.;

б) ароматических аминов – нитроароматические амины: тринитроанилин $\text{C}_6\text{H}_3(\text{NO}_2)_3\text{NH}_2$, тринитрофенилметилнитроамин

или тетрил $\text{C}_6\text{H}_3(\text{NO}_2)_3\text{N} \begin{array}{c} \text{CH}_3 \\ / \\ \backslash \\ \text{CH}_3 \end{array}$ и др.;

в) фенолов – нитрофенолы: пикриновая кислота $\text{C}_6\text{H}_2(\text{NO}_2)_3\text{OH}$, стифниновая кислота $\text{C}_6\text{H}(\text{NO}_2)_3(\text{OH})_2$ и др.

Имеются и другие классы, однако из всего многообразия взрывчатых веществ ароматического ряда практическое применение имеют (являются штатными ВВ) немногие: тротил и тетрил.

Из нитросоединений алифатического или ациклического жирного ряда наиболее известны:

а) нитропарафины – нитрометан CH_3NO_2 , гексанитроэтан $\text{C}_2(\text{NO}_2)_6$ и др.;

б) нитроамины – этилендинитроамин (ЭДНА) | CH_2NHNO_2 и др.;

в) нитроспирт – тринитроэтанол $\text{C}(\text{NO}_2)_3\text{CH}_2\text{OH}$ и др.

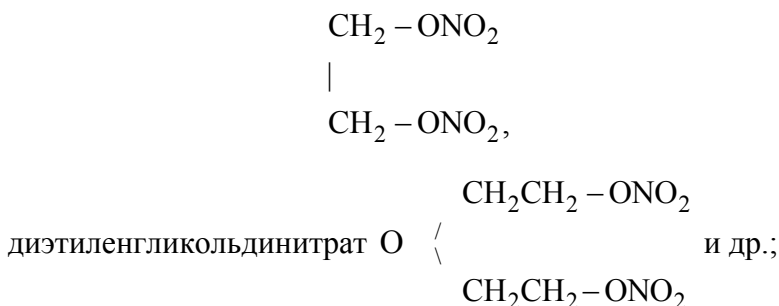
Практическое применение в качестве самостоятельных ВВ имеют немногие алифатические нитросоединения, например ЭДНА. Однако существует значительное число перспективных ВВ этой группы.

Гетероциклические нитросоединения – это наиболее малочисленный класс ВВ, насчитывающий всего два вещества: гексоген $(\text{CH}_2\text{N}-\text{NO}_2)_3$ и октоген $(\text{CH}_2\text{N}-\text{NO}_2)_4$, причем оба они являются штатными ВВ.

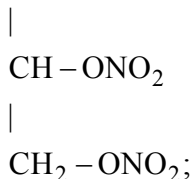
Нитраты – это эфиры азотной кислоты и жирных спиртов. Поскольку спирты бывают одно-, двух-, трех-, четырехатомные, соответственно этому различают:

а) нитраты одноатомных спиртов – этилнитрат $\text{C}_2\text{H}_5\text{ONO}_2$ и др.;

б) нитраты двухатомных спиртов – этиленгликольдинитрат



в) нитраты трехатомных спиртов – глицеринтринитрат (неправильно называемый нитроглицерином) $\text{CH}_2 - \text{ONO}_2$



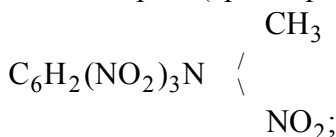
г) нитраты четырехатомных спиртов – пентаэритритетринитрат или ТЭН $\text{C}(\text{CH}_2\text{ONO}_2)_4$ и др.

Нитраты в основном применяются в качестве компонентов порохов и топлив. Штатным бризантным ВВ является практически одно вещество нитратов – ТЭН.

6.2. ИНДИВИДУАЛЬНЫЕ БРИЗАНТНЫЕ ВВ

В качестве штатных бризантных ВВ применяются:

- тротил (тринитротолуол, тол, ТНТ) $\text{C}_6\text{H}_2(\text{NO}_2)_3\text{CH}_3$;
- тетрил (тринитрофенилметилнитроамин, тетралит, пиронит)



- ТЭН (пентаэритритетранитрат, пентрит) $\text{C}(\text{CH}_2\text{ONO}_2)_4$;
- гексоген (циклотриметилентринитроамин, циклонит) $\text{RDX} (\text{CH}_2\text{N} - \text{NO}_2)_3$;

- октоген (циклотетраметилентетранитроамин, НМХ) $(\text{CH}_2\text{N} - \text{NO}_2)_4$.

Более ограниченное применение имеют:

- ДИНА (диэтанолнитроаминдинитрат) $\text{O}_2\text{N} \begin{array}{c} \text{CH}_2\text{CH}_2\text{ONO}_2 \\ / \backslash \\ \text{CH}_2\text{CH}_2\text{ONO}_2; \end{array}$



- ЭДНА (этилендинитроамин) $\begin{array}{c} | \\ \text{CH}_2\text{NHNO}_2. \end{array}$

6.2.1. ФИЗИЧЕСКИЕ И ХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА БРИЗАНТНЫХ ВВ

В табл. 6.1 приведены основные характеристики физических бризантных ВВ. Бризантные ВВ – кристаллические вещества белого или желтого цвета, значительно уступающие по удельному весу инициирующим ВВ (кроме тетразена).

По температуре плавления (затвердевания) только тротил и ДИНА, плавящиеся без разложения при сравнительно невысоких температурах, пригодны для изготовления разрывных зарядов способом заливки.

Тротил, тетрил, ДИНА, ЭДНА хорошо прессуются, давая заряды с достаточно высокой плотностью и прочностью. ТЭН, гексоген и октоген прессуются плохо, с образованием расслаивающихся зарядов, поэтому в чистом виде они непригодны для снаряжения боеприпасов.

Все рассматриваемые бризантные ВВ имеют невысокую гигроскопичность и незначительную растворимость в холодной и горячей воде, что позволяет применять воду для промывки ВВ при их производстве.

Исключение составляет ЭДНА, имеющий достаточно высокую растворимость в воде при повышенных температурах.

В органических растворителях таких, как ацетон, бензол, толуол, этиловый спирт, бризантные ВВ растворяются в основном хорошо, особенно при нагревании. Эту зависимость растворимости ВВ от температуры часто используют в производстве для очистки от примесей посредством перекристаллизации из органических растворителей.

Бризантные ВВ – вещества достаточно нейтральные, с металлами и их окислами не взаимодействуют, за исключением ЭДНА, который с металлами образует высокочувствительные соли. Тротил со щелочами, в том числе и с NH_4OH (т. е. с аммиаком в присутствии влаги) образует окрашенные производные – тротилаты, обладающие высокой чувствительностью, не уступающей чувствительности инициирующих ВВ.

Химическая стойкость бризантных ВВ достаточно высокая и обеспечивает их применение и длительное хранение в значительном интервале температур. Наиболее стойкие гексоген и октоген,



Таблица 6.1

Физические и химические свойства бризантных ВВ

Характеристика	Обозначение	Размерность	Взрывчатое вещество						
			Тротил	Тетрил	ТЭН	ДИНА	ЭДНА	Гексоген	Октоген
Температура плавления	$t_{пл} (t_{жст})$	°C	80,85	129,5...131,5*	141...142*	49,5...51,5*	175...178*	202...205*	276...280*
Плотность	ρ	г/см ³	1,663	1,73	1,773	1,67	1,75	1,82	1,96
Плотность, достигаемая при прессовании	Прессование	г/см ³	1,54...1,62	1,50...1,65	1,60...1,70	1,50...1,60	1,50...1,62	1,73...1,78	1,90
Растворимость в воде	$t = 15\text{ }^{\circ}\text{C}$	г/100 г воды	–	–	–	–	–	0,01	–
	$t = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$		0,013	0,008	–	–	0,3	–	0,003**
	$t = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$		0,147	0,184	0,035	–	16,0	0,15	0,02**
Гигроскопичность	h	%	0,05	0,02	0	–	–	0,10	0
Предел прочности	Литого прессования	кг/см ²	100 70	–	–	–	–	340...350	–
			–	52...107	35...50	–	–	40...50	–
Предел прочности при сдвиге	τ_p	кг/см ²	–	–	–	–	–	–	–
Предел прочности при растяжении	σ_p	кг/см ²	0,9...8,3	–	–	–	–	–	–
Удельная теплоемкость	C	$\frac{\text{кал}}{\text{г} \cdot \text{град}}$	0,269...0,47	0,218	–	–	–	0,30	–
Коэффициент теплопроводности	λ	$\frac{\text{кал}}{\text{N} \cdot \text{г} \cdot \text{град}}$	0,102	–	–	–	–	–	–
Температура начала разложения	t_p	°C	150	110	120	165	110	203	260...280

* Плавится с разложением.

** Растворимость в процентах.

наименее стойкий – тетрил. Большое влияние на стойкость ВВ оказывают примеси (влага, кислота, щелочи), которые могут ее существенно снижать. Так, если температура начала разложения сухого ЭДНА составляет 110 °С, то при увлажнении продукта она снижается до 50 °С.

В связи с этим ВВ в производстве очищаются от примесей, снижающих их химическую стойкость.

6.2.2. ВЗРЫВЧАТЫЕ СВОЙСТВА И ПРИМЕНЕНИЕ БРИЗАНТНЫХ ВВ

Наименее чувствителен ко всем видам начального импульса тротил. Это одно из самых безопасных ВВ, заряды из которого можно подвергать механической обработке, соблюдая, однако, определенные меры безопасности. Чувствительность к взрывному импульсу литого тротила меньше, чем прессованного (табл. 6.2).

Для обеспечения надежности и безотказности действия боеприпасов, снаряженных тротилом, в них обычно применяются дополнительные детонаторы из более чувствительных ВВ (тетрил, ДИНА).

Тетрил, ТЭН, ДИНА, ЭДНА, гексоген, октоген обладают значительно более высокой чувствительностью, чем тротил, что затрудняет или вообще делает невозможным применение этих ВВ в чистом виде для изготовления разрывных зарядов, особенно значительного веса.

По энергетике, или иначе, по эффективности, тротил также уступает всем остальным ВВ, хотя его энергетические характеристики в целом достаточно высокие. Наиболее эффективны ТЭН, гексоген, октоген, т. е. как раз такие ВВ, которые имеют неудовлетворительные технологические качества (плавятся с разложением, плохо прессуются) и высокую чувствительность.

Из применяемых бризантных ВВ тротил наиболее удачно сочетает ряд положительных качеств: высокую химическую стойкость, удовлетворительные технологические свойства, химическую инертность, невысокую чувствительность к простым импульсам и вполне удовлетворительные взрывчато-энергетические характеристики. В силу этого тротил не утратил своего значения как одно из основных бризантных ВВ. В чистом виде тротил применяется для снаряжения осколочных и осколочно-фугасных боеприпасов, а также для изготовления подрывных зарядов и детонаторов. Разрывные заряды из тротила имеют шифр «Т».



Таблица 6.2

Характеристики взрывчатых свойств бризантных ВВ

Характеристика		Обозначение	Размерность	Взрывчатое вещество					
				тротил	тетрил	ТЭН	ДИНА	ЭДНА	гексоген
Кислородный баланс		КБ	%	-74	-47	-10	-26,7	-32	-22
Температура вспышки	$\tau = 5 \text{ мин}$ $\tau = 5 \text{ с}$	$t_{\text{всп}}$	°C	290...300	190	215	240	180	230
Чувствительность к удару ($P = 10 \text{ кг}$, $H = 2,5 \text{ см}$)		—	Процент взрывов	4...8	50...60	100	80...90	50...60	70...80
Восприимчивость к детонации по величине предельного заряда азид свинца		—	Г	0,09	0,025	0,03	—	—	0,05
Теплота взрыва		$Q_{\text{в(п)}}$	ккал/кг	1010	1100	1400	1250	1275	1370
Температура взрыва		$T_{\text{взр}}$	К	3500	3800	4600	3540	—	4000
Удельный объем продуктов взрыва		W	л/кг	730	760	790	875	908	910
Скорость детонации	$\rho = 1,50 \text{ г/см}^3$ $\rho = 1,60 \text{ г/см}^3$ $\rho = 1,67 \text{ г/см}^3$ $\rho = 1,7 \text{ г/см}^3$ $\rho = 1,90 \text{ г/см}^3$	$D, \text{ м/с}$		6610	7300	—	7400	7700	—
				7000	7500	8200	7700	8000	8200
				—	7700	—	8000	—	—
				—	—	8600	—	8800	—
				—	—	—	—	—	9300
Работоспособность по расширению в свинцовом блоке		ΔW	мл	285...305	340	480...500	480	450	450...520
Бризантность по обжатию свинцовых столбиков		ΔH	мл	16	19	25*	—	17,5	25*
									—

* Заряд 25 г.

Особенно широкое применение тротил имеет в виде сплавов и смесей с другими взрывчатыми или невзрывчатыми веществами. Основными содержащими тротил композициями стали смеси тротила с гексогеном (ТГ) и октогеном, смеси, содержащие тротил, гексоген и алюминий (ТГА), и др.

В этих случаях тротил в основном выполняет роль компонента, улучшающего технологические качества системы (обеспечивает литьевые свойства, повышает прессуемость).

Важным классом ВВ на основе тротила являются его смеси с аммонийной селитрой – аммониты.

Остальные ВВ из-за их высокой чувствительности, а также неудовлетворительных технологических качеств в чистом виде для снаряжения боеприпасов не применяются или могут применяться ограниченно.

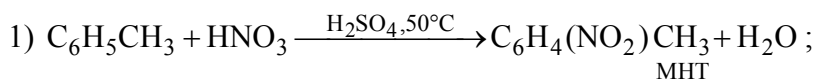
Чистый тетрил широко используется в качестве вторичного заряда капсюлей-детонаторов, в детонирующем шнуре, а также для изготовления детонаторов. Шифр тетрила в маркировке «ТЕТР». Известны также смеси тетрила с тротилом и гексогеном (ГТТ), которые могут применяться для снаряжения малокалиберных снарядов.

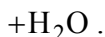
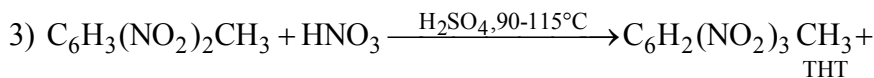
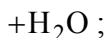
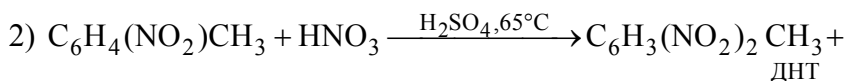
Во вторичных зарядах капсюлей-детонаторов, в детонирующем шнуре и в детонаторах используется также чистый ТЭН и гексоген. Флегматизированный ТЭН находит применение для изготовления детонаторов. Широко применяются флегматизированные гексоген, октоген – в кумулятивных боеприпасах, детонирующем шнуре, детонаторах. ЭДНА может применяться в тех же целях, что и тетрил и гексоген. ДИНА в чистом виде применяется для изготовления детонаторов. Наиболее важная область использования ДИНА – в качестве пластификатора нитратов целлюлозы в порохах и НЦРТ.

6.3. ПОЛУЧЕНИЕ БРИЗАНТНЫХ ВВ

Бризантные ВВ получают в результате химического взаимодействия соответствующих исходных веществ с азотной кислотой, обычно в присутствии серной кислоты.

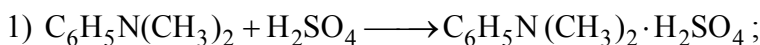
Тротил получают из толуола $C_6H_5CH_3$ в три стадии:



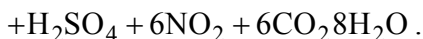
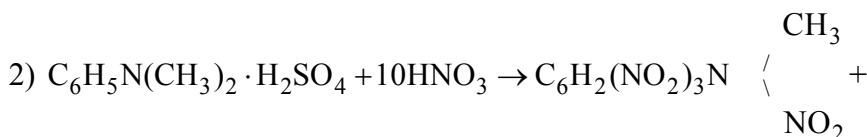


Получающийся тротил-сырец содержит 5...6 % примесей и имеет температуру затвердевания 75...77 °С. Тротил такого качества, обладающий высокой маслянистостью, для снаряжения боеприпасов непригоден. Его подвергают очистке, в результате которой температура затвердевания повышается до требуемой техническими условиями и ГОСТ 4117–67 величины 80,2 °С. Очищенный чешуируванный тротил укупоривается в многослойные бумажные мешки.

Тетрил получается из диметиланилина (ДМА) $\text{C}_6\text{H}_5\text{N}(\text{CH}_3)_2$ в две стадии:



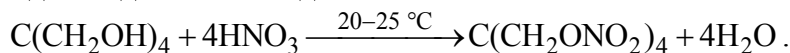
Сульфат ДМА



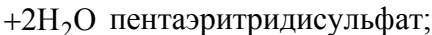
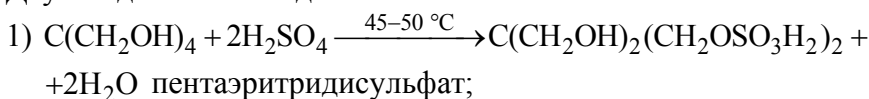
Очищенный и перекристаллизованный из бензола, ацетона или дихлорэтана тетрил должен иметь температуру плавления не ниже 127,9 °С.

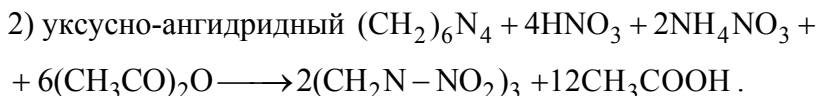
Для получения ТЭНа применяется синтетический четырехатомный спирт пентаэритрит $\text{C}(\text{CH}_2\text{OH})_4$, из которого ТЭН получается одностадийным или двухстадийным методом.

Одностадийный метод:



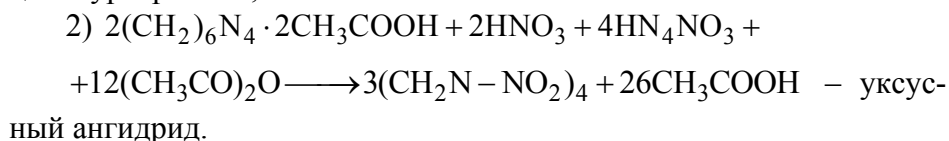
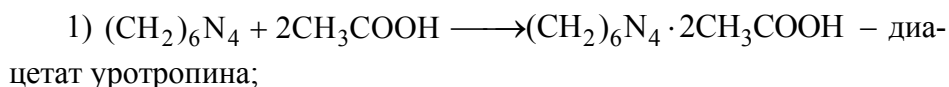
Двухстадийный метод:





Второй способ, хотя и более дорогой, но дает продукт с более высоким выходом. Стабилизированный гексоген должен иметь температуру плавления не ниже 200 °С. В случае необходимости гексоген подвергается флегматизации церезин-стеариновым сплавом или оксизином.

В основу получения октогена положен укусно-ангидридный способ:



При этом получается смесь (в расчете на сухой вес) 60...70 % октогена и 30...40 % гексогена. Выделение октогена из смеси основано на его значительно меньшей (в 4 раза) растворимости в ацетоне. При $t = 40...50$ °С практически весь гексоген переходит в раствор. Оставшийся октоген стабилизируется и в готовом виде должен иметь температуру плавления не ниже 270 °С.

6.4. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА СМЕСЕВЫХ БРИЗАНТНЫХ ВВ

Бризантные взрывчатые смеси (смесевые бризантные ВВ) – это сложные взрывчатые системы, содержащие несколько взрывчатых или невзрывчатых компонентов в виде механических смесей или сплавов и применяемые в тех же целях, что и индивидуальные бризантные ВВ.

Различные условия применения ВВ и многообразие выполняемых боеприпасами задач предъявляют к взрывчатым веществам различные, часто противоречивые требования, которым большинство индивидуальных ВВ не удовлетворяет и не может удовлетворять в полной мере.

Поэтому на практике более широко используются не индивидуальные (чистые) ВВ, а их смеси или сплавы и другие слож-

ные ВВ, содержащие различные добавки, благодаря чему становится возможным создавать взрывчатые системы с необходимыми технологическими, эксплуатационными и взрывчатыми свойствами.

Преимущественное значение смесевых бризантных ВВ обусловлено следующими основными группами факторов:

- технологическими (необходимость улучшать прессуемость или литьевые свойства системы);
- эксплуатационными (необходимость снижать чувствительность ВВ к механическим воздействиям или повышать термическую стойкость ВВ);
- энергетическими (необходимость регулировать теплоту взрыва или скорость детонации);
- экономическими (расширение сырьевой базы ВВ посредством использования для их изготовления дешевых и доступных веществ).

Все бризантные взрывчатые смеси по их применению принято подразделять на военные и промышленные. Первые используются главным образом в боеприпасах и подрывных средствах, вторые – в народном хозяйстве. Однако это вовсе не означает применения военных смесей в народном хозяйстве и, наоборот, – промышленных ВВ в военном деле.

По составу (природе основных компонентов) бризантные взрывчатые смеси подразделяются на ряд классов, среди которых в военном деле наиболее широко применяются смеси и сплавы индивидуальных ВВ, флегматизированные, металлосодержащие и пластичные ВВ. Аммониты – это ВВ военного времени.

6.4.1. СМЕСИ И СПЛАВЫ ИНДИВИДУАЛЬНЫХ ВВ (ВВ + ВВ)

Применение смесей и сплавов индивидуальных ВВ обусловлено тем, что некоторые ВВ при достаточно высоких взрывчато-энергетических характеристиках обладают неудовлетворительными технологическими качествами, например, плавятся с разложением, вследствие чего невозможно или весьма трудно изготовить разрывной заряд, особенно если выбор способа изготовления ограничен.

Например, гексоген и ТЭН при плавлении разлагаются, поэтому изготавливать разрывные заряды из этих ВВ методом расплавления

ния с последующей заливкой невозможно. Применяя смесь (сплав) гексогена или ТЭНа с другим легкоплавким и плавящимся без разложения ВВ (например, тротилом), можно изготавливать из таких композиций разрывные заряды методами заливки, что особенно важно для крупных боеприпасов, снаряжаемых преимущественно этим методом.

В этом наиболее характерном случае более чувствительное и более мощное ВВ (гексоген, ТЭН) служит энергетической основой смеси, а плавящееся без разложения (тротил) – технологической основой.

В некоторых случаях применение смесей индивидуальных ВВ определяется другими соображениями, например, необходимостью получить разрывной заряд с более высокой восприимчивостью к детонации или, напротив, с меньшей чувствительностью к механическим воздействиям.

Регулировать чувствительность смесей можно введением в их состав соответственно более или менее чувствительных ВВ по отношению к основному компоненту.

Естественно, что использование смесей и сплавов ВВ позволяет регулировать также их энергетику (Q_V , W , D), изменяя природу и соотношение компонентов в смеси.

Наибольшее распространение для снаряжения боеприпасов имеют смеси и сплавы тротила с гексогеном, получившие индекс ТГ и известные также под названием гексолитов (табл. 6.3).

Таблица 6.3

Составы и взрывчатые характеристики наиболее распространенных гексолитов

Шифр смеси	ρ_0 , г/см ³	$T_{всп}$ ($\tau = 5$ мин), °С	Чувствительность к удару и взрыву, %	D , м/с	Q_V , ккал/кг	W , л/кг	ΔW , мл	ΔH , мм
ТГ-20	—	220	48	8170	1230	—	460	22,7
ТГ-40	—	215	36	7800	1200	—	400	22,7
ТГ-50	1,70	225	24	7600	1140	800	430	22,7
ТГ-60	1,67	230	22	7500	1100	—	350	22,2
ТГ-70	—	—	8–12	—	1080	700	350	20,0

Соотношение компонентов в смесях ТГ может быть, вообще говоря, самым различным и определяется в первую очередь калибром и характером действия боеприпаса, а также способом изготовления разрывного заряда.

В индексе смесей ТГ цифра указывает содержание тротила в процентах (например, ТГ-60 содержит 60 % тротила, остальные 40 % – гексоген).

Свойства смесей ТГ определяются свойствами каждого компонента в отдельности и соотношением компонентов в смеси с преобладанием свойств того компонента, содержание которого больше. В целом смеси ТГ занимают промежуточное положение между тротилом и гексогеном. Один из их недостатков – это пониженная физическая стабильность, выражающаяся в постепенном нарушении равномерности распределения компонентов один в другом (перераспределение компонентов).

Благодаря наличию тротила смеси ТГ имеют хорошую прессуемость и обладают литьевыми свойствами, что позволяет использовать заливку и прессование для снаряжения боеприпасов этими смесями.

По чувствительности к механическим воздействиям смеси ТГ уступают гексогену, но вместе с тем имеют высокую восприимчивость к детонации. Энергетика смесей ТГ существенно выше, чем у тротила.

Начало применения смесей ТГ относится к периоду Второй мировой войны. Они используются главным образом для снаряжения кумулятивных и фугасных боеприпасов (снарядов, мин, боевых частей реактивных снарядов, противотанковых гранат, авиабомб, торпед, подрывных средств), а также для изготовления детонаторов.

Известны смеси ТГ с очень небольшим содержанием тротила, не выше 5 %. Тротил в данном случае выполняет роль флегматизатора и технологической добавки, улучшающей прессуемость гексогена.

Такие смеси, как, например, ТГ-5, применяются для снаряжения малокалиберных снарядов и для изготовления детонаторов.

Так, в США используется смесь В₃, близкая по составу к отечественной смеси ТГ. Из других смесей этого типа за рубежом известны тротил-гексогеновые ВВ с содержанием тротила 36 и 25 %.

Последняя смесь, известная под названием циклотол, имеет скорость детонации $D = 8134$ м/с при плотности $\rho_0 = 1,70$ г/см³.

Освоение октогена привело к появлению его смесей с тротилом (октолы). При аналогичном составе и взрывчатых характеристиках октолы по сравнению со смесями ТГ имеют более высокую термическую стойкость и находят применение в определенных условиях.

Известен, например октол, содержащий 77 % октогена и 23 % тротила. При плотности $\rho_0 = 1,80$ г/см скорость его детонации $D = 8540$ м/с.

Кроме наиболее распространенных смесей и сплавов с гексогеном и октогеном, тротил применяется в смесях с другими бризантными ВВ – ТЭНом, гексилем, динитронафталином (ДНН), ксилином, ЭДНА и др. (табл. 6.4).

Смесь тротила с ТЭНом (пентолит-50) широко применяется в армии США для снаряжения кумулятивных боеприпасов.

Таблица 6.4

Состав и физико-механические свойства ВВ

Название или шифр смеси	Компоненты					ρ_0 , г/см ³	Чувствительность к удару, % взрыва	D , м/с	$Q_{1/2}$, ккал/кг	ΔW , мл	ΔH , мм
	Тротил, %	ТЭН, %	ДНН, %	ЭДНА, %	Гексил						
Пентолит-50	50	50	–	–	–	1,68	48	7700	1200	406	20,8
ТД-50	50	–	0	–	–	1,54	0...6	5750	–	222	13,5
ТД-60	60	–	40	–	–	1,50	–	5930	–	244	17,1
Эднатол –	51	–	–	49	–	–	–	7400	1050	350	–
	60	–	–	–	40	1,60	16	7100	1100	330	–

Смеси и сплавы тротила с динитронафталином (индекс ДТ) – это смесевые ВВ военного времени и применяются для снаряжения осколочных и осколочно-фугасных боеприпасов (чаще – мин) стального чугуна. Можно использовать смеси тротила с тетрилом

(тетритолы) и с ЭДНА (эднатола). Однако широкого применения они не получили, так как не имеют преимуществ перед смесями ТГ.

Кроме рассмотренных, известно также большое количество других двойных смесей индивидуальных ВВ: тротила с ксилином 95/5 (сплав «Л»), тротила с тринитроанизолом (в Японии), динитробензола (ДНБ) с гексилем, динитробензола с гексогеном, динитробензола с пикриновой кислотой (табл. 6).

Таблица 6.5

Некоторые данные о смесях ВВ, которые могут использоваться для снаряжения различных боеприпасов, особенно в военное время

Компоненты						ρ_0 , г/см ³	D , м/с	Характеристики		
Тротил	ДНБ	Гексил	Гексоген	Тринитро- ксилол	Тринитро- анизол			Чувстви- тельность к удару, % взрывов	ΔW , мл	ΔH , мм
60	—	—	—	—	40	1,64	7700	—	—	—
—	70	30	—	—	—	1,56	6700	0	290	—
—	80	—	20	—	—	1,52	6500	6	306	—
30	—	—	—	70	—	1,61	7350	—	—	—
95	—	—	—	5	—	1,54	6400	—	260	—

Применение этих и неуказанных смесей и сплавов ВВ обусловлено не только технологическими и эксплуатационными, но и экономическими соображениями, так как значительно расширяется сырьевая база ВВ. Помимо двойных смесей и сплавов ВВ испытывались, находили применение и тройные смеси. Так, в авиационных снарядах использовалась смесь ГТТ: 75 % гексогена + 12,5 % тротила + 12,5 % тетрила, а для снаряжения морских бронебойных снарядов применялся «бронесплав»: 84,5 % тротила + 12,7 % динитротолуола + 2,8 % динитронафталина.

6.4.2. ФЛЕГМАТИЗИРОВАННЫЕ ВВ

С целью снижения чувствительности ВВ до безопасной величины и одновременно для улучшения прессуемости применяются смеси взрывчатых веществ с флегматизаторами. В качестве флегма-

тизаторов используются легкоплавкие вещества: парафин, воск, церезин, оксизин, головакс, сплавы стеарина с церезином или парафином и др. Покрывая кристаллы ВВ мягкой эластичной пленкой, флегматизаторы снижают чувствительность ВВ и улучшают сцепление между частицами при прессовании.

Вместе с тем введение флегматизаторов, являющихся инертными (невзрывчатыми) веществами, снижает энергетику ВВ и тем сильнее, чем больше содержание их в смеси.

Из флегматизированных ВВ наибольшее распространение имеют флегматизированные гексоген, октоген и ТЭН, а также некоторые более сложные системы, содержащие два ВВ, например, тротил или гексоген плюс флегматизатор.

В табл. 6.6 приведены составы и взрывчатые характеристики наиболее известных флегматизированных смесевых ВВ.

Таблица 6.6

Составы и взрывчатые характеристики наиболее известных флегматизированных смесевых ВВ

Компоненты смесей и взрывчато-энергетические характеристики	А-IX-I	Шифр смеси ТН	Смесь В
	Состав, %		
Тротил	—	—	39,5
Гексоген	95,0	—	59,5
ТЭН	—	95,0	—
Флегматизатор	5,0	5,0	1,0
Чувствительность к удару (стандартная), процент взрывов	25...35	75	—
ρ_0 , г/см ³	1,60	1,63	—
D , м/с	8000	7900	7650
ΔW , мм	440	500	—
$Q_{V(ж)}$	1250	—	1200
ΔH	—	20,5	—

Гексоген обычно флегматизируется церезин-стеариновым сплавом (в отношении 3 : 2) или оксизинном с добавкой 1...2 % (по отно-

пению к количеству флегматизатора) красного красителя; флегматизированный гексоген, содержащий 5 % флегматизатора, известен под шифром А-IX-I и применяется для снаряжения кумулятивных и бронебойных боеприпасов, детонирующего шнура, а также для изготовления детонаторов. Можно также применять А-IX-I в осколочных и осколочно-фугасных боеприпасах.

В США для снаряжения осколочных, осколочно-фугасных и кумулятивных боеприпасов применяется смесь А-3, содержащая 91 % гексогена и 9 % флегматизатора. При максимальной плотности $\rho_0 = 1,59 \text{ г/см}^3$ эта смесь имеет скорость детонации $D = 8100 \text{ м/с}$.

Флегматизированный парафином 5 % ТЭН имеет шифр ТН и применяется для изготовления детонаторов, для снаряжения детонирующего шнура и в качестве вторичного заряда капсюлей-детонаторов. Может также использоваться флегматизированный ТЭН с содержанием флегматизатора 10 %.

Внедрение в военную технику октогена закономерно привело к разработке флегматизированных смесевых ВВ на его основе – окфолов. Поскольку октоген флегматизируется легче, чем гексоген, окфолы содержат не более 2...2,5 % флегматизатора и, следовательно, имеют более высокие энергетические характеристики, чем А-IX-I. Кроме того, окфолы вообще характеризуются повышенной термической стойкостью по сравнению с флегматизированным гексогеном и применяются для тех же целей, что и А-IX-I, особенно в таких изделиях, которые могут испытывать длительный разогрев при $t = 200...300 \text{ }^\circ\text{C}$.

Необходимо иметь в виду, что флегматизацию можно выполнять не только инертными, но и взрывчатыми веществами, имеющими меньшую чувствительность, чем основные ВВ, например, тротилом (ТГ-5), динитробензолом и др.

6.4.3. МЕТАЛЛСОДЕРЖАЩИЕ ВЗРЫВЧАТЫЕ СМЕСИ

Введение металлических горючих в состав сложных бризантных ВВ повышает работоспособность продуктов взрыва за счет увеличения теплоты и температуры взрыва. В результате даже при уменьшении удельного объема газообразных продуктов взрыва фугасность ВВ существенно возрастает.

К эффективным металлическим горючим, используемым в смесевых ВВ, относятся алюминий, магний, бериллий и некоторые другие. В состав ВВ они вводятся в виде тонкоизмельченных порошков или пудры.

Повышение теплоты взрыва металлсодержащих ВВ объясняется тем, что металлические горючие имеют значительно более высокую теплотворную способность по сравнению с углеродом и водородом, составляющими основу молекул органических ВВ. Характерно также, что металл участвует лишь во вторичных реакциях при взрыве после завершения процесса детонации.

За счет тепла вторичных реакций и происходит дальнейший нагрев продуктов взрыва, что способствует повышению их работоспособности. Вместе с тем объем газообразных продуктов металлсодержащих ВВ уменьшается, так как образующиеся окислы металлов при температуре взрыва являются твердыми или жидкими. Снижается также и скорость детонации по сравнению с индивидуальными ВВ – основой смеси, поскольку металлическое горючее представляет собой инертную (невзрывчатую) примесь и непосредственно в реакциях детонации не участвует.

Из большого количества металлсодержащих ВВ наиболее широко применяются смеси с алюминием на основе гексогена и тротила (табл. 6.7). Часто эти смеси содержат также флегматизатор, поскольку металлическое горючее является сенсibiliзирующей примесью.

Введение тротила в металлсодержащие смеси вызвано необходимостью повысить их технологические качества, улучшить пресуемость и главным образом придать литьевые свойства, так как эти смеси применяются преимущественно в таких изделиях, снаряжение которых возможно только методами заливки.

Благодаря наличию алюминия смеси ТГА при равном содержании тротила имеют более высокую фугасность по сравнению со смесями ТГ.

Металлсодержащие смеси используются для снаряжения бронбойных и осколочно-зажигательных снарядов (А-IX-2, ТГА), фугасных артиллерийских боеприпасов крупных калибров и боевых частей ракет (ТГАГ-5, МС, ТГА), торпед, мин, авиабомб, инженерных боеприпасов.

Таблица 6.7

Состав металлсодержащих ВВ

Шифр или название			А-IX-2	ТГАГ-5	МС	ТГА		Торпексы	Триалены				ТА (три- тонал)
Компоненты	Тротил	Состав, %	–	60,0	19,0	70,0	50,0	50,0	40,0	58,0	40,0	38,0	80,0
	Гексоген		75,0	24,0	57,6	15,0	20,0	20,0	45,0	19,0	42,0	40,0	–
	Алюми- ний		20,0	16,0	17,0	15,0	30,0	30,3	15,0	17,0	18,0	17,0	20,0
	Флегматизатор		5,0	5,0*	6,4	–	–	–	–	6,0	–	5,0	–
г/см ³			1,68	1,72	1,65	1,72	1,85	1,80	1,79	1,65	–	–	–
м/с			7800	7300	7030	6960	7680	7400	7500	7000	7600	6800	6800
ккал/с			1500	920	1650	–	–	–	–	–	1600	1300	1300
мл			550	420	490	–	397	–	478	490	490	450	430
мм			22	17	22	4,5**	4,9**	4,7**	5,3**	22	–	–	–
Чувствительность к удару взрывов			40... 60	–	–	24	24	24	24	30... 40	–	–	–

* Сверх 100 %.

** По Касту.

В США смеси ТГА известны под индексом НВХ и применяются для тех же целей, что и отечественные ТГА.

6.4.4. ПЛАСТИЧНЫЕ ВВ

Пластичные или пластифицированные ВВ – это взрывчатые смеси, легко деформирующиеся от незначительных усилий и сохраняющие приданную им форму неограниченное время в условиях эксплуатационных температур.

Пластичные ВВ широко применяются в подрывном (инженерном) деле для изготовления фигурных зарядов непосредственно на месте проведения взрывных работ. Преимущество пластичных ВВ состоит в том, что из них можно изготавливать разрывные заряды любой конфигурации в зависимости от особенностей конструкции

и прочности подрываемых объектов: мостовых ферм, перекрытий, ракетных и артиллерийских установок и т. п. При этом заряды закрепляются в нужном месте простым приклеиванием, так как пластичные ВВ обладают адгезионными свойствами (клейкостью), благодаря чему обеспечивается хороший контакт ВВ с поверхностью объекта и повышается эффективность разрушительного действия заряда.

Значительный интерес пластичные ВВ представляют для ракетно-артиллерийской техники, где они используются в качестве разрывных зарядов фугасных и бронебойно-фугасных (сплющивающихся) боеприпасов. При ударе в преграду корпус боеприпасов деформируется (сплющивается) или разрушается, что приводит также к деформации разрывного заряда, но без его разрушения на части. Вследствие этого увеличивается площадь и прочность контакта ВВ с поверхностью цели и повышается эффективность ее поражения. При большой толщине брони применение пластичных ВВ резко увеличивает эффективность откольного действия боеприпасов (образование поражающих осколков с тыльной стороны брони без ее сквозного пробития).

В табл. 6.8 – 6.10 приведены данные о некоторых видах пластичных ВВ (ПВВ).

Пластичные ВВ обычно получают смешиванием сыпучих порошкообразных ВВ со специальными пластификаторами. В качестве пластификаторов используются минеральные и растительные масла (олифа, вазелин, каучуки, смолы). Из взрывчатых веществ для приготовления пластичных смесей чаще всего применяются гексоген, октоген, ТЭН.

Так, в инженерном деле широко используется пластит-4 (ПВВ-4) – гексоген, пластифицированный смесью минерального масла и стеарата кальция (75/25). Пластит-4 сохраняет пластичность в интервале температур от -30 до $+50$ °С. Имеет высокую восприимчивость к детонации – надежно детонирует от одного капсюля-детонатора № 8. Составы, подобные ПВВ-4, хорошо уплотняются при удельном давлении 50 кгс/см^2 .

Пластичные ВВ могут быть также получены введением в их состав нитратов целлюлозы (коллоксилина) и веществ, пластифицирующих нитраты целлюлозы (нитроглицерин, динитротолуол, тротил).



Таблица 6.8

Пластичные ВВ на основе нитратов целлюлозы

Название или шифр	Компоненты						Характеристики					
	тротил	гексоген	связка	коллоксилин	нитроглицерин	алюминий	г/с ³	м/с	ккал/кг	чувствительность к удару взрывов	мл	мм
Состав, %												
Пластит-4 или ПВВ-4	–	80	20	–	–	–	1,40	7000	920	24	290	16
	–	73	10	–	–	17	1,55	7000	1500	35...56	–	16
	40	50	–	10	–	–	1,65	7100	–	80	365	18
	20	45	–	5	20	10	1,70	7600	–	70	415	–
	–	85	15	–	–	–	1,55	8200	–	40	–	–
	–	85	15	–	–	–	1,40	7400	1100	32	330	–

Таблица 6.9

Пластичные ВВ на основе нитроглицерина

Название ВВ	Компоненты							Характеристики				
	тротил	гексоген	ТЭН	нитроглицерин	коллоксилин	динитротолуол	древесная мука		Г/см ₃	м/с	чувствительность к удару взрывов, %	мл
Состав, %												
–	–	50	–	–	20	30	–	–	1,56	5600	16	350
С-3, США			–		1,5							
–	–	–	60	–	2	38	–	–	1,50	6700	20	404
Дина- мит	–	–	–	83	6	–	2	9	–	6800	–	460
–	–	–	50	46	4	–	–	–	1,64	8100	80	480



Таблица 6.10

Суррогатные ВВ

Название и шифр аммонита	Компоненты							Характеристики						
	тротил	ксилил	ДНИ	ДНБ	древесная мука		парафин + + асфальтит	г/см ³	м/с	ккал/с	л/кг	чувствительность к удару взрывов, %	мл	мм
Аммотол 80/20 А80	20	—	—	—	—	—	—	1,40	5200	970	896	20... 30	3... 400	12... 13
Аммоксил 82	—	18	—	—	—	—	—	—	—	980	908	—	370	12... 14
Аммонал 82	12	—	—	—	—	6	—	—	5100	1180	836	—	440	12... 14
Белит 80	—	—	—	20	—	—	—	—	—	970	910	—	400	11
Дипаммон 88	—	—	—	—	12	—	—	—	2200	720	—	20	320	10
Шнейдерит 88	—	—	12	—	—	—	—	—	5100	920	920	16... 18	370	9... 14
Аммонит № 7 промыш. 82	14	—	—	—	4	—	—	1,25	4500	1160	900	—	370	13... 15

Примечание. В этом случае пластичные ВВ по компонентному составу напоминают нитроцеллюлозные пороха, однако соотношение компонентов берется таким, чтобы система была пластичной (гелеобразной) при обычной температуре.

Для снаряжения фугасных и бронебойно-фугасных боеприпасов применяются также пастообразные ВВ, отличающиеся от пластичных относительно большей текучестью и способностью заполнять (в том числе и под давлением) камеры сложного профиля. Одним из таких ВВ является известная в США смесь 75 % гексогена, 4,8 % динитротолуола, 3,2 % моонитротолуола и специальных добавок. При ударе в преграду и нарушении оболочки боеприпаса заряд «растекается» по поверхности объекта, благодаря чему увеличивается эффективная площадь поражения.

6.5. АММОНИЙНО-СЕЛИТРЕННЫЕ ВВ

6.5.1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА АММОНИЙНО-СЕЛИТРЕННЫХ ВВ

Аммонийно-селитренные ВВ (АСВВ) – это механические смеси аммонийной селитры NH_4NO_3 , представляющие собой окислитель с различными горючими, в качестве которых могут быть использованы как взрывчатые, так и невзрывчатые вещества.

Начало применения АСВВ относится к 1880-м годам. С 1886 года русским инженером Чельцовым была предложена для снаряжения боеприпасов смесь аммонийной селитры и пикрата аммония – «громобой».

Весьма дешевые и доступные АСВВ стали ценными ВВ как для военного дела, так и особенно для народного хозяйства, в котором потребление аммонитов очень велико (при добыче угля, железной руды, в строительстве плотин, дорог и т. д.).

АСВВ, применяемые в военном деле, содержат в качестве горючих преимущественно бризантные ВВ – тротил, ксилит и др. АСВВ, используемые в народном хозяйстве (промышленные), кроме ВВ, содержат и невзрывчатые горючие – древесную муку и др. Как те, так и другие могут содержать в своем составе алюминий (аммоналы).

По природе взрывчатых веществ и горючих, входящих в состав АСВВ, последние подразделяются на ряд классов.

1. Аммотолы: NH_4NO_3 + тротил.

2. Динафтиты (шнейдериты): NH_4NO_3 + динитронафталин (ДНН).

3. Беллиты: NH_4NO_3 + динитробензол.
4. Аммоксилы: NH_4NO_3 + тринитроксил (ксилил).
5. Аммоналы: NH_4NO_3 + Al + BB .
6. Динаммоны: NH_4NO_3 + невзрывчатое горючее.

Наиболее широко в военном деле применяются аммотолы, в меньшей степени – шнейдериты. Следует, однако, иметь в виду, что при острой необходимости практически любой вид АСВВ, включая и промышленные, может быть использован для снаряжения боеприпасов.

Аммонийная селитра – основной компонент аммонитов, содержание ее в смесях может составлять от 40 до 90 %. В связи с этим свойства АСВВ в значительной степени определяются свойствами аммонийной селитры, которая хорошо растворяется в воде, очень гигроскопична и довольно неустойчива. При обычной температуре аммонийная селитра разлагается с выделением аммиака NH_3 и азотной кислоты HNO_3 .

6.5.2. ХАРАКТЕРИСТИКА АСВВ

Состав АСВВ (природа и содержание компонентов) определяется главным образом областью применения, конкретным назначением смеси и сырьевой базой.

Наибольшее распространение имеют АСВВ, содержащие от 40 до 90 % аммонийной селитры и соответственно обозначаемые цифрами: А-40, А-50, А-60 и т. д.

По внешнему виду АСВВ представляют собой сыпучие порошки или мелкие гранулы (гранулиты) от светло-желтого до темно-коричневого цвета, зависящего от природы и содержания горючих и специальных добавок.

Аммониты (АВВ) очень гигроскопичны и при хранении в негерметичных условиях быстро увлажняются, особенно при повышенной влажности воздуха. Так, при $t = 20^\circ\text{C}$ и $\phi = 90\%$ аммотол А-80 в течение 48 суток «набирает» более 110 % влаги. Естественно, что при увлажнении ухудшаются или вообще теряются взрывчатые свойства аммонитов. Чтобы исключить увлажнение аммони-

тов, их хранят в герметичной упаковке, а в боеприпасах открытые торцы зарядов лакируют и дополнительно заливают тротилом (аммотолы с «тротиловой пробкой», имеющие индекс АТ).

Аммониты способны слёживаться, теряя при этом сыпучесть. Слёживаемость, как и увлажнение, ухудшает взрывчато-энергетические характеристики аммонитов, поэтому они должны храниться в условиях, исключающих значительные колебания температуры и воздействие влаги.

Аммониты имеют хорошую прессуемость и могут уплотняться под давлением $250 \dots 500 \text{ кг/см}^2$ до плотности $\rho = 1,35 + 1,50 \text{ г/см}^3$.

Разрывные заряды из аммонитов имеют склонность к «росту» при повышении температуры более $+32^\circ\text{C}$. «Рост» зарядов неизбежно сопровождается их распространением или разрушением. Поэтому температурные условия хранения боеприпасов, снаряженных аммонитами, должны быть стабильными.

АВВ обладают сравнительно невысокой химической стойкостью, недостаточной для длительного хранения, но достаточной для их практического применения.

Вследствие разложения аммонийной селитры и образования при этом азотной кислоты аммониты взаимодействуют с металлами особенно активно в присутствии влаги, вызывая их интенсивную коррозию. Это приводит к постепенному разрушению корпусов боеприпасов даже при наличии лакировки поверхности зарядных камер. Для аммотолов характерно также образование высокочувствительных соединений (типа «тротилатов») в результате взаимодействия тротила с аммиаком, образующимся при распаде аммонийной селитры. Это наиболее важное обстоятельство, из-за которого боеприпасы, снаряженные аммотолами, не подлежат длительному хранению.

В общем, аммониты в силу их отрицательных физико-химических свойств для снаряжения боеприпасов могут применяться лишь в военное время, когда расход боеприпасов резко возрастает и отпадает необходимость (и возможность) их продолжительного хранения.

Важнейшее достоинство аммонитов – их дешевизна по сравнению с индивидуальными ВВ. Себестоимость аммонитов в $2 \dots 3$ раза

(иногда и больше) ниже себестоимости такого сравнительного дешевого ВВ, как тротил, и в 5...10 раз меньше себестоимости гексогена и ТЭНа.

Взрывчатые свойства аммонитов определяются также их составом. Характерно, что чувствительность аммонитов к механическим воздействиям (удар, трение) выше, чем у тротила. Это объясняется, по-видимому, сенсibiliзирующим действием аммонийной селитры, имеющей прочные твердые кристаллы и довольно высокую температуру плавления. При простреле пулями или осколками аммониты способны воспламеняться и даже взрываться.

Вместе с тем аммониты имеют пониженную чувствительность к нагреву и малую восприимчивость к детонации. Имея температуру вспышки 210...240 °С, аммониты тем не менее с трудом воспламеняются от луча огня. Для надежного возбуждения детонации аммонитов требуется мощный детонатор.

Характерно также, что с повышением плотности зарядов более 1,45 г/см³ восприимчивость аммонитов к детонации существенно уменьшается. Поэтому заряды из аммонитов изготавливаются с плотностью не более 1,35...1,45 г/см³.

Как уже отмечалось, аммониты для снаряжения боеприпасов используются только в военное время. При этом состав аммонитов определяется калибром, видом действия боеприпасов и способом их снаряжения.

Так, осколочно-фугасные снаряды среднего калибра (100...122 мм) и мины к минометам снаряжаются в основном аммонитами А-80 и А-90 способом шнекования.

Фугасные снаряды крупного (152 мм и выше) калибра, авиабомбы, морские мины снаряжаются так называемыми высокопроцентными аммотолами А-40 и А-50. Это связано с тем, что крупные изделия наполняются преимущественно заливкой, а при высоком содержании селитры (80...90 %) плавить аммотолы нельзя из-за опасности взрывов.

Крупные фугасные боеприпасы могут снаряжаться также аммоналами и аммонитами, содержащими добавки мощных ВВ, например гексогена.

Вопросы для самоконтроля

1. Особенности бризантных ВВ.
2. Область применения бризантных ВВ.
3. Классификация бризантных ВВ в зависимости от вида eksploзифорных групп.
4. Вещества, относящиеся к штатным бризантным ВВ.
5. Физические свойства бризантных ВВ.
6. Химические свойства бризантных ВВ.
7. Взрывчатые свойства бризантных ВВ.
8. Применение бризантных ВВ.
9. Получение бризантных ВВ.
10. Общая характеристика смесевых бризантных ВВ.
11. Смеси и сплавы тротила с гексогеном (ТГ). Состав. Свойства. Применение.
12. Другие смеси тротила с бризантными ВВ. Примеры.
13. Флегматизированные ВВ. Свойства. Состав. Применение.
14. Металлсодержащие взрывчатые смеси. Краткая характеристика.
15. Что такое пластичные ВВ?
16. Пластичные ВВ. Виды. Характеристики.
17. Физические свойства аммонийно-селитренных ВВ.
18. Химические свойства АСВВ.
19. Взрывчатые свойства АСВВ.

Библиографический список

1. *Андреев К. К.* Теория взрывчатых веществ / К. К. Андреев, А. Ф. Беляев. – Москва : Оборонгиз, 1960. – 422 с.
2. Взрывчатые вещества. Т. 2. Основные свойства. Технология изготовления и переработки / под ред. Л. В. Фомичевой. – Саров : РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2007. – 452 с.
3. Физика взрыва. В 2 т. Т. 2 / под ред. Л. П. Орленко. – 3-е изд., перераб. – Москва : Физматлит, 2002. – 656 с.
4. Физика взрыва. В 2 т. Т. 1 / под ред. Л. П. Орленко. – 3-е изд., перераб. – Москва : Физматлит, 2002. – 832 с.

5. Энергетические конденсированные системы : краткий энциклопедический словарь / под ред. Б. П. Жукова. – Москва : Янус-К, 2000. – 596 с.

6. Милевский К. Е. Теория взрывчатых веществ: учебное пособие / К. Е. Милевский, А. В. Гуськов. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2001. – 139 с.

7. Высокоэнергетические материалы : учебное пособие / В. В. Андреев, А. В. Гуськов, К. Е. Милевский, Е. Ю. Слесарева. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2013. – 326 с.

ГЛАВА 7

СНАРЯЖЕНИЕ БОЕПРИПАСОВ

7.1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАЗРЫВНЫХ ЗАРЯДОВ

Разрывной (боевой) заряд – это определенное количество бризантного взрывчатого вещества (веса, плотности, формы и размеров), предназначенное для совершения разрушительной работы.

По применению разрывные заряды подразделяются на три группы: 1) боеприпасные, 2) подрывные, 3) специальные.

Боеприпасные разрывные заряды стали одним из основных конструктивных элементов различных боеприпасов – артиллерийских снарядов, мин, боевых частей, торпед, авиабомб и предназначены для обеспечения поражения или уничтожения живой силы, боевой техники, сооружений и других целей. Особенность этого вида разрывных зарядов в том, что они находятся в объектах, движущихся к цели со скоростями от десятков до тысяч метров в секунду. Причем в момент выстрела (пуска) и при ударе боеприпаса в преграду разрывной заряд может испытывать действие значительных инерционных перегрузок, отвечающих ускорениям, в тысячи (десятки тысяч) раз превосходящим ускорение силы тяжести.

Подрывные заряды – основной элемент подрывных средств и инженерных боеприпасов, предназначенных для уничтожения боевой техники, живой силы и разрушения мостов, зданий, сооружений, укреплений и т. п. Особенность этих зарядов – их заблаговременная установка в необходимом месте и возможность осуществления взрыва в любой требуемый момент при управлении взрывом на значительном расстоянии от заряда.

Специальные разрывные заряды обычно имеют вспомогательное назначение, обеспечивая действие специальных изделий и устройств. Например, в ядерных боеприпасах быстрое сближение частей ядерного заряда происходит под действием взрыва заряда обычного ВВ (А-IX-I, гексоген и др.).

Вес, плотность, форма и размеры, конструктивные особенности разрывного заряда определяются видом (размерами, калибром, формой зарядной камеры) и назначением боеприпаса или подрывного средства, природой (свойствами) ВВ, методом изготовления заряда и другими факторами. При этом разрывные заряды могут быть монолитные или составные, собранные из двух или нескольких элементов-шашек ВВ. Для размещения детонаторов в разрывных зарядах предусматриваются гнезда (одно или несколько) или сквозной канал.

Кумулятивные заряды имеют также выемку определенной формы.

7.1.1. ТРЕБОВАНИЯ, ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫЕ К РАЗРЫВНЫМ ЗАРЯДАМ

К разрывным зарядам независимо от их вида и назначения предъявляются следующие общие требования:

- 1) высокая (достаточная) эффективность действия;
- 2) безотказность действия и безопасность в служебном обращении;
- 3) физическая и химическая стойкость при хранении или действии неблагоприятных условий, химическая инертность по отношению к материалу оболочки;
- 4) невысокая себестоимость готовых изделий.

К разрывным зарядам, применяемым в боеприпасах с большими начальными скоростями и высокими скоростями встречи с преградой, предъявляются также дополнительные специальные требования:

- 1) стойкость к действию инерционных перегрузок в момент выстрела и при ударе боеприпаса в преграду;
- 2) отсутствие возмущенного влияния на характер траектории при полете изделия.

Все требования к разрывным зарядам при их самостоятельной важности взаимосвязаны и во многом взаимообусловлены, поэтому

любое отступление от них ведет к невозможности или ограничению практического использования разрывного заряда данного качества.

Высокая эффективность действия разрывных зарядов обеспечивает выполнение огневой (боевой) задачи в минимальные сроки при наименьшем расходе боеприпасов или подрывных средств. Однако высокая эффективность не всегда предполагает достижение максимального разрушительного эффекта разрывных зарядов. Так, в случае осколочного действия боеприпасов разрывной заряд должен обеспечивать дробление оболочки на определенное количество убойных осколков. Если оболочка будет раздроблена на слишком мелкие осколки, то эффективность поражающего действия их значительно уменьшится.

Эффективность разрывных зарядов обеспечивается взрывчато-энергетическими характеристиками ВВ, его количеством (весом) и плотностью.

Влияние взрывчато-энергетических характеристик на эффективность следует рассматривать главным образом в связи с конкретным назначением (действием) боеприпасов. Так, необходимая эффективность бризантного и кумулятивного действия обеспечивается достаточно высокой скоростью детонации заряда, поскольку при прочих одинаковых условиях детонационное давление $p \sim D^2$, а импульс продуктов взрыва $J \sim D^4$. Высокая эффективность ВВ с большими значениями теплоты, температуры взрыва и удельного объема продуктов взрыва, т. е. работоспособность ВВ,

$$A \sim (Q_V, T, W).$$

При этом скорость детонации ВВ может быть сравнительно невысокой, как, например, у аммотолов.

Плотность влияет на эффективность разрывных зарядов двояко. Во-первых, с повышением плотности ВВ при прочих одинаковых условиях увеличивается вес заряда, а чем больше количество ВВ в данном объеме, тем больше общее количество энергии и газов, выделяемых при взрыве, тем выше эффективность. Во-вторых, с возрастанием плотности повышается скорость детонации заряда и увеличивается импульс продуктов взрыва, что, как известно, приводит к росту эффективности местного и в определенной степени общего действия продуктов взрыва.

Требование **безотказности и надежности** действия разрывных зарядов вытекает из необходимости обеспечить экономичность расхода боеприпасов и сократить время на выполнение боевых задач. Безотказность действия имеет, помимо этого, и моральное значение: большое число отказов, естественно, подрывает доверие людей к своей боевой технике.

Безотказность действия обеспечивается, прежде всего, достаточной чувствительностью ВВ разрывного заряда к взрывному импульсу, создаваемому капсюлем-детонатором или детонатором. Чувствительность разрывного заряда к инициирующему импульсу определяется природой ВВ и зависит от метода изготовления и плотности заряда.

Так, прессованные разрывные заряды из тротила более чувствительны к взрывному импульсу, чем литые. Для надежного взрывания литых зарядов, как правило, применяются детонаторы из более чувствительных ВВ (тетрила, А-IX-I, прессованного тротила).

Восприимчивость к взрывному импульсу уменьшается также с повышением плотности разрывных зарядов, особенно это заметно у аммонитов. Однако на практике снижать плотность разрывных зарядов для повышения их чувствительности не рекомендуется, за исключением аммонитов, у которых плотность не должна быть выше $\sim 1,45 \text{ г/см}^3$, так как при этом уменьшается вес заряда. Главное внимание поэтому уделяется получению разрывных зарядов мелкокристаллического строения, поскольку с уменьшением размеров кристаллов чувствительность ВВ к взрывному импульсу увеличивается. Кроме того, безотказность действия разрывных зарядов обеспечивается достаточно мощным инициирующим импульсом с применением детонаторов из высокочувствительных ВВ.

При безотказности действия разрывные заряды должны быть безопасны в условиях хранения и эксплуатации. Это достигается подбором ВВ по чувствительности, которая не должна быть слишком высокой.

Требование **физической и химической** стойкости разрывных зарядов обусловлено тем, что боеприпасы и подрывные средства всегда подвергаются действию внешних условий – тепла, влаги, излучений, в результате чего физико-химические и, следовательно, взрывчатые свойства ВВ изменяются. Сопротивление этим изменениям и обеспе-

чивается достаточно высокой стойкостью ВВ, применяемых для снаряжения боеприпасов. В некоторых условиях применения разрывные заряды могут подвергаться более или менее длительному нагреву до температур 200...300 °С и выше. Для предотвращения разложения в этих случаях применяют ВВ с высокой термической стойкостью (октоген и его смеси и др.). Инженерные боеприпасы часто используют в условиях высокой влажности (на заболоченной почве, в воде и т. п.), что требует от ВВ высокой влагуостойчивости как в физическом, так и в химическом отношении.

Таким образом, постоянство физико-химических свойств разрывных зарядов обеспечивается в первую очередь выбором ВВ с высокой химической, термической и физической стойкостью и, кроме того, химически инертных по отношению к металлу оболочки боеприпаса. Несмотря на это, а особенно в тех случаях, когда приходится применять ВВ с недостаточно высокой стойкостью, принимают дополнительные меры для обеспечения постоянства свойств зарядов: герметизацию ВВ, хранение изделий в достаточно стабильных условиях, изоляцию ВВ металла корпуса посредством лакировки или применения футляров, введение в состав ВВ стабилизирующих добавок и др.

Требование стойкости разрывных зарядов к действию инерционных перегрузок диктуется необходимостью исключить преждевременные разрывы боеприпасов при выстреле и ударе их в преграду. При этом преждевременный разрыв в момент выстрела неизбежно имеет катастрофические последствия: гибель людей, вывод из строя материальной части, а в момент удара преждевременный взрыв – это изменение характера действия боеприпаса (например, вместо осколочного – фугасное). Под действием сил инерции в разрывном заряде возникают механические напряжения, среднее значение которых может составлять $10^2 \dots 10^3$ кг/см². Вследствие наличия некоторых дефектов напряжения в отдельных точках заряда могут концентрироваться, достигая значений $\sim 10^4$ кг/см². Происходящая при этом неоднородная неупругая деформация ВВ может служить эффективным источником локальных разогревов, приводящих к преждевременному взрыву.

Требование **отсутствия возмущающего влияния** на характер траектории (баллистику) изделия имеет тот смысл, что во время

полета боеприпаса разрывной заряд не должен изменить своего положения в зарядной камере. В противном случае самопроизвольные смещения заряда неизбежно приведут к незакономерным изменениям положения центра масс изделия, из-за чего траектория его полета будет отклоняться от расчетной – отсюда ухудшение точности и кучности стрельбы.

В связи с этим разрывные заряды в камерах боеприпасов надежно и прочно закрепляются с помощью специальной мастики и фиксируются от продольных перемещений прокладками.

7.1.2. ПРИЧИНЫ ПРЕЖДЕВРЕМЕННЫХ ВЗРЫВОВ РАЗРЫВНЫХ ЗАРЯДОВ

Инерционные напряжения, возникающие в разрывном заряде при выстреле, приближенно рассчитываются по уравнениям:

$$\sigma = p_{\max} \frac{\omega_{\text{ВВ}}}{q_{\text{сн}}} \left(\frac{d_{\text{сн}}}{d_3} \right)^2$$

или

$$\sigma = p_{\max} \rho S_{\text{сн}} \frac{l_3}{q_{\text{сн}}},$$

где p_{\max} – максимальное давление пороховых газов на дно снаряда; $\omega_{\text{ВВ}}$ – вес ВВ, находящегося впереди рассматриваемого сечения; $q_{\text{сн}}$ – вес снаряда; $d_{\text{сн}}$ – калибр; $S_{\text{сн}}$ – площадь дна снаряда; ρ – плотность ВВ; l_3 – длина заряда; d_3 – диаметр разрывного заряда.

Чтобы гарантировать полную безопасность при выстреле, необходимо, чтобы действительные напряжения, возникающие в разрывном заряде (σ_3), не превосходили максимально допустимых ($\sigma_{\text{доп}}$), которые, в свою очередь, назначаются меньше критических напряжений ($\sigma_{\text{кр}}$):

$$\sigma_3 < \sigma_{\text{доп}} < \sigma_{\text{кр}}.$$

Это и есть условие безопасности разрывного заряда при выстреле.

Критические напряжения – это максимальные напряжения в разрывном заряде, при которых гарантируется 100 %-я вероятность отсутствия преждевременных взрывов. Обычно принимают $\sigma_{кр} = (2...3)\sigma_{доп}$, благодаря чему учитывается возможность появления в заряде местных (локальных) «пиков» напряжений (табл. 7.1).

Таблица 7.1

**Значения критических и максимально допустимых напряжений
для некоторых ВВ**

Взрывчатое вещество	$\sigma_{кр}$, кг/см ²	$\sigma_{доп}$, кг/см ²
А-IX-I	3300	1100...1650
Аммотол	3000	1000...1500
А-IX-2	2500	830...1250
Тротил литой	2000	670...1000
Тротил прессованный	1800	600...900
ТГ-50	1400	480...715
Пикриновая кислота	1000	500
Тетрил	850	280

Как видим, максимально допустимые напряжения существенно меньше критических, а ожидаемые действительные еще менее значительны, благодаря чему надежно обеспечивается условие безопасности при отсутствии дефектов изделий, «нарушающих» это условие.

Основные причины преждевременных разрывов боеприпасов можно разделить на две группы:

- 1) причины, обусловленные дефектами боеприпасов;
- 2) причины, обусловленные дефектами разрывных зарядов.

Основные дефекты боеприпасов, из-за которых происходят преждевременные взрывы:

- неплотности резьбовых соединений в донной части снаряда;
- пороки металла корпуса боеприпаса (наличие в нем трещин, свищей, раковин и т. п.);
- зазор между торцом разрывного заряда и дном зарядной камеры.

При наличии неплотностей резьбовых соединений винтного дна или донного взрывателя с корпусом снаряда в момент выстрела возможен прорыв горячих пороховых газов через эти неплотности к заряду ВВ, вследствие чего может произойти (и, как правило, происходит) воспламенение ВВ с переходом горения в детонацию.

Поэтому ввинчивание донных элементов снарядов производится на специальной герметизирующей, обычно суриковой, замазке с применением свинцовых (реже медных) герметизирующих колец, а также прокладок и уплотнений из огнеупорных материалов (асбест, жезь).

Большую опасность представляют различные пороки металла, особенно в донной части снарядов. При наличии даже микроскопических трещин, свищей или раковин в металле горючие пороховые газы, находящиеся под давлением $2000...4000 \text{ кгс/см}^2$, могут прорваться через эти дефектные участки к разрывному заряду и вызвать преждевременный взрыв. Поэтому к качеству металла корпусов боеприпасов, особенно артиллерийских снарядов, предъявляются весьма жесткие требования

В момент выстрела осевая сила инерции вызывает резкое смещение разрывного заряда и удар его по дну камеры. Энергия удара может оказаться достаточной для возбуждения детонации ВВ. Кроме того, при смещении заряда происходит практически адиабатический нагрев до $t = 1000...1500^\circ\text{C}$ воздуха, находящегося в зазоре. Такой разогрев может также служить причиной воспламенения и взрыва ВВ при выстреле. Опасность усугубляется тем, что в зазоре могут находиться пары легковоспламеняющихся веществ (лака, спирта).

Воспламенение и взрыв ВВ в момент выстрела возможны также вследствие трения о стенку камеры разрывного заряда при его продольном смещении.

По этим причинам снаряжение и сборка боеприпасов производятся таким образом, чтобы исключить зазоры и возможность смещения разрывного заряда при выстреле. Боковая поверхность разрывных зарядов в ряде случаев оклеивается специальной бумагой, что исключает непосредственное трение ВВ о стенку.

Дефекты разрывных зарядов, приводящие к преждевременным взрывам, создают условия возникновения в заряде «пиковых»



напряжений, существенно превосходящих критические. Такими дефектами могут быть:

- пустоты (раковины, воздушные включения);
- трещины;
- неравномерность плотности ВВ;
- неравномерность кристаллической структуры заряда;
- неравномерность флегматизации ВВ.

При наличии в разрывном заряде пустот, трещин и других дефектов, нарушающих сплошность массы ВВ, величина действующих сечений в дефектных местах уменьшается.

В результате инерционные напряжения в расчете на меньшее сечение могут достигнуть опасных значений.

Пустоты и трещины – это наиболее опасные дефекты разрывных зарядов, служащие причиной преждевременных взрывов боеприпасов.

Если разрывной заряд имеет участки с повышенной плотностью, то при выстреле в этих участках возникнут более высокие напряжения, которые могут оказаться выше критических. Кроме того, возможно и относительное смещение более плотных участков в менее плотной массе ВВ. При сдвиге может инициироваться взрыв.

Неоднородность кристаллической структуры, т. е. наличие в разрывном заряде участков крупно- и мелкокристаллического строения, играет в общем такую же роль, что и непрерывность плотности ВВ, поскольку плотность и прочность ВВ в этих областях оказываются неодинаковыми.

Следует также принимать во внимание тот факт, что участки крупнокристаллического строения из-за их малой прочности (рыхлости) под действием силы инерции легко разрушаются более прочными соседними слоями, что может привести к взрыву.

Преждевременные взрывы, происходящие вследствие неравномерной или недостаточной флегматизации ВВ, обусловлены главным образом повышением чувствительности ВВ из-за уменьшения количества флегматизатора и снижения значений критических напряжений.

7.2. СПОСОБЫ СНАРЯЖЕНИЯ БОЕПРИПАСОВ

7.2.1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА СПОСОБОВ СНАРЯЖЕНИЯ

Снаряжение боеприпасов – это совокупность технологических операций по изготовлению разрывных зарядов, закреплению их в зарядных камерах и приведению боеприпасов в состояние, пригодное для боевого применения и длительного хранения.

Чтобы изготовить разрывной заряд, необходимо придать массе ВВ требуемую форму и уплотнить его до монолитного состояния. Это может быть достигнуто с помощью двух физических процессов:

- 1) плавлением ВВ с последующим его затвердеванием;
- 2) механическим уплотнением под давлением без изменения агрегатного состояния ВВ.

В соответствии с этим существует три основных способа изготовления разрывных зарядов – снаряжения боеприпасов:

- заливка расплавленным ВВ;
- прессование порошкообразных ВВ;
- шнекование сыпучих ВВ.

На базе основных способов разработано и применяется значительное количество их разновидностей, т. е. конкретных методов снаряжения, наиболее важные из которых – вибрационная и кусковая заливка, порционное и вибрационное прессование и др.

Применяя любой из способов снаряжения, разрывной заряд можно изготовить:

- 1) непосредственно в зарядной камере боеприпаса – нераздельное снаряжение;
- 2) отдельно, в специальной форме – раздельное снаряжение, а затем вставить его в камеру и закрепить в ней.

Нераздельный метод снаряжения в зависимости от калибра и конструкции боеприпаса существует в нескольких вариантах:

- снаряжение в один прием (изделия малых и средних калибров);
- снаряжение в несколько приемов, или порционное (изделия средних и больших калибров);

- снаряжение по частям (изделия, состоящие из нескольких частей, например, стакана и привинтной головки).

Раздельный метод применяется главным образом при снаряжении прессованием боеприпасов малых и средних калибров, не имеющих поднутрения зарядной камеры.

При выборе конкретного метода снаряжения за определяющие факторы принимают:

- свойства ВВ (прессуемость, температуру плавления, температуру начала разложения, чувствительность к механическим или тепловым воздействиям);
- характеристики снаряжаемого изделия (калибр, вид действия, конструкция, форма зарядной камеры и др.);
- технико-экономические показатели (качество разрывных зарядов, производительность, потери ВВ, себестоимость продукции и др.).

На основе длительного опыта снаряжения боеприпасов с учетом приведенных факторов мы разделили основные способы снаряжения боеприпасов (табл. 7.2). Приведенное разделение, безусловно, нельзя считать чем-то незыблемым, поскольку с развитием технологии снаряжения и появлением новых видов боеприпасов возможности каждого метода снаряжения могут расширяться.

При снаряжении любым методом боеприпасы могут быть доведены до разной степени их готовности к боевому применению. В этой связи различают:

- неокончательное снаряжение;
- окончательное снаряжение.

Таблица 7.2

Технологии снаряжения боеприпасов

Способ снаряжения	Снаряжаемые изделия	ВВ	Примечание
Заливка	Снаряды калибра 152 мм и выше, мины калибра 160 мм и выше, авиабомбы среднего и большего калибра, боевые части ракет, торпеды и т. д.	Тротил ТГ, аммотолы (А-40, А-50), ксилит, пикриновая кислота	Возможно снаряжение боеприпасов малых и средних калибров

Окончание табл. 7.2

Способ снаряжения	Снаряжаемые изделия	ВВ	Примечание
Прессование	Снаряды калибра 23...122 мм; бронебойные снаряды, независимо от калибра, ручные гранаты, инженерные боеприпасы, детонаторы	Тротил ТГ А-IX-I, А-IX-2, тетрил, флегматизированный ТЭН	Зарядные камеры боеприпасов не должны иметь поднутрения
Шнекование	Снаряды калибра 100...152 мм, мины калибра 82...240 мм и выше, авиабомбы среднего и малого калибра	Тротил, аммотолы, шнейдерит	Допускается небольшое поднутрение зарядных камер

В первом случае боеприпасы, сходящие с потока снаряжения, не имеют взрывательных устройств (взрывателей) или их элементов, вместо которых ввертываются холостые пластмассовые втулки (пробки) для предохранения разрывных зарядов от внешних воздействий. В окончательно снаряженном виде боеприпасы имеют взрывательные устройства (взрыватели, трубки) и готовы к боевому применению.

7.2.2. СНАРЯЖЕНИЕ БОЕПРИПАСОВ ЗАЛИВКОЙ

Заливка – это процесс расплавления взрывчатого вещества, наполнения расплавленным ВВ корпусов или специальных форм (изложниц) и последующего затвердевания расплава с превращением в монолитную массу по форме занимаемого объема.

Поскольку заливка связана с плавлением взрывчатых веществ, последние должны иметь не слишком высокую температуру плавления, по крайней мере, не выше 100...130 °С, плавиться без разложения и выдерживать (2...3 ч) перегрев на 20...25 °С выше температуры плавления. Кроме того, летучесть ВВ должна быть по возможности меньшей, а пары их должны быть малотоксичными.

Этим специальным требованиям отвечают сравнительно немногие бризантные ВВ: тротил, ксилит, динитробензол, пикриновая кислота и смеси на их основе.

Из смесей тротила для снаряжения заливкой и ее разновидностями пригодны ТГ и пентолиты (с содержанием тротила 20 % и выше), ТГА, аммотолы (содержащие не менее 40 % тротила) и некоторые другие.

Затвердевание (кристаллизация) расплава ВВ включает в себя два процесса:

- образование центров кристаллизации или зародышей кристаллов;
- рост кристаллов, или развитие кристаллизации.

Качество (структура) литых разрывных зарядов существенно зависит от соотношения скоростей этих процессов. Если скорость образования центров кристаллизации значительно выше скорости роста кристаллов $V_{\text{рк}} \ll V_{\text{цк}}$, то заряд получается мелкокристаллическим. В случае же, когда $V_{\text{рк}} \gg V_{\text{цк}}$, заряд оказывается крупнокристаллическим, что, как известно, нежелательно.

Взрывчатые вещества из-за малой теплопроводности естественным путем охлаждаются крайне медленно, поэтому практически реализуется условие преимущественного образования крупных кристаллов. Чтобы получить разрывные заряды мелкокристаллического строения и высокой плотности расплавов, ВВ до заливки его в изделия искусственно насыщают необходимым количеством центров кристаллизации. Этот процесс называется предварительной кристаллизацией ВВ.

Предварительная кристаллизация осуществляется двумя способами:

- 1) ускоренным, т. е. энергичным механическим перемешиванием расплава, благодаря чему повышается интенсивность охлаждения ВВ, а вследствие этого возрастает скорость образования центров кристаллизации;
- 2) смешиванием в определенном соотношении жидкого ВВ с кристаллами или чешуйками того же ВВ.

Предварительная кристаллизация перемешиванием расплава производится либо до «первого кристалла», что отвечает содержанию твердой фазы 5...6 %, либо до «второго кристалла», что

отвечает содержанию твердой фазы 12...13 %. Степень кристаллизации определяется с помощью пластин, которые погружают в расплав и тотчас вынимают. Если в застывшем слое ВВ на глаз различаются отдельные кристаллы, то предварительная кристаллизация проведена до «первого кристалла», если кристаллы образуют группы, то – до «второго кристалла». Такой метод определения субъективен, и точность его, а следовательно, и качество зарядов существенно зависят от навыка и внимания мастера.

Предварительную кристаллизацию до «первого кристалла» применяют при снаряжении сравнительно небольших изделий (малого и среднего калибра), до «второго кристалла» – при снаряжении крупных изделий.

Предварительная кристаллизация смешиванием твердой и жидкой фазы обеспечивает более точное и надежно контролируемое их соотношение, характеризуется более высокой производительностью и дает возможность полностью автоматизировать процесс.

Расплав ВВ, подвергнутый предварительной кристаллизации, вручную или автоматически заливается в камеры боеприпасов или заливочные формы, где продолжается процесс охлаждения и кристаллизации, который характеризуется некоторыми особенностями, существенно влияющими на качество литых зарядов:

- затвердевание ВВ происходит параллельными (концентричными) слоями от стенок корпуса внутрь к оси изделия;
- затвердевание ВВ сопровождается уменьшением его объема – усадкой;
- вследствие неравномерности температурного поля по сечению заряда в затвердевающих слоях ВВ возникают напряжения, стремящиеся разрушить заряд;
- в затвердевших слоях ВВ задерживается воздух в виде мелких пузырьков.

Затвердевание параллельными слоями может привести к «перехвату» во входном отверстии (очке) зарядной камеры, что способствует образованию раковин, происходящему в результате усадки ВВ (рис. 7.1). Наряду с этим при затвердевании параллельными слоями могут образовываться участки крупнокристаллического строения по оси заряда, так как внешние твердые слои ВВ

затрудняют теплоотвод из центральной части, вследствие чего скорость охлаждения уменьшается и создаются благоприятные условия для роста кристаллов.

Усадка ВВ при затвердевании – явление неизбежное. Для тротила она составляет 7...9 %, а для аммотолов 5 % и более. При усадке кроме образования усадочных раковин возможен отрыв заряда от стенок камеры после остывания.

Возникновение внутренних напряжений при неравномерном остывании может привести к образованию трещин в заряде, а воздушные включения в виде «сыпи» снижают прочность заряда и, кроме того, могут группироваться в довольно крупные раковины.

Для получения высококачественных литых разрывных зарядов все эти явления и их последствия должны быть исключены. «Перехваты» ликвидируются проколом образовавшейся корки ВВ латунным стержнем при расплавлении ее с помощью специального обогреваемого оплавника.

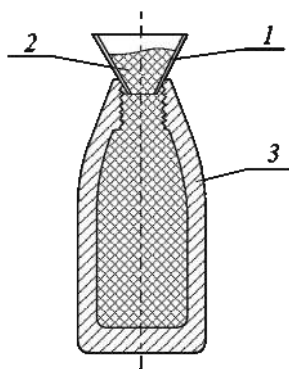


Рис. 7.2. Заливка с прибыльной воронкой:

1 – прибыльная воронка;
2 – прибыль; 3 – корпус

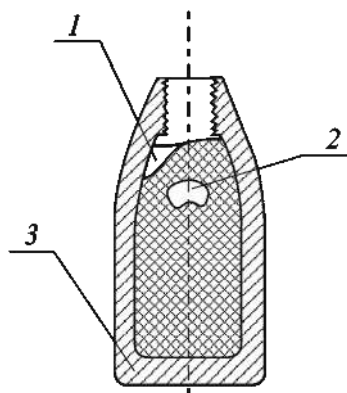


Рис. 7.1. «Перехват» и усадочная раковина при заливке:

1 – перехват; 2 – усадочная раковина; 3 – корпус;

Образование участков крупнокристаллического строения заряда предотвращается периодическим перемешиванием расплава ВВ в процессе его охлаждения. При перемешивании удаляется оставшийся и попавший в ВВ при заливке воздух. Такое периодическое перемешивание ВВ называется «ухаживанием», а осуществляется оно с помощью латунного инструмента: прутков, лопаточек, спиралей и т. п.

Чтобы предупреждать образование в заряде усадочных раковин, заливку производят с применением прибыльных (заливочных) воронок (рис. 7.2).

Прибыльная воронка надевается или устанавливается на корпус боеприпасов и заливается столько расплава, чтобы он заполнил не только зарядную камеру, но и воронку. Происходящее при охлаждении уменьшение объема ВВ в зарядной камере компенсируется поступлением расплава из прибыльной воронки. Благодаря этому усадочная раковина (или усадочный конус) образуется в массе ВВ, находящейся в прибыльной воронке, а не в зарядной камере.

Предотвратить отрыв заряда от стенок камеры, а также появление трещин под действием внутренних напряжений следует, создав определенный температурный режим при снаряжении заливкой, исключающий большую неравномерность охлаждения и слишком быстрое остывание ВВ.

С этой целью корпуса боеприпасов перед заливкой, особенно в зимнее время, подогревают до температуры не менее 20...25 °С. При заливке корпуса изделий устанавливают в специальные заливочные ванны-термосы, обеспечивающие достаточно медленное и равномерное охлаждение ВВ. На корпуса крупных изделий обычно надевают специальные чехлы из теплой ткани. Одна из важнейших разновидностей заливки – кусковая – состоит в том, что камера изделия наполняется жидким и твердым ВВ в виде кусков, таблеток или чешуек. Для твердого ВВ они могут составлять 50 % и более от веса заряда. Преимущество кусковой заливки состоит в более высокой (в 2...3 раза) производительности процесса наполнения и меньшей продолжительности процесса затвердевания ВВ по сравнению с обычной заливкой. Кроме того, введением кусков другого, более мощного, ВВ можно повысить эффективность действия боеприпаса.

Недостаток заливки с кусками – пониженная плотность и неоднородность структуры заряда, а также наличие мелких усадочных раковин между кусками ВВ. Поэтому кусковая заливка непригодна для снаряжения артиллерийских снарядов (опасные дефекты) и применяется при наполнении крупных изделий: авиабомб, торпед, инженерных боеприпасов, для которых неоднородность структуры заряда и наличие в нем усадочных раковин не представляет опасности.

7.2.3. СНАРЯЖЕНИЕ БОЕПРИПАСОВ ПРЕССОВАНИЕМ

Физические основы прессования

Прессование (от лат. *presso* – давлению, жму) есть процесс обработки давлением сыпучих материалов с целью уплотнения до монолитного состояния, придания требуемой формы и изменения механических свойств.

Прессование выполняется в жесткой пресс-форме с помощью рабочего тела (рис. 7.3). Прессующее (рабочее) тело, или пуансон, при своем перемещении создает давление на сыпучее вещество и уплотняет его, а жесткая пресс-форма придает массе вещества необходимую форму.

При сжатии материала в осевом направлении возникает также радиальная (боковая) составляющая давления ($P_{\text{бок}}$), под действием которой материал стремится деформироваться в боковом направлении. Этой деформации препятствуют жесткие стенки пресс-формы, но при этом наружная поверхность спрессованной массы довольно прочно сцепляется с внутренней поверхностью пресс-формы.

Возникающая при продольной деформации сила трения ВВ о стенку пресс-формы приводит к снижению («затуханию») давления на ВВ по высоте прессуемого заряда.

Поскольку плотность ВВ прямо зависит от давления прессования, она уменьшается по высоте заряда и ее разброс может достигать 0,05...0,10 г/см³ между наибольшим и наименьшим значением.

Для уменьшения разброса плотности размеры прессуемых шашек ВВ должны отвечать условию $\frac{h}{d_3} \leq 2$. Если его невозможно

обеспечить, то применяют прессование порциями (порционное) или двустороннее. Чтобы снизить коэффициент трения ВВ о рабочие поверхности прессового инструмента, их смазывают графитом, парафином, вазелином или опудривают тальком, косметической пудрой и т. п. Смазка или опудривание рабочих поверхностей

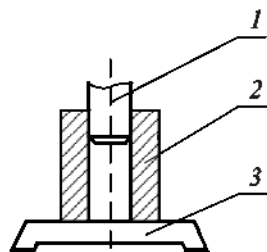


Рис. 7.3. Принцип прессования:

1 – прессующая деталь;
2 – пресс-форма; 3 – поддон

инструмента облегчает также выталкивание (извлечение) готовых шашек ВВ из пресс-формы, в которой они довольно прочно удерживаются под действием упругих сил. Усилие выталкивания шашки может достигать 20...35 % от усилия прессования.

Прессуемость взрывчатых веществ и качество прессованных зарядов

Получение доброкачественных прессованных разрывных зарядов обусловлено прессуемостью ВВ, т. е. способностью их под действием давления превращаться из сыпучего состояния в монолитные тела (изделия) требуемых размеров и формы, обладающих достаточной плотностью и высокой механической прочностью. Количественно прессуемость оценивается удельным давлением на ВВ, необходимым для достижения заданной плотности и прочности заряда, или величиной плотности и прочности, достигаемой при данном давлении прессования. Например, если плотность $1,60 \text{ г/см}^3$ достигается для одного ВВ при давлении 1500 кгс/см^2 , а для другого – при 2200 кгс/см^2 , то прессуемость первого ВВ считается лучше. Если же при давлении 1500 кгс/см^2 одно ВВ уплотняется до $\rho = 1,50 \text{ г/см}^3$, а второе – до $\rho = 1,60 \text{ г/см}^3$, то прессуемость первого хуже.

Прессуемость ВВ зависит от различных факторов, главные среди которых:

- природа взрывчатого вещества;
- наличие примесей во взрывчатом веществе;
- размеры частиц, или дисперсность ВВ;
- механическая прочность частиц ВВ;
- начальная температура ВВ.

При одинаковых условиях прессования разные ВВ прессуются до различной плотности и прочности. Так, при $p = 2000 \text{ кгс/см}^2$ и $t = +20 \text{ }^\circ\text{C}$ получают заряды из тротила плотностью $1,58 \text{ г/см}^3$, из тетрила – $1,62 \text{ г/см}^3$, из пикриновой кислоты – $1,65 \text{ г/см}^3$. Следует, однако, заметить, что различие плотностей объясняется не только различной прессуемостью ВВ, но и неодинаковыми значениями их удельного веса.

Примеси (добавки) могут ухудшать или улучшать прессуемость ВВ в зависимости от их свойств. Вещества, применяемые в качестве флегматизаторов, имеющие низкую температуру плавления и малую механическую прочность (парафин, стеарин, церезин, оксизин и др.), улучшают прессуемость за счет уменьшения трения между частицами ВВ в процессе прессования и обеспечивают более прочное их сцепление по окончании прессования (оклеивание).

Увеличение размеров частиц (кристаллов), как правило, способствует процессу прессования ВВ, так как под действием давления крупные частицы более легко разрушаются, чем обеспечивается их более плотная упаковка. Поэтому для улучшения прессуемости ВВ обычно используются в виде довольно крупных частиц (чешуек, гранул).

Повышенная прочность кристаллов ВВ отрицательно сказывается на прессуемости, что подтверждается примером гексогена, ТЭНа, октогена.

Следует заметить, что плотность и прочность прессованных зарядов при прочих одинаковых условиях существенно зависят от давления прессования. С повышением давления прессования плотность разрывных зарядов возрастает (рис. 7.4). Наиболее значительно плотность увеличивается до давлений около 2000 кгс/см^2 . В дальнейшем плотность ВВ возрастает незначительно.

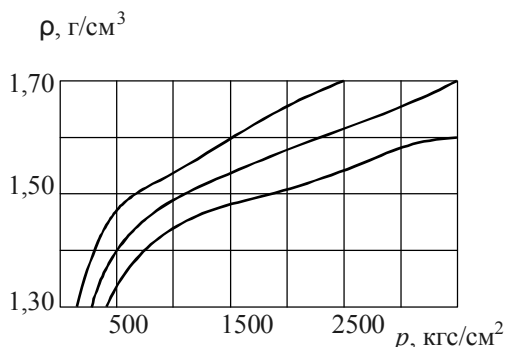


Рис. 7.4. Зависимость плотности ВВ от давления прессования

При достижении и превышении некоторого, характерного для данного ВВ, давления прессования разрывные заряды получают с трещинами. Такое давление называется предельным ($p_{\text{пр}}$), а отве-

чающая ему плотность ВВ – предельной плотностью ($\rho_{\text{пр}}$). Их значения для некоторых ВВ при $t = +20^\circ\text{C}$ приведены в табл. 7.3.

Таблица 7.3

Значения для некоторых ВВ при $t = +20^\circ\text{C}$

Взрывчатое вещество	$P_{\text{кр}}$, кгс/см ²	$\rho_{\text{кр}}$, г/см ³
Тротил чешуированный	1900	1,59
Пикриновая кислота	1800	1,64
Тетрил (кристаллизированный из бензола)	5300	1,70

Очевидно, что при изготовлении разрывных зарядов давление прессования должно быть не слишком близким к предельному и в то же время обеспечивать достаточно высокую плотность разрывных зарядов.

Достижимая плотность для А-IX-2 при прессовании составляет 1,82 г/см³, а практически прессование этой смеси ведется до плотности не более 1,76 г/см³. Для А-IX-I эти значения соответственно равны 1,69 и 1,65 г/см³, для тетрила – 1,70 и 1,63 г/см³, для флегматизированного ТЭНа – 1,67 и 1,64 г/см³.

Повышение начальной температуры улучшает прессуемость ВВ, что обусловлено, во-первых, уменьшением прочности кристаллов ВВ; во-вторых, увеличением количества жидкой фазы на поверхности кристаллов, которая, выполняя роль смазки, облегчает прессование.

В связи с этим некоторые ВВ перед прессованием подогревают: тротил до 30...40 °С, тетрил и пикриновую кислоту до 40...45 °С.

На качество прессованных зарядов существенно влияет режим прессования – характер подъема давления и выдержка ВВ под давлением. Плотность и прочность зарядов увеличиваются, а склонность их к растрескиванию уменьшается, если прессование ведется при плавном нарастании давления и по достижении его рабочего значения делается выдержка ВВ под давлением в течение 3...5 с.

Прессовый инструмент и прессовое оборудование

В зависимости от метода снаряжения прессованием различают инструмент для прессования шашек и для прессования в корпус (камеру) при нераздельном снаряжении.

Инструмент для прессования шашек может иметь различные конструктивные особенности, но во всех случаях он комплектуется следующими деталями (рис. 7.5): матрицей, пуансоном, поддоном, ограничителем, подставкой для выталкивания шашек.

Матрица, поддон и пуансон образуют пресс-форму, обеспечивающую прессование шашек требуемых размеров и формы.

Матрица представляет собой толстостенную цилиндрическую деталь с цилиндрическим сквозным каналом. Размеры (диаметр, высота) канала соответствуют размерам прессуемых шашек с учетом их последующего роста.

С одной стороны (снизу) канал матрицы закрывается *поддоном*. Конструкция рабочей части поддона такова, что она обеспечивает получение шашек с различными конструктивными особенностями: с плоским срезом, с каналом, с выемкой и др.

Пуансон – непосредственно прессующая деталь. Он состоит из цилиндрической рабочей части, шейки и головки. Конструкция рабочей части такова, что позволяет прессовать шашки с плоским срезом, гнездом под детонатор и другими конструктивными особенностями.

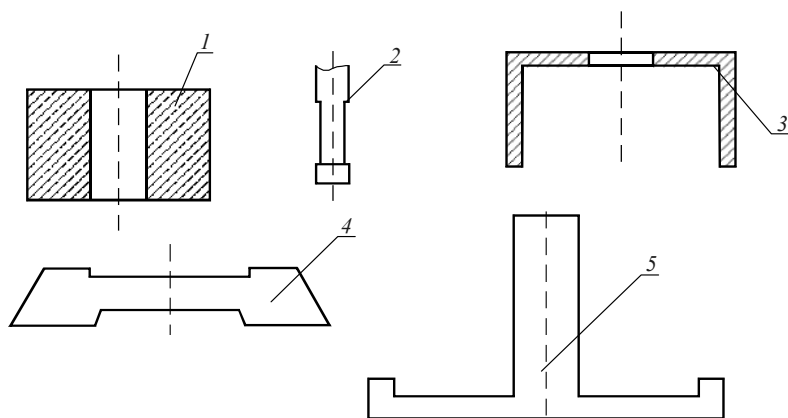


Рис. 7.5. Инструмент для прессования шашек:

1 – матрица; 2 – пуансон; 3 – ограничитель; 4 – поддон; 5 – подставка для выталкивателя

Ограничитель, устанавливаемый на верхний срез матрицы под головку пуансона, предназначается для ограничения хода пуансона при достижении заданного давления прессования, отвечающего требуемой высоте и плотности шашки ВВ. Конструктивно ограничитель выполняется в виде скобы.

Подставка для выталкивания – цилиндрическая деталь с расточкой для установки матрицы и каналом для шашки ВВ.

Основные детали пакета штампа (матрица, поддон и пуансон) изготавливаются из углеродистой, углеродистой азотированной или хромированной стали У8-У10, УВА-У10А, 7ХЗ, отличающейся высокой износостойкостью.

Матрица, поддон и ограничитель закаливаются до твердости $HRC = 52...56$, а пуансон, во избежание повреждения рабочей поверхности матрицы, до $HRC = 40...55$.

Рабочие размеры пакета штампа изготавливаются с большой точностью, а рабочие поверхности обрабатываются по высокому классу чистоты, не ниже $\nabla 9 - \nabla 10$.

Прессовый инструмент требует бережного и осторожного обращения во избежание даже малейшего повреждения рабочих поверхностей.

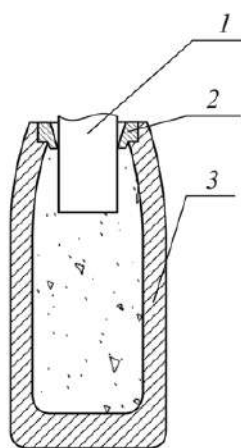


Рис. 7.6. Инструмент для прессования в корпус:

1 – пуансон; 2 – матрица; 3 – корпус

Основное назначение *инструмента для прессования в корпус* – уплотнить ВВ и сформировать верхний срез разрывного заряда. Основные конструктивные особенности заряда определяются формой и размерами зарядной камеры и от инструмента не зависят.

В самом общем случае инструмент для прессования в корпус состоит из следующих деталей (рис. 7.6):

- матрицы;
- пуансона;
- ограничителя;
- держателя или подготовки для корпуса боеприпаса.

Матрица в данном случае выполняет роль емкости (бункера) для размещения ВВ до его уплотнения, поскольку оно не вмещается

в зарядную камеру. Кроме этого, матрица служит направляющей для пуансона.

Для прессованных ВВ применяются гидравлические прессы различной мощности, развивающие усилие от 25 до 1000 т.

7.2.4. СНАРЯЖЕНИЕ БОЕПРИПАСОВ ШНЕКОВАНИЕМ

Формирование разрывных зарядов способом шнекования

Способ шнекования состоит в том, что порошкообразное сыпучее взрывчатое вещество непрерывно подается в зарядную камеру и непрерывно уплотняется вращающимся винтовым инструментом (рис. 7.7).

Формально шнекование можно рассматривать как непрерывное прессование ВВ малыми порциями. Однако процесс формирования разрывных зарядов шнекованием значительно сложнее, чем при прессовании.

Функции подачи ВВ в зарядную камеру и его уплотнения выполняет один инструмент, называемый шнек-винтом (от нем. Schnecke – улитка, поскольку витки винта закручены наподобие панциря некоторых видов улиток).

Взрывчатое вещество, находящееся в бункере, при вращении шнек-винта захватывается его витками и подается в зарядную камеру. До тех пор, пока весь свободный, не занятый винтом, объем камеры не заполнится взрывчатым веществом, уплотнения последнего практически не происходит. Это первый период, или период наполнения, который занимает 60...70 % от общего времени шнекования. Плотность ВВ в конце этого периода обычно не превышает $0,80...1,15 \text{ г/см}^3$.

Если корпус изделия имел бы возможность свободного продольного перемещения, то после заполнения свободного объема

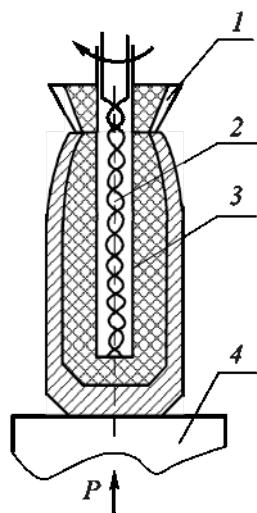


Рис. 7.7. Принцип шнекования:

1 – бункер; 2 – винт;
3 – трубка; 4 – противодавление

камеры и при продолжающейся подаче ВВ началось бы «сползание» корпуса со шнек-винта и заполнение освобождающегося объема без уплотнения ВВ.

Чтобы обеспечить необходимое уплотнение ВВ, в схеме шнекования предусмотрено создание противодействия, препятствующего свободному сходу корпуса со шнек-винта. Это противодействие создается такой величины, которая обеспечивается данным ВВ.

Противодавление может быть создано либо механическим торможением движения корпуса, либо с помощью гидравлической системы, снабженной клапаном, открывающимся при достижении заданного давления шнек-винта на взрывчатое вещество. Предпочтение отдается гидравлической системе противодействия, работающей более плавно и надежно.

Таким образом, при наличии противодействия в корпус, остающийся неподвижным, продолжает поступать ВВ. Но так как свободный объем камеры заполнен взрывчатым веществом, то поступление очередных порций возможно лишь при его уплотнении, т. е. уменьшении занимаемого объема.

По мере уплотнения ВВ давление шнек-винта на него возрастает, а по достижении требуемой величины давления преодолевается сопротивление системы противодействия и корпус изделия начинает сходить с винта. Для обеспечения непрерывной подачи ВВ в камеру корпус опускается вместе с бункером либо неподвижный бункер снабжается трубкой, по которой поступает взрывчатое вещество в камеру отходящего корпуса.

Движение корпуса до конца шнекования происходит практически при постоянном давлении на ВВ, обычно не превышающем 500 кгс/см^2 . Второй период – наполнение с уплотнением – занимает 30...40 % от общего машинного времени шнекования.

Процесс уплотнения ВВ при шнековании сопровождается трением ВВ о поверхность винта и трением частиц ВВ между собой. Происходит нагрев винта до $75...120^\circ\text{C}$ и оплавление ВВ, что способствует его уплотнению, но одновременно увеличивает взрывоопасность процесса.

Поскольку при шнековании ВВ непосредственно уплотняется в зоне действия витков шнек-винта, а остальная масса – за счет передачи давления по массе ВВ, плотность шнекованных разрывных

зарядов оказывается неравномерной, а структура – неоднородной по поперечному сечению. На рис. 7.8 показано распределение плотности шнекованных зарядов. В зависимости от различных факторов (природа ВВ, конструкция шнек-винта и др.) количественно это распределение плотности может быть различным, но качественная картина всегда одинакова, характерна именно для шнекования.

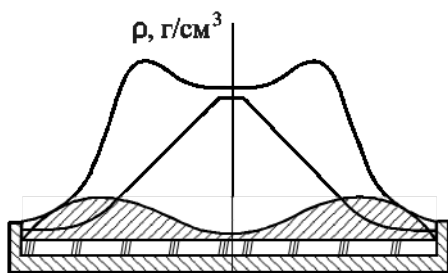


Рис. 7.8. Распределение плотности шнекования

В центральной части заряда, диаметр которой примерно соответствует наружному диаметру шнек-винта, плотность ВВ наибольшая, у стенок камеры наименьшая.

Так, шнекованные заряды из тротила могут иметь в центральной части плотность $1,60 \dots 1,62 \text{ г/см}^3$, на периферии – не выше $1,45 \text{ г/см}^3$, а в некоторых случаях – не более $1,20 \dots 1,30 \text{ г/см}^3$.

Поскольку изменение плотности по сечению шнекованного заряда происходит достаточно плавно, этот недостаток не представляет опасности преждевременных взрывов, но благодаря сильному снижению средней плотности ВВ уменьшается вес разрывных зарядов и эффективность действия боеприпасов.

Шнек-винт и его характеристики

Шнек-винт – рабочий инструмент, с помощью которого производится транспортировка порошкообразного ВВ в зарядную камеру и формирование разрывного заряда.

Производительность и безопасность процесса шнекования, качество разрывных зарядов в значительной степени определяются конструкцией шнек-винта, чистотой обработки рабочих поверхностей и скоростью вращения.

Шнек-винты изготавливаются из углеродистых или углеродистых азотированных сталей У8-У10, У8А-У10А, а рабочие поверхности обрабатываются по классу чистоты ∇8 (полируются).

Общая длина шнек-винта определяется главным образом длиной камеры снаряжаемого изделия и высотой бункера для

ВВ. Обычно длина шнек-винта составляет 700...900 мм, иногда больше.

Основные части шнек-винта по его длине: 1) установочная (~1/7...1,8 общей длины), 2) транспортирующая и 3) прессующая (два-три последних витка). Заканчивается прессующая часть пятой (рис. 7.9).

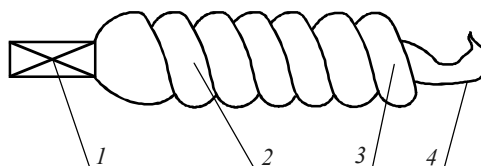


Рис. 7.9. Общий вид шнек-винта:

1 – установочная; 2 – транспортирующая;
3 – прессующая; 4 – пята

Профиль шнек-винта определяется следующими параметрами:

- наружным диаметром d_n ;
- диаметром шейки $d_{ш}$;
- шагом винта t или s ;
- углом подъема винтовой линии α ;
- углом подъема винтовой поверхности β .

К рабочим характеристикам относится также число оборотов шнек-винта.

Наружный диаметр шнек-винта определяется внутренним диаметром шнек-трубки или диаметром очка (входного отверстия) зарядной камеры, или внутренним диаметром предохранительной втулки, вставляемой в очко.

С увеличением d_n при прочих одинаковых условиях возрастает производительность шнекования, так как увеличивается объем межвиткового пространства. Кроме того, при этом повышается качество разрывного заряда, которое выражается в увеличении средней и периферийной плотности. Это происходит вследствие расширения зоны непосредственного воздействия шнек-винта на ВВ.

Диаметр шейки также определяет величину межвиткового объема. Уменьшение диаметра шейки при прочих одинаковых условиях приводит к повышению производительности шнекования с одновременным ухудшением качества заряда. Средняя плотность

заряда уменьшается, так как при том же значении наружного диаметра шнек-винт не обеспечивает необходимого уплотнения возросшего количества ВВ, поступающего под прессующие витки. Обычно принимают $d_{ш} = (0,6...0,8)d_n$, причем учитывается также необходимость обеспечения достаточной прочности шнек-винта, которая снижается при уменьшении диаметра шейки.

Шаг винта подбирается опытным путем. С увеличением шага производительность шнекования возрастает, но до некоторого предела. При слишком большой величине шага возможно образование пробок, т. е. прекращение шнекования.

Как и при увеличении наружного диаметра, качество разрывных зарядов с увеличением шага винта ухудшается: разброс плотности становится более значительным, средняя плотность снижается. Чтобы обеспечить достаточно высокую производительность шнекования и плотность разрывных зарядов, довольно часто применяют шнек-винты переменного шага. Шаг транспортирующей части в 2...3 раза больше шага прессующих витков.

Угол подъема винтовой линии прямо связан с шагом винта. Установлено, что с увеличением угла α повышается периферийная, а значит, и средняя, плотность заряда за счет увеличения боковой составляющей сил, действующих на ВВ. Вместе с тем увеличение угла α повышает вероятность образования пробок при шнековании.

Угол подъема винтовой линии зависит от природы ВВ. Так, для аммотолов его оптимальное значение составляет 18...20°, для тротила – 9...10°. Шаг винта подбирается по известному или заданному углу α .

Увеличение угла *подъема винтовой поверхности* β также способствует более равномерному распределению плотности шнекованных зарядов. Обычно шнек-винты имеют в прессующей части $\beta = 45^\circ$, а в остальной – 90° .

Скорость вращения шнек-винта, выражаемая *числом оборотов*, существенно влияет на производительность шнекования и качество зарядов. Увеличение числа оборотов повышает производительность, при этом ухудшается качество заряда. Одновременно усиливается нагрев винта и ВВ, возрастает вероятность образования пробок.

В зависимости от природы ВВ, калибра снаряжаемых боеприпасов, конструкции шнек-винта и аппарата обеспечивается $n = 100 \dots 800$ об/мин.

Снаряжение шнекованием производится на специальных шнек-аппаратах, в устройстве которых объединены гидравлическая система противодавления, механизм крепления снаряжаемого изделия, бункер с ВВ, привод шнек-винта, обеспечивающий его вращение с необходимой скоростью.

7.3. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС СНАРЯЖЕНИЯ БОЕПРИПАСОВ

Технологический процесс снаряжения боеприпасов складывается из определенного количества операций, выполняемых в заданной последовательности. В зависимости от калибра и конструкции снаряжаемых изделий, свойств ВВ, метода снаряжения и технических возможностей предприятия количество и объем (содержание) операций могут быть различными, однако общее построение технологического процесса и назначение операций остаются всегда неизменными.

По характеру и назначению операций технологический процесс снаряжения боеприпасов разделяется на несколько этапов (групп операций), обычно называемых стадиями или фазами. В общем виде технологический процесс снаряжения включает в себя следующие основные фазы:

- подготовку корпусов к наполнению;
- подготовку взрывчатого вещества;
- подготовку инструмента и оборудования;
- изготовление разрывных зарядов (наполнение изделий);
- обработку и сборку разрывных зарядов и снаряженных изделий;
- окончательную отделку боеприпасов.

Операции по подготовке корпусов, ВВ, инструмента называются подготовительными, а операции по обработке, сборке и окончательной отделке боеприпасов – заключительными.

Подготовка корпусов – это приведение их в состояние, пригодное для наполнения взрывчатым веществом. При подготовке кон-



тролируется качество металла корпусов, состояние окраски и лакировки, вес изделий, основные размеры.

Устранимые дефекты исправляются, поверхности зарядных камер лакируются, корпуса термостатируются или подогреваются до 40...50 °С, после чего производится их наполнение тем или иным способом. Корпуса с неустраняемыми дефектами в производство не допускаются.

Содержание подготовки ВВ неодинаково для различных методов снаряжения.

При снаряжении заливкой ВВ плавится в плавительных аппаратах, обогреваемых водяным паром. Расплавленное ВВ подвергается предварительной кристаллизации, после чего заливается в изделия. Заливка может выполняться вручную (из ведер, кружек) или автоматически, с помощью специальных дозирующих устройств.

Для кусковой заливки, кроме расплава, приготавливаются также куски (таблетки) ВВ методом отливки или прессованием на таблетировочных прессах-автоматах.

При снаряжении методами прессования и шнекования ВВ просеивается с целью удаления посторонних предметов и слишком крупных частиц. После просеивания ВВ может быть подогрето до 30...45 °С. Подогретое ВВ в случае прессования поступает на взвешивание требуемых порций с точностью $\pm 0,1$ г. Взвешенные порции высыпаются через воронки в матрицы пресс-инструмента или непосредственно в корпуса изделий.

Подготовленное для шнекования ВВ загружается в бункеры шнек-аппаратов.

Все операции снаряжения выполняются с применением исправного инструмента и на исправном технологическом оборудовании. Инструмент, применяемый при заливке и прессовании (заливочные воронки, матрицы, пуансоны, поддоны), очищается от налипшего ВВ и протирается спиртом или ацетоном. Рабочие поверхности пресс-инструмента покрываются (смазываются) парафином или опудриваются тальком (белой пудрой). Подготовленный инструмент собирается в соответствии со схемой снаряжения. Заливочные воронки устанавливаются на корпуса изделий, поддоны вставляются в матрицы, и в них засыпается ВВ, после чего вставляются пуансоны и ставятся ограничители.

После наполнения корпусов методом заливки производится «ухаживание». С началом затвердевания «ухаживание» прекращается и изделия останавливаются до полного затвердевания ВВ и остывания зарядов. Время выдержки (выстойки) до полного охлаждения может составлять от 30 мин до десятков (и сотен) часов, в зависимости от калибра изделий.

При снаряжении прессованием собранный пресс-инструмент подается под пресс и производится прессование зарядов на заданном режиме. Отпрессованные шашки (при раздельном прессовании) выталкиваются из матриц и поступают на сборку.

Назначение заключительных операций в снаряжении боеприпасов – приведение изделий в соответствие с чертежом и в состояние, пригодное для длительного хранения и боевого применения.

Если профиль среза разрывного заряда, полученный при снаряжении, не отвечает чертежу, то производится механическая обработка – сверловка или фрезерование для придания заряду окончательной формы и чертежных размеров. После обработки и очистки срез заряда лакируется.

При снаряжении боеприпасов с привинтными головками, а также имеющих ввинтное дно или другие элементы, производится сборка изделий и закрепление зарядов. Привинчивание головок, ввинчивание доньев и донных крышек производятся с применением картонных прокладок или колец, обеспечивающих поджатие и надежную фиксацию разрывного заряда от продольных перемещений. Для герметизации разрывных зарядов резьбовые соединения смазываются суриковой замазкой или специальным герметиком и ставятся свинцовые кольца.

При раздельном снаряжении изделий сборке предшествует вставка и закрепление зарядов в зарядных камерах. Разрывные заряды смачиваются расплавленным парафином и вставляются до упора в камеры. Застывший парафин (или другой закрепитель) обеспечивает прочное сцепление заряда со стенкой камеры.

Окончательная отделка снаряженных и собранных изделий включает чистку наружных поверхностей, окраску и лакировку, взвешивание, нанесение отличительных знаков и маркировки и укупоривание. Изделия окрашиваются темно-серой краской или эмалями, маркировка наносится специальной быстросохнущей черной краской. Содержание маркировки на корпусах изделий включает

номер или индекс завода, номер партии и год снаряжения, шифр ВВ, а также сведения об изделии: калибр, индекс, весовой знак или вес.

Маркировка наносится на оживальной и цилиндрической части снаряда, а у мин – ниже центрующих утолщений, с диаметрально противоположных сторон. На бронебойных снарядах ниже шифра ВВ указывается марка взрывателя.

Готовые изделия совместно с комплектующими деталями укупориваются в соответствующую тару (ящики, контейнеры). На тару наносится маркировка, содержащая основные сведения об изделиях, например:

<p>76-39 г. 5 шт. ++ Брутто 59 кг Передняя стенка</p>

<p>I5-7-43-T Торцевая стенка</p>

На правой торцевой стенке (если смотреть спереди) указываются данные о снаряжении: номер снаряжательного завода, партия и год снаряжения, шифр ВВ. На ящиках с бронебойными снарядами наносятся данные о взрывателе: марка, завод, партия и год изготовления, месяц, год и номер партии ввинчивания. Крышка укупорки снабжается знаком разряда и опасности груза.

7.4. КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА РАЗРЫВНЫХ ЗАРЯДОВ

Качество разрывных зарядов обеспечивается точным соблюдением технологических режимов и соответствующим контролем снаряжательного производства.

Контроль качества разрывных зарядов бывает текущий и концевой (приемочный). При текущем контроле периодически (систематически) или постоянно проверяется правильность выполнения технологических операций, а также проводится анализ ВВ по предусмотренным показателям. У всех 100 % изделий контролируется состояние среза разрывного заряда и гнезда под детонатор, а также их профиль и размеры. При раздельном снаряжении производится 100 %-й контроль состояния по наружному виду размеров шашек ВВ.

Концевой (приемочный) контроль производится при приемке партии готовых изделий.

Качество разрывных зарядов при текущем и приемочном контроле готовых изделий оценивается по структуре, плотности, состоянию поверхностей среза и гнезда и результатам физико-химического анализа ВВ. По каждому показателю предусмотрены соответствующие нормы отклонений или дефекты, которые допускаются для разрывных зарядов, изготавливаемых разными способами из различных ВВ.

Структура разрывных зарядов проверяется посредством осмотра поверхностей разрезанных по оси образцов, высверленных, выплавленных или извлеченных иным способом из корпусов, привинтных головок, стаканов или разъемных (разборных) корпусов. В оценку качества зарядов по плотности входят: средняя плотность, средняя табличная плотность, местная (локальная) плотность.

Для определения плотностей без извлечения разрывных зарядов все корпуса или их часть взвешиваются до и после снаряжения и определяется объем зарядных камер. Средняя (истинная) плотность рассчитывается по соотношению

$$\rho_{\text{ср}} = \frac{M_{\text{ш}}}{V_{\text{к}}},$$

где $M_{\text{ш}}$ – вес шашки (болванки) ВВ, определяемой как разность между весами наполненного и пустого корпусов; $V_{\text{к}}$ – объем камеры данного корпуса.

Средняя табличная плотность

$$\rho_{\text{ср.т}} = \frac{M_{\text{ш}}}{V_{\text{ср}}},$$

где $V_{\text{ср}}$ – средний объем некоторого количества (может быть до 10 %) корпусов от партии.

Местную плотность определяют на извлеченных из корпусов образцах зарядов, которые разделяются на отдельные части – по

оси и поперечному сечению, после чего, установив вес и объем каждой части, вычисляют их плотность.

При раздельном снаряжении определяется средняя и локальная плотность некоторого количества (обычно 0,5 %) шашек от партии.

Для контроля структуры образцы разрывных зарядов рассекаются (разрезаются) по оси, поверхности среза протираются спиртом, затем высушиваются и осматриваются. Характер структуры ВВ (мелкокристаллическая, крупнокристаллическая) и дефектов (раковины, воздушные включения и др.) определяется визуально.

Особенность и наиболее характерный недостаток контроля качества разрывных зарядов – это его выборочность, состоящая в том, что контролируются не все 100 % изделий, а лишь некоторая их часть и по результатам этой части делается заключение о качестве всей партии.

Вопросы для самоконтроля

1. Что такое разрывной заряд?
2. Боеприпасные разрывные заряды.
3. Подрывные заряды.
4. Специальные разрывные заряды.
5. Требования, предъявляемые к разрывным зарядам.
6. Специальные требования, предъявляемые к РЗ.
7. Эффективность действия.
8. Безотказность и надежность.
9. Физическая и химическая стойкость.
10. Требования стойкости разрывных зарядов к действию инерционных нагрузок.
11. Требования отсутствия возмущающего влияния.
12. Причины преждевременных взрывов РЗ.
13. Дефекты РЗ, приводящие к преждевременным взрывам.
14. Что такое снаряжение боеприпасов?
15. Способы изготовления РЗ.
16. Отличие метода нераздельного снаряжения от метода раздельного снаряжения.

17. Снаряжение боеприпасов прессованием.
18. Качество прессованных зарядов.
19. Факторы, от которых зависит прессуемость ВВ.
20. Прессовый инструмент. Приведите примеры.
21. Прессовое оборудование. Примеры.
22. Снаряжение боеприпасов шнекованием.
23. Что такое шнек-винт? Характеристики.
24. Технологический процесс снаряжения боеприпасов.
25. Контроль качества разрывных зарядов.

Библиографический список

1. Взрывчатые вещества. Т. 2. Основные свойства. Технология изготовления и переработки / под ред. Л. В. Фомичевой. – Саров : РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2007. – 452 с.
2. Энергетические конденсированные системы : краткий энциклопедический словарь / под ред. Б. П. Жукова. – Москва : Янус-К, 2000. – 596 с.
3. Горст А. Г. Пороха и взрывчатые вещества / А. Г. Горст. – 2-е изд., перераб. – Москва : Оборонгиз, 1957. – 188 с.
4. Смирнов Л. А. Создание смесевых твердых топлив / Л. А. Смирнов, Г. В. Калабухов. – Москва : Химия, 1997. – 116 с.
5. Дубнов Л. В. Промышленные взрывчатые вещества / Л. В. Дубнов, Н. С. Бахаревиц, А. И. Романов. – 3-е изд., перераб. и доп. – Москва : Недра, 1988. – 358 с.
6. Орлова Е. Ю. Химия и технология бризантных взрывчатых веществ / Е. Ю. Орлова. – Ленинград : Химия, 1973. – 688 с.
7. Химический энциклопедический словарь / гл. ред. И. Л. Кнунянц. – Москва : Советская энциклопедия, 1983. – 792 с.
8. Милевский К. Е. Теория взрывчатых веществ: учебное пособие / К. Е. Милевский, А. В. Гуськов. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2001. – 139 с.
9. Высокоэнергетические материалы : учебное пособие / В. В. Андреев, А. В. Гуськов, К. Е. Милевский, Е. Ю. Слесарева. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2013. – 326 с.

ГЛАВА 8

РАСЧЕТ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ

8.1. ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ

Взрывчатыми веществами (ВВ) называются химические вещества и их смеси, способные к быстрому самораспространяющемуся химическому превращению с образованием газов и с выделением большого количества тепла.

Различают два основных типа химического превращения: горение и детонацию и в соответствии с этим – метательные ВВ (пороха) и бризантные ВВ.

Взрывчатые вещества служат источниками тепловой энергии и обладают высокой объемной ее концентрацией. Носители выделившейся тепловой энергии – продукты взрывчатого превращения (ПВП), которые при расширении совершают над внешней средой работу перемещения или разрушения. ПВП могут содержать некоторое количество твердых веществ.

Энергетическими характеристиками ВВ называются физические величины, характеризующие работу продуктов взрывчатого превращения. К ним относятся:

- 1) кислородный баланс КБ и кислородный коэффициент α ;
- 2) теплота взрывчатого превращения ВВ Q_w ;
- 3) потенциал ВВ Π ;
- 4) удельная теплоемкость ПВП c ;
- 5) удельная внутренняя энергия ПВП u ;
- 6) температура взрывчатого превращения ВВ T_1 ;

- 7) сила ВВ f ;
- 8) параметр расширения ПВП θ ;
- 9) удельный объем газообразных ПВП W_1 ;
- 10) удельный объем твердых продуктов взрывчатого превращения $\alpha_{\text{ТВ}}$.

Все перечисленные характеристики могут быть определены экспериментально или расчетом. В основе расчетного метода лежит основной закон термохимии Г.И. Гесса (1840).

Кислородный баланс (КБ) характеризует соотношение во взрывчатом веществе горючего и кислорода. Вычисляется он как разность между весовым количеством кислорода в ВВ и кислородом, необходимым для полного окисления всех элементов ВВ. При этом предполагается, что азот выделяется в свободном виде N_2 .

Если во взрывчатом веществе содержится кислорода достаточно для полного окисления всех элементов, то КБ равен нулю, если в избытке, то он положительный, если кислорода недостаточно, то $\text{КБ} < 0$.

Вычислим кислородный баланс вещества с формулой $C_aH_bO_cN_d$ и молекулярной массой M .

Количество кислорода, содержащегося в веществе, равно 16с, очевидно, что массовая доля кислорода в веществе

$$X_1 = \frac{16c}{M}.$$

Для полного окисления углерода в количестве a необходимо в соответствии с формулой $C + O_2 \rightarrow CO_2$ иметь $2a$ кислорода.

Для полного окисления водорода $H_2 + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow H_2O$ требуется $\frac{b}{2}$ кислорода. Соответственно для полного окисления всех продуктов необходимо $\left(2a + \frac{b}{2}\right)$ или $\left(2a + \frac{b}{2}\right)16$ г кислорода.

Массовая доля кислорода, необходимая для полного окисления углерода и водорода,

$$X_2 = \frac{\left(2a + \frac{b}{2}\right)16}{M}.$$



Разность $X_1 - X_2$, взятая в процентах, и будет составлять кислородный баланс:

$$\text{КБ} = \frac{16 \left[c - \left(2a + \frac{b}{2} \right) \right]}{M} 100 \%. \quad (8.1)$$

Пример 1. Рассчитаем кислородный баланс тротила $\text{C}_7\text{H}_5\text{O}_6\text{N}_3$.

Молекулярная масса M равна:

$$M = 7 \cdot 12 + 5 \cdot 1 + 6 \cdot 16 + 3 \cdot 14 = 227 \text{ г/моль}, \quad a = 7, \quad b = 5, \\ c = 6, \quad d = 3.$$

По формуле (8.1), подставляя нужные значения, определяем кислородный баланс:

$$\text{КБ} = \frac{16 \left[6 - \left(2 \cdot 7 + \frac{5}{2} \right) \right]}{227} 100 \% = -74 \%.$$

Кислородным коэффициентом α называют отношение содержания в ВВ кислорода к необходимому для полного окисления всех горючих элементов:

$$\alpha = \frac{c}{2a + \frac{b}{2}}. \quad (8.2)$$

Если кислородный баланс может быть отрицательным, то кислородный коэффициент всегда положителен.

Кислородный коэффициент в отличие от кислородного баланса характеризует истинное соотношение горючего и окислителя в молекуле и является *характеристикой степени насыщенности молекулы* кислородом.

Пример 2. Рассчитаем кислородный коэффициент тротила $\text{C}_7\text{H}_5\text{O}_6\text{N}_3$.

Подставляя полученные в примере 1 значения в формулу (8.2), получаем

$$\alpha = \frac{6}{2 \cdot 7 + \frac{5}{2}} = 0,36.$$

Теплотой взрывчатого превращения ВВ называется количество теплоты, выделившейся из продуктов взрывчатого превращения 1 кг (или 1 моля) ВВ при охлаждении в постоянном объеме до температуры 291 К (+18 °С).

Единицей измерения количества вещества является моль, введенный в качестве основной единицы СИ в 1971 г.

Моль – это количество вещества системы, которое содержит столько определенных *структурных* элементов (молекул, атомов, ионов); моль содержит $6,022 \cdot 10^{25}$ структурных элементов.

Различают теплоту взрывчатого превращения, полученную при условии, что вода остается в парообразном состоянии (Q_w) или переходит в жидкое состояние ($Q_{wж}$). Очевидно, величина $Q_{wж}$ будет больше величины Q_w , так как в первом случае выделяется дополнительная теплота ΔQ при конденсации водяных паров.

В системе единиц СИ

$$\Delta Q = 2773,78 \frac{n_{H_2O}}{100} \text{ кДж/кг}, \quad (8.3)$$

где 2773,78 – количество тепла, которое выделяется при конденсации водяных паров, кДж/кг.

В технической системе единиц

$$\Delta Q = 662 \frac{n_{H_2O}}{100} \text{ ккал/кг}, \quad (8.3a)$$

где 662 – количество тепла, которое выделяется при конденсации водяных паров, ккал/кг; n_{H_2O} – количество воды, содержащейся в продуктах взрывчатого превращения, %.

Потенциалом ВВ П называется механическая энергия, заключенная в 1 кг (или 1 моле) продуктов взрывчатого превращения; в технической системе единиц величина П выражается равенством (кгс · дм/кг)

$$П = EQ_w, \quad (8.4)$$

где E – механический эквивалент теплоты; $E = 4270 \text{ кгс} \cdot \text{дм/ккал} = 4,27 \text{ кгс} \cdot \text{дм/кал} = 0,427 \text{ кгс} \cdot \text{м/кал}$.

Величина Π численно равна максимальной работе, которую могли бы совершить продукты взрывчатого превращения при их адиабатическом расширении и охлаждении до температуры 291 К.

Фактическая работа ВВ в существующих технических устройствах достигает лишь 20...40 % от максимальной работы. В системе СИ потенциал ВВ равен теплоте взрыва (кДж/кг):

$$\Pi = Q_w. \quad (8.4a)$$

Удельной теплоемкостью ПВП c называется количество теплоты, необходимое для нагревания 1 кг продуктов на 1 °С.

Различают теплоемкость при постоянном объеме c_w и при постоянном давлении c_p , соотношение которых определяется формулой Р. Майера:

$$c_p = c_w + R, \quad (8.5)$$

где R – удельная газовая постоянная, Дж/(кг · К).

Величина R зависит от состава продуктов взрывчатого превращения и численно равна удельной работе продуктов при изобарическом термодинамическом процессе и при изменении их температуры на 1 К (°С).

Удельную газовую постоянную R можно выразить через универсальную газовую постоянную R_0 , которая не зависит от природы газа:

$$R = n_{\text{газ}} R_0, \quad (8.5a)$$

где R_0 – универсальная газовая постоянная;

$$R_0 = 8,31441 \text{ Дж/(моль} \cdot \text{К)};$$

$n_{\text{газ}}$ – число молей газообразных продуктов в 1 кг ПВП, моль/кг, или $n_{\text{газ}} = 1/M_{\text{газ}}$, где $M_{\text{газ}}$ – молярная масса газообразных продуктов, кг/моль.

Наряду с удельными применяются молярные теплоемкости, отнесенные не к килограмму, а к молю ПВП, имеющие размерность [Дж/(моль · К)]. В этом случае в уравнении (8.5) будет стоять не удельная, а универсальная газовая постоянная. При расчете энерге-

тических характеристик удобнее пользоваться молярными величинами.

Теплоемкость зависит в основном от природы и температуры газа. Для средней (в интервале температур от 0 до 15 °С) теплоемкости c_w обычно принимают линейную зависимость (Дж/(моль · °С))

$$c_w = a_w + b_w T, \quad (8.6)$$

где a_w и b_w – эмпирические коэффициенты теплоемкостей (табл. 8.1).

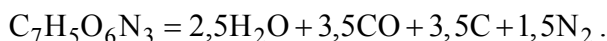
Т а б л и ц а 8.1

Значения и размерности эмпирических коэффициентов

Газы	a_w , кал/(моль · °С)	a_w , Дж/(моль · °С)	$b_w \cdot 10^4$, кал/(моль · °С)	$b_w \cdot 10^4$, Дж/(моль · °С)
Двухатомные	4,8	20,112	4,5	18,855
Трехатомные H ₂ O	4,0	16,760	21,5	90,085
CO ₂	9,9	37,710	5,8	24,302
Четырех- атомные	10,0	41,900	4,5	18,855
Пятиатомные	12,0	50,280	4,5	18,855

Теплоемкость твердых продуктов взрывчатого превращения практически не зависит от температуры, тогда $b_w = 0$. Для простого вещества (типа графита) следует принимать $a_w = 6,4$ кал/(моль · °С) = 26,816 Дж/(моль · °С). Для сложного вещества будем считать, что теплоемкость равна сумме атомных теплоемкостей составляющих его химических элементов.

Пример 3. Рассчитаем теплоемкость продуктов реакции взрывчатого превращения тротила (реакция в первом приближении). При температуре взрыва 2888 °С



Коэффициенты a_w и b_w вычисляются как суммы теплоемкостей ПВП с учетом стехиометрических коэффициентов (коэффициентов реакции):

$$a_w = \sum_i n_i a_{wi} = 2,5 \cdot 16,760 + 3,5 \cdot 20,112 + 3,5 \cdot 26,816 + 1,5 \cdot 20,112 = \\ = 236,316 \text{ Дж/(моль} \cdot ^\circ\text{C)};$$

$$b_w = \sum_i n_i b_{wi} = (2,5 \cdot 90,085 + 3,5 \cdot 18,855 + 3,5 \cdot 0 + 1,5 \cdot 18,855) 10^{-4} = \\ = 319,487 \cdot 10^{-4} \text{ Дж/(моль} \cdot ^\circ\text{C)}.$$

По формуле (8.6) вычисляем теплоемкость ПВП:

$$c_w = a_w + b_w t = 236,316 + 319,487 \cdot 10^{-4} \cdot 2888 = 328,58 \text{ Дж/(моль} \cdot ^\circ\text{C)}.$$

Удельной внутренней энергией ПВП u называется кинетическая и потенциальная энергия молекул и атомов 1 кг (или 1 моля) продуктов. Изменение внутренней энергии может происходить за счет передачи теплоты, совершения механической работы или изменения фазового состояния продуктов. Удельная внутренняя энергия идеального газа и реальных газов при высокой температуре зависит только от величины T :

$$u = \int_0^T c_w dT.$$

Начальное значение удельной внутренней энергии u_0 в момент образования продуктов взрывчатого превращения равно начальному значению их удельной энтальпии H_0 , которое, в свою очередь, равно удельной энтальпии ВВ при стандартных условиях $H_{ВВ}$:

$$u_0 = H_0 = H_{ВВ}. \quad (8.7)$$

Величина $H_{ВВ}$ может быть рассчитана по составу ВВ.

Удельная энтальпия H_0 при некотором текущем значении температуры газа не будет равна удельной внутренней энергии:

$$H_0 = \int_0^T c_p dT = u + p\omega, \quad (8.7a)$$

где ω – удельный объем газа; p – давление газа.

На практике обычно пользуются не полными значениями u и H , а их изменениями Δu , ΔT при переходе газа из состояния 1 в состояние 2, т. е.

$$\Delta u = \int_1^2 c_w dT = c_w(T_2 - T_1) \quad \text{и} \quad \Delta H = \int_1^2 c_p dT = c_p(T_2 - T_1). \quad (8.8)$$

Температурой взрывчатого превращения ВВ T_1 называется температура, которую имеют ПВП в момент их образования.

Различают температуру взрывчатого превращения при постоянном объеме (T_1) и при постоянном давлении (T_0), в соответствии с равенством (8.6) можно записать:

$$H_{\text{ВВ}} = \int_0^{T_1} c_w dT = \int_0^{T_1} c_p dT. \quad (8.9)$$

Из формулы (8.3) видно, что $c_p > c_w$, поэтому $T_1 > T_0$.

Если воспользоваться средними теплоемкостями, то из уравнения (8.9) можно найти соотношения между T_1 и T_0 :

$$\frac{T_1}{T_0} = k, \quad (8.10)$$

где k – показатель адиабаты;

$$k = \frac{c_p}{c_w}. \quad (8.11)$$

Если известна теплота взрывчатого превращения (Q_w), то температуру взрывчатого превращения (T_1) можно определить как температуру ПВП, получивших теплоту Q_w в постоянном объеме и имевших начальную температуру $+18^\circ\text{C}$.

Запишем:

$$Q_w = \Delta u = \int_{29}^{T_1} c_w dT = \int_{18}^{t_2} c_w dt \approx \int_0^{t_3} c_w dt = \bar{c}_w t_1, \quad (8.12)$$

где t_1 – температура взрывчатого превращения ВВ, $^\circ\text{C}$.

В результате получим

$$t_1 = \frac{Q_w}{\bar{c}_w} \quad \text{и} \quad T_1 = t_1 + 273.$$

Силой ВВ называется физическая величина, численно равная работе расширения 1 кг продуктов взрывчатого превращения при нагревании их от 0 К до температуры взрывчатого превращения T_1 при постоянном давлении (Дж/кг): $f = RT_1$, если величину газовой постоянной R относить к 1 кг продуктов. Если же ее относить к молю ВВ, то следует записать:

$$f = RT_1 \frac{1}{M_{\text{ВВ}}} \text{ Дж/кг},$$

где $M_{\text{ВВ}}$ – молярная масса ВВ (грамм-атомная); μ – молекулярная масса ВВ; $\mu_{\text{ВВ}} = \sum n_i \mu_i$; $M_{\text{ВВ}} = 0,001 \mu_{\text{ВВ}}$ кг/моль.

Здесь n_i , μ_i – число атомов и атомная масса i -го химического элемента, входящего в химическую формулу ВВ. В результате получим расчетную формулу

$$f = RT_1 \frac{1000}{\mu_{\text{ВВ}}} \text{ Дж/кг}. \quad (8.13)$$

Сила ВВ характеризует его работоспособность, поскольку работа расширения продуктов взрывчатого превращения при любом термодинамическом процессе пропорциональна силе ВВ.

Например, внешняя удельная работа газов при их адиабатическом расширении $l_{\text{ад}}$ определяется равенством

$$l_{\text{ад}} = \frac{f}{k-1} \left(1 - \frac{T}{T_1} \right), \quad (8.14)$$

где k – показатель адиабаты; T – температура, до которой охлаждаются газы при расширении.

Если процесс взрывчатого превращения протекает при постоянном давлении (например, в камере реактивного двигателя), то работоспособность ВВ будет характеризоваться приведенной силой

ВВ (f_0): $f_0 = RT_0$, которая согласно равенству (8.10) будет меньше силы ВВ f в k раз:

$$f_0 = \frac{f}{k}. \quad (8.15)$$

Параметром расширения продуктов взрывчатого превращения θ называется физическая величина, численно равная отношению работ расширения 1 кг продуктов взрывчатого превращения при изобарическом и адиабатическом процессах и при изменении их температуры на 1 °С.

Удельная работа при изменении температуры газов на 1 °С равна для изобарического процесса удельной газовой постоянной R , а для адиабатического – удельной внутренней энергии c_w , следовательно,

$$\theta = \frac{R}{c_w}, \quad (8.16)$$

или с учетом формулы Майера (8.3) $\theta = R - 1$.

Параметр расширения характеризует ВВ с точки зрения эффективности преобразования теплоты в механическую работу. Из выражения (8.14) следует, что чем меньше будет величина θ , тем бóльшую работу можно получить при одной и той же степени охлаждения газов. Для большей наглядности за параметр расширения следует принимать обратную величину:

$$\theta^* = \frac{1}{\theta} = \frac{1}{k-1}.$$

В этом случае, чем больше будет параметр расширения θ^* , тем больше будет и работа расширения газов.

Величина θ зависит от состава продуктов взрывчатого превращения и их температуры и уменьшается с ростом температуры. На основе равенства (8.14) можно получить следующие соотношения между основными энергетическими характеристиками:

$$Q_w = \frac{f}{\theta} \left(1 - \frac{291}{T_1} \right). \quad (8.17)$$

Удельным объемом газообразных ПВП ω_1 называется объем газообразных продуктов взрывчатого превращения 1 кг ВВ при температуре 0°C и при давлении, равном 760 мм рт. ст. (т. е. при нормальных физических условиях). Зная объем моля газа ($22,4 \cdot 10^{-3} \text{ мм}^3/\text{моль}$) и число молей газообразных продуктов в 1 кг ПВП $n_{\text{газ}}$, можно получить:

$$\omega_1 = 22,4 n_{\text{газ}} \frac{1000}{\mu_{\text{ВВ}}} \text{ м}^3/\text{кг}. \quad (8.18)$$

Различают удельные объемы при парообразном ω_1 и жидком состоянии воды $\omega_{1\text{ж}}$, между которыми существует соотношение

$$\omega_1 = \omega_{1\text{ж}} + 1240 \frac{n_{\text{H}_2\text{O}}}{100}.$$

Удельным объемом твердых ПВП $\alpha_{\text{ТВ}}$ называется объем твердых продуктов взрывчатого превращения 1 кг ВВ.

Зная для каждого твердого вещества число молей n_j в 1 кг ПВП, молекулярную массу μ_j и плотность ρ_j , можно найти число молей $n_{\text{ТВ}}$ в 1 кг ПВП, молекулярную массу $\mu_{\text{ТВ}}$ и плотность $\rho_{\text{ТВ}}$ твердых продуктов:

$$n_{\text{ТВ}} = \sum_j n_j; \quad \mu_{\text{ТВ}} = \sum_j n_j \mu_j; \quad \rho_{\text{ТВ}} = \frac{\sum_j n_j \rho_j}{n_{\text{ТВ}}}. \quad (8.19)$$

По величинам молекулярных масс ВВ и твердых продуктов найдем массовую долю твердых продуктов:

$$\bar{n}_{\text{ТВ}} = \frac{\mu_{\text{ТВ}}}{\mu_{\text{ВВ}}}. \quad (8.20)$$

Тогда удельный объем твердых продуктов

$$\alpha_{\text{ТВ}} = \frac{\bar{n}_{\text{ТВ}}}{\rho_{\text{ТВ}}}. \quad (8.21)$$

Отметим, что плотность графита равна $2,267 \cdot 10^3$ кг/м³, а твердых продуктов дымного пороха $2,3 \cdot 10^3$ кг/м³.

В случае когда продукты взрывчатого превращения содержат твердые вещества, при расчете параметра расширения следует использовать удельную теплоемкость газообразных продуктов \bar{c}'_w , считая, что теплота твердых продуктов в работу расширения не переходит:

$$\bar{c}'_w = \bar{c}_w - \sum_j n_j a_{wj}, \quad (8.22)$$

где $n_j a_{wj}$ – теплоемкость твердых продуктов, Дж/(моль · °С); \bar{c}_w – средняя теплоемкость ПВП ВВ, Дж/(моль · °С).

В этом случае формула (8.17) в левой части будет содержать не всю теплоту взрывчатого превращения, а только ее часть, соответствующую внутренней энергии газообразных продуктов (табл. 8.2).

Таблица 8.2

Значения основных энергетических характеристик некоторых ВВ

ВВ	Q_w ; П, кДж/кг	T_1 , К	f , Дж/кг	ω_t , м ³ /кг	$\alpha_{тв}$, м ³ /кг	θ
Дымный порох	2304,5	2200	$275 \cdot 10^3$	$300 \cdot 10^{-3}$	$0,28 \cdot 10^{-3}$	0,280
Пироксилиновый порох	3247,2	2770	$932 \cdot 10^3$	$950 \cdot 10^{-3}$	$0,01 \cdot 10^{-3}$	0,200
Тротил	4022,4	3300	$819 \cdot 10^3$	$690 \cdot 10^{-3}$	$0,13 \cdot 10^{-3}$	0,220

Для расчета энергетических характеристик ВВ необходимо прежде всего знать состав продуктов взрывчатого превращения, который может быть установлен экспериментальным или расчетным путем.

8.2. МЕТОД РАСЧЕТА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВВ

Взрывчатое вещество может быть «индивидуальным» веществом или смесью веществ (аммотол, пироксилиновый порох). Чистое химическое вещество определяется формулой, которая указы-



вает на его состав и количество. Например, формула тротила $C_6H_2(NO_2)_3CH_3$ или $C_7H_5O_6N_3$ показывает, что в одной молекуле ВВ содержится 7 атомов углерода, 5 – водорода, 6 – кислорода и 3 – азота. Формулу для 1 кг ВВ можно записать в общем виде:

$$C_a H_b O_c N_d, \quad (8.23)$$

где a, b, c, d – число молей (грамм-атомов) соответствующих химических элементов в 1 кг ВВ.

Например, для углерода С

$$a = \frac{\bar{n}_a}{M_a},$$

где \bar{n}_a – массовая доля углерода ВВ; M_a – молярная (грамм-атомная) масса углерода, равная 0,012 кг.

Формула (8.23) называется условной химической формулой ВВ. Большинство бризантных и метательных ВВ состоят лишь из химических элементов, входящих в условную формулу (8.23). В дальнейшем будем рассматривать только такие индивидуальные ВВ.

Для расчета чисел a, b, c, d имеющейся химической формулы берут числа атомов в ней и умножают их на коэффициент, равный отношению 1000 г (1 кг ВВ) к молю ВВ $M_{\text{инд}}$, выраженному в граммах.

Например, для тротила $C_7H_5O_6N_3$ находим

$$M_{\text{инд}} = 7\mu_C + 5\mu_H + 6\mu_O + 3\mu_N, \quad (8.24)$$

где $\mu_C, \mu_H, \mu_O, \mu_N$ – атомные массы соответствующих химических элементов;

$$M_{\text{инд}} = 7 \cdot 12 + 5 \cdot 1 + 6 \cdot 16 + 3 \cdot 14 = 227 \text{ г}.$$

Из пропорций типа $7 : 227 = a : 1000$ получим:

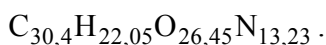
$$a = 7 \frac{1000}{227} = 30,40 \text{ моль/кг};$$

$$b = 5 \frac{1000}{227} = 22,05 \text{ моль/кг};$$

$$c = 6 \frac{1000}{227} = 26,45 \text{ моль/кг};$$

$$d = 3 \frac{1000}{227} = 13,23 \text{ моль/кг}.$$

Тогда формула 1000 г тротила будет



Для 1 кг нитроцеллюлозы (пироксилина, коллоксилина) числа a , b , c , d можно определить по формулам В.С. Тихановича, зная число N , показывающее процентное содержание в ней азота:

$$\begin{aligned} a &= 21,85 - 1,18(N - 12,75); \\ b &= 27,32 - 2,69(N - 12,75); \\ c &= 36,40 + 0,444(N - 12,75); \\ d &= 9,10 + 0,722(N - 12,75). \end{aligned} \tag{8.25}$$

Для смеси веществ сначала, зная процентный массовый состав ВВ, находят число молей химических элементов каждого вещества в 1 кг ВВ. Для этого умножают число атомов в химической формуле на коэффициент, равный отношению массы данного вещества в 1 кг ВВ к массе одного моля ВВ $M_{\text{см}}$, выраженной в граммах ($M_{\text{см}} = 1000 \text{ г}$).

Пусть в аммотоле масса тротила составляет 50 %, т. е. в 1 кг ВВ – 500 г. Тогда число молей химических элементов тротила в 1 кг аммотола получим следующим образом:

$$a' = 7 \frac{500}{227} = 15,20;$$

$$b' = 5 \frac{500}{227} = 11,02;$$

$$c' = 6 \frac{500}{227} = 13,23;$$

$$d' = 3 \frac{500}{227} = 6,26.$$

Складывая соответствующие числа молей всех веществ, входящих в состав ВВ, получаем числа молей a , b , c , d для 1 кг смешанного взрывчатого вещества.

Пример 4. Рассчитаем химическую формулу аммонала 60/35/5.

В смесь входит 60 % аммонийной селитры NH_4NO_3 , 35 % тротила $\text{C}_6\text{H}_2(\text{NO}_2)_3\text{CH}_3$ и 5 % алюминия.

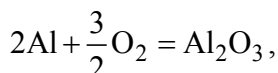
Преобразуем формулы: $\text{NH}_4\text{NO}_3 \rightarrow \text{H}_4\text{O}_3\text{N}_2$; $\text{C}_6\text{H}_2(\text{NO}_2)_3\text{CH}_3 \rightarrow \text{C}_7\text{H}_5\text{O}_6\text{N}_3$.

Посчитаем количество элементов на 1 кг ВВ. Запишем уравнение соединения всех веществ в молях, затем определим количество каждого элемента в каждом веществе и сложим количества соответствующих элементов:

$$\begin{aligned} & \frac{350}{227} \text{C}_7\text{H}_5\text{O}_6\text{N}_3 + \frac{600}{80} \text{H}_4\text{O}_3\text{N}_2 + \frac{50}{27} \text{Al} = \\ & = 1,54 \text{C}_7\text{H}_5\text{O}_6\text{N}_3 + 7,5 \text{H}_4\text{O}_3\text{N}_2 + 1,85 \text{Al} = \\ & = \text{C}_{7 \cdot 1,54} \text{H}_{5 \cdot 1,54} \text{O}_{6 \cdot 1,54} \text{N}_{3 \cdot 1,54} + \text{H}_{4 \cdot 7,5} \text{O}_{3 \cdot 7,5} \text{N}_{2 \cdot 7,5} + \text{Al}_{1,85} = \\ & = \text{C}_{10,78} \text{H}_{7,7} \text{O}_{9,24} \text{N}_{4,62} + \text{H}_{30} \text{O}_{22,5} \text{N}_{15} + \text{Al}_{1,85} = \\ & = \text{C}_{10,78} \text{H}_{7,7+30} \text{O}_{9,24+22,5} \text{N}_{4,62+15} \text{Al}_{1,85} = \\ & = \text{C}_{10,78} \text{H}_{37,7} \text{O}_{31,74} \text{N}_{19,62} \text{Al}_{1,85}. \end{aligned}$$

При расчете состава продуктов взрывчатого превращения необходимо знать реакцию взрывчатого превращения ВВ. Возможны различные реакции взаимодействия химических элементов, содержащихся во взрывчатом веществе. Однако наиболее вероятными будут реакции сгорания углерода в углекислоту CO_2 и водорода в воду H_2O , поэтому на состав продуктов взрывчатого разложения существенно влияет относительное содержание в ВВ кислорода O_2 , определяемое величиной кислородного коэффициента α , рассчитываемого по формуле (8.2).

Пример 5. Посчитаем кислородный баланс и коэффициент для аммотола 60/35/5. $C_{10,78}H_{37,7}O_{31,74}N_{19,62}Al_{1,85}$. В данной смеси появился алюминий. Его окисление происходит в соответствии с уравнением



т. е. для окисления 1 атома Al необходимо 1,5 атома кислорода.

В соответствии с определением кислородного коэффициента и баланса имеем

$$\alpha = \frac{c}{2a + \frac{b}{2} + \frac{3}{2}e} = \frac{31,74}{10,78 \cdot 2 + \frac{37,7}{2} + \frac{3}{2}1,85} = 0,735;$$

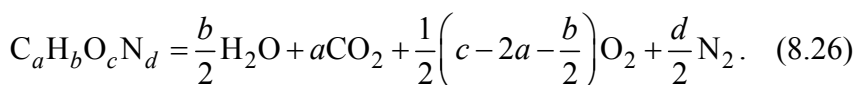
$$KB = \frac{16 \left[c - \left(2a + \frac{b}{2} + \frac{3}{2}e \right) \right]}{1000} 100 \% =$$

$$= \frac{16 \left[31,74 - \left(10,78 \cdot 2 + \frac{37,7}{2} + \frac{3}{2}1,85 \right) \right]}{1000} 100 \% = -18,312 \%,$$

где e – количество Al. Молярная масса равна 1000, так как мы уже пересчитали коэффициенты на 1 кг ВВ.

При $\alpha > 1$ ВВ имеет положительный кислородный баланс; при $\alpha = 1$ – нулевой и при $\alpha < 1$ – отрицательный. Все взрывчатые вещества в зависимости от величины α можно разделить на три группы и для каждой дать правило записи реакции взрывчатого превращения ВВ в **первом приближении**.

1-я группа ВВ ($\alpha \geq 1$) – весь водород окисляется в воду, весь углерод окисляется в углекислоту, оставшийся кислород и азот выделяются в элементарном состоянии:



2-я группа ВВ ($\alpha < 1$, но кислорода достаточно для превращения всего углерода в газы CO_2 и CO , т. е. $c \geq b/2 + a$) – весь водород окисляется в воду, весь углерод окисляется в окись углерода, оставшийся кислород окисляет окись углерода в угольную кислоту, азот выделяется в элементарном состоянии:

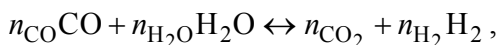
$$\begin{aligned} \text{C}_a\text{H}_b\text{O}_c\text{N}_d &= \frac{b}{2}\text{H}_2\text{O} + a\text{CO}_2 + \frac{1}{2}\left(c - 2a - \frac{b}{2}\right)\text{O}_2 + \frac{d}{2}\text{N}_2 = \\ &= \frac{b}{2}\text{H}_2\text{O} + \left(c - \frac{b}{2} - a\right)\text{CO}_2 + \left(2a + \frac{b}{2} - c\right)\text{CO} + \frac{d}{2}\text{N}_2. \end{aligned} \quad (8.27)$$

3-я группа ВВ ($\alpha < 1$, но кислорода недостаточно для превращения всего углерода в газ CO , т. е. $c < b/2 + a$) – весь водород окисляется в воду, оставшийся кислород окисляет углерод в окись углерода, оставшийся углерод и азот выделяются в элементарном состоянии:

$$\text{C}_a\text{H}_b\text{O}_c\text{N}_d = \frac{b}{2}\text{H}_2\text{O} + \left(c - \frac{b}{2}\right)\text{CO} + \left(a + \frac{b}{2} - c\right)\text{C} + \frac{d}{2}\text{N}_2. \quad (8.28)$$

Отметим, что с помощью формул (8.26)–(8.28) определяется состав продуктов взрывчатого превращения ВВ в **первом приближении**.

Между продуктами взрывчатого превращения могут протекать вторичные реакции и реакции диссоциации. Наиболее важная среди них – обратимая реакция водяного газа:



которая может протекать в продуктах взрывчатого превращения ВВ 2-й и 3-й группы.

Соотношения между концентрациями компонентов водяного газа n_{CO} , $n_{\text{H}_2\text{O}}$, n_{CO_2} и n_{H_2} зависят от величины константы равновесия k_1 (табл. 8.3), являющейся функцией температуры газа T :

$$\frac{n_{\text{CO}}n_{\text{H}_2\text{O}}}{n_{\text{CO}_2}n_{\text{H}_2}} = k_1. \quad (8.29)$$

Таблица 8.3

Значения константы равновесия k_1 , по данным Дж. Корнера [6]

T_1, K	0	100	200	300	400	500	600	700	800	900
1000	0,729	1,082	1,435	1,852	2,270	2,704	3,132	3,555	3,975	4,385
2000	4,782	5,161	5,520	5,852	6,115	6,433	6,694	6,939	7,167	7,379
3000	7,574	7,753	7,917	8,068	8,205	8,330	8,443	8,544	8,633	8,710
4000	8,775	8,974	9,141	9,290	9,419	9,572	9,705	9,840	9,977	10,070

Если величина T_1 будет превышать значение 4900 К, константу равновесия k_1 следует вычислить по формуле

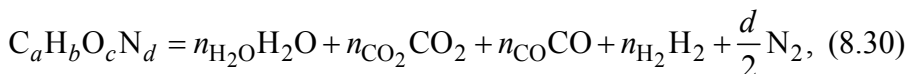
$$\lg k_1 = \left(1,3 - \frac{130}{T_1} \right) 0,97.$$

С учетом реакции водяного газа определяют состав продуктов взрывчатого превращения ВВ во **втором приближении**.

Примечание. Напоминаем, что для ВВ 1-й группы это приближение не делается, поскольку все элементы *полностью* окисляются до своих высших окислов.

При этом сначала для определения константы равновесия k_1 берут температуру взрывчатого превращения T_1 из первого приближения или задают T_1' из каких-либо других соображений. Затем уточняют константу равновесия k_1 по найденной во втором приближении температуре T_1'' и повторяют расчет несколько раз, добиваясь с требуемой точностью найденного значения теплоты взрывчатого превращения Q_w совпадения с предыдущим значением.

Во **втором приближении** реакцию взрывчатого превращения **2-й группы** записывают следующим образом:



где n_{CO} , n_{H_2O} , n_{CO_2} и n_{H_2} – искомые числа молей соответствующих веществ, входящих в состав продуктов взрывчатого превращения (стехиометрические коэффициенты).

Уравнение (8.30) используют для написания химической реакции взрывчатого превращения бездымных порохов и в том случае, когда по кислородному коэффициенту они относятся к 3-й группе ВВ.

Для определения четырех неизвестных необходимо составить четыре уравнения, связывающих их. Одним из уравнений будет равенство (8.29), а остальные три выражают равенство химических элементов С, Н и О в исходном веществе и в продуктах его разложения:

$$a = n_{\text{CO}_2} + n_{\text{CO}}; \quad b = 2n_{\text{H}_2\text{O}} + 2n_{\text{H}_2}; \quad c = n_{\text{H}_2\text{O}} + 2n_{\text{CO}_2} + n_{\text{CO}}.$$

Преобразуем последние равенства к виду

$$\begin{aligned} n_{\text{CO}} &= a - n_{\text{CO}_2}; & n_{\text{H}_2\text{O}} &= c - a - n_{\text{CO}_2}; \\ n_{\text{H}_2} &= \frac{1}{2}b - (c - a - n_{\text{CO}_2}) = \frac{1}{2}b - n_{\text{H}_2\text{O}} \end{aligned} \quad (8.31)$$

и исключим величины n_{CO} , $n_{\text{H}_2\text{O}}$, n_{H_2} из равенства (8.29). В результате получим квадратное уравнение относительно величины n_{CO_2} :

$$n_{\text{CO}_2}^2 + 2An_{\text{CO}_2} - \frac{a(c-a)}{k_1-1} = 0, \quad (8.32)$$

где

$$A = \frac{k_1 \left(\frac{b}{2} - c + a \right) + c}{2(k_1 - 1)}. \quad (8.33)$$

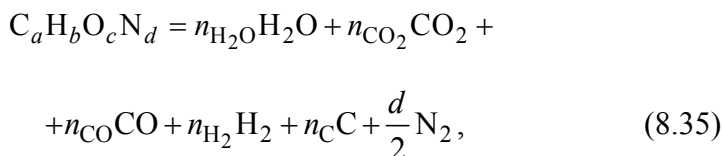
Решая уравнение (8.32), находим величину

$$n_{\text{CO}_2} = -A + \sqrt{A^2 + \frac{a'(c-a)}{k-1}}, \quad (8.34)$$

а затем с помощью равенств (8.31) – величины n_{CO} , $n_{\text{H}_2\text{O}}$, n_{H_2} .

Для проверки правильности определения чисел n_i по константе k_1 следует использовать формулу (8.29).

Для **3-й группы ВВ** реакция взрывчатого превращения во втором приближении записывается следующим образом:



где n_C – число молей углерода, выделяющегося в элементарном состоянии.

Из уравнения (8.28) первого приближения находим $a_C = a + b/2 - c$. Очевидно, в реакции водяного газа будет участвовать только часть атомов углерода:

$$a' = a - n_C = c - \frac{b}{2}. \quad (8.35a)$$

Поэтому при расчете состава продуктов взрывчатого превращения ВВ 3-й группы необходимо в равенствах (8.31), (8.33) и (8.34) вместо величины a подставлять величину a' . После расчета состава продуктов взрывчатого превращения для контроля целесообразно найти числа молей газообразных продуктов, которые в первом и втором приближении не должны изменяться. Можно определить молекулярную массу продуктов взрывчатого превращения $\mu_{ПВП}$, которая должна быть равна молекулярной массе ВВ $\mu_{ВВ}$.

Теплота взрывчатого превращения ВВ определяется на основе термохимического закона Г.И. Гесса как разность между теплотой образования продуктов взрывчатого превращения $Q_{ПВП}$ и теплотой образования ВВ $Q_{ВВ}$:

$$Q_{\omega} = Q_{ПВП} - Q_{ВВ}. \quad (8.36)$$

Теплотой образования сложного вещества называется количество теплоты, которое выделяется или поглощается при образовании одного моля вещества из составляющих его элементарных веществ. При этом принимается, что теплота образования элементарных веществ (H_2 , N_2 , O_2 , C) равна нулю.

Теплота образования продуктов взрывчатого превращения (ВП) равна сумме теплот образования сложных веществ, содержащихся в продуктах:

$$Q_{\text{ВП}} = \sum_i n_i Q_i, \quad (8.36a)$$

где Q_i – теплота образования i -го вещества (табл. 8.4).

Таблица 8.4

Теплота образования ВП

Название вещества	Формула	Q_B , кДж/моль	Q_i , кДж/моль
Вода (пар)	H ₂ O	241,763	57,7
Вода (жидкость)	H ₂ O	282,825	67,5
Углекислота	CO ₂	395,955	94,5
Оксид углерода	CO	110,616	26,4
Метан	CH ₄	77,096	18,4

Теплота образования нитроцеллюлозы $Q_{\text{нц}}$ может быть рассчитана по формуле, полученной по данным Дж. Корнера (кДж/кг):

$$Q_{\text{нц}} = 6377 - 301,68N, \quad (8.37)$$

где N – число, показывающее процентное содержание азота в нитроцеллюлозе.

Теплота образования ВВ определяется по теплоте сгорания ВВ, получаемой экспериментально путем сжигания навески ВВ в калориметрической бомбе. В дальнейшем будем считать ее известной.

Температура взрывчатого превращения t_1 (°C) определяется по теплоте взрывчатого превращения на основе равенства (8.12) с учетом зависимости (8.6) средней теплоемкости \bar{c}_w от температуры t_1 :

$$Q_w = (a_w + b_w t_1) t_1, \text{ или } b_w t_1^2 + a_w t_1 - Q_w = 0.$$

Решая квадратное уравнение, получим

$$t_1 = \frac{-a_w + \sqrt{a_w^2 + 4b_w Q_w}}{2b_w}, \quad (8.38)$$

после чего можно перейти к температуре взрывчатого превращения T_1 в градусах абсолютной шкалы: $T_1 = t_1 + 273$ К. Энергетические характеристики ВВ рассчитываются в следующем порядке:

- 1) определяем химическую формулу и молекулярную массу ВВ;
- 2) записываем реакцию взрывчатого превращения в первом приближении (или задаем температуру T'_1);
- 3) определяем величины Q_ω и T_1 в первом приближении;
- 4) находим константу равновесия k_1 ;
- 5) рассчитываем состав продуктов взрывчатого превращения;
- 6) проверяем расчет состава продуктов;
- 7) определяем величины Q_ω и T_1 во втором приближении;
- 8) уточняем константу равновесия k_1 и состав продуктов;
- 9) рассчитываем все энергетические характеристики.

При расчете следует обратить особое внимание на единицы измерения используемых и получаемых величин, которые должны быть однородными, а также на анализ полученных результатов.

8.3. ЭКСПРЕСС-МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК КОНДЕНСИРОВАННЫХ ВВ

Экспресс-методы базируются на установленной количественной связи физико-химических свойств ВВ с параметрами детонации. Они позволяют определить основные характеристики ВВ, в том числе и смесевых, без написания реакции взрывчатого разложения. Использование этих методов требует знания брутто-формулы и плотности ВВ.

Важную роль играет *коэффициент состава (константа состава)* $K_{ВВ}$. По существу, он устанавливает соотношение между атомами углерода и водорода в молекуле и учитывает связь между горючими и окислительными элементами, содержащимися в углеводородной части молекулы и эсилозофорных группах. Коэффициент состава рассчитывают по формуле

$$K_{ВВ} = \frac{0,5a + b + 4c + 4d}{M}. \quad (8.39)$$



Ниже приводятся основные расчетные зависимости и размерности, в которых они выражаются:

$$\begin{aligned}\gamma &= K_{\text{ВВ}} \sqrt{Q_{\omega}}; \\ p &= 12,2 \gamma \rho_0^2; \\ D &= \gamma^{1/2} (0,892 + 1,13 \rho_0),\end{aligned}\tag{8.40}$$

где Q_{ω} – теплота ВП, кал/г; ρ_0 – плотность ВВ, г/см³; p – давление детонации, кбар; D – скорость детонации, км/с.

Пример 6. Найдем давление и скорость детонации гексогена $\text{C}_3\text{H}_6\text{O}_6\text{N}_6$ с плотностью $\rho_0 = 1,82$ г/см³; теплота взрывчатого превращения $Q_{\omega} = 1370$ кал/г.

Найдем молекулярную массу: $M = 3 \cdot 12 + 6(1 + 16 + 14) = 222$ г/моль и коэффициент состава:

$$K_{\text{ВВ}} = \frac{0,5 \cdot 3 + 6 + 4 \cdot 6 + 4 \cdot 6}{222} = 0,25;$$

$$\gamma = K_{\text{ВВ}} \sqrt{Q_{\omega}} = 0,25 \sqrt{1370} = 9,25;$$

$$p = 12,2 \gamma \rho_0^2 = 373,8 \text{ кбар} = 37,38 \text{ ГПа};$$

$$D = \sqrt{\gamma} (0,892 + 1,13 \rho_0) = 8,96.$$

Как видим, характеристики приближенно совпадают с известными величинами.

Значения максимальной теплоты взрыва $Q_{\omega\text{max}}$, числа молей n и средней молекулярной массы $M_{\text{ср}}$ газообразных продуктов зависят от кислородного баланса и в случае положительного кислородного баланса вычисляются по формулам:

$$\begin{aligned}Q_{\omega\text{max}} &= \frac{28,9b + 94a - Q_{\text{ВВ}}}{M}; \\ n &= \frac{b + 2c + 2d}{4M}; \\ M_{\text{ср}} &= \frac{48a + 4b + 64c + 56d}{b + 2c + 2d};\end{aligned}\tag{8.41}$$

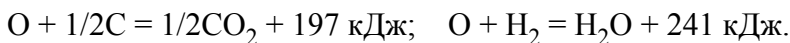
в случае же отрицательного баланса – по формулам:

$$Q_{\omega \max} = \frac{28,9b + 47(c - b/2) - Q_{\text{ВВ}}}{M};$$

$$n = \frac{b + 2c + 2d}{4M}; \quad (8.42)$$

$$M_{\text{ср}} = \frac{8b + 88c + 56d}{b + 2c + 2d}.$$

Значение $Q_{\omega \max}$ можно, не прибегая к написанию уравнения взрывчатого превращения, определить и по методу Авакяна, который основан на предположении, что предельное значение суммарной теплоты образования продуктов взрыва $\sum Q_{\text{ВП max}}$ может быть определено из условия, что диссоциация CO_2 и H_2O подавлена, а равновесие реакции $2\text{CO} = \text{CO}_2 + \text{C}$ и $\text{CO} + \text{H}_2 = \text{H}_2\text{O} + \text{C}$ смещено полностью вправо. При расчете $\sum Q_{\text{ВП max}}$ весь кислород переводится в H_2O , а оставшаяся часть идет на окисление углерода до CO_2 . В общем случае окисление последовательно полностью происходит по реакциям, имеющим больший тепловой эффект. Ниже приведены некоторые распространенные уравнения с тепловыми эффектами:



Пример 7. Рассчитаем максимальный тепловой эффект смеси 80 % аммонийной селитры, 15 % – динитротолуола и 5 % – алюминиевой пудры.

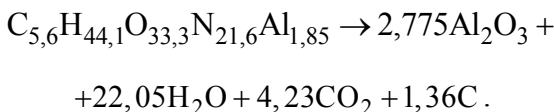
Запишем условную формулу 1 кг смеси ВВ:



Рассчитаем кислородный баланс:

$$\begin{aligned} \text{КБ} &= \frac{\left[c - \left(2a + \frac{b}{2} + \frac{3}{2}e \right) \right] 16}{1000} 100 = \\ &= \frac{16 \left[33,3 - (2 \cdot 5,6 + 44,1/2 + 1,85 \cdot 3/2) \right]}{1000} 100 = -4,36 \%. \end{aligned}$$

Поскольку кислородный баланс отрицательный, Q_{\max} считаем с наибольшим выделением тепла. Сначала окисляется весь алюминий (на один атом Al – 1,5 атома O), потом водород до воды (на один атом H – 0,5 O), затем углерод до углекислого газа (на один атом C – два атома O), остальной углерод останется в твердом состоянии. Запишем уравнение реакции:



Теперь по уравнению рассчитаем максимальную теплоту ВП:

$$Q_{\max} = 2,775 \cdot 1666,4 + 22,05 \cdot 240,6 + 4,23 \cdot 395,6 = 11602,9 \text{ кДж/кг}.$$

Как видно, экспресс-методы позволяют быстро, без особых трудностей, рассчитать все основные параметры смесевых ВВ.

8.4. ПРИМЕРЫ РАСЧЕТА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВВ РАЗЛИЧНЫХ ГРУПП

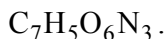
8.4.1. РАСЧЕТ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК БРИЗАНТНОГО ВВ 3-й ГРУППЫ

Требуется: определить состав продуктов взрывчатого превращения и энергетические характеристики бризантного ВВ 3-й группы.

Дано: бризантное ВВ – тротил $\text{C}_6\text{H}_2(\text{NO}_2)_3\text{CH}_3$; теплота образования $Q_{\text{ВВ}} = 42,319 \text{ кДж/моль}$ (при $\omega = \text{const}$); плотность $\rho = 1600 \text{ кг/м}^3$.

Решение

1. Запишем химическую формулу тротила:



2. Определим молекулярную массу ВВ $\mu_{ВВ}$ и молярную массу M :

$$\mu_{ВВ} = \sum n_i \mu_i = 7 \cdot 12 + 5 \cdot 1 + 6 \cdot 16 + 3 \cdot 14 = 227;$$

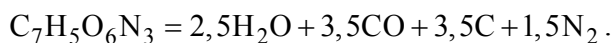
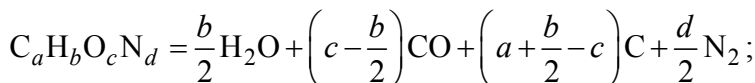
$$M_{ВВ} = 0,001 \mu_{ВВ} = 227 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль.}$$

3. Рассчитаем кислородный коэффициент:

$$\alpha = \frac{c}{2a + b/2} = \frac{6}{2 \cdot 7 + 5/2} = 0,363 < 1.$$

Поскольку, кроме того, выполняется неравенство $c < b/2 + a$ ($6 < 9,5$), это ВВ относится к 3-й группе.

4. Запишем реакцию взрывчатого превращения в первом приближении по уравнению (8.28):



5. Определим число молей газообразных и твердых веществ и их молекулярные массы:

$$n_{\text{газ}} = \sum_i n_i = 2,5 + 3,5 + 1,5;$$

$$\mu_{\text{газ}} = \sum_i n_i \mu_i = 2,5 \cdot 18 + 3,5 \cdot 28 + 1,5 \cdot 28 = 185;$$

$$n_{\text{ТВ}} = \sum_j n_j = 3,5;$$

$$\mu_{\text{ТВ}} = \sum_j n_j \mu_j = 3,5 \cdot 12 = 42;$$



$$\mu_{\text{TB}} = 0,001\mu_{\text{TB}} = 42 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}.$$

6. Рассчитаем удельный объем твердых продуктов взрывчатого превращения, принимая плотность графита $\rho_{\text{TB}} = 2,267 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$:

$$\bar{n}_{\text{TB}} = \frac{M_{r_{\text{TB}}}}{M_{r_{\text{BB}}}} = \frac{42 \cdot 10^{-3}}{227 \cdot 10^{-3}} = 0,185;$$

$$\alpha_{\text{TB}} = \frac{\bar{n}_{\text{TB}}}{\rho_{\text{TB}}} = \frac{0,185}{2,267 \cdot 10^3} = 8,16 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{кг}.$$

7. Найдем теплоту взрывчатого превращения Q_{ω} в первом приближении по формулам (8.36) и (8.36а), используя табл. 8.4:

$$Q_{\text{ПВП}} = \sum_i n_i Q_i = 2,5 \cdot 241,763 + 3,5 \cdot 110,616 = 991,563 \text{ кДж/моль};$$

$$Q_{\omega} = Q_{\text{ПВП}} - Q_{\text{BB}} = 991,563 - 42,312 = 949,224 \text{ кДж/моль}.$$

8. Рассчитаем температуру взрывчатого превращения по формуле (8.38), используя табл. 8.1:

$$a_w = \sum_i n_i a_{wi} = 2,5 \cdot 16,760 + 3,5 \cdot 20,112 + 3,5 \cdot 26,816 + \\ + 1,5 \cdot 20,112 = 236,316 \text{ Дж/(моль} \cdot ^\circ\text{C)};$$

$$b_w = \sum_i n_i b_{wi} = (2,5 \cdot 90,085 + 5,0 \cdot 18,855) 10^{-4} = \\ = 319,487 \cdot 10^{-4} \text{ Дж/(моль} \cdot ^\circ\text{C)};$$

$$t_1 = \frac{-a_w + \sqrt{a_w^2 + 4b_w Q_{\omega} \cdot 10^3}}{2b_w} = \\ = \frac{-236,316 + \sqrt{236,316^2 + 4 \cdot 319,487 \cdot 10^{-4} \cdot 949,241 \cdot 10^3}}{2 \cdot 319,487 \cdot 10^{-4}};$$

$$T_1 = t_1 + 273 = 2888,7 + 273 = 3161,7 \text{ К}.$$

9. Найдем константу равновесия k_1 , применяя линейное интерполирование табличной функции $k_1 = f(T_1)$ (табл. 8.5).

Таблица 8.5

Значения константы равновесия k_1

T_1, K	3100	3161	3200
k_1	7,753	7,853	7,917

10. Рассчитаем состав продуктов взрывчатого превращения во втором приближении по формулам (8.33), (8.34), (8.31), принимая, что количество элементарного углерода и азота в продуктах сохраняется. Зная, что в реакции водяного газа будет участвовать только часть атомов углерода, с учетом формулы (8.35а) запишем:

$$a' = a - n_{\text{C}} = 7 - 3,5 = 3,5,$$

$$A = \frac{k_1(b/2 - c + a') + c}{2(k_1 - 1)} = \frac{7,853(5/2 - 6 + 3,5) + 6}{2(7,853 - 1)} = 0,438;$$

$$n_{\text{CO}_2} = -A + \sqrt{A^2 + \frac{a'(c - a')}{k_1 - 1}} = -0,438 + \sqrt{0,438^2 + \frac{3,5(6 - 3,5)}{7,853 - 1}} = 0,774;$$

$$n_{\text{CO}} = a' - n_{\text{CO}_2} = 3,5 - 0,774 = 2,726;$$

$$n_{\text{H}_2\text{O}} = c - a' - n_{\text{CO}_2} = 6 - 3,5 - 0,774 = 1,726;$$

$$n_{\text{H}_2} = b/2 - n_{\text{H}_2\text{O}} = 2,5 - 1,726 = 0,774.$$

11. Проверим расчет состава продуктов взрывчатого превращения по величинам $n_{\text{газ}}$ и k_1 :

$$n_{\text{газ}} = \sum_i n_i = 1,726 + 2,726 + 0,774 + 0,774 + 1,5 = 7,5;$$

$$k_1 = \frac{n_{\text{CO}} n_{\text{H}_2\text{O}}}{n_{\text{CO}_2} n_{\text{H}_2}} = \frac{2,726 \cdot 1,726}{0,774 \cdot 0,774} = 7,854.$$

Поскольку число молей газов по сравнению с первым приближением не изменилось, а константа равновесия, найденная по составу ПВП, совпала с исходной, расчет выполнен правильно.



12. Найдем теплоту взрывчатого превращения:

$$Q_{\text{ПВП}} = \sum_i n_i Q_i = 1,726 \cdot 241,763 + 2,726 \cdot 110,616 + \\ + 0,774 \cdot 395,955 = 1025,291 \text{ кДж/моль.}$$

13. Рассчитаем температуру взрывчатого превращения:

$$a_w = 1,726 \cdot 16,760 + 5,0 \cdot 20,112 + 3,5 \cdot 26,816 + \\ + 0,774 \cdot 37,710 = 252,531 \text{ Дж/(моль} \cdot ^\circ\text{C)};$$

$$b_w = (1,726 \cdot 90,085 + 5,0 \cdot 18,855 + 0,774 \cdot 24,302) 10^{-4} = \\ = 268,572 \cdot 10^{-4} \text{ Дж/(моль} \cdot ^\circ\text{C)};$$

$$t_1 = \frac{-252,531 + \sqrt{252,531^2 + 4 \cdot 268,572 \cdot 10^{-4} \cdot 982,972 \cdot 10^3}}{2 \cdot 268,572 \cdot 10^{-4}} = 2960,4 \text{ } ^\circ\text{C};$$

$$T_1 = 2960 + 273 = 3233 \text{ К.}$$

14. Уточним константу равновесия k_1 (табл. 8.6):

$$k_1 = 7,917 + \frac{33 \cdot 0,151}{100} = 7,967.$$

Таблица 8.6

Значения константы равновесия k_1

$T_1, \text{ К}$	3200	3233	3300
k_1	7,917	7,967	8,068

15. Уточним состав продуктов взрывчатого превращения:

$$A = \frac{k_1(b/2 - c + a') + c}{2(k_1 - 1)} = \frac{7,967(5/2 - 6 + 3,5) + 6}{2(7,967 - 1)} = 0,430;$$

$$n_{\text{CO}_2} = -A \sqrt{A^2 + \frac{a'(c - a')}{k_1 - 1}} = -0,430 + \sqrt{0,430^2 + \frac{3,5(6 - 3,5)}{7,967 - 1}} = 0,77;$$

$$n_{\text{CO}} = a' - n_{\text{CO}_2} = 3,50 - 0,77 = 2,73 ;$$

$$n_{\text{H}_2\text{O}} = c - a' - n_{\text{CO}_2} = 6 - 3,5 - 0,77 = 1,73 ;$$

$$n_{\text{H}_2} = b / 2 - n_{\text{H}_2\text{O}} = 2,5 - 1,73 = 0,77 .$$

Проверка величин k_1 и $n_{\text{газ}}$ по составу ПВП подтверждает правильность расчетов:

$$k_1 = \frac{n_{\text{CO}} n_{\text{H}_2\text{O}}}{n_{\text{CO}_2} n_{\text{H}_2}} = \frac{2,72 \cdot 1,73}{0,77 \cdot 0,77} = 7,966 ;$$

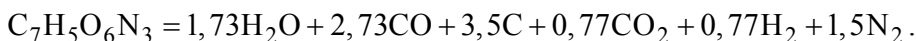
$$n_{\text{газ}} = 1,73 + 2,73 + 0,77 + 0,77 + 1,5 = 7,5 .$$

16. Найдем теплоту взрывчатого превращения:

$$Q_{\text{ПВП}} = \sum_i n_i Q_i = 1,73 \cdot 241,763 + 2,73 \cdot 110,616 + \\ + 0,774 \cdot 395,955 = 1025,116 \text{ кДж/моль};$$

$$Q_{\omega} = Q_{\text{ПВП}} - Q_{\text{ВВ}} = 1025,116 - 42,319 = 982,797 \text{ кДж/моль}.$$

Сравнение уточненного значения величины Q_{ω} с полученным в п. 12 показывает, что они совпадают с точностью до 1 кДж/моль, т. е. уточненный в п. 15 состав продуктов взрывчатого превращения можно считать окончательным. Запишем реакцию взрывчатого превращения во втором приближении:



Теперь можно приступить к расчету энергетических характеристик ВВ, округлив полученные значения в соответствии с данными табл. 8.2.

17. Найдем значение теплоты взрывчатого превращения Q_{ω} (или потенциал ВВ П) для 1 кг ВВ:

$$Q_{\omega} [\text{кДж/кг}] = \frac{Q_{\omega} [\text{кДж/моль}]}{M [\text{кг/моль}]} = \frac{982,797}{227 \cdot 10^{-3}} 4329,502 \approx 4329,5 \text{ кДж/кг}.$$

18. Рассчитаем температуру взрывчатого превращения по формуле (8.38):

$$a_w = 1,73 \cdot 16,760 + 5,0 \cdot 20,112 + 3,5 \cdot 26,816 + \\ + 0,77 \cdot 37,710 = 252,448 \text{ Дж/}(\text{моль} \cdot ^\circ\text{C});$$

$$b_w = (1,73 \cdot 90,085 + 5,0 \cdot 18,855 + 0,77 \cdot 24,302) 10^{-4} = \\ = 268,834 \cdot 10^{-4} \text{ Дж/}(\text{моль} \cdot ^\circ\text{C});$$

$$t_1 = \frac{-252,448 + \sqrt{252,448^2 + 4 \cdot 268,834 \cdot 10^{-4} \cdot 982,797 \cdot 10^3}}{2 \cdot 268,834 \cdot 10^{-4}} = \\ = 2960,02 \approx 2960 \text{ } ^\circ\text{C};$$

$$T_1 = 2960 + 273 = 3233 \text{ K.}$$

19. Рассчитаем удельный объем газообразных продуктов и удельную газовую постоянную R , силу ВВ f , удельную теплоемкость \bar{c}_w и параметр расширения θ по формулам (8.18), (8.5), (8.13), (8.6), (8.22) и (8.16) соответственно:

а) объем газообразных продуктов

$$\omega_1 = 22,4 \cdot 10^{-3} n_{\text{газ}} \frac{1000}{M} = 22,4 \cdot 10^{-3} \cdot 7,5 \frac{1000}{227} = 740 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{кг};$$

б) удельная газовая постоянная

$$R = n_{\text{газ}} R_0 = 7,5 \cdot 8,31441 = 62,358 \text{ Дж/}(\text{моль} \cdot \text{K});$$

в) сила тротила

$$f = R T_1 \frac{1000}{M} = 62,358 \cdot 3233 \frac{1000}{227} = 8881,20 \cdot 10^2 \approx 888 \cdot 10^3 \text{ Дж/кг};$$

г) средняя удельная теплоемкость ПВП

$$\bar{c}_w = a_w + b_w t_1 = 252,448 + 268,834 \cdot 10^{-4} \cdot 2960 = \\ = 331,908 \text{ Дж/}(\text{моль} \cdot ^\circ\text{C});$$

д) средняя удельная теплоемкость газообразных продуктов

$$\bar{c}'_{\omega} = \bar{c}_{\omega} - \sum_i n_c a_i = 331,908 - 3,5 \cdot 26,816 = 238,052 \text{ Дж}/(\text{моль} \cdot ^\circ\text{C});$$

е) параметр расширения

$$\theta = \frac{R}{\bar{c}'_{\omega}} = \frac{62,358}{238,052} = 0,26195 \approx 0,262.$$

20. Проверим расчет энергетических характеристик с помощью формулы (8.17) через параметр расширения θ .

Сначала рассчитаем теплоту взрывчатого превращения θ'_{ω} , соответствующую величине \bar{c}'_{ω} (газообразные продукты), из пропорции

$$\frac{Q_{\omega} - \bar{c}_{\omega}}{Q'_{\omega} - \bar{c}'_{\omega}}.$$

Тогда $Q'_{\omega} = Q_{\omega} \frac{\bar{c}'_{\omega}}{\bar{c}_{\omega}} = 4329,502 \frac{238,052}{331,908} = 31\,052 \cdot 10^2 \text{ Дж/кг}$; после чего получим

$$\theta = \frac{f}{Q'_{\omega}} \left(1 - \frac{291}{T_1} \right) = \frac{8881,20 \cdot 10^2}{31052,17 \cdot 10^2} \left(1 - \frac{291}{3233} \right) = 0,260.$$

Как видим, результат практически совпадает с величиной θ из п. 19, что говорит о правильности расчетов.

21. Дополнительно рассчитаем скорость детонации тротила и давление во фронте детонационной волны p_1 . При $k < 3$

$$D = \sqrt{1,5(k^2 - 1)Q_{\omega}} = \sqrt{1,5(3^2 - 1)4\,329\,502} = 7207,9 \approx 7200 \text{ м/с};$$

$$p_1 = \frac{\rho_0 D^2}{k+1} = \frac{1600 \cdot 7200^2}{4} = 2,074 \cdot 10^{10} = 20,7 \text{ ГПа}.$$



22. Найдем массовый процентный состав продуктов взрывчатого превращения тротила по формуле

$$\bar{n}_i = n_i \frac{\mu_i}{\mu_{\text{ВВ}}} 100 \, \%.$$

Например,

$$\bar{n}_{\text{H}_2\text{O}} = 1,73 \frac{18}{227} 100 = 13,7 \, \%.$$

Результаты запишем в табл. 8.7.

Таблица 8.7

Результаты расчетов

Вещество	H ₂ O	CO ₂	CO	H ₂	N ₂	C (графит)
$\bar{n}_i, \%$	13,7	14,9	33,7	0,7	18,5	18,5

23. Результаты расчетов энергетических характеристик тротила представлены в табл. 8.8.

Таблица 8.8

Результаты расчетов

Характеристика	$Q_{\omega}, \text{П, кДж/кг}$	$T_i, \text{К}$	$f, \text{Дж/кг}$	$\omega_1, \text{м}^3/\text{кг}$	$\alpha_{\text{ТВ}}, \text{м}^3/\text{кг}$	θ
Расчетное значение	4329,5	3233	$888 \cdot 10^3$	$740 \cdot 10^{-3}$	$0,08 \cdot 10^{-3}$	0,261
Характеристика	$D, \text{м/с}$	$P_1, \text{ГПа}$	$\bar{c}_{\omega}, \text{Дж/(моль} \cdot ^\circ\text{C)}$		$\bar{c}'_{\omega}, \text{Дж/(моль} \cdot ^\circ\text{C)}$	
Расчетное значение	7200	20,7	331,9		238,0	

24. Проанализируем полученные результаты и сделаем выводы с помощью контрольных вопросов.

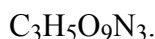
8.4.2. РАСЧЕТ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК БРИЗАНТНОГО ВВ 1-Й ГРУППЫ

Требуется: определить состав продуктов взрывчатого превращения и энергетические характеристики бризантного ВВ 1-й группы.

Дано: бризантное ВВ – нитроглицерин $C_3H_5(ONO_2)_3$; теплота образования $Q_{ВВ} = 344,837$ кДж/моль; плотность $\rho_0 = 1600$ кг/м³.

Решение

1. Запишем химическую формулу нитроглицерина:



2. Определим молекулярную массу ВВ $\mu_{ВВ}$ и молярную массу нитроглицерина M :

$$\mu_{ВВ} = \sum_i n_i \mu_i = 3 \cdot 12 + 5 \cdot 1 + 9 \cdot 16 + 3 \cdot 14 = 227;$$

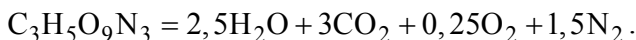
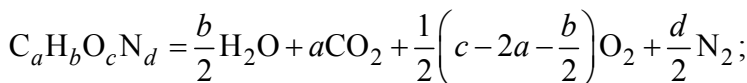
$$M = 0,001 \mu_{ВВ} = 227 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}.$$

3. Рассчитаем кислородный коэффициент:

$$\alpha = \frac{c}{2a + b/2} = \frac{9}{2 \cdot 3 + 5/2} = 1,05 > 1.$$

Данное ВВ относится к 1-й группе.

4. Запишем реакцию взрывчатого превращения по уравнению (8.26):



5. Определим число молей газообразных веществ и молекулярную массу газообразных ПВП:

$$n_{\text{газ}} = \sum_i n_i = 2,5 + 3 + 0,25 + 1,5 = 7,25;$$

$$\mu_{\text{газ}} = 227 \quad \text{при} \quad n_{\text{ТВ}} = 0.$$



6. Найдем теплоту взрывчатого превращения Q_{ω} по формулам (8.36), (8.36а), используя табл. 8.4:

$$Q_{\text{ПВП}} = \sum_i n_i Q_i = 2,5 \cdot 241,763 + 3,0 \cdot 395,955 = 1792,273 \text{ кДж/моль};$$

$$Q_{\omega} = 1792,273 - 344,837 = 1447,436 \text{ кДж/моль}.$$

7. Рассчитаем температуру взрывчатого превращения по формуле (8.38), используя табл. 8.1:

$$\begin{aligned} a_w &= \sum_i n_i a_{wi} = 2,5 \cdot 16,760 + 3 \cdot 37,710 + 1,75 \cdot 20,112 = \\ &= 190,226 \text{ Дж/(моль} \cdot ^\circ\text{C)}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} b_w &= \sum_i n_i b_{wi} = (2,5 \cdot 90,085 + 3,0 \cdot 24,302 + 1,75 \cdot 18,855) 10^{-4} = \\ &= 331,115 \cdot 10^{-4} \text{ Дж/(моль} \cdot ^\circ\text{C)}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} t_1 &= \frac{-a + \sqrt{a_w^2 + 4b_w Q_{\omega} 10^3}}{2b_w} = \\ &= \frac{-190,226 + \sqrt{190,226^2 + 4 \cdot 331,115 \cdot 10^{-4} \cdot 1447,436 \cdot 10^3}}{2 \cdot 331,5 \cdot 10^{-4}} = 4336 \text{ } ^\circ\text{C}; \end{aligned}$$

$$T_1 = 4336 + 273 = 4609 \text{ К}.$$

Для ВВ 1-й группы приближений не производим.

8. Приступим к расчету энергетических характеристик нитроглицерина.

Найдем значение теплоты взрывчатого превращения Q_{ω} для 1 кг ВВ:

$$Q_{\omega} [\text{кДж/кг}] = \frac{Q_{\omega} [\text{кДж/моль}]}{M [\text{кг/моль}]} = 1447,436 \frac{10^3}{227} = 6376,37 \text{ кДж/кг}.$$

9. Рассчитаем удельный объем газообразных продуктов ω_1 , удельную газовую постоянную R , силу ВВ f , удельную теплоем-

кость \bar{c}_w и параметр расширения θ по формулам (8.18), (8.4), (8.13), (8.5), (8.22) и (8.16) соответственно:

а) объем газообразных продуктов

$$\omega_1 = 22,4 \cdot 10^{-3} n_{\text{газ}} \frac{1000}{M} = 22,4 \cdot 10^{-3} \cdot 7,25 \frac{1000}{227} = 715 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{кг};$$

б) удельная газовая постоянная

$$R = n_{\text{газ}} R_0 = 7,25 \cdot 8,31441 = 60,28 \text{ Дж}/(\text{моль} \cdot \text{К});$$

в) сила нитроглицерина

$$f = R T_1 \frac{1000}{M} = 60,28 \cdot 4609 \frac{1000}{227} = 12239,27 \cdot 10^2 \approx 1224 \cdot 10^3 \text{ Дж}/\text{кг};$$

г) средняя удельная теплоемкость

$$\begin{aligned} \bar{c}_w &= a_w + b_w t_1 = 190,226 + 331,115 \cdot 10^{-4} \cdot 4336 = \\ &= 333,803 \text{ Дж}/(\text{моль} \cdot ^\circ\text{C}); \end{aligned}$$

$$\bar{c}'_w = \bar{c}_w = 333,803 \text{ Дж}/(\text{моль} \cdot ^\circ\text{C}). \text{ Твердых веществ нет;}$$

д) параметр расширения

$$\theta = \frac{R}{\bar{c}'_w} = \frac{60,28}{333,803} = 0,180.$$

10. Проверим расчет энергетических характеристик, рассчитаем с помощью формулы (8.17) параметр расширения θ ;

$$Q'_w = Q_w \frac{\bar{c}'_w}{\bar{c}_w} = 6376,37 \text{ кДж}/\text{кг} = 63763,70 \cdot 10^2 \text{ Дж}/\text{кг},$$

где Q'_w – теплота взрывчатого превращения, соответствующая параметру \bar{c}'_w ; по п. 9 параметр $\bar{c}'_w = \bar{c}_w$.

$$\theta = \frac{f}{Q'_w} \left(1 - \frac{291}{T_1} \right) = \frac{12239,27 \cdot 10^2}{63763,70 \cdot 10^2} \left(1 - \frac{291}{4609} \right) = 0,180.$$



Как видно, результат совпадает с п. 9, что говорит о правильности расчетов.

11. Дополнительно найдем скорость детонации нитроглицерина D и давление на фронте детонационной волны p_1 ; при $k = 3$

$$D = \sqrt{1,5(k^2 - 1)Q_{\omega}} = \sqrt{1,5(3^2 - 1)6376 \cdot 10^3} = 8747 \text{ м/с} \approx 8700 \text{ м/с};$$

$$p_1 = \frac{\rho_0 D^2}{k + 1} = \frac{1600 \cdot 8700^2}{3 + 1} = 3,027 \cdot 10^{10} \text{ Па} = 30,3 \text{ ГПа}.$$

12. Определим массовый процентный состав продуктов взрывчатого превращения нитроглицерина по формуле

$$\bar{n}_i = n_i \frac{M_i}{M_r} 100 \%;$$

$$\bar{n}_{\text{H}_2\text{O}} = 2,5 \frac{18}{227} 100 = 19,8 \%.$$

Результаты расчетов запишем в табл. 8.9 и 8.10.

Таблица 8.9

Результаты расчетов

Вещество	H ₂ O	CO ₂	O ₂	N ₂
$\bar{n}_i, \%$	19,8	58,2	3,5	18,5

Таблица 8.10

Результаты расчетов

Характеристики	$Q_{\omega}; \text{П, кДж/кг}$	$T_1, \text{К}$	$f, \text{Дж/кг}$	$\omega_1, \text{м}^3/\text{кг}$	θ	$D, \text{м/с}$	$P_1, \text{ГПа}$	$\bar{c}'_{\omega} = \bar{c}_{\omega}, \frac{\text{Дж}}{(\text{моль} \cdot ^\circ\text{C})}$
Расчетное значение	6376,4	4609	$1224 \cdot 10^3$	$715 \cdot 10^3$	0,18	8700	30,3	333,8

Таким образом, мы получим характеристики и расчетные значения энергетических параметров нитроглицерина.

8.4.3. РАСЧЕТ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МЕТАТЕЛЬНОГО ВВ

Требуется: определить состав продуктов взрывчатого превращения и энергетические характеристики метательного ВВ.

Дано: метательное ВВ – нитроглицериновый порох состава:

коллоксилин ($N = 12 \%$)	57 %
нитроглицерин	28 %
динитротолуол	11 %
централит	3 %
вазелин	1 %

Решение

1. Найдем условную химическую формулу пороха данного состава:

а) определим условную химическую формулу коллоксилина, содержащего 12 % азота, по формулам (8.24):

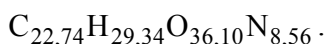
$$a = 21,85 - 1,18 (12 - 12,75) = 22,74,$$

$$b = 27,32 - 2,69 (12 - 12,75) = 29,34,$$

$$c = 36,40 + 0,444 (12 - 12,75) = 36,10,$$

$$d = 9,10 + 0,722 (12 - 12,75) = 8,56.$$

Следовательно, условная химическая формула коллоксилина



Проверим формулу по величине молекулярной массы коллоксилина $\mu_{\text{КС}}$ (в нашем случае $\mu_{\text{КС}} = 1000$): $\mu_{\text{КС}} = 22,74 \cdot 12 + 29,34 \cdot 1 + 36,10 \cdot 16 + 8,56 \cdot 14 = 999,66 \approx 1000$, т. е. формула определена правильно;

б) подсчитаем число молей С, Н, О и N, приходящихся на долю коллоксилина в 1 кг пороха. Если в 1 кг коллоксилина содержится 22,74 моля углерода; 29,34 моля водорода; 36,10 молей кислорода; 8,56 моля азота, то, следовательно, в 570 г коллоксилина, входящего в состав пороха, будет содержаться:

$$a^I = 22,74 \cdot 570 / 1000 = 12,96,$$

$$b^I = 29,34 \cdot 570 / 1000 = 16,70,$$



$$c^I = 36,10 \cdot 570 / 1000 = 20,58,$$

$$d^I = 8,56 \cdot 570 / 1000 = 4,88;$$

в) подсчитаем число молей С, Н, О и N в 1 кг пороха, приходящихся на долю:

- 280 г нитроглицерина; химическая формула $C_3H_5O_9N_3$; молекулярная масса $\mu_{нг} = 3 \cdot 12 + 5 \cdot 1 + 9 \cdot 16 + 3 \cdot 14 = 227$.

Получаем:

$$a^{II} = 3 \cdot 280 / 227 = 3,70,$$

$$b^{II} = 5 \cdot 280 / 227 = 6,20,$$

$$c^{II} = 9 \cdot 280 / 227 = 11,10,$$

$$d^{II} = 3 \cdot 280 / 227 = 3,70;$$

- 110 г динитротолуола; химическая формула $C_7H_6O_4N_2$; молекулярная масса $\mu_{дт} = 7 \cdot 12 + 6 \cdot 1 + 4 \cdot 16 + 2 \cdot 14 = 182$.

Получаем:

$$a^{III} = 7 \cdot 110 / 182 = 4,23,$$

$$b^{III} = 6 \cdot 110 / 182 = 3,62,$$

$$c^{III} = 4 \cdot 110 / 182 = 2,42,$$

$$d^{III} = 2 \cdot 110 / 182 = 1,21;$$

- 30 г централита № 1. Химическая формула $C_{17}H_{20}ON_2$, молекулярная масса $\mu_{цт} = 17 \cdot 12 + 20 \cdot 1 + 1 \cdot 16 + 2 \cdot 14 = 268$.

Получаем:

$$a^{IV} = 17 \cdot 30 / 268 = 1,90,$$

$$b^{IV} = 20 \cdot 30 / 268 = 2,22,$$

$$c^{IV} = 1 \cdot 30 / 268 = 0,11,$$

$$d^{IV} = 2 \cdot 30 / 268 = 0,22;$$

- 10 г вазелина; химическая формула $C_{20}H_{42}$, молекулярная масса $\mu_{ваз} = 20 \cdot 12 + 42 \cdot 1 = 282$.

Получаем:

$$a^V = 20 \cdot 10 / 282 = 0,70,$$

$$b^V = 42 \cdot 10 / 282 = 1,47.$$

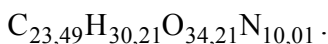
Результаты вычислений запишем в табл. 8.11.

Таблица 8.11

Результаты вычислений

Компоненты пороха	μ_i	Масса компонентов в 1 кг пороха, г	Число молей в 1 кг пороха, приходящегося на долю каждого компонента			
			C	H	O	N
Коллоксилин (№ 12)	1000	570	12,96	16,70	20,58	4,88
Нитроглицерин	227	280	3,70	6,20	11,10	3,70
Динитротолуол	182	110	4,23	3,62	2,42	1,21
Централит № 1	268	30	1,90	2,22	0,11	0,22
Вазелин	282	10	0,70	1,47	—	—

Следовательно, химическая формула пороха будет иметь вид



2. Проверим правильность формулы пороха по величине молекулярной массы: $\mu_{ВВ} = 23,49 \cdot 12 + 30,21 \cdot 1 + 34,21 \cdot 16 + 10,01 \cdot 14 = 999,59 \approx 1000$, т. е. расчет выполнен верно.

3. Рассчитаем кислородный коэффициент:

$$\alpha = \frac{c}{2a + b/2} = \frac{34,21}{2 \cdot 23,49 + 30,21/2} = 0,59 < 1.$$

Кроме того, имеем $c < b/2 + a(34,21 < 38,59)$, т. е. данный порох относится к 3-й группе ВВ.



4. Запишем реакцию взрывчатого превращения в первом приближении по формуле (8.28):

$$C_a H_b O_{c_1} N_d = \frac{b}{2} H_2O + \left(c - \frac{b}{2}\right) CO + \left(a + \frac{b}{2} - c\right) C + \frac{d}{2} N_2;$$

$$C_{23,49} H_{30,21} O_{34,21} N_{10,01} = 15,105 H_2O + 19,105 CO + \\ + 4,385 C + 5,005 N_2.$$

5. Определим число молей газообразных и твердых веществ и их относительные молекулярные массы:

$$n_{\text{газ}} = \sum_i n_i = 15,05 + 19,105 + 5,005 = 39,215;$$

$$\mu_{\text{газ}} = \sum_i n_i \mu_i = 15,05 \cdot 18 + 19,105 \cdot 28 + 5,005 \cdot 28 = 946,970;$$

$$n_{\text{ТВ}} = \sum_j n_j = 4,385;$$

$$\mu_{\text{ТВ}} = \sum_j n_j \mu_j = 4,385 \cdot 12 = 52,620; \quad M_r = 999,59.$$

6. Рассчитаем удельный объем твердых продуктов взрывчатого превращения $\alpha_{\text{ТВ}}$:

а) весовая доля твердого продукта в общей массе

$$\bar{n}_{\text{ТВ}} = \frac{\mu_{\text{ТВ}}}{\mu_{\text{ВВ}}} = \frac{52,620}{1000} = 0,053;$$

б) удельный объем

$$\alpha_{\text{ТВ}} = \frac{\bar{n}_{\text{ТВ}}}{\rho_{\text{ТВ}}} = \frac{0,053}{2,267 \cdot 10^3} = 0,023 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{кг}$$

при $\rho_{\text{ТВ}} = 2,267 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ (графит).

7. Найдем теплоту взрывчатого превращения (калорийность) пороха Q_{ω} , пользуясь данными табл. 8.4 и прил. 1:

$$Q_{\omega} = Q_{\text{ПВП}} - Q_{\text{ПП}}.$$

Теплота продуктов взрывчатого превращения

$$\begin{aligned} Q_{\text{ПВП}} &= \sum_i n_i Q_i = n_{\text{H}_2\text{O}} Q_{\text{H}_2\text{O}} + n_{\text{CO}} Q_{\text{CO}} = \\ &= 15,105 \cdot 241,763 + 19,105 \cdot 110,616 = \\ &= 3651,830 + 2113,318 = 5765,148 \text{ кДж/кг.} \end{aligned}$$

Рассчитаем теплоту образования компонентов пороха $Q_{\text{обр } i}$, кДж/кг.

Теплота образования коллоксилина определяется по формуле (8.37)

$$\begin{aligned} Q_{\text{кс}} &= 6377 - 301,68N = 6377 - 301,68 \cdot 12 = \\ &= 6377 - 3620 = 2757 \text{ кДж/кг.} \end{aligned}$$

Теплоту образования других компонентов рассчитаем, используя данные прил. 1, где приведены молярные теплоты, по формуле

$$Q_{\text{обр } i} = Q_{\text{обр } i} [\text{кДж/моль}] \frac{100}{M_i} \text{ кДж/кг,}$$

где M_i – молярная масса компонента, кг/моль.

Для нитроглицерина

$$Q_{\text{обр.нг}} = \frac{334,837 \cdot 1000}{227} = 1519,106 \text{ кДж/кг.}$$

Для динитротолуола

$$Q_{\text{обр.дт}} = \frac{49,652 \cdot 1000}{182} = 272,813 \text{ кДж/кг.}$$

Для централита № 1

$$Q_{\text{обр.цт}} = \frac{133,661 \cdot 1000}{268} = 498,735 \text{ кДж/кг.}$$



Для вазелина

$$Q_{\text{обр.ваз}} = \frac{498,61 \cdot 1000}{268} = 1768,120 \text{ кДж/кг.}$$

$$\begin{aligned} Q_{\text{ВВ}} &= \sum_i q_i Q_{\text{обр}i} = 0,57 \cdot 2757 + 0,28 \cdot 1519,106 + 0,11 \cdot 272,813 + \\ &\quad + 0,03 \cdot 498,735 + 0,01 \cdot 1768,120 = \\ &= 1571,490 + 425,349 + 30,009 + 14,962 + 17,681 = 2059,491 \text{ кДж/кг,} \end{aligned}$$

где q_i – i -й компонент состава пороха, кг;

$$Q_{\omega} = Q_{\text{ПВП}} - Q_{\text{ВВ}} = 5765,148 - 2059,491 = 3702,657 \text{ кДж/кг.}$$

8. Рассчитаем температуру взрывчатого превращения по формуле (8.38), используя данные из табл. 8.1:

$$\begin{aligned} a_w &= \sum_i n_i a_{wi} = n_{\text{H}_2\text{O}} a_{w\text{H}_2\text{O}} + (n_{\text{CO}} + n_{\text{N}_2}) a_{w\text{CO}_2\text{N}_2} + n_{\text{C}} a_{w\text{C}} = \\ &= 15,105 \cdot 16,760 + (19,105 + 5,005) 20,112 + 4,385 \cdot 26,816 = \\ &= 253,160 + 484,900 + 117,588 = 855,648 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{°C)}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} b_w &= \sum_i n_i b_{wi} = n_{\text{H}_3\text{O}} b_{w\text{H}_2\text{O}} + (n_{\text{CO}} + n_{\text{N}_2}) b_{w\text{CON}_2} = \\ &= [15,105 \cdot 90,085 + (19,105 + 5,005) 18,855] 10^{-4} = \\ &= (1360,734 + 454,594) 10^{-4} = 1815,328 \cdot 10^{-4} \text{ Дж/(кг} \cdot \text{°C}^2); \end{aligned}$$

$$t_1 = \frac{-a_w + \sqrt{a_w^2 + 4b_w Q_{\omega} 10^3}}{2b_w};$$

$$\begin{aligned} t_1 &= \frac{-855,648 + \sqrt{855,645^2 + 4 \cdot 1815,328 \cdot 10^{-4} \cdot 3702,657 \cdot 10^2}}{2 \cdot 1815,328 \cdot 10^{-4}} = \\ &= 2737,46 \approx 2735,5 \text{ °C}; \end{aligned}$$

$$T_1 = 2737,5 + 273 = 3010,5 \approx 3010 \text{ К.}$$

9. Найдем константу равновесия k_1 , применяя линейное интерполирование табличной функции (табл. 8.12).

Т а б л и ц а 8.12

Значения константы равновесия k_1

T_1, K	3000	3010	3100
k_1	7,574	7,592	7,753

10. Рассчитаем состав продуктов взрывчатого превращения по формулам (8.33), (8.34), (8.31), принимая, что элементарный углерод переходит в соединение CO_2 и CO ; $n_C = a = 23,49$;

$$A = \frac{k_1(b/2 - c + a) + c}{2(k_1 - 1)} = \frac{7,592 \left(\frac{30,21}{2} - 34,21 + 23,49 \right) + 34,21}{2(7,592 - 1)} = 5,12;$$

$$\begin{aligned} n_{\text{CO}_2} &= -A + \sqrt{A^2 + \frac{a(c-a)}{k_1 - 1}} = \\ &= -5,12 + \sqrt{5,12^2 + \frac{23,49(34,21 - 23,49)}{7,592 - 1}} = 2,906; \end{aligned}$$

$$n_{\text{CO}} = a - n_{\text{CO}_2} = 23,49 - 2,906 = 20,584;$$

$$n_{\text{H}_2\text{O}} = c - a - n_{\text{CO}_2} = 34,21 - 23,49 - 2,906 = 7,814;$$

$$n_{\text{H}_2} = b/2 - n_{\text{H}_2\text{O}} = 15,105 - 7,814 = 7,291.$$

11. Проверим расчет состава ПВП с учетом перехода углерода в газообразные соединения:

$$n_{\text{газ}} = \sum_i n_i = 7,814 + 20,584 + 2,906 + 7,291 + 5,005 = 43,60,$$



по п. 5 (для сравнения)

$$n_{\text{общ}} = n_{\text{газ}} + n_{\text{тв}} = 39,215 + 4,385 = 43,60;$$

$$\begin{aligned}\mu_{\text{ВВ}} &= 7,814 \cdot 18 + 20,584 + 2,906 \cdot 44 + 7,291 \cdot 2 + 5,005 \cdot 28 = \\ &= 999,59 \approx 1000.\end{aligned}$$

Число молей и молекулярная масса по сравнению с первым приближением не изменились, значит, расчет выполнен правильно.

Расчет константы равновесия k_1 по формуле (8.29) подтверждает правильность результатов:

$$k_1 = \frac{n_{\text{CO}} n_{\text{H}_2\text{O}}}{n_{\text{CO}_2} n_{\text{H}_2}} = \frac{20,584 \cdot 7,814}{2,906 \cdot 7,291} = 7,592.$$

12. Найдем теплоту взрывчатого превращения (калорийность) пороха во втором приближении:

$$\begin{aligned}Q_{\text{ПВП}} &= \sum_i n_i Q_i = n_{\text{H}_2\text{O}} Q_{\text{H}_2\text{O}} + n_{\text{CO}} Q_{\text{CO}} + n_{\text{CO}_2} Q_{\text{CO}_2} = \\ &= 7,814 \cdot 241,763 + 20,584 \cdot 10,616 + 2,906 \cdot 395,955 = \\ &= 1889,152 + 2276,970 + 1150,645 = 5316,717 \text{ кДж/кг};\end{aligned}$$

$$Q_{\omega} = Q_{\text{ПВП}} - Q_{\text{ВВ}} = 5316,717 - 2059,491 = 3257,226 \text{ кДж/кг}.$$

13. Рассчитаем температуру взрывчатого превращения:

$$\begin{aligned}a_w &= \sum_i n_i a_{wi} = n_{\text{H}_2\text{O}} a_{w\text{H}_2\text{O}} + (n_{\text{CO}} + n_{\text{H}_2} + n_{\text{N}_2}) a_{w\text{CO}_2\text{H}_2\text{N}_2} + n_{\text{CO}_2} a_{w\text{CO}_2} = \\ &= 7,814 \cdot 16,760 + (20,584 + 7,291 + 5,005) 20,112 + 2,906 \cdot 37,710 = \\ &= 130,963 + 661,282 + 109,585 = 901,83 \text{ Дж/(кг} \cdot ^\circ\text{C)};\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}b_w &= \sum_i n_i b_{wi} = n_{\text{H}_2\text{O}} b_{w\text{H}_2\text{O}} + (n_{\text{CO}} + n_{\text{H}_2} + n_{\text{N}_2}) b_{w\text{CO}_2\text{H}_2\text{N}_2} + n_{\text{CO}_2} b_{w\text{CO}_2} = \\ &= (7,814 \cdot 90,085 + 32,880 \cdot 18,855 + 2,906 \cdot 24,302) 10^{-4} = \\ &= (703,924 + 619,952 + 70,662) 10^{-4} = \\ &= (703,924 + 619,952 + 70,662) 10^{-4} = 1394,498 \cdot 10^{-4} \text{ Дж/(кг} \cdot ^\circ\text{C)};\end{aligned}$$



$$t_1 = \frac{-a_w + \sqrt{a_w^2 + 4b_w Q_w \cdot 10^3}}{2b_w} =$$

$$= \frac{-901,83 + \sqrt{901,83^2 + 4 \cdot 1394,498 \cdot 10^{-4} \cdot 3257,226 \cdot 10^3}}{2 \cdot 1394,498 \cdot 10^{-4}} = 2581,4 \text{ } ^\circ\text{C};$$

$$T_1 = 2581 + 273 = 2854 \text{ K.}$$

14. Уточним константу равновесия k_1 (табл. 8.13).

Таблица 8.13

Значение константы равновесия k_1

$T, \text{ K}$	2800	2854	2900
k_1	7,167	7,281	7,379

15. Уточним состав продуктов взрывчатого превращения:

$$A = \frac{k_1(b/2 - c + a) + c}{2(k_1 - 1)} = \frac{7,281 \left(\frac{30,21}{2} - 34,21 + 23,49 \right) + 34,21}{2(7,281 - 1)} = 5,265;$$

$$n_{\text{CO}_2} = -A + \sqrt{A^2 + \frac{a(c-a)}{k_1 - 1}} =$$

$$= -5,265 + \sqrt{5,265^2 + \frac{23,49(34,21 - 23,49)}{7,281 - 1}} = 2,97;$$

$$n_{\text{CO}} = a - n_{\text{CO}_2} = 23,49 - 2,97 = 20,52;$$

$$n_{\text{H}_2\text{O}} = c - a - n_{\text{CO}_2} = 34,21 - 23,49 - 2,97 = 7,75;$$

$$n_{\text{H}_2} = \frac{b}{2} - n_{\text{H}_2\text{O}} = 15,105 - 7,750 = 7,355.$$

16. Снова проверим результат расчета по молекулярной массе μ , по числу газообразных молей $n_{\text{газ}}$ и по константе равновесия k_1 :

$$\begin{aligned}\mu &= 7,75 \cdot 18 + 20,52 \cdot 28 + 2,97 \cdot 44 + 7,355 \cdot 2 + 5,005 \cdot 28 = \\ &= 139,50 + 574,56 + 130,68 + 14,71 + 140,14 = 999,59;\end{aligned}$$

$$n_{\text{газ}} = 7,75 + 20,52 + 2,97 + 7,355 + 5,005 = 43,60;$$

$$k_1 = \frac{n_{\text{CO}} n_{\text{H}_2\text{O}}}{n_{\text{CO}_2} n_{\text{H}_2}} = \frac{20,52 \cdot 7,75}{2,97 \cdot 7,355} = 7,280.$$

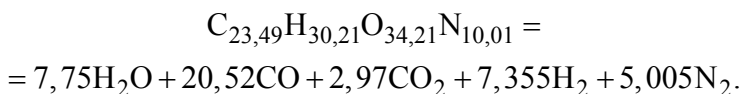
Практическое совпадение сравниваемых величин говорит о правильности результатов.

17. Уточним теплоту взрывчатого превращения:

$$\begin{aligned}Q_{\text{ПВП}} &= \sum_i n_i Q_i = n_{\text{H}_2\text{O}} Q_{\text{H}_2\text{O}} + n_{\text{CO}} Q_{\text{CO}} + n_{\text{CO}_2} Q_{\text{CO}_2} = \\ &= 7,75 \cdot 241,763 + 20,52 \cdot 110,606 + 2,97 \cdot 395,955 = \\ &= 1873,663 + 2269,635 + 1175,986 = 5319,28 \text{ кДж/кг};\end{aligned}$$

$$Q_w = Q_{\text{ПВП}} - Q_{\text{ВВ}} = 5319,28 - 2059,49 = 3259,79 \text{ кДж/кг}.$$

На этом расчет теплоты Q_w и состава ПВП закончим, а при необходимости процесс сближения можно продолжать. Запишем уравнение реакции взрывчатого превращения во втором приближении:



Теперь можно перейти к расчету энергетических характеристик.

Рассчитаем температуру взрывчатого превращения:

$$\begin{aligned}a_w &= \sum_i n_i a_{wi} = 7,75 \cdot 16,760 + 2,970 \cdot 3710 + 32,880 \cdot 20,112 = \\ &= 903,171 \text{ Дж/(кг} \cdot ^\circ\text{C)};\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}b_w &= \sum_i n_i b_{wi} = (7,75 \cdot 90,085 + 32,880 \cdot 18,855 + 2,97 \cdot 24,302)10^{-4} = \\ &= 1390,228 \cdot 10^{-4} \text{ Дж/(кг} \cdot ^\circ\text{C)};\end{aligned}$$

$$t_1 = \frac{-903,171 + \sqrt{903,171^2 + 4 \cdot 1390,288 \cdot 10^{-4} \cdot 3259,79 \cdot 10^3}}{2 \cdot 1390,288 \cdot 10^{-4}} =$$

$$= 2882,58 \approx 2582 \text{ } ^\circ\text{C};$$

$$T_1 = 2582 + 273 = 2855 \text{ K}.$$

18. Рассчитаем удельный объем газообразных продуктов ω_1 , удельную газовую постоянную R , силу ВВ f , удельную теплоемкость \bar{c}_ω и параметр расширения θ по формулам (8.18), (8.4), (8.13), (8.5), (8.22) и (8.16) соответственно:

а) объем газообразных продуктов

$$\omega_1 = 22,4 \cdot 10^{-3} n_{\text{газ}} \frac{1000}{1000} = 976,4 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{кг};$$

б) удельная газовая постоянная ($n_{\text{газ}} = 43,60$)

$$R = n_{\text{газ}} R_0 = 43,60 \cdot 8,31441 = 362,508 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{K});$$

в) сила пороха

$$f = RT_1 \frac{1000}{1000} = 362,508 \cdot 2855 \frac{1000}{1000} = 10349,61 \cdot 10^2 \approx 1035 \cdot 10^3 \text{ Дж}/\text{кг};$$

г) средняя удельная теплоемкость

$$\bar{c}_\omega = a_w + b_w t_1 = 903,171 + 1390,288 \cdot 10^{-4} \cdot 2582 = 1262,143 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C});$$

д) параметр расширения

$$\theta = \frac{R}{\bar{c}_\omega} = \frac{362,508}{1262,143} = 0,287.$$

19. Проверим расчет энергетических характеристик, рассчитав с помощью формулы (8.17) параметр расширения θ :

$$\theta = \frac{f}{Q'_\omega} \left(1 - \frac{291}{T_1} \right) = \frac{10349,61 \cdot 10^2}{32597,9 \cdot 10^2} \left(1 - \frac{291}{2855} \right) = 0,286.$$

Полученный результат почти совпадает с результатом п. 18, что говорит о правильности расчетов.

20. Дополнительно найдем скорость детонации D нитроглицеринового пороха и давление на фронте детонационной волны p_1 при $k = 3$:



$$D = \sqrt{1,5(k^2 - 1)Q_\omega} = \sqrt{1,5(3^2 - 1)3259 \cdot 10^3} = 6253,6 \text{ м/с} \approx 6250 \text{ м/с};$$

$$p_1 = \frac{\rho_0 D^2}{k+1} = \frac{1600 \cdot 6250^2}{3+1} = 1,562 \cdot 10^{10} \text{ Па} = 15,6 \text{ ГПа}.$$

21. Найдем массовый процентный состав продуктов взрывчатого превращения пороха по формуле

$$\bar{n}_i = n_i \frac{M_i}{M_r} 100 \%;$$

$$\bar{n}_{\text{H}_2\text{O}} = 7,75 \frac{18}{1000} 100 = 13,9 \%$$

и результаты запишем в табл. 8.14.

Таблица 8.14

Состав продуктов ВП

Вещество	H ₂ O	CO ₂	CO	N ₂	H ₂
$\bar{n}_i, \%$	13,9	13,1	57,5	14,0	1,5

22. Результаты расчетов энергетических характеристик рассмотренного пороха представим в табл. 8.15.

Таблица 8.15

Результаты расчетов

Характеристики	$Q_\omega, \text{ П, кДж/кг}$	$T_1, \text{ К}$	$f, \text{ Дж/кг}$	$\omega_1, \text{ м}^3/\text{кг}$	θ	$D, \text{ м/с}$	$p_1, \text{ ГПа}$	$\bar{c}'_\omega = \bar{c}_\omega, \frac{\text{Дж}}{(\text{моль} \cdot ^\circ\text{C})}$
Расчетное значение	3259,8	2855	$1035 \cdot 10^3$	$976 \cdot 10^3$	0,287	6250	15,6	1262,1

23. Проанализируем полученные результаты и сделаем выводы с помощью контрольных вопросов.

Вопросы для самоконтроля

1. В чем заключается метод последовательных приближений и сближений при расчете энергетических характеристик?
2. Назначение компонентов нитроглицеринового пороха: коллоксилина, нитроглицерина, динитротолуола, централита и вазелина.
3. Какие пороха и почему называют «холодными» и за счет чего их получают?
4. В уравнении взрывчатого превращения первого приближения находился углерод, тогда как в последующих уравнениях углерода не стало. Объясните причины.
5. Проверьте формулы (8.17) и (8.38) по размерностям входящих в них величин.
6. Оцените горючие свойства продуктов взрывчатого превращения рассмотренного пороха.
7. Чем отличается нитроглицериновый порох от пироксилинового?
8. В чем заключается сущность термохимического закона Г.И. Гесса?
9. По какому принципу записывается реакция взрывчатого превращения в первом приближении?
10. В чем заключается сущность метода последовательных приближений определения состава ПВП во втором приближении?
11. К какой группе по кислородному балансу относится рассматриваемое ВВ?
12. Что собой представляют твердые продукты в рассматриваемом ВВ и как их можно обнаружить визуально при взрыве?
13. Почему и насколько различаются энергетические характеристики P и f ?
14. Поясните физическую сущность и формулу перевода молярной величины в удельную величину.
15. Чем различаются удельная газовая постоянная и универсальная газовая постоянная?
16. Какие физические параметры используются для определения температуры взрыва?
17. Что такое взрывчатые вещества?
18. Типы химических превращений.

19. Энергетические характеристики ВВ.
20. Кислородный баланс (КБ). Характеристика.
21. Кислородный коэффициент.
22. Теплота взрывчатого превращения ВВ.
23. Что такое потенциал ВВ?
24. Удельная теплоемкость ПВП.
25. Удельная внутренняя энергия ПВП.
26. Что такое сила ВВ?
27. Метод расчета энергетических характеристик ВВ.
28. 1-я группа ВВ ($\alpha \geq 1$).
29. 2-я группа ВВ ($\alpha < 1$, но кислорода достаточно для превращения всего углерода в газы CO_2 и CO , т. е. $c < b/2 + a$).
30. Порядок расчета энергетических характеристик ВВ.
31. Экспресс-методы оценки энергетических характеристик конденсированных ВВ.

Библиографический список

1. *Афанасьев Г. Т.* Инициирование твердых взрывчатых веществ ударом / Г. Т. Афанасьев, В. К. Боболев. – Москва : Наука, 1968. – 174 с.
2. Взрывчатые вещества. Т. 2. Основные свойства. Технология изготовления и переработки / под ред. Л. В. Фомичевой. – Саров : РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2007. – 452 с.
3. Физика взрыва. В 2 т. Т. 2 / под ред. Л. П. Орленко. – 3-е изд., перераб. – Москва : Физматлит, 2002. – 656 с.
4. Физика взрыва. В 2 т. Т. 1 / под ред. Л. П. Орленко. – 3-е изд., перераб. – Москва : Физматлит, 2002. – 832 с.
5. *Милевский К. Е.* Теория взрывчатых веществ: учебное пособие / К. Е. Милевский, А. В. Гуськов. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2001. – 139 с.
6. *Чурбанов Е. В.* Расчет энергетических характеристик : учебное пособие / Е. В. Чурбанов, А. Ф. Князев. – Ленинград : ЛМИ, 1981. – 47 с.
7. *Соловьев В. С.* Расчет энергетических характеристик ВВ / В. С. Соловьев, В. Н. Охитин. – Москва : ЦНИИНТИ, 1983. – 52 с.
8. *Марьин В. К.* Пороха, ракетные топлива и взрывчатые вещества / В. К. Марьин, В. П. Зеленский, Б. М. Орлов. – Москва : Минобороны, 1975. – 466 с.



9. Бандурин М. К. Сборник задач по теории взрывчатых веществ / М. К. Бандурин, Л. Г. Рукш. – Москва : Оборонгиз, 1959. – 190 с.

10. Теория горения и взрыва: высокоэнергетические материалы: учебное пособие / В. В. Андреев, А. В. Гуськов, К. Е. Милевский, Е. Ю. Слесарева. – Новосибирск : Юрайт, 2017. – 323 с.

11. Высокоэнергетические материалы : учебное пособие / В. В. Андреев, А. В. Гуськов, К. Е. Милевский, Е. Ю. Слесарева. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2013. – 326 с.

ГЛАВА 9

СОВРЕМЕННЫЕ СИСТЕМЫ ВЗРЫВАНИЯ, ВЗРЫВЧАТЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ТЕХНОЛОГИИ ВЗРЫВАНИЯ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ В ПРОМЫШЛЕННОСТИ ПРИ ВЕДЕНИИ ВЗРЫВНЫХ РАБОТ

9.1. ОСНОВНЫЕ ТИПЫ ВЗРЫВЧАТЫХ МАТЕРИАЛОВ, ПРИМЕНЯЕМЫХ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ВЗРЫВНЫХ РАБОТ

Количество энергии, выделяющейся при взрыве ВВ, относительно невелико – в пять-шесть раз меньше теплотворной способности нефти, однако реакция взрывного превращения ВВ не требует кислорода воздуха, поскольку он содержится в молекулах компонентов ВВ в химически связанном виде (для кислородсодержащих ВВ). Этим достигается большая объемная концентрация энергии в единице массы, а в сочетании с малым временем протекания реакции – огромная мощность взрывного процесса. Образование газов – еще одно необходимое условие протекания процесса в форме взрыва. Быстрое, в течение микросекунд, превращение исходного ВВ в нагретые до высокой температуры газы сопровождается скачком давления – формированием *ударной волны*. Повышение давления в результате этого очень велико: для конденсированных ВВ до 10...30 ГПа. Энергия возбуждения реакции от слоя к слою ВВ в таком процессе передается посредством ударной волны. Такой режим взрывчатого превращения называют *детонацией*, а распространяющуюся по ВВ ударную волну, которая сопровождается химической реакцией, – *детонационной волной*. Скорость ее распространения (*скорость детонации*) достигает

нескольких километров в секунду. Величина развивающегося при детонации давления и профиль зависимости давления от времени существенно влияют на характер воздействия взрыва на окружающую среду. Другой формой макрогетерогенного взрывчатого превращения, быстро протекающего в узкой зоне, отделяющей продукты реакции от исходного вещества, является *горение*. В этом случае энергия от слоя к слою ВВ передается посредством тепловой волны и процесс не сопровождается существенным повышением давления (если система не находится в замкнутом объеме). Соответственно *скорость горения* невысока, для различных ВВ составляет от долей миллиметра до десятков сантиметров в секунду и существенно зависит от внешних условий – давления, исходной температуры ВВ и др.

По составу ВВ подразделяют на два больших класса: **индивидуальные** и **смесевые**. Среди индивидуальных вторичных ВВ, применяемых в снаряжательном производстве при изготовлении детонаторов и детонирующих шнуров, основные – это ТЭН, гексоген, октоген, тротил. Смесевые ВВ готовят, смешивая индивидуальные ВВ (смеси и сплавы *тротил–гексоген* – ТГ, тротил–ТЭН – пентолит и др.); скорость детонации индивидуальных ВВ и смесей на их основе при максимальной плотности заряжания свыше 7 км/с.

Отдельный класс смесевых ВВ, применяемых в промышленности, составляют **аммиачно-селитренные (АС) ВВ**. Наибольшее распространение получили простейшие смеси аммиачной селитры и дизельного топлива типа АС-ДТ (за рубежом AN-FO), как наиболее дешевые и безопасные промышленные ВВ без использования взрывчатого сенсibilизатора. Их скорость детонации, как правило, ниже 4 км/с, а плотность заряжания не превышает 1,4 г/см³. Они изготавливаются в порошкообразном, гранулированном и льющемся состоянии. Порошкообразные АС ВВ в основном выпускаются в патронированном виде с наличием взрывчатого сенсibilизатора (обычно тротил) типа аммонитов, реже – с одним маслом типа диаммонов и используются преимущественно для ведения взрывных работ в подземных условиях. Гранулированные АС ВВ имеют самый широкий ассортимент (гранулиты, игданиты, граммониты, гранитолы и т. д.), наибольший объем потребления и обеспечивают полную механизацию взрывных работ. Льющиеся АС ВВ представляют собой классы водосодержащих и эмульсионных составов, в

которых нитрат аммония применяется в виде высококонцентрированных растворов. Это позволяет резко увеличить плотность заряжания и получить высокие взрывчатые характеристики на уровне индивидуальных ВВ.

Вопросами влияния наполнения ВВ водой начали заниматься в середине прошлого века. В 1945 г. Н.М. Сытый отмечал, что при заливке пироксилиновых порохов водным раствором аммиачной селитры (АС) наблюдается значительное увеличение эффекта взрыва. А.Я. Апин описал экспериментальные исследования влияния различных наполнителей на показатели взрыва бездымных порохов и тротила. Он рассмотрел три функции влияния наполнителя: обволакивающего агента (флегматизатора), заполнителя пустот и разбавителя (нарушения контакта между зернами). Так, исходя из функции действия воды как обволакивающего агента (флегматизатора) оказалось невозможным применять в обводненных скважинах чешуируванный тротил (ТНТ) из-за его значительной удельной поверхности. В обводненных условиях с проточной водой стали применять водоустойчивое ПВВ – гранулотол, а в случае непроточной воды – смесь АС с повышенным содержанием ТНТ от 50 до 35 %. Вода или водный раствор АС в скважинном заряде находится в свободном состоянии, заполняя межгранульное пространство, и их содержание в объеме может достигать 40 %.

Выводы о влиянии воды как наполнителя в зарядах ПВВ:

- снижается ударно-волновая чувствительность состава;
- увеличивается критический диаметр;
- механизм взрывного разложения ВВ меняется с поверхностного горения на разложение в объеме по механизму теплового взрыва;
- увеличивается полнота превращения в детонационной волне;
- растет плотность заряжания;
- вода не участвует в детонационном превращении и не влияет на скорость детонации;
- потери энергии на сжатие воды незначительны.

Однако следует отметить, что в случае применения алюмотола в обводненных условиях вода принимает участие во вторичных реакциях с алюминием за плоскостью Чепмена–Жуге.

Американская фирма ADTEC в качестве альтернативы к гранулотолу разработала простейший состав – водоустойчивый ANFO.

В основу разработки этого состава были заложены следующие идеи:

- сокращение свободного объема межгранульного пространства;
- создание покрытия гранул АС, препятствующего проникновению воды в АС.

В таком составе используется пористая АС с размерами гранул от 0,5 до 1,0 мм, позволяющая оптимизировать объем межгранульного пространства. Покрытие АС обладает способностью создавать плотный гель, разбухающий при проникновении воды в межгранульное пространство и препятствующий дальнейшему проникновению воды к гранулам АС. Но такой состав требует предварительного «осушения» взрывных скважин перед их зарядкой и выполнения специальной системы инициирования зарядов. Следует также отметить единичные положительные опыты пневмозаряжения игданита под столб воды в обводненные скважины. При этом состав под водой выдерживали около одних суток. В данных опытах получить положительный результат помогло сокращение до минимума свободного межгранульного пространства. Однако этот опыт требует тщательного его изучения и проведения дополнительных исследований и разработки технологии, позволяющей получать надежные результаты. Горные и технологические условия настолько разнообразны, что данные технологии могут оказаться востребованы.

В исторической ретроспективе можно отметить следующие водосодержащие составы ПВВ:

- водосодержащие, поступавшие на горные предприятия в готовом виде (акватол АВ, акватол МГ, акванит ЗЛ);
- водосовместимые, поставляемые заводами в сухом виде и совмещаемые с водой в процессе заряжания (акватол 65/35, акватол М-15);
- водосодержащие взвеси гранулолота в высококонцентрированных водных растворах АС, насыщенных при температуре 90 °С (акватол 20 ГМ, карбатылы);
- растворосодержащие ВВ (ифзаниты, ипкониты). Представляют смесь сухой фазы, содержащей АС и ТНТ, и насыщенного высококонцентрированного водного раствора АС.

Использование водосодержащих составов позволило решить ряд проблем по применению ПВВ:

- возможность применения водосодержащих составов, обладающих высокой водоустойчивостью в любых условиях обводненности;
- более высокая в сравнении с гранулированными составами объемная плотность энергии;
- комплексная механизация работ по изготовлению и применению ПВВ.

Однако ряд проблем, связанных с наличием в составе взрывчатого сенсibilизатора (ТНТ), недостаточная стабильность и водоустойчивость составов привели к созданию нового класса водосодержащих ПВВ – эмульсионных. Эмульсионная матрица представляет собой обратную эмульсию (типа «вода в масле»), в которой сплошная фаза – это смесь нефтепродуктов с эмульгатором, а диспергируемая – высококонцентрированный водный раствор окислителя (АС или ее смеси с кальциевой или натриевой селитрой). Эмульсия состоит из мицелл размером 5...10 мкм, покрытых оболочкой масляной фазы, внутри которой находится водный раствор окислителя. Эмульсия имеет высокую степень водоустойчивости, при отсутствии в ней газовых включений ее плотность составляет примерно $1,4 \text{ г/см}^3$. Хотя эмульсионная матрица и имеет все необходимые компоненты для взрывчатого состава, но при такой плотности ее детонационная способность низкая и при диаметре заряда около 500 мм она не детонирует. Для сенсibilизации эмульсионной матрицы используют газификацию (насыщение пузырьками газа эмульсии), введение полых микросфер, введение взрывчатого сенсibilизатора или твердых микрочастиц (ферросилиция). Кроме этого смешение эмульсионной матрицы с игданитом, изготовленным на пористой селитре, при содержании последнего свыше 50 % обеспечивает надежную детонацию такого состава в скважинах диаметром 180...200 мм. Составы, изготовленные на основе эмульсионной матрицы, – эмуланы, содержащие в составе твердую фазу – игданит, обладают хорошей водоустойчивостью, а объемная плотность энергии может регулироваться соотношением эмульсионной матрицы и твердой фазы.

В водосодержащих составах вода является одним из составляющих компонентов ПВВ, в которых она может выполнять двойственную функцию: только технологическую роль в изготовлении состава (приготовление водного раствора АС) или роль полноценного компонента, участвующего в реакциях взрывчатого превращения составов с металлизированной горючей добавкой. Практика применения ПВВ с металлизированной горючей добавкой показывает заметный прирост эффекта действия взрыва этих составов.

Кроме этого следует также отметить неоднозначную роль воды (водного раствора АС), вводимой в простейшие составы ПВВ при пневмозаряжении. С одной стороны, введение воды в количестве 3...5 % препятствует образованию и накоплению статического электричества на зарядных шлангах и обеспечивает необходимый уровень безопасности работ. Однако эта вода создает на поверхности гранул АС пленку водного раствора, что препятствует загоранию гранул в поверхностном слое (данные составы разлагаются по механизму взрывного горения) и снижает детонационную способность составов ПВВ. Разработка способа, позволяющего снизить негативное влияние этой воды, сможет повысить взрывную эффективность данных составов ПВВ.

9.2. ИНДИВИДУАЛЬНЫЕ ВВ ДЛЯ КД

В снаряжательном производстве в основном применяются индивидуальные ВВ: ТЭН, гексоген, октоген – это белые сыпучие кристаллические порошки с удельной плотностью монокристалла 1,77; 1,82; 1,92 г/см³ и температурой плавления 139, 204 и 281 °С. Их используют для снаряжения бризантной части капсюлей-детонаторов (КД) и в качестве основного заряда обычных и термостойких детонирующих шнуров (ДШ). Рассмотрим особенности формирования детонации при горении этих порошковых вторичных ВВ. Знать их необходимо, чтобы правильно обращаться с ними при работе и снаряжении, а также чтобы создавать новые безопасные средства взрыва. Явление возникновения детонации при горении вторичных порошковых ВВ детально исследовалось в работах [15–17]. Современное представление о переходе горения вторичных порошковых ВВ в детонацию видится в форме многоста-

дийного процесса, возбуждаемого при воспламенении ВВ в прочной оболочке:

- 1) послойное горение;
- 2) конвективное горение;
- 3) детонация с малой скоростью;
- 4) нормальная детонация.

Послойное горение протекает при передаче тепла из зоны горения молекулярной *теплопроводностью*. При разработке ВВ прогноз скорости горения осуществляется по расчетной калорийности, довольно приближенно. Реальные значения определяются экспериментально по эмпирическим зависимостям от исходной плотности, пористости, температуры, давления и других параметров. При горении в замкнутом объеме рост давления приводит к приближению фронта пламени к конденсированному веществу, пробоем газообразными продуктами слоя расплава и проникновению их в поры ВВ. Режим кондуктивного распространения тепла в этом случае сменяется конвективным, и ускорившееся вследствие прогрессивного роста поверхности воспламенения горение называют **конвективным**. Скорость конвективного горения от послойного отличается в сотни и тысячи раз.

Расположим ВВ в порядке снижения критического давления срыва на конвективный режим горения из послойного: тротил – 2000 атм, пикриновая кислота – 800 атм, ТЭН – 550 атм, гексоген – 250 атм, гремучая ртуть – 100 атм, азид свинца + 2 % парафина – взрывается при любом давлении. Дальнейший рост давления при конвективном горении заряда ВВ в прочной оболочке приводит к увеличению скорости процесса до 1...2 км/с. Такие режимы горения уже **представляют собой детонацию с малой скоростью**. При достаточной прочности оболочки и диаметре заряда больше критического детонация с малой скоростью переходит в **нормальную детонацию**, соответствующую исходной плотности ВВ. В гремучей ртути и азиде свинца переход горения в детонацию реализуется практически мгновенно, и эти ВВ используются в качестве первичных (инициирующих) для снаряжения капсюлей-детонаторов. Если в порошковых ВВ удастся возбудить конвективное горение со скоростью более 500 м/с, то в них может развиваться переход в детонацию в зарядах длиной менее 20 мм и в оболочке, выдерживающей давление ~50...100 атм. Поэтому деление ВВ на вторичное и первичное – понятие условное и при обращении с ВВ требуются особые аккуратность и осторожность.

9.3. СИСТЕМЫ ИНИЦИИРОВАНИЯ ВВ

9.3.1. НЕЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ВЗРЫВАНИЯ

Неэлектрической системой взрываания называют, как правило, комплект средств взрываания, состоящий из детонирующего шнура (ДШ), пиротехнических реле (РП) и промежуточного заряда-боевика, инициируемого детонацией ДШ. Новосибирский механический завод «Искра» выпускает широкую гамму детонирующих шнуров, в которую попадают ДШ нормальной мощности общего назначения и термостойкие ДШ для прострелочных работ на нефтяных и газовых скважинах и детонирующие шнуры повышенной прочности. К первым относятся шнуры ДША, ДШВ, ДШЭ-12, ко вторым – ДШУ-33М и ДШТ-165, к третьим – ДШН (рис. 9.1).

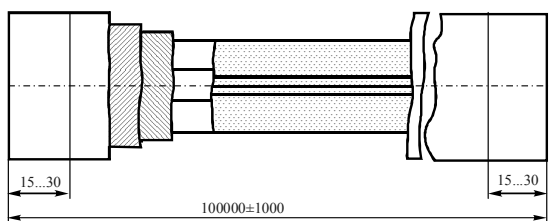


Рис. 9.1. Устройство детонирующего шнура

Отличие термостойких шнуров состоит в снаряжении термостойким взрывчатым веществом (ВВ) (гексоген, октоген) и в применении термостойких нитей в оплетке и термостойкого полимера на наружной герметизирующей оболочке. Шнуры ДШН выпускаются в трех вариантах по количеству ВВ на погонный метр: 10, 8, и 6 г/м, в качестве оплетки используются фибриллированные полипропиленовые нити, значительно увеличивающие разрывную прочность ДШ. В детонирующем шнуре нормальной мощности основой служит заряд порошкового ВВ (ТЭН), количество которого может варьироваться от 14 (ДШВ) до 10 (ДШН) г/м, в шнурах ДША и ДШЭ-12 – 12 г/м. Выпускаются предприятием и шнуры пониженной мощности: ДШН-8, ДШН-6 и ДШЭ-М, навеска ВВ в которых уменьшена до 8...6 г/м.

Взрывание с применением ДШ предусматривает порядное и межскважинное замедление при помощи пиротехнических реле (рис. 9.2).

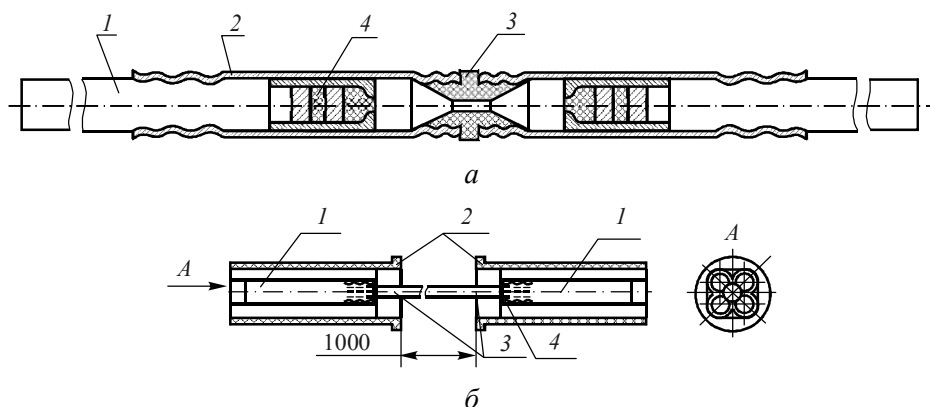


Рис. 9.2. Пиротехнические реле РП-Н (а) и РП-Д (б)

Пиротехническое реле двустороннего действия РП-Н представляет собой два капсюля-детонатора с замедлением 4, запальными отверстиями, направленными друг к другу и разделенными пластмассовой втулкой с коническими отверстиями 3, соединенными вершинами. С другой стороны капсюли-детонаторы соединены с отрезками детонирующего шнура 1. РП-Н имеет три серии замедления: 20, 35 и 50 мс.

Пиротехническое реле повышенной стойкости к механическим воздействиям РП-Д состоит из метрового отрезка ударно-волновой трубки (УВТ) 3, на концах которой размещены капсюли-детонаторы с замедлением 4, фиксируемые в блоке-соединителе 2, в котором ДШ проходит параллельно КД и касается УВТ. РП-Д имеет 7 серий замедления: 5, 20, 35, 45, 60, 80 и 100 мс. Таким образом, выпуск широкого спектра ДШ и реле позволяет реализовать практически все схемы неэлектрического взрыва.

9.3.2. НЕЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ВЗРЫВАНИЯ НА ОСНОВЕ УДАРНО-ВОЛНОВОЙ ТРУБКИ

Из инициирующих устройств (ИУ), выпускаемых предприятием, наиболее распространена система неэлектрического инициирования (СИНВ), состоящая из ударно-волновой трубки (УВТ) и капсюля-детонатора (мгновенного действия или с замедлением).

В 1969 г. в СССР был выдан патент на детонирующий шнур гражданину Швеции Пер Андерс Персону, представлявшему фирму «Нитро-Нобель АБ». Формула изобретения звучала следующим

образом: «Детонирующий шнур для инициирования капсюлей-дето-наторов, содержащий пластикатную, например, поливинилхлоридную трубчатую оболочку и сердцевину из реактивного вещества, отличающийся тем, что с целью снижения мощности и устранения возможности непосредственного инициирования взрывчатых веществ в нем сердцевина выполнена в виде нанесенного на внутреннюю поверхность оболочки слоя вторичного взрывчатого вещества, например ТЭНа (тетранитропентаэритрита), или порошкообразного алюминия весом от 0,005 до 0,5 г, предпочтительно 0,2...0,1 г на погонный метр шнура и не перекрывающего внутреннего поперечного сечения по всей ее длине».

Этот принцип трубки с нанесенным ВВ на внутренней поверхности сохранился и по настоящее время, только сейчас трубка многослойная, из пластмассы, с хорошей адгезией к ВВ, формируется первый слой и на него наносится ВВ (октоген), имеющее высокую температуру термического разложения (более 190 °С). Это важно, так как ВВ наносится на расплавленный полимер с температурой ~160 °С. Затем на первую оболочку наносят вторую и третью из полиэтиленов различной плотности, обеспечивая таким образом достаточную механическую прочность и герметичность трубки.

Современная УВТ имеет разрывную прочность ~30 кг при внешнем диаметре 3,6...3,0 мм и внутреннем ~1,0 мм. С целью оптического контроля навески в ВВ добавляют от 1 до 7 % алюминиевой пудры. Количество ВВ на погонный метр трубки при этом составляет 20 ± 6 мг. Температурный диапазон работоспособности УВТ зависит от применяемых полимеров с предельными значениями от -50 до +85 °С. Скорость распространения детонации по УВТ ~ 2 км/с. Детонационный процесс в УВТ представляет собой инициируемое ударной волной, распространяющейся по внутреннему каналу трубки, «взрывное горение» сорванных с поверхности частиц взрывчатого материала (ВМ), сгорание которых обеспечивает подпитку ударной волны и стационарность распространения процесса. Давление в ударном фронте составляет ~30...40 атм, его малая величина и кратковременность (~100 мкс) не нарушают целостности трубки. Наличие «пробки» из ВВ в канале трубки или сильного сужения канала может вызвать появление отраженной ударной волны и возрастание давления до величины, разрушающей оболочку, и, как следствие, возможное затухание процесса. Поэтому

нельзя переламывать и надрезать УВТ, так же как интенсивно ее трясти, что может вызвать осыпание ВВ и образование пробки. Практика взрывных работ показала, что при аккуратном обращении УВТ работает безотказно, и в перспективе все основные виды взрывных работ будут вестись с применением системы неэлектрического взрывания на основе УВТ.

Важнейшим требованием к ИУ является безопасность обращения с ними, высокая точность срабатывания и безотказность в работе. Так, при испытаниях на безопасность УВТ 1 вместе с входящим в систему «Искра» (рис. 9.3) капсюлем-детонатором 2 подвергается удару, имитирующему удар ковшом экскаватора (удар стального ударника весом 5 кг, падающего с высоты 10 м на снаряженное изделие); при этом не допускается ни единого случая срабатывания детонатора. Система «Искра» допущена к постоянному применению, как прошедшая испытания по всем контролируемым параметрам.

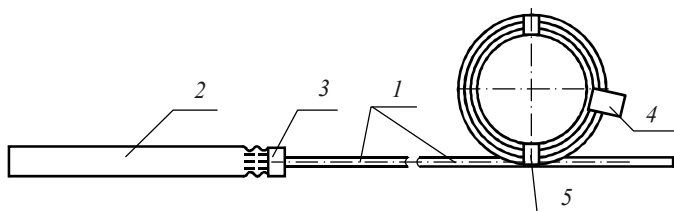


Рис. 9.3. Система «Искра»

Она выпускается в трех видах исполнения. «Искра»-С – для внутрискважинного взрывания с 11 ступенями замедления от 100 до 500 мс, «Искра»-Ш – для шпурового взрывания с более чем 30 ступенями замедления от 0 до 10 с и для поверхностного взрывания – «Искра»-П с 7 ступенями от 0 до 176 мс. Для соединения УВТ системы во взрывную цепь разработано и выпускается несколько типов соединителей для «Искра»-П и УВТ, для ДШ и УВТ и т. д. (рис. 9.4).

Точность времени работы каждой серии замедления определяется в основном временем горения пиротехнического состава, размещенного в капсюле-детонаторе с замедлением, инициируемым импульсом УВТ. Изготовить равномерно горящие пиротехнические составы практически невозможно, поэтому разработчики и изгото-

вители средств взрывания гарантируют, руководствуясь нормальным распределением разброса во времени срабатывания, непересекаемость соседних серий замедления. При этом номинально ошибка не должна превышать 10 %. В большинстве случаев такая точность удовлетворяет потребителей.

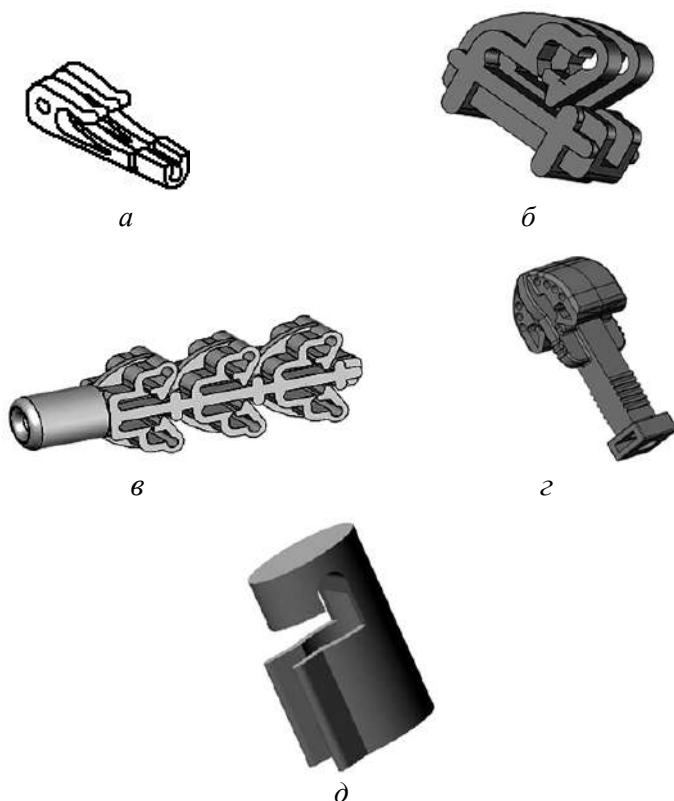


Рис. 9.4. Примеры соединителей системы «Искра»:

а – соединитель (ДШ-1УВТ), ИВШП 143.000.000-02; *б* – соединитель (ДШ-3УВТ), ИВШП 313.000-01, -02; *в* – соединитель (монтажный блок ДШ-18УВТ), ИВШП 326.000; *з* – соединитель (ДШ-6УВТ), ИВШП 292.000; *д* – соединитель (ЗМВ-ДШ), ИВШП 331.000

Однако при работе вблизи населенных пунктов, а также в условиях повышенной сейсмоопасности такие разбросы во времени могут привести к одновременному взрыванию большого количества зарядов, чем принято в расчетной схеме.

9.4. ЭЛЕКТРОДЕТОНАТОРЫ

Электродетонаторы ЭД-КЗ-ПКМ, ЭД-30-У-Н и ЭД-30-У-П с десятью сериями замедления (0...200 мс – ЭД-КЗ-ПКМ, 0...300 мс – ЭД-30-У-Н и ЭД-30-У-П) являются предохранительными, предназначены для инициирования зарядов в шахтах, опасных по газу и пыли. ЭД-30-У-Н и ЭД-30-У-П отличаются от ЭД-КЗ-ПКМ увеличенными интервалами серий замедления, а ЭД-30-У-П – повышенным значением безопасного тока 0,47 А в отличие от 0,20 А для ЭД-КЗ-ПКМ и ЭД-30-У-Н (рис. 9.5).

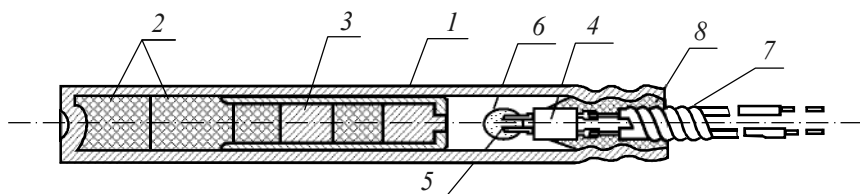


Рис. 9.5. Устройство электродетонатора с замедлением

По выводным проводам 7, проходящим через пластмассовую пробочку 8, вставленную в металлическую гильзу 1, протекает электрический ток. Мостик накаливания 5 нагревается и выделяет тепло, вызывающее зажигание воспламенительной головки 6, в составе которой находится высокочувствительный к нагреву воспламенитель. Форс огня воспламенителя направлен на чувствительный к пламени пиротехнический состав, в свою очередь зажигающий замедлительный состав, горение которого и формирует требуемую задержку взрыва, затем воспламеняется и детонирует инициирующее ВВ 3, возбуждающее детонацию основного заряда 2.

В предохранительных электродетонаторах, применяемых в условиях опасности взрыва пылегазовых смесей, на биметаллическую оболочку в области расположения ИВВ и БВВ наносится обмазка пламегасящего состава.

Электродетонаторы с замедлением ЭДЗН нормальной чувствительности с безопасным током 0,2 А имеют 36 серий замедления в диапазоне 20...10 000 мс при токе срабатывания 1 А. Электродетонаторы с пониженной чувствительностью ЭД-З-ИП обладают безопасным током 0,47 А и гарантийным током срабатывания 2 А с 37 сериями замедления от 5...10 000 мс, электродетонаторы ЭД-1-ЗТ

и ЭД-З-ИМ при одинаковом количестве серий замедления 36 и безопасном токе в 1 А имеют разные гарантийные токи срабатывания в 5 и 3,5 А соответственно. Увеличение безопасного тока достигается изменением материала и диаметра мостика накаливания электро-воспламенителя, а снижение механической чувствительности и повышение его точности срабатывания – пиротехническим составом, нанесенным на мостик.

Очевидно, что применение электровзрывания требует соблюдения правил монтажа электроцепи и ограничения для каждого типа электродетонаторов их количества при одновременном взрывании в зависимости от типа используемого взрывного прибора и сопротивления взрывной линии. Так, для ЭД-З-ИП эти требования сведены в табл. 9.1.

Таблица 9.1

Требования к монтажу электроцепи

Тип прибора	Предельное сопротивление взрывной цепи, Ом	Количество электродетонаторов
ПИВ-100, КВП-1/100	110	70
КВП-2/200	290	190
ЖЗ-2460 (3 режим)	200	130
КПИМ-3	270	180
ПВЗ-1500-2,3	500	150

Следует заметить, что современные «интеллектуальные» взрывные приборы типа ПВЗ-1500 имеют встроенные измерители сопротивления линии и сами указывают возможность подрыва того или иного количества электродетонаторов при задании их гарантийного тока срабатывания.

При взрывании приборами иного типа необходимо измерять сопротивление взрывной линии с помощью измерительных мостов с током измерения ниже 50 мкА. Еще одна особенность группового электровзрывания состоит в необходимости подбирать электродетонаторы в группу по сопротивлению. Разброс их сопротивлений

в группе не должен превышать 10 % (за рубежом не более 5 %), в противном случае при взрывании прибором достаточной мощности происходит в последовательной цепи отключение тока при срабатывании детонатора с наибольшим сопротивлением; если к этому моменту в остальных детонаторах мостик накаливания не обеспечил зажигания воспламенительного состава, то произойдет отказ их срабатывания.

9.4.1. ЭЛЕКТРОДЕТОНАТОРЫ С ЭЛЕКТРОННЫМ ЗАМЕДЛЕНИЕМ

Для повышения точности взрывания завод «Искра» с привлечением специалистов Новосибирского государственного университета (НГУ) разработал ИУ с электронным замедлением (ЭДЭЗ). Средства инициирования нового поколения представляют собой детонатор со встроенным сверхминиатюрным интеллектуальным микроконтроллером (рис. 9.6).

Электронные детонаторы используются в основном в горной промышленности, а также МЧС и при проведении так называемых «бархатных» взрывов в окружении застройки. Такие детонаторы позволяют осуществлять инициирование групповых взрывов с заданной временной последовательностью. Временные задержки, обеспечиваемые электронными детонаторами, составляют 0...12 с, точность задания задержки – 1 мс. При проведении групповых взрывов электронные детонаторы с помощью двухпроводной взрывной линии соединяются через согласующий адаптер с портативным управляющим компьютером. Допустимая длина взрывной линии свыше 3000 м, допустимое количество детонаторов на одной взрывной линии 1000 шт. и более. Двухпроводная взрывная линия используется как для подачи питания к электронному детонатору, так и для передачи кодированных команд детонаторам и получения ответной информации от детонаторов. Оператор (взрывник) с помощью компьютера может тестировать детонаторы на смонтированной взрывной линии, задавать последовательность взрывания и выдавать команду «подрыв». После получения команды «подрыв» детонатор переходит в режим автономного питания, отсчитывает запрограммированное время и срабатывает даже при разрушении взрывной линии.



Рис. 9.6. Детонатор со встроенным сверхминиатюрным «интеллектуальным» микроконтроллером

Каждый детонатор имеет индивидуальный идентификационный номер, запрограммированный в процессе производства детонатора. Благодаря индивидуальному номеру оператор может обратиться к каждому детонатору независимо.

В отличие от детонаторов с пиротехническим замедлением электронные детонаторы при разлете не дают тлеющих осколков, что делает их безопасными при применении в шахтах, опасных по газу и пыли.

Детонаторы имеют встроенную защиту от бытовых источников тока (батареи, аккумуляторы, сеть 220 В). Это исключает возможность их несанкционированного применения. Наличие у детонаторов индивидуального идентификационного номера позволяет проследить пути их утечки в случае хищения.

Особенности применения электронных детонаторов затрудняют их использование в диверсионно-террористической деятельности. Для проведения взрыва кроме самих детонаторов требуется управляющий компьютер, согласующий адаптер, специальное программное обеспечение, а также предполагается определенный уровень подготовки исполнителей взрыва.

Анализ эксплуатационных характеристик электронных компонентов допускает изготовление специализированной конструкции ЭДЭЗ для работы при температуре +150 °С, что делает перспектив-

ным возможность создания на их основе систем для инициирования перфорационных и газогенерирующих зарядов в нефтяных и газовых скважинах.

9.4.2. ДЕТОНАТОР ПРОМЕЖУТОЧНЫЙ МАЛОГАБАРИТНЫЙ

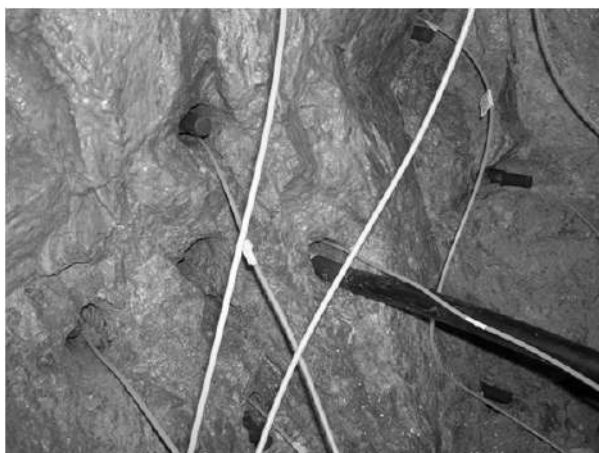
С целью улучшения условий проведения взрывных работ и повышения надежности инициирования шпуровых и скважинных зарядов промышленных взрывчатых веществ II класса завод разработал и освоил выпуск детонаторов промежуточных малогабаритных (ДПМ); они наиболее удобны в применении при механизированном зарядании шпуровых зарядов. В отличие от применения «боевика» из патронированных ВВ процесс зарядания существенно упрощен, более безопасен и удобен, уменьшает время зарядания забоя. ДПМ представляет собой бумажный или пластмассовый стакан, в котором размещен заряд пентолита 90/10. В стакане с одной стороны располагается капсюльное гнездо, имеющее посадочное место для капсюля-детонатора, с другой стороны стакан закрыт герметизирующей крышкой. Капсюльное гнездо находится внутри стакана, имеет фиксатор, надежно удерживающий капсюль-детонатор. ДПМ по заказам потребителя поставляется с переходником-парашютом, допускающим применение ДПМ с зарядными шлангами внутренним диаметром 19 мм. Испытания ДПМ, проводившиеся на руднике «Джульетта» Омсукчанской горно-геологической компании при зарядании забоя игданитом (пористая селитра) пневмозарядчиком «Аналодер» эжекторного типа (рис. 9.7), показали их существенное преимущество по сравнению с патронированными боевиками по качеству, по простоте и по стоимости буровзрывных работ.

По условиям применения ДПМ относятся ко II классу. Выпускаются ДПМ четырех типов:

- ДПМ-3 – заряд пентолита 90/10 массой 15 г. В корпусе из пластмассы наружным диаметром 18,5 мм, длиной 135 мм;
- ДПМ-3-Б1 – заряд пентолита 90/10 массой 15 г. В бумажном корпусе 18 мм диаметром и длиной 135 мм;
- ДПМ-3-Б2 – заряд пентолита 90/10 массой 30 г. В бумажном корпусе 18,5 мм диаметром, длиной 190 мм;
- ДПМ-С – заряд пентолита 90/10 массой 30 г.



а



б

Рис. 9.7. Заряжание забоя пористой селитрой

9.4.3. ЗАРЯДЫ МЯГКОГО ВЗРЫВАНИЯ

По существующей на предприятии технологии изготовления завод «Искра» освоил производство зарядов мягкого взрывания (ЗМВ), предназначенных для отделения и разделки блоков природного камня из скальных пород методом шпуровых и скважинных зарядов, а также при проходке горных выработок с использованием контурного взрывания. Предприятие может регулировать мощность



Рис. 9.8. Использование ЗМВ

и величину ЗМВ, адаптируя их к конкретным горно-геологическим условиям потребителя. На рис. 9.8 показано использование ЗМВ на одном из рудников компании «Бурятзолото».

9.5. ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ СРЕДСТВ ВЗРЫВАНИЯ

9.5.1. КОРОТКОЗАМЕДЛЕННОЕ ВЗРЫВАНИЕ (КЗВ)

Различные волновые и динамические процессы, происходящие при подрыве зарядов одновременно либо через промежутки времени, позволяют снизить расходы взрывчатых веществ и повысить эффективность их применения. Эти процессы применяются и изучаются при осуществлении так называемого *короткозамедленного взрыва*.

Короткозамедленным называется последовательное взрывание серий или отдельных зарядов с интервалами в тысячные доли секунды (миллисекунды). Поэтому иногда такой метод называют миллисекундным.

Короткозамедленное взрывание (КЗВ) впервые было применено в 1934–1935 гг. инженером К.А. Берлиным при проходке вертикального ствола с целью получения в центре забоя конусообразного навала породы. С 1950-х годов КЗВ начинают широко применять для снижения сейсмического действия взрыва и затем для улучшения дробления (с 1945 г. – в США, с 1949 г. – в Англии). На карьерах СССР этот метод стали внедрять с 1951 г.

Основные факторы, определяющие эффективность КЗВ, – это интервал замедления и последовательность разрушения участков массива и их движения (соударения) в процессе разлета горной массы. Эти параметры изменяются в зависимости от свойств пород, схемы расположения зарядов, задачи взрыва (дробление, перемещение породы и т. д.).

Получаемый при КЗВ эффект определяется следующими факторами:

- интерференцией волн напряжений от соседних зарядов;
- образованием дополнительных открытых поверхностей;
- соударением разлетающихся кусков при взрыве соседних зарядов.

При малых интервалах (до 5 мс) имеет место интерференция волн напряжений, при средних (15...200 мс) – образование дополнительных открытых поверхностей, при больших (>200 мс) – соударение. Их все следует рассматривать как составные элементы единого процесса взаимодействия зарядов при КЗВ.

9.5.2. ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ

Интерференция волн напряжений (рис. 9.9) происходит в том случае, когда направления смещения частиц от предыдущего и последующего взрывов совпадают. При этом увеличиваются суммарные смещения, напряжения и интенсивность разрушения массива.

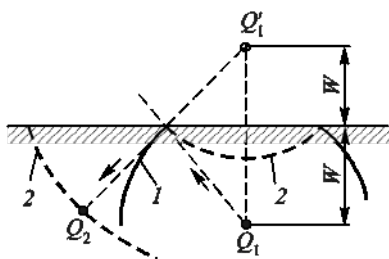


Рис. 9.9. Интерференция волн напряжений

Волна напряжений 1 от заряда распространяется до открытой поверхности и, отражаясь от нее, образует отраженную волну растяжения 2, которая распространяется в глубь массива. Взрыв второго заряда Q_2 должен быть произведен в момент, когда волна растяжения от первого заряда будет проходить через место расположения заряда Q_2 ,

что облегчит его действие и увеличит эффект разрушения, производимого в массиве.

Эффект интерференции волн напряжений может быть достигнут, если в каждом заряде устанавливать средства инициирования, срабатывающие в момент прохода через заряд волны напряжений от соседнего взрыва.

Длительность упругих колебаний в массиве породы после взрыва в зоне разрушения не превышает 4...6 мс, в то время как применяемые на практике интервалы замедлений, обеспечивающие улучшение дробления породы, составляют 20...70 мс. В трещиноватых породах с удалением от заряда амплитуда волн напряжений резко снижается и их роль в дроблении оказывается несущественной.

Поэтому использовать эффект интерференции волн напряжений для увеличения интенсивности дробления пород в реальных условиях проведения взрывных работ весьма затруднительно, поскольку для этого необходимо очень точно (до 0,1 мс) подбирать интервал замедления, к тому же скорость волн напряжений, интенсивность трещиноватости и расстояния между зарядами меняются от скважины к скважине.

9.5.3. СОЗДАНИЕ НОВЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Дробление породы всегда происходит с увеличением ее первоначального объема при смещении его в сторону открытых поверхностей. При недостаточной ширине щели разрушение будет затруднено, так как не успевшая сдвинуться на достаточную величину после первого взрыва порода станет оказывать дополнительное сопротивление следующему взрыву. Поэтому ширина пространства между нарушенной и ненарушенной частью массива должна быть пропорциональна линии наименьшего сопротивления (ЛНС) и минимальному коэффициенту разрыхления данной породы для достижения ее дробления.

Необходимая ширина пространства для получения открытой поверхности, по данным опытов, должна быть в пределах 1/20...1/30 линии наименьшего сопротивления.

Интервал замедления между взрывами зарядов следует выбирать исходя из того, что за это время разрушенная первой очередью часть породы должна отделиться от массива на расстояние, достаточное, чтобы образовавшаяся щель можно было считать открытой поверхностью.

9.5.4. СОУДАРЕНИЕ

Соударение перемещающихся от взрыва зарядов кусков породы есть результат того, что разные участки массива при взрыве имеют разные скорости и направления движения. При столкновении кусков происходит их дополнительное дробление. Опыты показывают, что наилучший эффект дробления породы получается при встречном соударении и если направления разлета кусков породы пересекаются под углом не менее 90° . В случае порядного взрывания соударение кусков также имеет место, поскольку передний фронт взорванной породы от последующего взрыва, движущийся со скоростью 20...60 м/с, соударяется с задним фронтом породы от предыдущего взрыва, движущимся со скоростью 3...6 м/с.

Расчетами установлено, что при разности скоростей движения более 15 м/с происходит дробление соударяющихся кусков. При взрыве с высокими удельными расходами ВВ разность скоростей может быть значительно выше, особенно при врубовых и встречных схемах КЗВ. Применение КЗВ в шахтах, опасных по взрыву метана и угольной пыли, позволяет в выработке или лаве завершить взрывы за такой суммарный интервал времени, в течение которого из разрушенного угля и дополнительных открытых поверхностей забоя не успеет выделяться количество метана, делающее атмосферу в забое взрывоопасной.

Применение короткозамедленного взрывания предъявляет определенные требования к качеству средств инициирования.

К видам взрывания можно отнести:

- 1) электроогневое взрывание (при помощи огнепроводного шнура и электрических зажигателей огнепроводного шнура – ЭЗОШ через зажигательные патроны ЗПБ);
- 2) электрическое взрывание;
- 3) взрывание при помощи детонирующего шнура и пиротехнических реле;
- 4) неэлектрическое и комбинированное взрывание;
- 5) неэлектрическое взрывание в шахтах, опасных по газу и пыли;
- 6) взрывание с применением электронных систем замедления.

Во всех этих видах в качестве начального инициирующего импульса применяют капсули-детонаторы (в трех последних с

замедлением). В короткозамедленном взрывании можно применять только взрывание при помощи детонирующего шнура, электрическое, неэлектрическое взрывание и электронное. Они могут обеспечить необходимую точность замедления. Одно из наиболее часто применяемых видов взрывания – электрическое – основано на применении электродетонатора с замедлением в качестве инициатора.

9.5.5. ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ВЗРЫВАНИЕ

Электрический способ взрывания в настоящее время является основным в шахтах, опасных по газу и пыли, для осуществления короткозамедленного взрывания и состоит в инициировании ВМ взрывом мгновенного или замедленного электродетонатора. Для инициирования электродетонатора формируется электровзрывная цепь (ЭЦ), в которую включены сопротивление мостиков электровоспламенителей электродетонаторов, их выводные провода, взрывная линия, соединяющая провода электродетонаторов и клеммы источника инициирующего тока. ЭЦ может быть последовательной, параллельной или смешанной; рассчитывается она по закону Ома и правилам Кирхгофа, при этом необходимо, чтобы источник тока обеспечил поступление в мостик каждого детонатора тока и импульса тока, гарантирующих срабатывание данного типа электродетонатора. Для исключения взрывов метановоздушных смесей и угольной пыли корпус предохранительного детонатора выполняется из биметалла, снаружи покрытого солью щелочного металла или меди: осколки в этом случае не воспламеняют взрывоопасные пылевоздушные и газовые смеси.

Основные проблемы в электровзрывании обусловлены неверным выбором инициирующего тока во взрывной цепи. Разработанный взрывной прибор сам решает эту проблему, тестируя линию, и в зависимости от типа взрываемого детонатора автоматически устанавливает необходимую величину и импульс инициирующего тока во взрывной цепи. Кроме того, при групповом взрывании Едиными правилами ведения взрывных работ регламентирован подбор детонаторов при последовательном взрывании по сопротивлению. (Это связано с опасностью отключения инициирующего тока в последовательной цепи самым чувствительным детонатором с наибольшим сопротивлением воспламенительного мостика и отка-

зом в работе последующих изделий. При параллельном соединении этого может не быть в случае достаточной мощности источника инициирующего тока и ненарушенной взрывной цепи.) Чувствительность к току определяется не только материалом и геометрией мостика воспламенителя, но и пиротехникой наносимого на него состава, поэтому в случае нарушения технологии изготовления даже при одинаковом сопротивлении мостика возможен отказ в последовательной взрывной цепи. Однако это исключительный случай, так как предприятие, сертифицированное по межгосударственному стандарту ГОСТ ISO 9001–2011 Системы менеджмента качества, гарантирует соответствие изделий техническому регламенту.

Другой причиной отказов при электровзрывании служит нарушение электроизоляции взрывной цепи (механическое повреждение, попадание негерметизированных скруток в токопроводящую среду) и, как следствие (рис. 9.10), шунтирование взрывной цепи токопроводящей средой. Поэтому непременно должен проводиться контроль цепи перед взрыванием, причем измеренное сопротивление не должно расходиться с расчетным более чем на 10 %.



Рис. 9.10. Разрушение гильзы давлением продуктов горения замедляющего состава в зоне маркировки

Выполнение требования механической маркировки электродетонаторов перед выдачей для взрывания мастеру-взрывнику при

существующих механических маркираторах также приводит к появлению отказов, поскольку дополнительная деформация гильзы детонатора в напряженной зиговой части дает разрушение гильзы по образующей под действием давления продуктов горения замедляющих составов. Маркировка также является активным центром коррозии у сейсмических детонаторов, обуславливая промокание через образующиеся трещины инициирующего ВВ. Это характерно для мгновенных сейсмических электродетонаторов, когда механически маркированные детонаторы несколько суток находятся в заряженном шнуре в солевом растворе. На рис. 9.10 гильза разрушена давлением продуктов горения замедляющего состава в зоне маркировки, отказы такого типа имели место на одном из рудников компании «Бурятзолото».

9.5.6. ВЗРЫВАНИЕ ЗАРЯДОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ ДЕТЕНИРУЮЩИХ ШНУРОВ И ПИРОТЕХНИЧЕСКИХ РЕЛЕ

Для проведения массовых взрывов на открытой поверхности и под землей в условиях неограниченности (или слабых ограничений) по акустическому и сейсмическому воздействию на окружающую среду применяется неэлектрическое взрывание зарядов с использованием ДШ и РП. Так, в 1990-х годах на угольных разрезах Райчихинска Амурской области при вскрышных работах по мерзлоте взрывание скважинных зарядов выполнялось только с применением детонирующего шнура. Для скважин глубиной до 10 м и при сетке 5 м × 5 м задержка, даваемая ДШ, составляет ~2...3 мс, взрывание производится диагональное с углом в 45 градусов, по отзыву специалистов разреза, с оптимальным разлетом и дроблением. Активное применение пиротехнических реле двустороннего действия началось в России в 80-х годах XX века. Однако возможности короткозамедленного взрывания ДШ с РП были ограничены тремя степенями замедления пиротехнических реле. Тем не менее применение 20, 35 и 50 мс замедления позволяло управлять взрывом, разделяя взрывание отдельных рядов скважин и реализацию схем с управляемым соударением (дроблением) и выбросом взрывающей породы. Кроме того, двусторонность пиротехнического реле повышает надежность взрывания при обрыве взрывной цепи с одной из сторон (рис. 9.11).

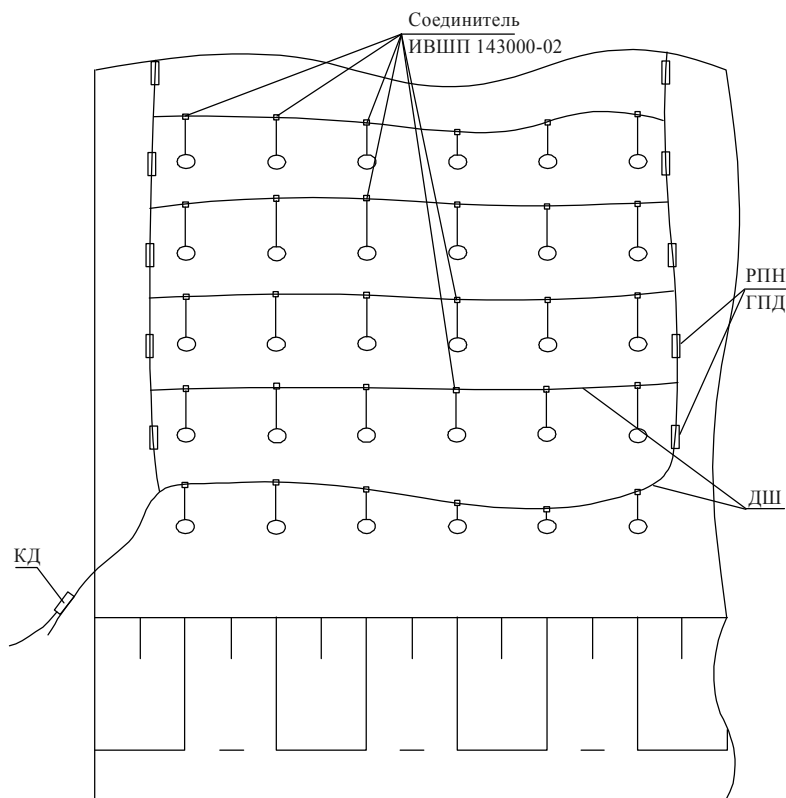


Рис. 9.11. Типовая схема взрывания скважинных зарядов с ДШ и РП

Для скважинных зарядов глубиной более 15 м едиными правилами безопасного ведения буровзрывных работ (ЕПБВБР) регламентировано применение двух боевиков. В основном это было связано с обеспечением полной детонации протяженного скважинного заряда. Для взрывных цепей с применением ДШ это требование дает более эффективное взрывание за счет появления во взрываемом заряде встречных детонационных волн, так как ДШ мгновенно инициирует верхний боевик и детонация распространяется по колонне заряда ВВ; одновременно, примерно с двукратным опережением по скорости, распространяется детонация по второй нитке ДШ к нижнему боевику, который в свою очередь формирует детонацию нижнего скважинного заряда, направленную вверх. При выбранных соотношениях скоростей детонации

элементарная оценка, следующая из отношения скоростей детонации ДШ и заряда ВВ, показывает, что встреча детонационных волн произойдет примерно в четвертой части от длины заряда, взятой между боевиками, от нижнего боевика. Выгоранием заряда от ДШ можно пренебречь (5...15 % от массы), так же как и временем на формирование устойчивой детонации (~10...20 мкс). Для зарядов большой протяженности (>10 м) эти пренебрежения вполне допустимы. Зона соударения массовых потоков за встречными детонационными волнами дает более эффективную диссипацию энергии взрывчатого материала в окружающую среду: переизмельчение в ближней зоне столкновения детонационных волн и большее разрушение массива в дальней. При этом интенсивность сейсмических продольных колебаний значительно снижается.

При взрывании ДШ с РП со временем замедления свыше 200 мс при применении РП со временем срабатывания 50 мс и более необходимо: **обязательно пригрузить (присыпать) реле (породой, отсевом и др.)**, чтобы исключить поднятие взрывной цепи и ее последующий подбой осколками реле или ДШ; детонатор соединять с ДШ по направлению детонации; соединять ДШ под правильным углом (исключить отсекание); применять пластиковые соединители; расстояние между параллельными шнурами должно быть более 0,2 м; расстояние между реле и параллельными шнурами выдерживать бóльшим 1 м; не допускать петель и скручиваний во взрывной цепи с ДШ. На сегодня технология взрывания с применением ДШ и двусторонних РП остается надежной и эффективной при проведении массовых взрывов на поверхности, а имеющиеся в номенклатуре ДШ с навеской ВВ ~6 г/м, инициируя пентолитовую и тротил-гексогеновую шашки, не вызывают существенного выгорания простейших ВМ и могут применяться при использовании центрирующих устройств для формирования в зарядах ВМ осевого канала, который также способствует эффективному преобразованию энергии взрыва в энергию разрушения взрываемого массива. Поэтому технология ведения взрывных работ с ДШ и РП имеет перспективы развития и дальнейшего совершенствования.

9.5.7. НЕЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ И КОМБИНИРОВАННОЕ ВЗРЫВАНИЕ

Развитие неэлектрического взрывания определило распространение в практике взрывных работ систем взрывания на основе ударно-волновых трубок (УВТ). Завод в настоящее время такое устройство выпускает под маркой «Искра». Обладая теми же степенями замедления, что и электродетонаторы, система нечувствительна к электростатике и блуждающим токам, а распространяющийся по УВТ со скоростью 2 км/с сигнал в отличие от ДШ не разрушает оболочку и не воздействует на окружающую среду. Поэтому в настоящее время примерно 60 % взрывных работ выполняется с применением системы «Искра». В 30-летней мировой практике наработаны схемы и приспособления с использованием неэлектрических систем на основе УВТ практически во всех видах взрывных работ.

В отличие от взрывания с ДШ применение СИНВ на поверхности позволяет существенно снизить акустическое воздействие на окружающую среду и обеспечить взрывание каждой скважины или их групп в заданное время (рис. 9.12). Обе представленные схемы диагональные с замедлением 42 мс на 109 мс (рис. 9.12, *а*) и 42 мс на 67 мс (рис. 9.12, *б*). В скважинах заряды могут инициироваться детонирующим шнуром, «Искрой» с нулевым замедлением и «Искрой» с замедлением, которая выбирается из условия, что ошибка в разбросе от номинального значения была меньше минимального времени замедления на поверхности. В этом случае удастся избежать одновременного срабатывания нерасчетной группы скважин.

Наибольшее распространение взрывание с «Искрой» получило в шахтах, не опасных по взрывам газа и пыли, практически вытеснив огневое и электрическое взрывание. Варьируя время внутришпурового замедления, можно подобрать оптимальные условия проходки и развала горной массы при проходке горных выработок и добыче руды. На рис. 9.13 показаны схемы монтажа взрывной цепи с «Искрой» при шпуровом взрывании.

Самым простым способом инициирования волноводов «Искра» при шпуровом взрывании считается использование петли ДШ. В этом случае УВТ выбирают длиной на 1,5...2 м больше глубины шпура, собирают в пучки, в каждом из которых должно быть не более 20 шт., пучок фиксируют изолянтной по возможности на наименьшем расстоянии от груди забойщика, затем, отступив 30...40 см, делают вторую

фиксацию пучка УВТ изолентой. Узел ДШ, охватывающий пучок, фиксируют на середине выделенного участка пучка УВТ (рис. 9.14).

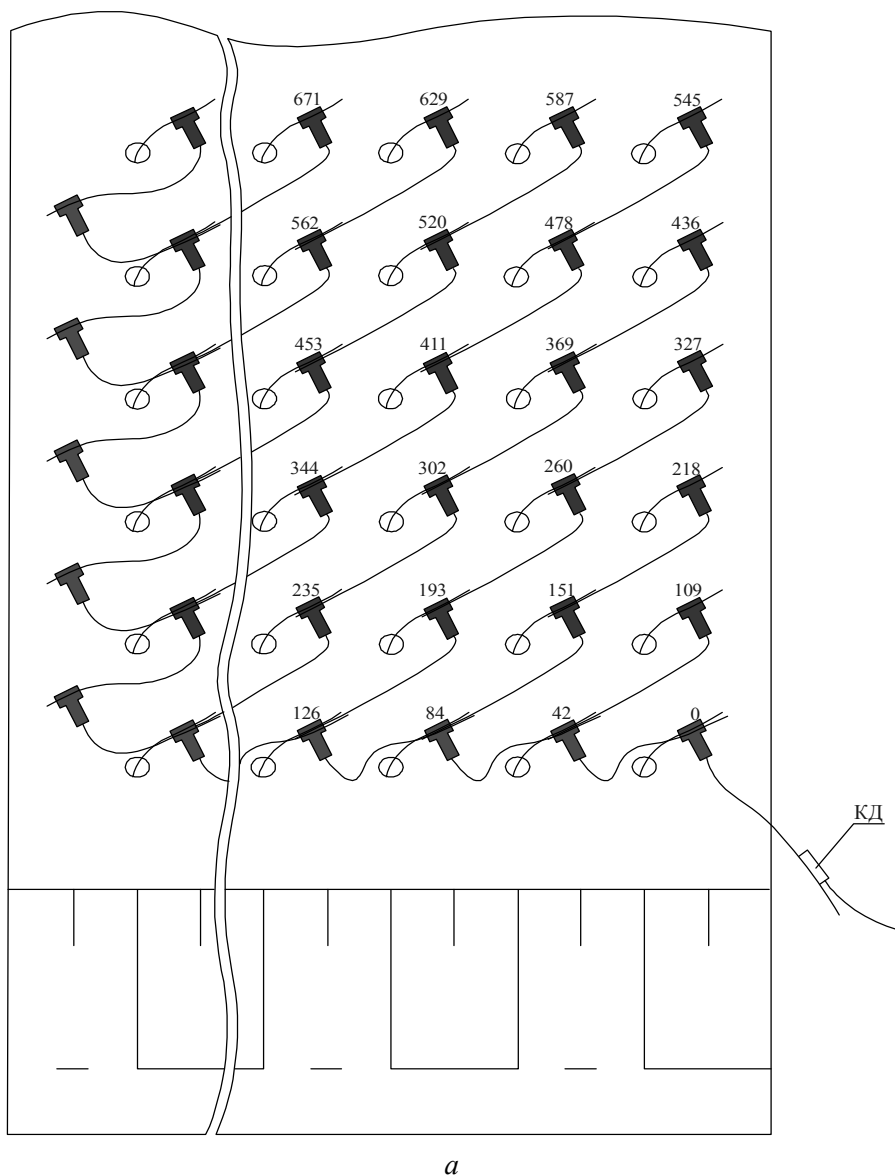


Рис. 9.12. Рабочие схемы взрывания скважинных зарядов неэлектрической системой «Искра» с поверхностным (а) и внутрискважинным (б) замедлением (см. также с. 294)

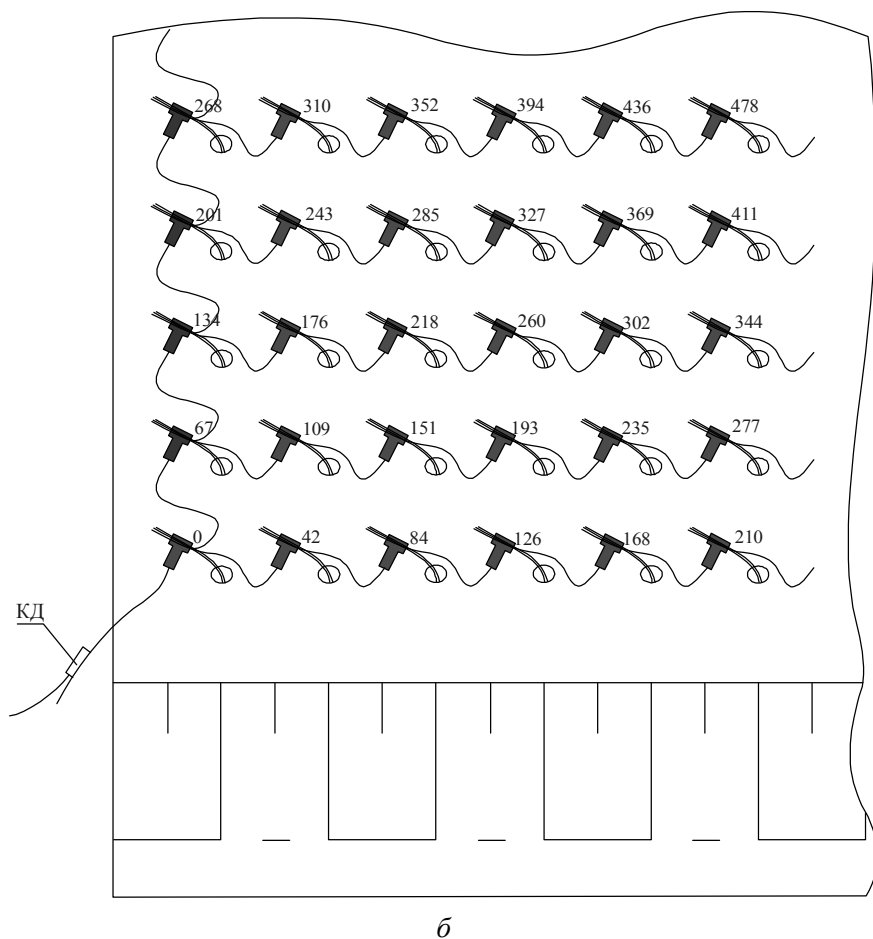
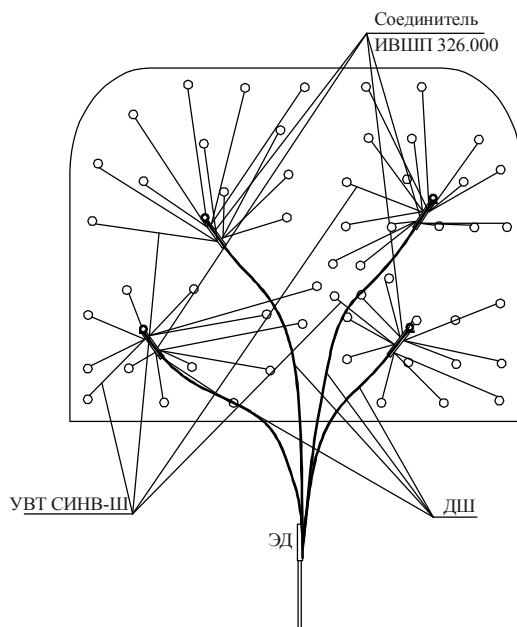
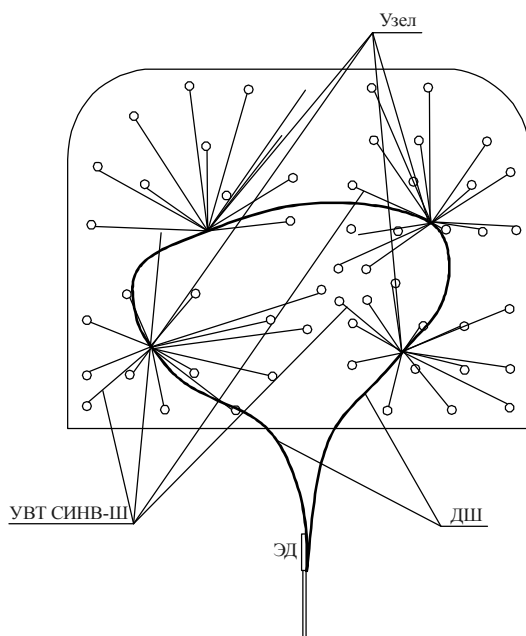


Рис. 9.12. Окончание

Все узлы ДШ соединяют в одну взрывную цепь и инициируют детонатором, однако такой способ взрывания увеличивает количество взрывающего ДШ в забое и повышает риск подбоя волноводов, приводящего к «отказам». При таком способе соединения пучков необходимо выдерживать расстояние до активных частей УВТ более 20 см, учитывая, что скорость детонации ДШ более чем в 3 раза превышает скорость распространения процесса в УВТ. Кроме того, взрывники часто подбивают УВТ увеличенным количеством витков ДШ или «своими способами формирования соединительного узла», отличными от рекомендованного в инструкции по применению системы «Искра».



а



б

Рис. 9.13. Схема монтажа взрывной сети



Рис. 9.14. Правильный монтаж взрывной цепи

Соединитель ДШ с 18 волноводами предназначен для монтажа взрывной цепи. При его применении упрощается схема монтажа, сокращается количество ДШ и повышается надежность взрывания. На рис. 9.15 представлена фотография взрывной цепи с таким монтажным блоком.

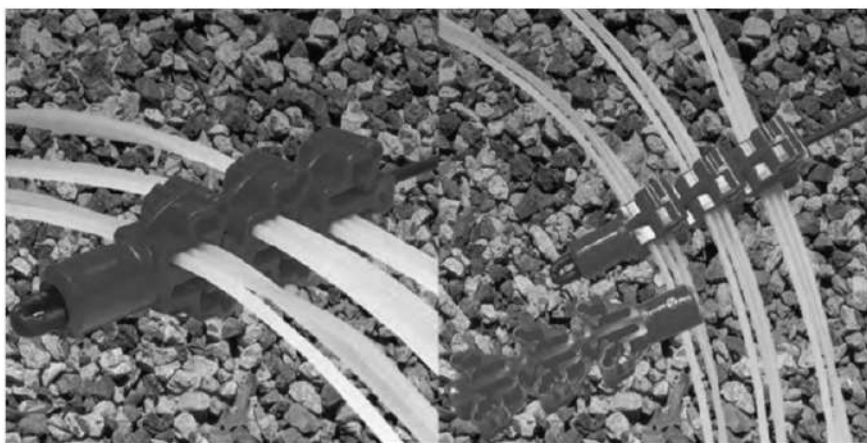


Рис. 9.15. Взрывная цепь с монтажным блоком

Детонирующий шнур проходит через сквозной канал соединительного блока, обеспечивая контакт с 18 иницируемыми УВТ. Свободный конец ДШ можно вставить в коническое отверстие блока и заклинить шнур, потянув за другой конец.

9.5.8. НЕЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ВЗРЫВАНИЕ В ШАХТАХ, ОПАСНЫХ ПО ВЗРЫВУ ГАЗА И ПЫЛИ

В категорийных шахтах с использованием УрсБ (устройство распылительное с блокировкой) разрешено применять для инициирования зарядов системы СИНВ. Это устройство (рис. 9.16) одновременно с инициированием до 40 шт. волноводов СИНВ распыляет в призабойном пространстве огнетушащий порошок, а минимальная задержка срабатывания первого СИНВ в 40 м/с обеспечивает заполнение призабойного пространства огнетушащим порошком перед взрывом шпурового заряда (удлиненный заряд взрывчатых веществ, размещенный в шпуре вместе со средством его инициирования). Таким образом, исключается «человеческий» фактор непредохранительного взрыва в опасном забое.

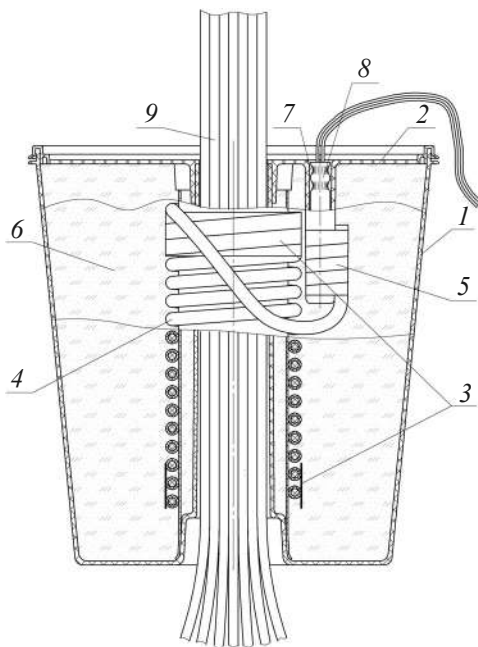


Рис. 9.16. Устройство УрсБ:

1 – корпус; 2 – крышка; 3 – метательный, инициирующий УВТ заряд; 4 – ДШ; 5 – фиксатор ДШ с ЭД-ПКМ; 6 – огнетушащий порошок; 7 – капсульное гнездо с замком; 8 – ЭД-ПКМ; 9 – пучок УВТ

Замена электровзрывания на строительстве шахты «Коксовая» взрыванием СИНВ с УрсБ дало рост скорости проходки ~30 %, а также возможность использовать ВМ более низкого класса, что существенно снизило себестоимость выполнения взрывных работ.

При переходе на подземную разработку алмазного месторождения трубки «Удачная» компания «АЛРОСА» столкнулась со сложными горно-геологическими условиями при проведении подземных горных выработок, характеризующихся высокой обводненностью, газообильностью и нефтепроявлениями во вмещающих породах и кимберлитах. Газовая составляющая кимберлитовых трубок представляет собой сложные смеси газов воздушного, химического, метаморфического, магматического и радиогенного происхождения с тремя основными разновидностями нахождения: свободной, сорбированной и растворенной. Исследованиями установлено, что в газовом составе отмечаются метан, тяжелые углеводороды (этан, пропан, бутан, пентан, гексан), водород, азот, углекислый газ, гелий, аргон, непредельные УВГ (этилен, пропилен, бутилен). Основу природной газовой смеси составляют азот, метан и его гомологи, водород, углекислый газ. Осложняет ведение взрывных работ с применением электродетонаторов обводненная агрессивная среда, которая характеризуется наличием высококонцентрированных рассолов с минерализацией 350...400 г/дм³. Этот фактор и необходимость тщательной изоляции соединений электропроводов существенно влияют на время коммутации взрывной сети и, как следствие, снижают темпы проходки горных выработок и увеличивают срок строительства подземного рудника.

Возможные способы изоляции нефтегазопроявлений пеной или иным способом в конкретных условиях подземного рудника оказывались малоэффективными и значительно трудоемкими. Кроме того, как показывают исследования сотрудников МВТУ им. Баумана, заключение горючего вещества в пенные ячейки не исключает инициирования в них взрывоопасных газов при достаточно мощном воздействии детонационных процессов с малой скоростью (2...5 км/с), распространяющихся в такой среде по механизму взрывного горения. Проблема борьбы с выделениями горючих газов разных форм нахождения при строительстве и эксплуатации подземных рудников в настоящий период весьма актуальна, при этом может решаться с учетом некоторой модернизации имеющихся

в горной промышленности разнообразных методов и средств. В то же время необходимо проводить профилактические мероприятия по дегазации разрабатываемых массивов, перехвату газонасыщенных флюидов с уточнением и корректировкой некоторых деталей в технологических операциях и этапах при строительстве подземных сооружений на месторождениях.

Положительный опыт применения УРСБ при строительстве шахты «Коксовая» и на других опасных объектах путем ингибирования пламени огнетушащим порошком показывает возможность их применения в шахтах со значительными водопритоками и нефтегазопроявлениями (рис. 9.17).

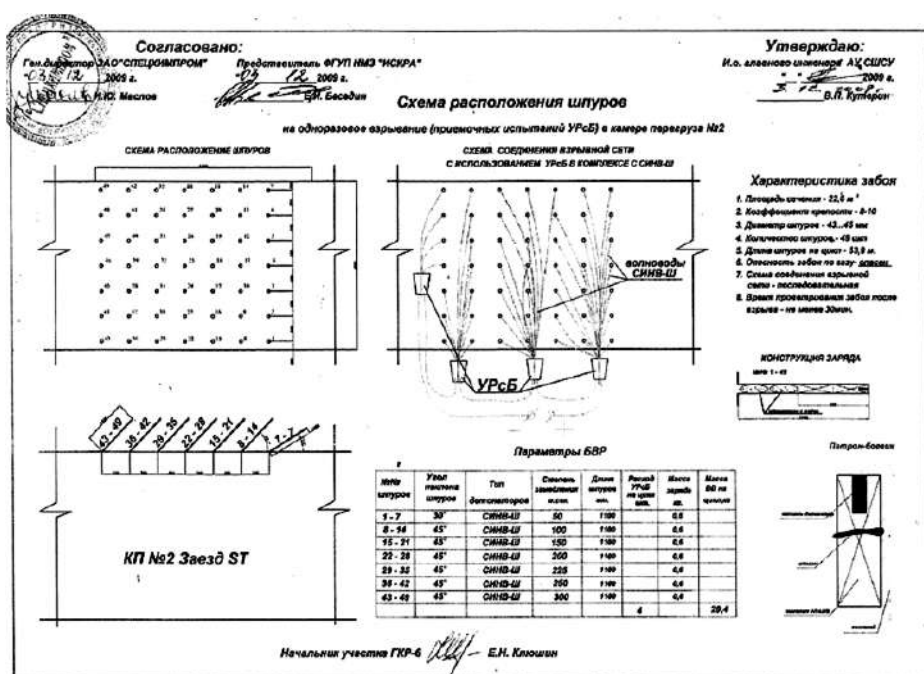


Рис. 9.17. Схема коммутации и параметры БВР при опытном взрывании

В процессе опытно-промышленных испытаний было израсходовано УРСБ в количестве 500 шт. и свыше 8000 шт. СИНВ-Ш. Отказов при взрывании СИНВ-Ш в комплексе с УРСБ не обнаружено, качество дробления горной массы удовлетворительное, воспламенений метановоздушной смеси и нефтепроявлений в разных горных выработках не зафиксировано.

9.5.9. ВЗРЫВАНИЕ С ПРИМЕНЕНИЕМ ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ

Развитие современной электронной техники в миниатюризацию и снижение стоимости при массовом тиражировании позволили в конце XX века реализовать сверхточное взрывание, когда допустимый временной разброс в замедлении инициирующих систем не превосходит 1 мс и менее. На рис. 9.18 показана общая схема системы электронного взрывания с применением электродетонатора с электронным замедлением (ЭДЭЗ).

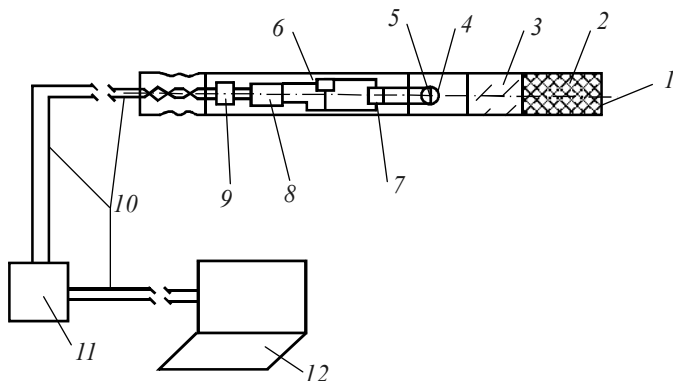


Рис. 9.18. Схема КЗВ с использованием ЭДЭЗ:

1 – гильза; 2 – заряд бризантного ВВ; 3 – колпачок с зарядом инициирующего ВВ; 4 – воспламенительный состав; 5 – мостик накаливания; 6 – транзисторный ключ; 7 – конденсатор; 8 – микропроцессор; 9 – логическая цепь заряда и управления; 10 – двухпроводная линия связи для передачи импульсных сигналов; 11 – согласующее устройство; 12 – управляющий компьютер

Качественно новое решение состоит в отказе от замедляющих составов и использовании вместо них микропроцессора 8. Это позволило создать новый класс электродетонаторов – с электронным замедлением (ЭДЭЗ), что дает возможность программировать время срабатывания при минимальном шаге КЗВ 1 мс с точностью до 1 мс в диапазоне от 0 до 12 с. Кроме того, в отличие от ЭДКЗ с пиротехническим замедлением электрический ток в ЭДЭЗ, обуславливающий срабатывание мостика накаливания 5 и зажигание воспламеняющегося состава 4, формируется при разряде конденсатора 7, размещенного в гильзе детонатора (в обычном ЭДКЗ конденсатор

располагается во взрывной машинке и подсоединяется к мостику накаливания магистральной двухпроводной линией). Наличие микропроцессора 8 дает возможность еще в процессе производства ЭДЭЗ присваивать каждому из них индивидуальный идентификационный номер. Благодаря этому номеру оператор может обращаться к тому или иному детонатору независимо от остальных, включенных в линию, а в случае хищения позволяет проследить пути их миграции. Следует отметить еще одну немаловажную особенность: ЭДЭЗ имеет мощную встроенную защиту от блуждающих токов и бытовых источников как постоянного, так и переменного тока (батареи, аккумуляторы, сеть 220 В). Если подключить такой детонатор к розетке 220 В, то он не только не взорвется, но и не выйдет из строя. Чтобы взорвать такой детонатор, необходимо подать на его вход особый, хорошо защищенный (в информационном смысле) кодовый сигнал. Во время монтажа взрывной сети до 1000 шт. ЭДЭЗ с помощью двухпроводной взрывной линии 10 (см. рис. 9.18) длиной до 3000 м могут соединяться через согласующий адаптер 11 с портативным управляющим компьютером 12. Линия 10 используется для подачи питания к ЭДЭЗ и для передачи кодированных команд детонаторам и получения ответной информации от них.

Для подготовки массового взрыва используется специальное программное обеспечение. Первое, что необходимо сделать проектировщику взрыва, – составить план рабочей площадки, на которой будет производиться взрыв (рис. 9.19).

На плане должны быть обозначены скважины с их номерами, границы верхней и нижней бровки. Для составления плана разработан соответствующий инструментарий, позволяющий сделать это одним из трех способов: 1) проектировщик взрыва в рабочем окне может с помощью мышки и клавиатуры нарисовать план рабочей площадки и размещения скважин; 2) тот же план можно создать, занеся в специальную таблицу маркшейдерские данные. В этом случае план будет нарисован автоматически. При необходимости проектировщик может отредактировать этот план; 3) его также можно создать, отсканировав рисунок, который обычно составляют маркшейдеры. Составив план, с помощью программного обеспечения можно рассчитать объем выработки, линии наименьшего сопротивления, сопротивление по подошве. После составления плана

проектировщик задает конструкцию заряда в скважине, указывает типы и объемы ВВ, наличие промежутков, забойки, типы боевиков, используемых детонаторов и сопутствующих материалов. Программа автоматически составит ведомость расходных материалов на весь массовый взрыв. При получении отклика об исправности взрывной цепи в целом и каждого детонатора в отдельности проектировщик задает время срабатывания каждого детонатора индивидуально в соответствии со схемой взрыва, которое проставляется на плане рабочей площадки в виде цифры (рис. 9.19) рядом с номером скважины. Проектировщик может проверить правильность установленной последовательности времени срабатывания детонаторов с помощью мультипликационного клипа, который симулирует процесс массового взрыва. Тем самым работа проектировщика завершается. При работе в поле программа предоставляет взрывнику так называемый «пульт взрывника» (рис. 9.20).

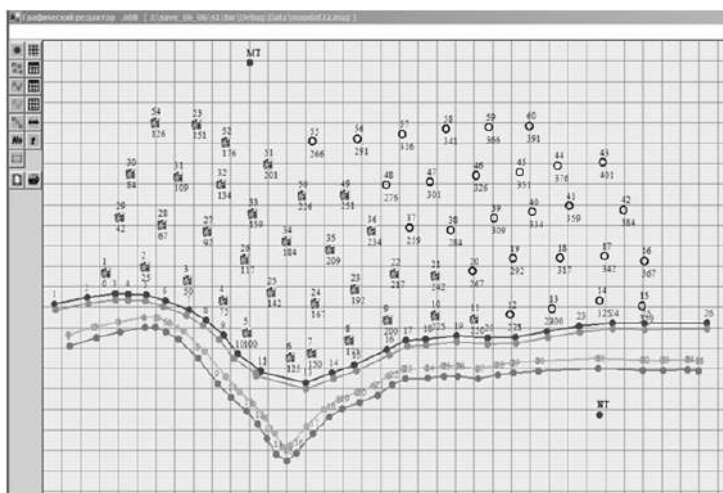


Рис. 9.19. План рабочей площадки в окне компьютера

По завершении программирования и монтажа взрывной сети оператор-взрывник с помощью компьютера тестирует ЭДЭЗ посредством запуска команды проверки, для чего он должен нажать на своем пульте (рис. 9.20) кнопку «Проверка». При этом проверяется готовность и соответствие времени срабатывания каждого детонатора. В случае неуспешной проверки программа выдает взрывнику номер отказавшего детонатора и указывает его положение на

плане. Успешное завершение проверки означает готовность ЭДЭЗ к срабатыванию в заданной последовательности. Получив положительный отклик, оператор дает команду ответственному за взрыв на подачу боевого сигнала. По окончании звучания сирены он нажимает кнопку «Подрыв» (рис. 9.20) на пульте взрывника. С этого момента ЭДЭЗ переходят в режим автономного питания, отсчитывают запрограммированное время и срабатывают даже в случае разрушения взрывной сети. В отличие от обычных детонаторов с пиротехническим замедлением ЭДЭЗ при разлете не дают тлеющих осколков, что делает их безопасными при применении в шахтах, опасных по газу и пыли.

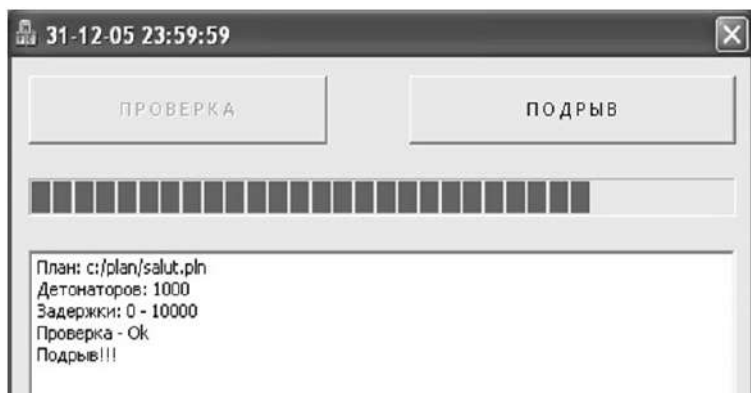


Рис. 9.20. Пульт взрывника, предоставляемый программой

Применение ЭДЭЗ возможно по двум технологическим схемам, различающимся местом их установки: вне и внутри скважин (рис. 9.21, а). По этой схеме предусмотрено инициирование боевиков с помощью СИНВ-Ш-0 (с нулевым замедлением). Ведущую к СИНВ ударно-волновую трубку (УВТ) фиксируют на земной поверхности перед устьем скважины. К магистральной линии через клипсы-соединители параллельно подключают ЭДЭЗ; одновременно каждый ЭДЭЗ соединяют через блок-соединитель с УВТ СИНВ. С целью исключения возможного подбоя УВТ при взрыве соседних скважин УВТ вместе с ЭДЭЗ в соединительном блоке заглубляют в устье взрывающей скважины (на рис. 9.21, а не показано). Далее устанавливают соответствие номера ЭДЭЗ и времени замедления и выполняют прочие технологические операции, перечень которых приведен выше.

Этот вариант использования ЭДЭЗ в сочетании с СИНВ-Ш-0 обеспечивает точность взрывания зарядов в соответствии с заданными интервалами времени. Он позволяет реализовать встречное

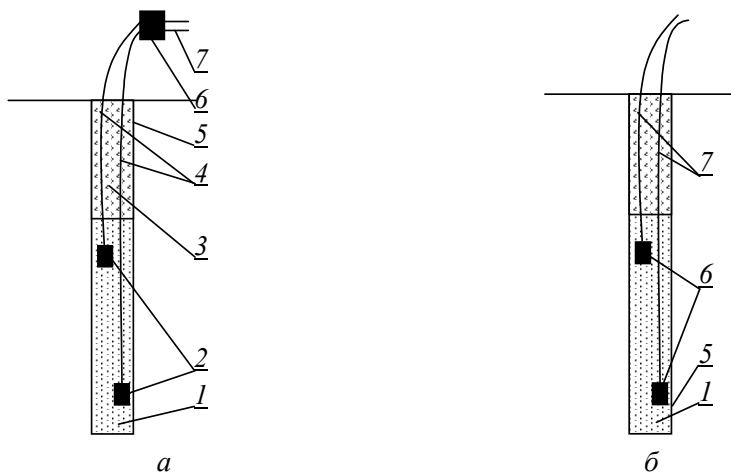


Рис. 9.21. Конструкция заряда с применением ЭДЭЗ:

а – вне скважины; *б* – внутри скважины: 1 – заряд ВВ; 2 – боевики (промежуточные детонаторы) из шашек ТГП-850 с установленными в них СИНВ-Ш-0; 3 – забойка; 4 – ударно-волновая трубка СИНВ (УВТ СИНВ); 5 – скважина; 6 – ЭДЭЗ и блок-соединитель; 7 – электропровод магистральной линии

инициирование скважинных зарядов ВВ, не сопровождающееся частичным выгоранием колонки заряда, что имело место при обычном взрывании с использованием детонирующего шнура (известно, что при встречном инициировании существенно снижается сейсмическое воздействие на взрывааемый массив и повышается дробление породы). К его преимуществу относится также возможность быстрой и безопасной замены обнаруженного при тестировании неисправного ЭДЭЗ, а также возможность обслуживания одним ЭДЭЗ одновременно группы из двух-трех скважин, что позволяет снизить затраты на взрывание с их применением. Всего на карьерах, разрабатывающих известняки (крепость по Протодяконову $f=10$) и гранодиориты ($f=16$), с использованием поверхностных ЭДЭЗ было произведено пять массовых взрывов и два – с применением внутрискважинных ЭДЭЗ. Для объективного сравнения электронной и неэлектрической систем взрывания (СИНВ) и выявления пре-

имуществ и недостатков данных систем устанавливались одинаковые интервалы замедления между скважинами в ряду (42 мс) и между рядами скважин (67 мс). Экспертная оценка показала, что качество дробления взрываемых пород при использовании электронной системы взрывания заметно улучшается, а сейсмическое воздействие на охраняемые объекты понижается. Отмечено увеличение компактности развала взорванной горной массы, в частности уменьшен объем выброса камней на автодорогу.

9.5.10. ВЛИЯНИЕ СИСТЕМ ВЗРЫВАНИЯ НА СЕЙСМИЧЕСКОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ

Применение систем взрывания с УВТ в зарядах ПВВ протяженностью свыше 10...15 м с использованием инициирования боевиков детонаторами с пиротехнической задержкой 450 мс и более связано с появлением разброса в их срабатывании до 40 мс, что превосходит время прохождения детонации по заряду ПВВ (3...6 мс). Это дает односторонний детонационный фронт в заряде, как правило, от дна скважины к ее устью и, как следствие, увеличение сейсмического воздействия. Таким образом, принятая технология неэлектрического взрывания с УВТ проигрывает традиционной с ДШ по качеству дробления и по сейсмическому воздействию.

По аналогии с инициированием взрыва ДШ для снижения сейсмичности и улучшения дробления породы используется одновременное многоточечное инициирование заряда ПВВ. Поскольку скорость распространения процесса в УВТ составляет ~2 км/с, а это меньше, чем скорость детонации ПВВ, для одновременного многоточечного инициирования необходимо применять УВТ равной длины с детонаторами с нулевым замедлением или УВТ разной длины, но детонаторы которых пиротехническим замедлением компенсируют изменение длины, так как каждый метр УВТ – это задержка в 0,5 мс.

Выбор оптимальных ступеней замедления опирается на затухание волн напряжения при взрывах скважинных зарядов в различных средах. На рис. 9.22 показано затухание волн напряжения в упругой среде и среде с трением в зависимости от расстояния до заряда.

Необходимым условием для выбора времени задержки должно быть его значение $T < L/V_{\text{ср}}$. Здесь L – линия наименьшего сопротивления (ЛНС) от рассматриваемой скважины до ближайшей

взорванной; $V_{\text{ср}}$ – среднее значение скорости волны разрушения. Оценки по значениям средней скорости для скважин диаметром 0,3 м и сетки в 7 м × 7 м дают значение $T = 20$ мс для упругой среды, а для среды с трением $T = 40$ мс. По стандартам американской

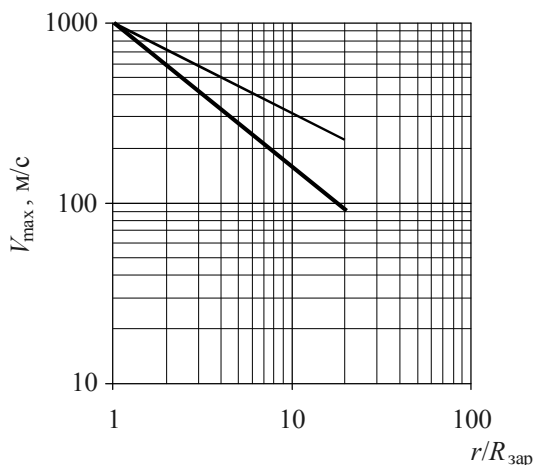


Рис. 9.22. Затухание волн напряжения в упругой среде и среде с трением:

— — упругая среда; — — среда с трением

ассоциации взрывников, где на 1 м ЛНС устанавливается задержка в 8 мс, получаем $T \sim 50$ мс. Оценки по шведской технологии ведения взрывных работ дают на 1 м ЛНС в упругой среде 15 мс, позволяют задержку $T \sim 100$ мс. Стоит заметить, что в странах Скандинавии скважины диаметром 0,3 м редко применяются и, возможно, это объясняет почти двукратное допустимое время задержки.

9.6. ПЕРСПЕКТИВНЫЕ РАЗРАБОТКИ СРЕДСТВ ВЗРЫВАНИЯ

9.6.1. ЭЛЕКТРОБЕЗОПАСНАЯ ЛАЗЕРНАЯ СВЕТОВОЛОКОННАЯ СИСТЕМА ИНИЦИИРОВАНИЯ ВВ

Современная горнодобывающая промышленность, нефтегазовый комплекс и геофизические разведочные исследования требуют проведения большого объема взрывных работ. В этой связи остро стоит проблема их электробезопасности, поскольку основное

устройство подрыва – электродетонатор. Грозовые разряды, наводки от мощных электроагрегатов, статическое электричество могут привести к несанкционированному подрыву взрывчатых веществ с трагическими последствиями. Альтернативой электрическому способу инициирования ВВ может стать мощное лазерное излучение, канализируемое к месту подрыва с помощью световолоконного кабеля. Такой способ абсолютно электробезопасен, так как никакие наводки или иные внешние воздействия не могут создать в волокне необходимый импульс света.

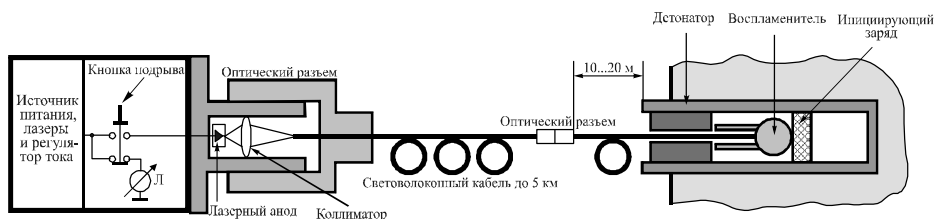


Рис. 9.23. Функциональная схема световолоконной системы подрыва ВВ

Совместными усилиями ИАиЭ СО РАН и Новосибирского механического завода «Искра» разработана электробезопасная лазерная система инициирования ВВ (рис. 9.23). Ее основу составляет мощный отечественный полупроводниковый лазер, снабженный коллиматором и фокусирующей линзой для ввода оптического излучения в световолокно. Импульс света через оптический разъем проходит в световолоконный кабель длиной до 5 км. Кабель оканчивается вторым оптическим разъемом, к которому подсоединен небольшой (10...20 м) отрезок кабеля, герметично соединенный с капсулом-детонатором, обеспечивающим инициирование детонации в зарядах геофизических или иных взрывных устройств. Подрыв осуществляется с помощью пульта управления, который содержит источник питания лазера, регулятор тока и кнопку подрыва.

Технические характеристики

Максимальное расстояние до точки подрыва	5 км
Мощность лазерного диода.....	1 Вт
Минимальная мощность подрыва	100 мВт
Минимальный диаметр световолокна.....	50 мкм
Потери в световолокне	2,03 дБ/км

Области применения

Взрывные работы в горнодобывающей промышленности.
Перфорация нефтяных и газовых скважин.
Геофизические разведочные работы.
Прочие ответственные электробезопасные взрывные работы.

9.6.2. НЕШУМЯЩИЕ ПИРОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ ЗАМЕДЛЕНИЯ И РАЗВОДКИ ДЕТОНАЦИИ

Для решения большинства задач горной отрасли при проведении взрывных работ такая точность удовлетворительна, но для повышения эффективности взрыва, снижения сейсмичности и проведения специальных взрывных работ она недостаточна. В публикации Барона и Кантора американской ассоциацией взрывников еще в 80-х годах прошлого столетия ставилась задача более точного управления взрывом с помощью низкоскоростных УВТ. Современные УВТ с реакционным слоем в трубке из смеси октогена с алюминием (3...10 %) передают процесс со скоростью 2 км/с + 2 %, на перхлоратном составе со скоростью ~1 км/с с еще меньшей точностью ~5 %, но устройства на их основе громоздки и достаточно дороги. В этой связи существует система замедления взрывания на основе механоактивированной высокоточной пиротехники, способной к инициированию УВТ (рис. 9.24).

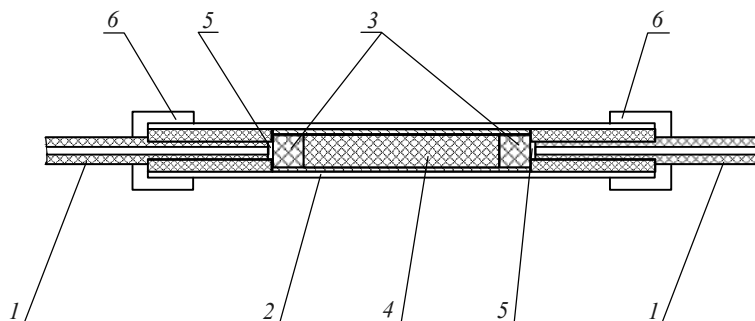


Рис. 9.24. Узел замедления взрывания:

1 – УВТ; 2 – цилиндрический стакан; 3 – воспламенительный состав; 4 – замедляющий состав; 5 – воздушный промежуток; 6 – фиксаторы УВТ

Предлагается узел замедления, который не разрушается при работе и может изготавливаться любой фиксированной степени замедления с точностью работы не хуже 1...3 % от номинального значения. В сочетании с устройствами «Искра» с нулевым замедлением он может размещаться как на земной поверхности, так и внутри скважин. Для его применения на поверхности разработаны и мгновенные разветвители на четыре-пять УВТ, позволяющие инициировать скважинные и поверхностные УВТ. Такая нешумящая система повышенной точности должна прийти на смену используемому сейчас комбинированному взрыванию с применением ДШ, РП и «Искра» с замедлением.

Конструкторско-технологическое решение отличается от предыдущих выполнением конструкции разветвителя, в котором нет специального зажигательного состава.

Пучок герметизированных ударно-волновых трубок по боковой поверхности резиновым уплотнением размещается в корпусе, схематическое устройство которого поясняется рис. 9.25.

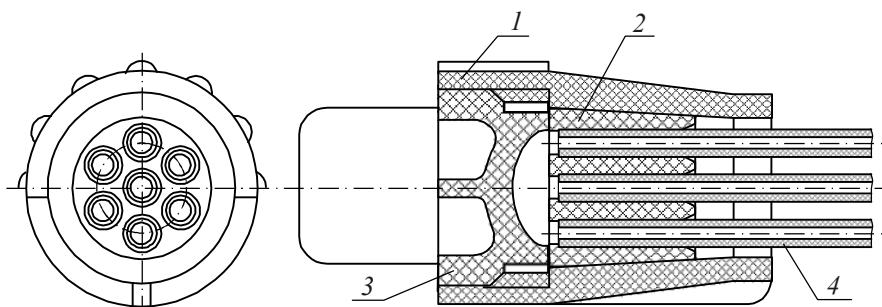


Рис. 9.25. Конструкция разветвителя:

1 – корпус с внутренней резьбой; 2 – герметизирующий ступенчатый вкладыш из резиновых смесей средней маслостойкости с необходимым количеством n отверстий (обеспечивает уплотнение по боковой поверхности трубок и ограничивает их перемещение на определенном расстоянии от внутренней поверхности корпуса); 3 – крышка с внешней резьбой и гладким параболическим дном; 4 – n -е количество УВТ, подсоединяемое к устройству через отверстия вкладыша

Принцип работы такого устройства состоит в том, что ударно-волновой импульс от одной из трубок, инициируемый любым способом, воздействует потоком продуктов процесса, протекающего

в УВТ, на другие УВТ. Это достигается тем, что поток продуктов реакции, инициирующей УВТ, истекает в замкнутое пространство с воздушным промежутком полусферической (параболоидной) формы. Упруго отражаясь от него, поток приобретает импульс, как минимум более чем в 2 раза (при идеальных условиях – в 8 раз) превосходящий падающий, формируя волну, инициирующую $n - 1$ оставшихся УВТ; при этом инициируемые УВТ дают такой же дополнительный импульс при возникновении распространения в них ударно-волнового процесса.

Изготовлено устройство разветвителя детонации в УВТ, где n – число, означающее количество УВТ, равно семи. Результаты испытаний показали надежное инициирование шести отрезков УВТ, а также герметичность конструкции и работоспособность системы при погружении в воду до 1 м.

9.6.3. СИСТЕМЫ ИНИЦИИРОВАНИЯ С УВТ И ЦИФРОВЫМ ЗАМЕДЛЕНИЕМ

Рассматриваемые системы относятся к области разработок высокоточных систем взрывания и могут быть использованы в составе неэлектрических систем взрывания, систем инициирования на основе ударно-волновых трубок (УВТ), при инициировании систем взрывания для производства взрывных работ в добывающей промышленности, военном деле, спасательных службах и т. п.

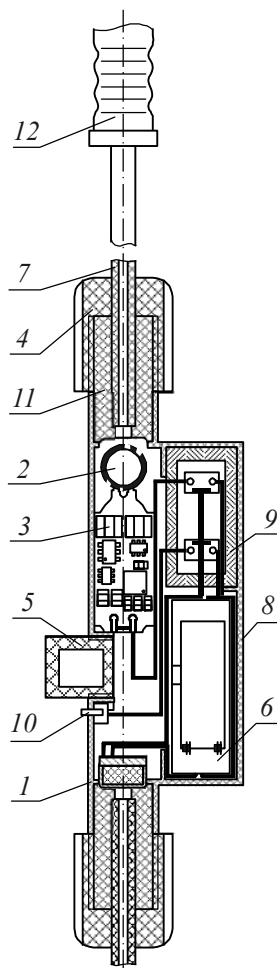
Технический результат достигается конструктивным выполнением устройства коммутации и инициирования УВТ с электронным хронометром без применения взрывчатых веществ.

Поставленная задача решена за счет того, что модуль программируемой цифровой задержки системы неэлектрического взрывания содержит корпус, в котором размещены воспламенитель, электронный узел программируемой задержки срабатывания воспламенителя, вводы-фиксаторы УВТ, ключ-сенсор, источник питания и УВТ. Кроме того, корпус снабжен крышкой, через которую после программирования через разомкнутый ключ-сенсор вставляется источник питания, обеспечивающий при срабатывании ключа-сенсора подачу напряжения питания электронного узла и воспламенителя.

Описание устройства поясняется схемой модуля, показанной на рис. 9.26.

Рис. 9.26. Модуль цифровой задержки системы:

1 – корпус модуля; 2 – воспламенитель;
3 – электронный узел программируемой задержки; 4 – вводы-фиксаторы УВТ;
5 – ключ-сенсор; 6 – источник питания;
7 – УВТ; 8 – крышка-фиксатор источника питания; 9 – электронный ключ;
10 – индикатор активности модуля;
11 – герметизирующая пробка; 12 – капсуль-детонатор мгновенного действия



Перед использованием модуля 1 при открытой крышке 8 производится программирование электронного узла задержки 3, затем через ввод 4 с помощью герметизирующей пробки 11 фиксируется стартовый отрезок УВТ 7, непосредственно перед взрыванием в модуле размещается соединяемый гальванической связью через открытый электронный ключ 9 источник питания 6 (гальванический элемент, ионистор и т. п.), о подключении которого свидетельствует индикатор активности 10, закрывается крышка-фиксатор 8 и подсоединяется второй отрезок УВТ с мгновенным капсулем-детонатором 12. При инициировании стартового отрезка УВТ 7 срабатывает ключ-сенсор 5, запуская с помощью электронного

ключа 9 узел программируемой задержки 3, работа которого завершается запуском воспламенителя 2, вызывающего инициирование УВТ 7 и капсюля-детонатора 12, чем и заканчивается работа устройства системы неэлектрического взрыва.

Выполнение модуля отдельным узлом позволяет обезопасить проведение взрывных работ, условия хранения и транспортировки, так как без источника питания он эквивалентен по степени опасности единичной спичечной головке. Возможность программирования времени замедления при открытой крышке позволяет оперативно вносить коррективы в схему взрыва забоя, блока при изменяющихся горно-геологических и иных условиях. Размещение в модуле источника питания непосредственно перед взрывом существенно повышает надежность работы системы, исключая появление разряженных источников при долговременном хранении их в неразборных модулях. Кратковременность эксплуатации источников питания позволяет применять дешевые разовые элементы; при этом не исключается и возможность использовать ионистор, магнитоиндукционные, пьезоэлектрические и иные генераторы тока, применяемые в прототипах, существенно удешевляя себестоимость модуля. Таким образом, предложенное устройство и способ его применения выполняют все поставленные задачи.

Вопросы для самоконтроля

1. Влияние воды как наполнителя в зарядах ВВ.
2. Каков состав водоустойчивого ANFO?
3. Индивидуальные ВВ для снаряжения капсюлей-детонаторов.
4. Стадии перехода процесса горения вторичных порошков ВВ в детонацию.
5. Отличие послойного горения от конвективного горения.
6. Что такое неэлектрическая система взрыва?
7. Отличие термостойких шнуров от детонирующих шнуров.
8. Для чего необходимо пиротехническое реле?
9. Неэлектрическая система взрыва на основе ударно-волновой трубки. Характеристика.
10. Требования, предъявляемые к инициирующим устройствам (ИУ).

11. Электродетонаторы. Классификация. Применение.
12. Электродетонаторы с электронным замедлением.
13. Детонатор промежуточный малогабаритный. Характеристика.
14. Что такое короткозамедленное взрывание?
15. Интерференция волн напряжений.
16. Создание новых поверхностей.
17. Соударение.
18. Электрическое взрывание.
19. Взрывание зарядов с применением детонирующих шнуров и пиротехнических реле.
20. Комбинированное взрывание.
21. Неэлектрическое взрывание в шахтах, опасных по взрыву газа и пыли.
22. Взрывание с применением электронных систем.
23. Электробезопасная лазерная световолоконная система инициирования ВВ.
24. Нешумящие пиротехнические системы замедления и разводки детонации.
25. Системы инициирования с УВТ и цифровым замедлением.

Библиографический список

1. *Зыков А. В.* Опыт применения СИНВ и ЭДЭЗ в ОАО «Взрывпром» Юга Кузбасса / А. В. Зыков, В. Н. Таекин, И. В. Тимошин // Взрывное дело. – 2009. – № 101/58. – С. 227–232.
2. *Андреев В. В.* Особенности применения систем взрывания с электронным замедлением / В. В. Андреев // Взрывное дело. – 2010. – № 104/61. – С. 229–234.
3. Технические условия СИНВ-С ДИШВ 773979.007 ТУ.
4. *Батуев М. А.* VI Всероссийское совещание по взрывным работам «Взрыв-95» / М. А. Батуев, Б. Н. Кутузов // Горный журнал. – 1995. – № 6. – С. 58–60.
5. *Батуев М. А.* Проблемы и пути повышения эффективности буровзрывных работ на карьерах / М. А. Батуев // Горный журнал. – 1996. – № 11/12.
6. *Шемякин Е. И.* Волны напряжений при взрыве скважинного заряда / Е. И. Шемякин, А. Н. Кочанов // Взрывное дело. – 1998. – № 91/48. – С. 12–21.

7. *Mogi G.* Reduction of blast vibration by means of sequentially optimized delay blasting / G. Mogi, T. Hoshino, S.-Q. Kou // Proceedings of the 1st World Conference on Explosives and Blasting Techniques. – Munich, Germany, 2000. – P. 219–224.

8. *Медведев С. В.* Сейсмика горных взрывов / С. В. Медведев. – Москва: Недра, 1957.

9. *Барон В. Л.* Техника и технология взрывных работ в США / В. Л. Барон, В. Х. Кантор. – Москва : Недра, 1989. – 376 с.

10. *Акимушкин Ю. А.* Совершенствование шпуровой неэлектрической системы инициирования взрыва / Ю. А. Акимушкин, В. В. Андреев // Взрывное дело. – 2011. – № 105/62. – С. 162–167.

11. Безопасные средства распределения и задержки массового взрывания / В. В. Андреев, А. В. Гуськов, К. Е. Милевский, И. В. Найгеборин // Наука. Промышленность. Оборона : труды XV Всероссийской научно-технической конференции, г. Новосибирск, 23–25 апреля, 2014. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2014. – С. 21–25.

12. Разветвляющее устройство для ударно-волновых трубок / В. В. Андреев, А. В. Гуськов, К. Е. Милевский, И. В. Найгеборин // ГЕО-Сибирь. – 2010. – Т. 2, № 1. – С. 151–154.

13. Высокоэнергетические материалы : учебное пособие / В. В. Андреев, А. В. Гуськов, К. Е. Милевский, Е. Ю. Слесарева. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2013. – 326 с.

14. Горная энциклопедия. Т. 1. Аа-лава – Геосистема / редкол.: Е. А. Козловский (гл. ред.) [и др.]. – Москва : Советская энциклопедия, 1984. – 560 с.

15. *Милевский К. Е.* Теория взрывчатых веществ : учебное пособие / К. Е. Милевский, А. В. Гуськов. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2001. – 139 с.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение 1

РАСЧЕТ МАКСИМАЛЬНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В РАЗРЫВНОМ ЗАРЯДЕ

П1.1. СТОЙКОСТЬ РАЗРЫВНОГО ЗАРЯДА К СОТРЯСЕНИЮ

Разрывным зарядом называется изделие из бризантного взрывчатого вещества, предназначенное для совершения взрывной работы.

Различают боеприпасные, инженерные и специальные разрывные заряды. Боеприпасные разрывные заряды размещаются в боеприпасах различного назначения (снаряды, мины, бомбы и др.). При доставке боеприпасов к цели они и, следовательно, разрывные заряды могут испытывать ударные нагрузки (сотрясения), от которых может произойти преждевременный взрыв разрывного заряда.

Свойство разрывных зарядов выдерживать ударные нагрузки без взрыва называется стойкостью к сотрясению. Она зависит от природы ВВ, характера ударных нагрузок и конструкции разрывного заряда.

Особенно большие ударные нагрузки испытывают артиллерийские снаряды: сначала при выстреле, а затем при встрече с преградой. При выстреле снаряд под действием силы давления пороховых газов, образующихся при горении метательного (порохового) заряда, перемещается в канале ствола орудия и в момент вылета получает скорость v_0 , называемую начальной.

Поскольку длина ствола ограничена и обычно лежит в пределах от 10 до 70 калибров орудия d , а величина начальной скорости значительна (до 1000 м/с), при движении в стволе снаряд будет испытывать весьма положительные линейные ускорения $j = \frac{dv}{dt}$.

В результате на каждый элемент снаряда и в том числе на разрывной заряд будет действовать сила инерции от линейного ускорения ($F_{ин}$), направленная назад:

$$F_{ин} = m j_{д} H, \quad (\text{П1.1})$$

где m – масса рассматриваемого элемента снаряда (заряда), кг.

Величину силы инерции можно оценить с помощью безразмерного коэффициента перегрузки $n_{\text{л}}$, численно равного отношению линейного ускорения к ускорению свободного падения g :

$$n_{\text{л}} = \frac{j_{\text{л}}}{g} = \frac{F_{\text{ин}}}{gm}. \quad (\text{П1.2})$$

При выстреле из орудия коэффициент перегрузки достигает многих тысяч единиц.

Под действием сил инерции частицы (кристаллы) ВВ разрывного заряда могут деформироваться, разрушаться и перемещаться. При этом могут создаваться условия, благоприятные для возникновения очага разогрева ВВ до температуры вспышки, что приведет к воспламенению, горению и последующей детонации разрывного заряда, т. е. к преждевременному его взрыву.

Аналогичная картина происходит при встрече снаряда с преградой (броней, грунтом). В момент встречи снаряд имеет некоторую скорость $v_{\text{с}}$, называемую окончательной, которая будет меньше начальной скорости. При движении в преграде из-за действия силы сопротивления преграды $F_{\text{пр}}$ скорость снаряда быстро убывает, а снаряд испытывает весьма большие отрицательные линейные ускорения. В результате на разрывной заряд будет действовать сила инерции от линейного ускорения, направленная вперед, и могут создаваться условия для преждевременного взрыва.

На практике принято стойкость к перегрузкам разрывного заряда определять посредством оценки максимальных напряжений сжатия σ_{max} , возникающих в разрывном заряде под действием сил инерции при выстреле и при встрече с преградой.

Общепринятой характеристикой стойкости взрывчатых веществ к сотрясению служит величина критических напряжений $\sigma_{\text{кр}}$. Критическими напряжениями называются наибольшие напряжения динамического сжатия ВВ, при которых еще не получается преждевременного взрыва в заданных условиях. Величина критических напряжений определяется стрельбой специальными разборными снарядами, имеющими небольшой разрывной заряд и инерционное тело.

Считается, что стойкость разрывного заряда к перегрузкам будет обеспечена, а стрельба будет безопасной, если максимальные



напряжения в нем не превысят некоторой величины допустимых напряжений $\sigma_{\text{доп}}$, меньших в 1,5...2,0 раза критических напряжений. Следовательно, условие стойкости разрывного заряда к сотрясению можно записать в виде неравенства

$$\sigma_{\text{max}} \leq \sigma_{\text{доп}} < \sigma_{\text{кр}} \cdot \quad (\text{П1.3})$$

В табл. П1.1 приведены критические и допустимые напряжения для некоторых взрывчатых веществ.

Т а б л и ц а П1.1

Взрывчатое вещество	$\sigma_{\text{кр}}$, МПа	$\sigma_{\text{доп}}$, МПа
Тротил литой	200	100
Тротил прессованный	180	90
ТГ-50	140	71
Аммотол 80/90	140	110
Гексоген флегматизированный	300	150
Пикриновая кислота	100	50
А-IX-1	330	150
А-IX-2	250	125
Тетрил	85	28

П1.2. МЕТОД РАСЧЕТА МАКСИМАЛЬНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В РАЗРЫВНОМ ЗАРЯДЕ

Рассмотрим разрывной заряд артиллерийского снаряда (рис. П1.1), представляющий собой тело вращения, состоящее из цилиндрической и оживальной части и имеющее донный срез с радиусом r_1 и головной срез с радиусом r_2 . Массу разрывного заряда обозначим через $\omega_{\text{ВВ}}$. Отметим, что снаряд перемещается головной (оживальной) частью вперед.

Напряжение сжатия σ от действия силы инерции $F_{ин}$ в произвольном сечении $i-i$ заряда определяется по формуле

$$\sigma = \frac{F_{ин}}{S_i}, \quad (\text{П1.4})$$

где S_i – площадь поперечного сечения.

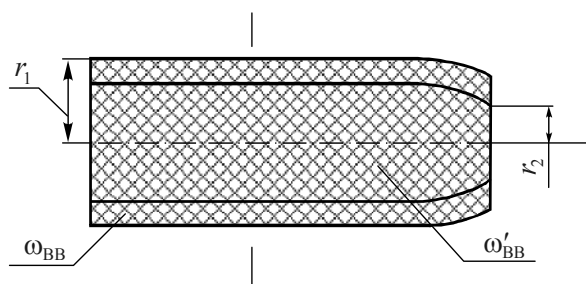


Рис. П1.1. Разрывной заряд артиллерийского снаряда

Сила инерции для сечения $i-i$ в соответствии с формулой (П1.1) будет пропорциональна массе части разрывного заряда, расположенной при выстреле впереди, а при встрече с преградой – сзади этого сечения. При перемещении сечения $i-i$ к донному срезу заряда эта «наседающая» масса станет больше при выстреле и меньше при встрече снаряда с преградой. То же произойдет с величинами силы инерции и напряжений сжатия.

Наибольшие инерционные напряжения при выстреле σ_1 будут в донном срезе заряда, на который «наседает» вся масса заряда $\omega_{ВВ}$. На основе формул (П1.4) и (П1.1)

$$\sigma_1 = \frac{\omega_{ВВ} j_{л}}{\pi r_1^2}. \quad (\text{П1.5})$$

При встрече снаряда с преградой наибольшие инерционные напряжения σ_2 возникнут в головном срезе заряда. При этом «наседать» на него будет не вся масса заряда, а только часть ее $\omega_{ВВ}$,

соответствующая цилиндру с радиусом r_2 (на рис. П1.1 показана мелкой штриховкой):

$$\omega_{\text{ВВ}} = k_{\omega} \omega_{\text{ВВ}} \left(\frac{r_2}{r_1} \right)^2, \quad (\text{П1.6})$$

где k_{ω} – коэффициент, зависящий от длины оживальной части разрывного заряда, $k_{\omega} = 1, 1, \dots, 1, 2$.

Получим формулу для определения напряжений в разрывном заряде при встрече снаряда с преградой:

$$\sigma_2 = \frac{k_{\omega} \omega_{\text{ВВ}} j_{\text{Л}}}{\pi r_1^2}. \quad (\text{П1.7})$$

Сравнение формул (П1.5) и (П1.7), полученных для рассматриваемого разрывного заряда, показывает, что при равных линейных ускорениях снаряда наибольшие напряжения в разрывном заряде при встрече снаряда с преградой будут несколько больше (на 10...30 %) наибольших напряжений при выстреле.

Для разрывных зарядов более сложной формы наибольшие напряжения могут быть в других (так называемых опасных) сечениях, и соотношение между наибольшими напряжениями при выстреле и при встрече снаряда с преградой будет иным.

Величина линейного ускорения $j_{\text{Л}}$ определяется из уравнения поступательного движения снаряда.

При выстреле воспользуемся упрощенным уравнением

$$q j_{\text{Л}} = S p, \quad (\text{П1.8})$$

где q – масса снаряда, кг; p – давление пороховых газов; S – площадь поперечного сечения канала ствола.

Учитывая, что $S = \pi d^2 / 4$, получаем

$$j_{\text{Л}} = \frac{\pi d^2}{4q} p, \quad (\text{П1.9})$$

т. е. при заданном калибре орудия линейное ускорение изменяется прямо пропорционально давлению и обратно пропорционально массе снаряда.

При движении снаряда в стволе давление пороховых газов сначала растет до наибольшего значения p_{\max} , а затем будет уменьшаться. Аналогично изменяется величина линейного ускорения снаряда и инерционное напряжение разрывного заряда.

Следовательно, максимальные напряжения в разрывном заряде при выстреле должны рассчитываться по формуле (П1.5) с учетом формулы (П1.9) при условии $p = p_{\max}$:

$$\sigma_{1\max} = \frac{\omega_{\text{ВВ}}}{q} \frac{d^2}{4r_1^2} p_{\max}, \quad (\text{П1.10})$$

где p_{\max} – максимальное давление пороховых газов.

При встрече снаряда с преградой максимальные напряжения $\sigma_{2\max}$ в зависимости от типа преграды могут быть больше или меньше напряжений $\sigma_{1\max}$. Наиболее динамичными условия встречи снаряда с преградой будут при пробитии брони.

Рассмотрим преграду, которую снаряд не пробивает. Будем считать, что вся кинетическая энергия снаряда тратится на преодоление силы сопротивления преграды $F_{\text{пр}}$. До потери всей кинетической энергии снаряд пройдет по преграде некоторый путь l , который будет тем больше, чем больше окончательная скорость снаряда v_c и масса снаряда q .

При заданном калибре снаряда между величинами i , v_c и q имеет место соотношение

$$\frac{i}{q^{v_c}} = \text{const}. \quad (\text{П1.11})$$

Если при заданных v'_c и q' снаряд проходит в преграде путь l' и при этом теряет всю свою кинетическую энергию, то при других значениях v_c и q путь снаряда в преграде до потери всей кинетической энергии будет

$$l = l' \frac{q^{v_c}}{q'^{v'_c}}. \quad (\text{П1.12})$$



Уравнение поступательного движения снаряда в преграде имеет вид

$$qj_{\text{л}} = F_{\text{пр}}, \quad (\text{П1.13})$$

где $F_{\text{пр}}$ – сила сопротивления преграды. Сначала она растет до максимального значения $F_{\text{пр max}}$, а затем будет уменьшаться.

Приблизительно можно считать, что ее максимальное значение превосходит в два раза среднее значение $F_{\text{пр.ср}}$ на пути снаряда l :

$$F_{\text{пр max}} = 2F_{\text{пр.ср}}.$$

Полная работа силы сопротивления по условию должна равняться кинетической энергии снаряда в момент встречи $F_{\text{пр.ср}}l = qv_{\text{с}}^2/2$, откуда

$$F_{\text{пр.ср}} = \frac{qv_{\text{с}}^2}{2l}. \quad (\text{П1.14})$$

Для расчета максимальных напряжений $\sigma_{2\text{max}}$ определим с помощью уравнения (П1.13) максимальное линейное ускорение снаряда при движении в преграде:

$$j_{\text{л max}} = \frac{F_{\text{пр max}}}{q} = \frac{2F_{\text{пр.ср}}}{q} = \frac{2qv_{\text{с}}^2}{q2l} = \frac{v_{\text{с}}^2}{l}, \quad (\text{П1.15})$$

которое зависит от окончательной скорости снаряда $v_{\text{с}}$ и массы снаряда q (через величину l). Учитывая выражение (П1.15), на основе формулы (П1.7) получим

$$\sigma_{2\text{max}} = \frac{k_{\omega}\omega_{\text{ВВ}}}{\pi r_1^2} \frac{V_{\text{с}}^2}{l}. \quad (\text{П1.16})$$

Рассчитав максимальные напряжения в разрывном заряде при выстреле и при встрече с преградой, можно ответить на ряд практических вопросов.

1. Обеспечена ли стойкость разрывного заряда к сотрясению при выстреле и при встрече с преградой?

2. Имеется ли запас стойкости разрывного заряда к сотрясению?

3. Где более сложные условия функционирования разрывного заряда: при выстреле или при встрече с преградой?

4. Какое взрывчатое вещество необходимо выбрать для разрывного заряда по условиям его стойкости к сотрясению?

5. Как следует изменить форму и размеры разрывного заряда с целью улучшения его стойкости к сотрясению?

6. Как изменяются максимальные напряжения в разрывном заряде при выстреле в зависимости от величины максимального давления, пороховых газов?

7. Как изменяются максимальные напряжения в разрывном заряде при встрече с преградой с увеличением окончательной скорости снаряда?

8. Чему равны допустимые по условиям стойкости разрывного заряда к сотрясению значения максимального давления пороховых газов и окончательной скорости снаряда?

П1.3. ПРИМЕР РАСЧЕТА МАКСИМАЛЬНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В РАЗРЫВНОМ ЗАРЯДЕ

Требуется:

1) рассчитать максимальные напряжения в разрывном заряде при выстреле и при встрече с преградой;

2) проверить выполнение условия стойкости к сотрясению;

3) построить графики зависимостей максимальных напряжений в разрывном заряде от максимального давления пороховых газов и окончательной скорости снаряда;

4) определить допустимые значения максимального давления пороховых газов и окончательной скорости снаряда по условию стойкости к сотрясению.

Дано: бризантное взрывчатое вещество А-IX-2; калибр орудия $d = 122$ мм; масса разрывного заряда $\omega_{ВВ} = 3,2$ кг; радиус донного среза $r_1 = 50$ мм; масса снаряда $q = 18,2$ (кумулятивный), 21,76 (ОФС), 28,0 кг («Китолов 2М»); максимальное давление пороховых газов $p_{\max} = 200; 300; 400$ МПа; окончательная скорость снаряда $v_c = 300, 400, 500$ м/с; полный путь снаряда в преграде при $q = 21,76$ кг; $v'_c = 300$ м/с; $l = 1,00$ м.



Решение

1. Рассчитаем максимальное напряжение в разрывном заряде при выстреле для $q = 21,76$ кг и $p_{\max} = 200$ МПа:

$$\sigma_{1\max} = \frac{\omega_{\text{ВВ}}}{q} \frac{d^2}{4r_1^2} p_{\max} = \frac{3,2}{21,76} \frac{0,122^2}{4 \cdot 0,05^2} 400 = 43,8 \text{ МПа.}$$

2. Найдем по таблице допустимые напряжения для А-IX-2 $\sigma_{\text{доп}} = 125$ МПа и проверим условие стойкости к сотрясению: $\sigma_{1\max} < \sigma_{\text{доп}}$; $43,8 < 125$, т. е. разрывной заряд из тротила будет стойким к сотрясению при выстреле («да»).

3. Повторим действия пп. 1 и 2 для всех значений q и p_{\max} , а результаты представим в табл. П1.2.

Таблица П1.2

Характеристика	q , кг								
	18,2			21,76			28,0		
p_{\max} , МПа	200	300	400	200	300	400	200	300	400
$\sigma_{1\max}$, МПа	52,3	78,5	104,7	43,8	65,7	87,6	34,0	51,0	68
Стойкость	Да	Да	Да	Да	Да	Да	Да	Да	Да

4. По табл. П1.2 построим графические зависимости $\sigma_{1\max} = f(p_{\max})$, рис. П1.2. Определим на графике область допустимых напряжений для А-IX-2.

Линейная зависимость $\sigma_{1\max} = f(p_{\max})$ позволяет получить допустимые максимальные давления $p_{\max \text{ доп}}$ по графику или аналитически (табл. П1.3).

Таблица П1.3

q , кг	18,2	21,76	28
$p_{\max \text{ доп}}$, МПа	477,7	571,1	734

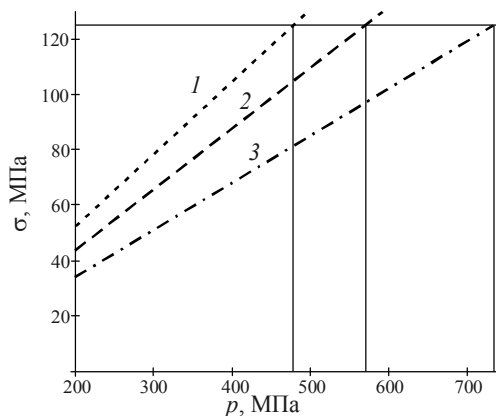


Рис. П1.2

5. Рассчитаем максимальные напряжения в разрывном заряде при встрече с преградой для $q = 28$ кг и $v_c = 500$ м/с, найдя предварительную величину l по формуле (П1.12):

$$l = l' \frac{qv_c}{q'v'_c} = 1,00 \frac{28}{21,76} \frac{500}{300} = 2,1 \text{ м};$$

$$\sigma_{2\max} = \frac{k_{\omega} \omega_{\text{ВВ}}}{\pi r_1^2} \frac{v_c^2}{l} = \frac{1,2 \cdot 3,2}{3,14 \cdot 0,05^2} \frac{500^2}{2,1} = 57 \cdot 10^6 \text{ Па}.$$

6. Повторим действия п. 5 для всех значений q и v_c , проверим условия стойкости к сотрясению, а результаты представим в табл. П1.4.

Таблица П1.4

Характеристика	q , кг								
	18,2			21,76			28		
v_c , м/с	300	400	500	300	400	500	300	400	500
l , м/с	0,8	1,1	1,4	1,0	1,3	1,7	1,3	1,7	2,1
$\sigma_{2\max}$, МПа	52,6	70,1	87,7	44,0	58,7	73,3	34,2	45,6	57,0
Стойкость	Да	Да	Да	Да	Да	Да	Да	Да	Да

7. Построим графические зависимости $\sigma_{2\max} = f(v_c)$ (рис. П1.3) и по ним или аналитически найдем допустимые окончательные скорости снаряда для каждого значения.

Таблица П1.5

q , кг	18,2	21,76	28,0
$v_{с\text{ доп}}$, м/с	712,8	852,2	1096,6

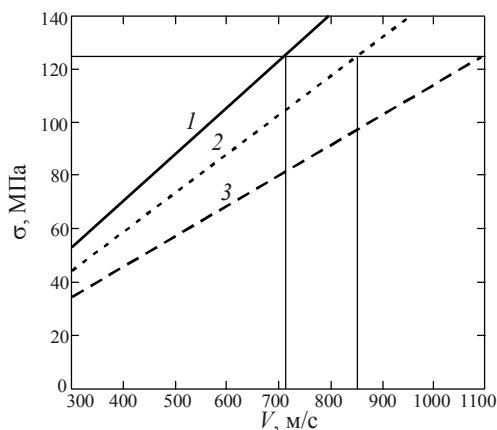


Рис. П1.3

Проанализируем полученные результаты и сделаем выводы с помощью контрольных вопросов.

Контрольные вопросы

1. Что показывают полученные значения $p_{\max\text{ доп}}$ и $v_{с\text{ доп}}$?
2. Как можно оценить запас стойкости к сотрясению?
3. Почему с уменьшением массы снаряда максимальные напряжения при выстреле увеличиваются более интенсивно (см. рис. П1.2) с ростом давления p_{\max} ?
4. Почему с уменьшением массы снаряда максимальные напряжения при встрече с преградой увеличиваются более интенсивно (см. рис. П1.3) с повышением скорости $v_{с}$?
5. Покажите направления действия сил инерции от линейного ускорения при выстреле и при встрече с преградой.
6. Какой принцип заложен при введении в формулы (П1.6), (П1.7) и (П1.16) коэффициента $k_{\omega} = 1, 1 \dots 1, 2$?
7. Сравните максимальные напряжения в разрывном заряде при выстреле и при встрече с преградой.

Приложение 2

**ТЕПЛОТА ОБРАЗОВАНИЯ НЕКОТОРЫХ
ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ
И КОМПОНЕНТОВ ПОРОХОВ**

Таблица П2.1

Взрывчатое вещество		$\mu_{\text{ВВ}}$	$Q_{\text{ВВ}}$	
Название	Формула		кДж/моль	ккал/моль
Аммиачная селитра	NH_4NO_3	80,0	366,038	87,36
Азотно-кислый калий	KNO_3	101,1	494,797	118,09
Сернокислый калий	K_2SO_4	174,3	1442,617	344,30
Перхлорат аммония	NH_4ClO_4	117,5	294,138	70,20
Дибутилфталат	$\text{C}_{10}\text{H}_{20}\text{N}_2\text{O}$	278,3	868,168	207,20
Централит I	$\text{C}_{17}\text{H}_{20}\text{N}_2\text{O}$	268,4	133,661	31,90
Централит II	$\text{C}_{15}\text{H}_{16}\text{N}_2\text{O}$	140,3	30,085	21,50
Дифениламин	$(\text{C}_6\text{H}_5)_2\text{NH}$	169,0	-129,890	-31,00
Динитротолуол	$\text{C}_7\text{H}_5(\text{NO}_2)_2$	182,0	49,652	11,85
Нитроглицерин	$\text{C}_3\text{H}_5(\text{ONO}_2)_3$	227,0	344,837	82,30
Ацетон	$\text{C}_3\text{H}_6\text{O}$	58,0	255,171	60,90
Этиловый спирт	$\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$	46,0	272,769	65,10
Этиловый эфир	$\text{C}_2\text{H}_5\text{OC}_2\text{H}_5$	74,0	283,244	67,60
Вазелин	$\text{C}_{20}\text{H}_{42}$	282,3	489,610	119,00
Нитрогуанидин	$\text{CH}_4\text{N}_4\text{O}_2$	104,1	90,085	21,50
Диэтиленгликоль динитрат	$\text{C}_4\text{H}_8\text{N}_2\text{O}_7$	196,1	427,380	102,00



Приложение 3

ТАБЛИЦА ПЕРЕВОДА ВЕЛИЧИН ИЗ ТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ЕДИНИЦ (ДМ, КГС, КАЛ) В СИСТЕМУ СИ

Таблица ПЗ.1

Наименование величины	Размерность величины		Переводной коэффициент, размерность
	в технической системе	в системе СИ	
Длина	дм	м	$1 \cdot 10^{-1}$ м
Время	с	с	1
Площадь	дм ²	м ²	$1 \cdot 10^{-2}$ м ²
Скорость	дм/с	м/с	$1 \cdot 10^{-1}$ м/с
Ускорение	дм/с ²	м/с ²	$1 \cdot 10^{-1}$ м/с ²
Сила	кгс	Н	9,81 Н
Вес (сила тяжести)	кгс	Н	9,81 Н
Масса (количество вещества)	кг	Кг	1
Давление, напряжение	кг/дм ²	Н/м ²	$9,81 \cdot 10^2$ Н/м ²
Плотность	кг/дм ³	кг/м ³	$1 \cdot 10^3$ кг/м ³
Массовая плотность	кг · с ² /дм ⁴	кг/м ³	$9,81 \cdot 10^4$ кг/м ³
Удельный объем	дм ³ /кг	м ³ /кг	$1 \cdot 10^{-3}$ м ³ /кг
Плотность заряжания	кгс/дм ³	кг/м ³	$1 \cdot 10^{-3}$ кг/м ³
Коволум пороховых газов	дм ³ /кг	м ³ /кг	$1 \cdot 10^{-3}$ м ³ /кг
Работа, энергия	кгс · дм	Дж	$9,81 \cdot 10^{-1}$ Дж
Сила пороха	кгс · дм/кг	Дж/кг	$9,81 \cdot 10^{-1}$ Дж/кг
Мощность	кгс · дм/с	Вт	$9,81 \cdot 10^{-1}$ Вт
Количество теплоты	кал	Дж	4,187(4,19) Дж
Калорийность	ккал	Дж	$(4,19) \cdot 10^3$ 4,187·10 ³ Дж
Удельная теплоемкость	ккал/кг · град	Дж/кг · К	$4,187(4,19) \cdot 10^3$ Дж/(кг · К)
Удельная газовая постоянная	кгс · дм/кг · град	Дж/кг · К	$9,81 \cdot 10^{-1}$ Дж/(кг · К)

Приложение 4

ВАРИАНТЫ ДОМАШНЕГО ЗАДАНИЯ

Таблица П4.1

№ п/п	Наименование ВВ	Химическая формула	Условная формула	M_r	ρ_0 , г/см ³	$Q_{ВВ}$ при $\nu = \text{const}$	
						$\frac{\text{ккал}}{\text{моль}}$	$\frac{\text{кДж}}{\text{моль}}$
1	Медина	$\text{CH}_2\text{NNH}_2(\text{NO}_2)_2$	$\text{CH}_4\text{O}_4\text{N}_4$	136	1,52	6,0	25,140
2	Нитроманнит	$\text{C}_6\text{H}_8(\text{ONO}_2)_6$	$\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_{18}\text{N}_6$	452	1,60	152,0	636,880
3	Нитроэритрит	$\text{C}_4\text{H}_6(\text{ONO}_2)_4$	$\text{C}_4\text{H}_6\text{O}_{12}\text{N}_4$	302	1,50	111,5	467,185
4	Нитроглицерин	$\text{C}_3\text{H}_5(\text{ONO}_2)_3$	$\text{C}_3\text{H}_5\text{O}_9\text{N}_3$	227	1,60	82,3	344,837
5	Гексоген	$(\text{CH}_2\text{NNO}_2)_3$	$\text{C}_3\text{H}_6\text{O}_6\text{N}_6$	222	1,82	-22,3	-93,437
6	Октоген	$(\text{CH}_2\text{NNO}_2)_4$	$\text{C}_4\text{H}_8\text{O}_8\text{N}_8$	296	1,96	-17,0	-71,230
7	ДИНА	$\text{O}_2\text{N-N}(\text{CH}_2\text{CH}_2\text{ONO}_2)_2$	$\text{C}_4\text{H}_8\text{O}_8\text{N}_4$	240	1,67	67,7	283,663
8	ТЭН	$\text{C}_5\text{H}_8(\text{ONO}_2)_4$	$\text{C}_5\text{H}_8\text{O}_{12}\text{N}_4$	316	1,77	120,0	502,8
9	Тринитро- резорцин	$\text{C}_6\text{H}(\text{NO}_2)_3(\text{OH})_2$	$\text{C}_6\text{H}_3\text{O}_8\text{N}_3$	245	1,82	99,2	415,648
10	Битетрил	$[\text{C}_6\text{H}(\text{NO}_2)_3\text{N}_2\text{O}_2\text{CH}_3]_2$	$\text{C}_{14}\text{H}_8\text{O}_{16}\text{N}_{10}$	572	1,99	-27,5	-115,23
11	Тротил	$\text{C}_6\text{H}_2(\text{NO}_2)_3\text{CH}_3$	$\text{C}_7\text{H}_5\text{O}_6\text{N}_3$	227	1,66	10,4	42,319
12	2,4-динитро- толуол	$\text{C}_6\text{H}_3(\text{NO}_2)_2\text{CH}_3$	$\text{C}_7\text{H}_6\text{O}_4\text{N}_2$	182	1,52	11,85	49,652
13	2,6-динитро- толуол	$\text{C}_6\text{H}_3(\text{NO}_2)_2\text{CH}_3$	$\text{C}_7\text{H}_6\text{O}_4\text{N}_2$	182	1,54	6,3	26,397
14	Пикриновая кислота	$\text{C}_6\text{H}_2(\text{NO}_2)_3\text{OH}$	$\text{C}_6\text{H}_3\text{O}_7\text{N}_3$	229	1,81	47,8	200,282
15	Динитрофенол	$\text{C}_6\text{H}_3(\text{NO}_2)_2\text{OH}$	$\text{C}_6\text{H}_4\text{O}_5\text{N}_2$	184	1,68	53,0	222,07
16	1,3,8-тринитро- нафталин	$\text{C}_{10}\text{H}_5(\text{NO}_2)_3$	$\text{C}_{10}\text{H}_5\text{O}_6\text{N}_3$	263	1,62	-11,8	-49,442
17	1,4,5-тринитро- нафталин	$\text{C}_{10}\text{H}_5(\text{NO}_2)_3$	$\text{C}_{10}\text{H}_5\text{O}_6\text{N}_3$	263	1,64	-14,6	-61,174



Окончание табл. П4.1

№ п/п	Наименование ВВ	Химическая формула	Условная формула	M_r	ρ_0 , г/см ³	$Q_{ВВ}$ при $\nu = \text{const}$	
						$\frac{\text{ккал}}{\text{моль}}$	$\frac{\text{кДж}}{\text{моль}}$
18	1,5-динитро- нафталин	$C_{10}H_6(NO_2)_2$	$C_{10}H_6O_4N_2$	218	1,50	–11,9	–49,861
19	1,8-динитро- нафталин	$C_{10}H_6(NO_2)_2$	$C_{10}H_6O_4N_2$	218	1,52	–13,2	–55,308
20	Динотроэтан	$C_2H_4(NO_2)_2$	$C_2H_4O_4N_2$	120	1,32	38,5	161,315
21	Тринитробен- зол	$C_6H_3(NO_2)_3$	$C_6H_3O_6N_3$	213	1,69	5,0	20,95
22	Динитробензол	$C_6H_4(NO_2)_2$	$C_6H_4O_4N_2$	168	1,57	2,9	12,151
23	Тринитро- этилбензол	$C_6H_2(NO_2)_3C_2H_5$	$C_8H_7O_6N_3$	241	1,82	20,0	83,8
24	Тринитрокре- зол	$C_6H(NO_2)_3(CH_3)_2$	$C_8H_7O_6N_3$	241	1,56	55,1	230,869
25	Тринитроани- зол	$C_6H_2(NO_2)_3OCH_3$	$C_7H_5O_7N_3$	243	1,60	32,1	134,499
26	Тетранитро- анилин	$C_6H(NO_2)_4NH_2$	$C_6H_3O_8N_5$	273	1,87	6,9	28,911
27	Тринитроани- лин	$C_6H_2(NO_2)_3NH_2$	$C_6H_4O_6N_4$	228	1,72	13,1	54,889
28	Нитрогликоль	$C_2H_4(ONO_2)_2$	$C_2H_4O_6N_2$	152	1,49	54,8	229,612
29	Гуанидинитрат	$HNC(NH_2)_2HNO_3$	$CH_6O_3N_4$	122	1,54	87,0	364,53
30	Нитрогуанидин	$HNCNH_2NHNO_2$	$CH_4O_2N_4$	104	1,62	18,46	77,347
31	Кселил	$C_6H(NO_2)_3(CH_3)_2$	$C_8H_7O_6N_3$	241	1,65	17,9	75,001
32	ЭДНА	$C_2H_4NNH_2(NO_2)_2$	$C_2H_6O_4N_4$	150	1,75	20,0	83,8
33	Эддин	$C_2H_6(ONO_2)_2(NH_2)_2$	$C_2H_{10}O_6N_4$	186	1,84	149,6	626,824
34	Пикрат аммония	$C_6H_2(NO_2)_3ONH_4$	$C_6H_6O_7N_4$	246	1,55	87,3	365,787
35	Тетрил	$C_6H_2(NO_2)_3NNO_2CH_4$	$C_7H_5O_8N_5$	287	1,73	–13,3	–55,727

Приложение 5

МАССОВОЕ ВЗРЫВАНИЕ НА ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ С ПРИМЕНЕНИЕМ ТРАДИЦИОННЫХ СРЕДСТВ

П5.1. МЕТОДЫ ВЗРЫВНЫХ РАБОТ

Название метода взрывных работ определяется выработкой или системой выработок, сооруженных для размещения и производства взрывов зарядов промышленных ВВ.

В настоящее время на карьерах применяются следующие методы ведения взрывных работ.

Метод скважинных зарядов, когда для разрушения массива применяют вертикальные и наклонные скважины диаметром 100...300 мм, расширяемые в заряжаемой части на некоторых железорудных карьерах огневым способом до 400...500 мм, глубиной от 5 до 20 м и более. Это основной метод взрывания на карьерах.

Метод шпуровых зарядов, когда для взрывания применяют вертикальные, наклонные или горизонтальные шпуры диаметром до 75 мм и глубиной до 5 м. Этот метод взрывания применяют в карьерах малой мощности при добыче блоков, а на крупных – для вспомогательных работ (дробление негабарита, подработка завывшений подошвы уступов и т. д.).

Метод котловых шпуровых и котловых скважинных зарядов, когда для размещения в нижней части увеличенного заряда ВВ шпуры и скважины предварительно простреливают небольшими зарядами (0,5...10,0 кг). Этот способ применяется редко из-за его ненадежности.

Метод камерных зарядов, когда сосредоточенные заряды большой массы от нескольких до тысяч тонн размещают в камерах. Метод применяется в основном для взрывания на выброс и сброс при строительстве плотин, дамб, каналов.

Метод малокамерных зарядов (рукавов), когда заряды размещают в горизонтальных углублениях сечением до 30 × 30 см глубиной до 3,0 м для взрывания небольших уступов. Применяют редко на карьерах небольшой производственной мощности при отсутствии буровых станков.



Метод наружных (накладных) зарядов, когда заряды укладываются на разрушаемые объекты (крупные куски породы, козырьки уступов, небольшие завывшения подошвы и т. д.).

П5.2. ПОДГОТОВКА МАССОВОГО ВЗРЫВА

Массовый взрыв на карьере производится специальным инженерно-техническим и рабочим персоналом по типовому или специальному проекту.

Технология выполнения массового взрыва состоит из следующих этапов и операций.

1. Подготовительный этап выполнения массового взрыва, который включает:

а) подготовку исходных материалов для составления проекта взрыва с целью определения расчетного расхода ВВ, диаметра скважин, сопротивления по подошве, величины перебура и забойки, расстояния между скважинами, величины заряда в скважине;

б) составление проекта массового взрыва;

в) определение границ опасной зоны;

г) охрану места взрыва;

д) установление системы сигнализации при взрывных работах.

2. Выполнение массового взрыва, который включает:

а) изготовление патронов-боевиков;

б) зарядание и забойку шпуров, скважин и камер;

в) монтаж взрывной сети и производство взрыва;

г) осмотр забоя и ликвидацию отказавших зарядов.

На всех этапах подготовки, проведения и оценки результатов взрыва проводится его маркшейдерское обслуживание.

Маркшейдерское обслуживание массовых взрывов включает в себя следующие операции:

а) выдачу плана-задания на производство массового взрыва;

б) производство маркшейдерско-геологической съемки блока, намечаемого к взрыву, и на основе этой съемки составление плана и характерных разрезов блока с указанием свойств пород и руд (трещиноватости, крепости, рудоносности и т. д.);

г) перенесение скважин или минных выработок с проекта в натуру, определение расчетных объемов взрываемого блока;

д) съемку фактического положения пробуренных скважин (величины перебура, расстояния между скважинами, расстояния

скважин первого ряда от верхней бровки уступа, значения СПП (сопротивления по подошве), углов откоса уступа);

е) оценку результатов взрыва (объема взорванной горной массы, величины развала, линии и угла откоса развала, коэффициента разрыхления, выхода горной массы с 1 м скважины, фактического удельного расхода ВВ, полноты отрыва пород по подошве уступа, величины заколов и т. д.).

Маркшейдерская документация массовых взрывов во всех случаях должна состоять:

- а) из плана-задания (масштаб 1:1000);
- б) предварительного плана проекта расположения скважин на уступе (масштаб 1:500);
- в) поперечных профилей скважин первого ряда (масштаб 1:500 и 1:200) с таблицей расчета зарядов;
- в) геолого-технологического плана блока (масштаб 1:500);
- г) сводного плана буровых и взрывных работ (масштаб 1:1000).

П5.3. КОРОТКОЗАМЕДЛЕННОЕ ВЗРЫВАНИЕ СКВАЖИННЫХ ЗАРЯДОВ

В последние годы на карьерах широко распространилось многорядное КЗВ скважинных зарядов, которое обеспечивает более высокие технико-экономические показатели взрывных работ, чем при мгновенном однорядном взрывании.

При КЗВ с помощью ДШ и пиротехнических замедлителей РП применяют разнообразные схемы соединения зарядов, которые должны удовлетворять следующим требованиям:

- обеспечивать надежность передачи детонации по всей сети;
- обеспечивать высокую интенсивность дробления;
- формировать развал породы желаемых геометрических параметров;
- обеспечивать минимальные разрушения в глубь массива;
- создавать минимальный сейсмический эффект воздействия взрыва на окружающие сооружения и объекты.

Для повышения надежности схем применяют резервные магистрали, периферийные линии и кольцевые схемы ДШ, дублирование боевиков в скважинах, что увеличивает расход ДШ на взрыв.

Наиболее просты схемы соединения сети при однорядном взрывании, присоединении зарядов через один (рис. П5.1, *а*) или с замедлением на каждую скважину (рис. П5.1, *б*). Более эффективно с точки зрения дробления горной породы и уменьшения ширины развала взрывание с последовательным замедлением взрыва каждой скважины. Интервал замедления между взрывами зависит от физико-технических свойств горных пород и находится экспериментально в пределах 20...50 мс. С увеличением крепости пород интервал замедления уменьшают. Расстояние между скважинами для исключения подбоя одного заряда другим рекомендуется принимать не менее 28...30 их диаметров.

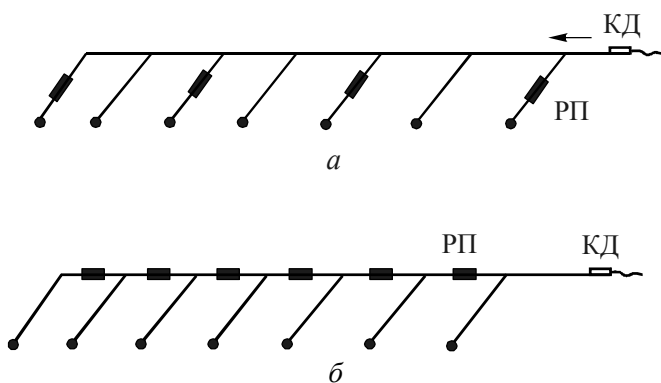


Рис. П5.1. Схемы однорядного КЗВ:

а – замедление через скважину; *б* – замедление на каждой скважине

При больших объемах добычи полезного ископаемого целесообразнее применять многорядное КЗВ, обеспечивающее сокращение расходов на путевые работы и уменьшение числа взрывов в карьере.

При многорядном расположении скважин применяются разнообразные схемы, сущность которых заключается в создании взрывом первых зарядов дополнительной открытой поверхности, облегчающей работу зарядов последующих взрывов, или создании взрывом первой серии зарядов по контуру взрывающего участка массива дробленого экрана (щели), который снижает разрушение породы за пределами оконтуренного участка, уменьшает сейсмическое действие взрыва, а также схлопывает трещины в массиве,

обеспечивая тем самым лучшее распространение энергии и дробление при взрыве.

Взрывание по рядам представляет наиболее простой вариант многорядных схем. В соответствии с этим различают взрывание продольными, поперечными и диагональными рядами.

Когда первый ряд взрывают мгновенно (рис. П5.2), а последующие ряды с замедлением, имеем простую порядную схему с продольными рядами.

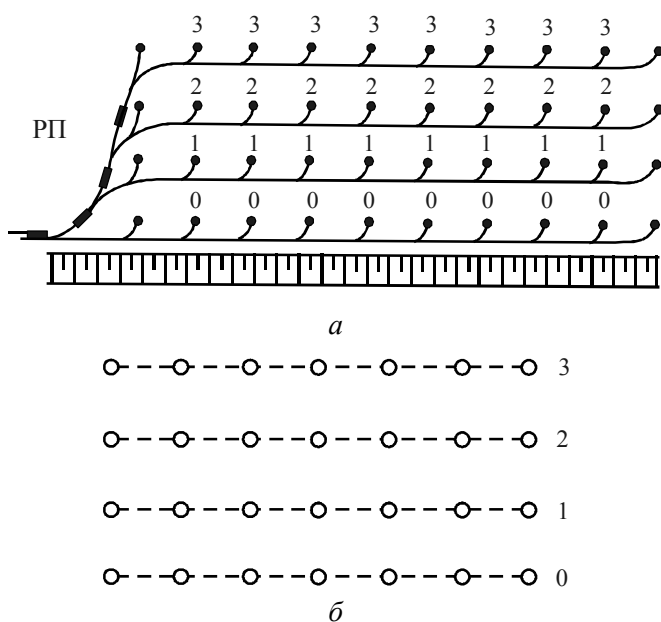


Рис. П5.2. Порядная схема КЭВ:

а – монтажная схема; *б* – последовательность взрыва

В некоторых случаях первым взрывают второй или третий ряд, за счет чего достигается уменьшение ширины развала.

При трех и более рядах скважин применяют порядную врубовую схему, когда мгновенно взрывают средний врубовой ряд более глубоких и заряженных большими зарядами скважин, а затем с замедлением последовательно с обеих сторон на «вруб» взрывают остальные ряды. Эта схема обеспечивает хорошее дробление и неширокий развал взорванной массы. Однако высота развала бывает большой в месте расположения врубового ряда, что в зимнее время при смерзании пород повышает опасность ведения погрузочных работ.

При завышенных СПП следует взрывать по схемам, обеспечивающим взаимодействие зарядов в ряду для проработки подошвы уступа. В таком случае можно применить взрывание группами зарядов, например парами скважин (рис. П5.3).

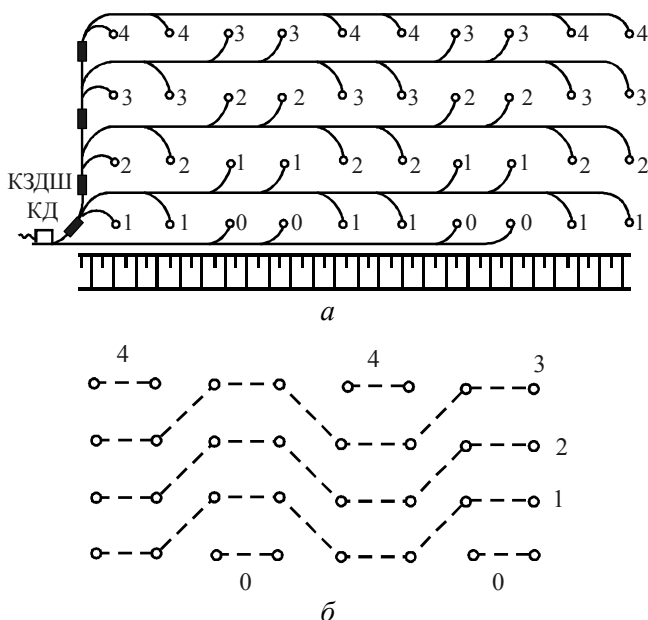


Рис. П5.3. Схема КЗВ с трапецевидными врубами:

а – монтажная схема; *б* – последовательность действия взрыва зарядов

Для получения минимальной ширины развала используют диагональную схему, при которой широкий навал образуется в одном углу блока, а основная масса породы перемещается вдоль фронта уступа в сторону заряда, взорванного первым, а также применение порядной поперечной обычной или врубовой схемы (рис. П5.4)*.

* Схемы выполнены в виде монтажных эскизов (рис. П5.1–П5.4) и построены для условий взрывания детонирующим шнуром с помощью замедлителей РП, так как этот способ взрывания имеет наибольшее распространение. На рисунках цифрами и пунктиром показана очередность работы зарядов, характеризующая принцип действия схемы.

При такой схеме скважины располагают при бурении по квадратной сетке, а взрывают по шахматной схеме с коэффициентом сближения сква-

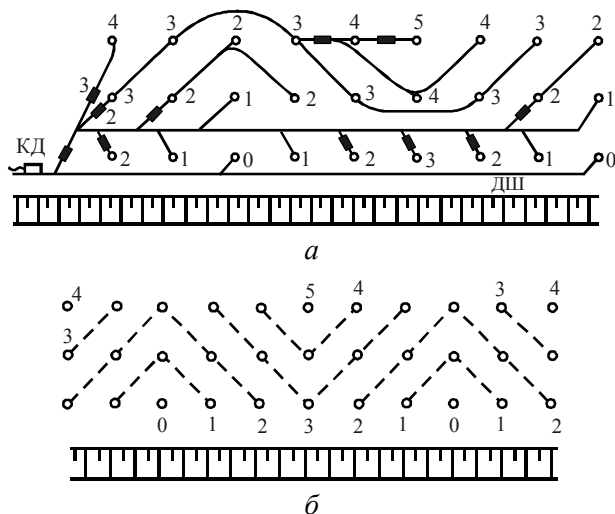


Рис. П5.4. Диагональная схема КЗВ с треугольными врубами:

а – схема установки замедлителей РП; б – последовательность действия взрыва зарядов

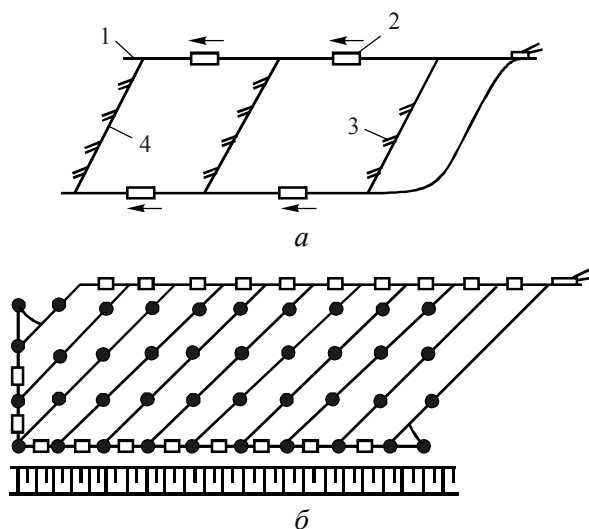


Рис. П5.5. Схема КЗВ с кольцевой магистралью

жин, равным двум. В результате этого за счет уменьшения фактических значений W_{ϕ} и увеличения A_{ϕ} улучшается дробление породы и в массиве не образуется, как указывалось выше, зон с пониженными напряжениями.

Для повышения надежности инициирования крупных взрывов применяют кольцевую магистраль (рис. П5.5), к которой подсоединяют диагональные ряды скважин. Замедлители ставят в магистраль обычно между соседними диагоналями.

П5.4. СОСТАВЛЕНИЕ ПРОЕКТА МАССОВОГО ВЗРЫВА

В типовом проекте массового взрыва приводятся: краткая геологическая и гидрогеологическая характеристика пород месторождения; классификация пород (руд) по взрываемости; типы буровых станков; виды ВВ; способы взрывания; конструкция зарядов; параметры расположения скважин на уступах в зависимости от категории пород, высоты уступа; расчетные показатели взрыва (удельный расход ВВ, выход горной массы с 1 м скважины и т. д.); расчет сейсмически безопасных расстояний для инженерных сооружений, подземных выработок и бортов карьеров; расчет безопасных расстояний по действию воздушной волны и разлету отдельных кусков породы; схемы взрывной сети; интервалы замедления; расчеты зарядов ВВ, организация ведения взрывных работ и мероприятия по обеспечению безопасности.

Для составления проекта взрыва по скважинам первого ряда составляют профили перпендикулярно линии нижней бровки уступа с указанием геологических особенностей и всех деталей этого уступа.

По данным профилей производят первичное определение значений СПП, глубины скважины, величины перебура, расстояний между скважинами и их рядами, удаления скважин от верхней бровки уступа и предварительно рассчитывают заряды. Затем, после бурения скважин на основе геолого-маркшейдерской съемки фактического их расположения, определяют фактическое значение СПП, глубину скважин и на основе этих данных окончательно рассчитывают заряды ВВ по тем же формулам, составляют (корректируют) проект взрыва.

Приложение 6
**КЛАССИФИКАЦИЯ ВЗРЫВЧАТЫХ МАТЕРИАЛОВ
ПО ГРУППАМ СОВМЕСТИМОСТИ**
Таблица П6.1

Группа совместимости (опасности)	Вещества, изделия
А	Иницирующие взрывчатые вещества
В	Изделия, содержащие иницирующие взрывчатые вещества
С	Метательные взрывчатые вещества и другие дефлагирующие взрывчатые вещества или изделия, содержащие их (бездымный порох)
D	Вторичные детонирующие взрывчатые вещества: дымный порох; изделия, содержащие детонирующие взрывчатые вещества без средств инициирования и метательных зарядов (детонирующего шнура)
Е	Изделия, содержащие вторичные детонирующие вещества без средств инициирования, но с метательным зарядом (кроме содержащих легковоспламеняющуюся жидкость)
F	Изделия, содержащие вторичные детонирующие вещества, средства инициирования и метательные заряды, или без метательных зарядов
G	Пиротехнические вещества и изделия, содержащие их
N	Изделия, содержащие чрезвычайно нечувствительные детонирующие вещества
S	Вещества или изделия, упакованные или сконструированные так, что при случайном срабатывании любое опасное проявление ограничено самой упаковкой, а если тара разрушена огнем, то эффект взрыва или разбрасывания ограничен, что не препятствует проведению аварийных мер или тушению пожара в непосредственной близости от упаковки

Таблица П6.2

Подкласс	Наименование подкласса
1.1	Взрывчатые материалы с опасностью взрыва массой
1.2	Взрывчатые материалы, не взрывающиеся массой
1.3	Взрывчатые материалы пожароопасные, не взрывающиеся массой
1.4	Взрывчатые материалы, не представляющие значительной опасности
1.5	Очень нечувствительные взрывчатые материалы
1.6	Изделия чрезвычайно низкой чувствительности

Библиографический список

1. Чурбанов Е. В. Расчет энергетических характеристик : учебное пособие / Е. В. Чурбанов, А. Ф. Князев. – Ленинград : Изд-во ЛМИ, 1981. – 47 с.
2. Соловьев В. С. Расчет энергетических характеристик ВВ / В. С. Соловьев, В. Н. Охитин. – Москва : ЦНИИНТИ, 1983. – 52 с.
3. Взрывчатые вещества и пороха / М. А. Будников [и др.]. – Москва : Госиздат, 1955. – 364 с.
4. Горст А. Г. Пороха и взрывчатые вещества / А. Г. Горст. – 2-е изд., перераб. – Москва : Оборонгиз, 1957. – 188 с.
5. Пороха, твердые топлива и взрывчатые вещества / В. К. Марьин [и др.]. – Москва : Минобороны, 1975. – 466 с.
6. Корнер Дж. Внутренняя баллистика орудий : пер. с англ. / Дж. Корнер ; под ред. И. П. Граве. – Москва : Иностранная литература, 1953. – 462 с.
7. Физика взрыва / под ред. К. П. Станюковича. – 2-е изд., перераб. – Москва : Наука, 1975. – 704 с.
8. Андреев К. К. Теория взрывчатых веществ / К. К. Андреев, А. Ф. Беляев. – Москва : Оборонгиз, 1960. – 422 с.
9. Бандурин М. К. Сборник задач по теории взрывчатых веществ / М. К. Бандурин, Л. Г. Рукш. – Москва : Оборонгиз, 1959. – 190 с.

10. Физические величины : справочник / под ред. И. С. Григорьева, Е. 3. Мейлихова. – Москва : Энергоатомиздат, 1991. – 1232 с.

11. Энергетические конденсированные системы : краткий энциклопедический словарь / под ред. Б. П. Жукова. – Москва : Янус-К, 2000. – 596 с.

12. Демидюк Г. П. Направления развития гранулированных и водосодержащих ВВ / Г. П. Демидюк // Взрывное дело. – 1974. – № 74/31. – С. 5–13.

13. Друкованный М. Ф. О влиянии воды на детонацию водоустойчивых гранулированных ВВ / М. Ф. Друкованный, О. Н. Оберемок // Взрывное дело. – 1974. – № 74/31. – С. 17–27.

14. Дубнов Л. В. Промышленные взрывчатые вещества / Л. В. Дубнов, Н. С. Бахаревич, А. И. Романов. – 3-е изд., перераб. и доп. – Москва : Недра, 1988. – 358 с.

15. Андреев В. В. Сжимаемость порошковых ВВ при статических нагрузениях / В. В. Андреев, Л. А. Лукьянчиков // Динамика сплошных сред. – Новосибирск, 1971. – Вып. 7.

16. Об одном из режимов детонации в порошковых ВВ малой плотности / В. В. Андреев, П. И. Зубков, Г. И. Киселев, Л. А. Лукьянчиков // Динамика сплошных сред. – Новосибирск, 1972. – Вып. 10.

17. Андреев В. В. Течение порошкового вещества малой плотности при импульсном нагружении / В. В. Андреев, Л. А. Мержиевский // Динамика сплошных сред. – Новосибирск, 1973. – Вып. 13.

18. Кутузов Б. Н. Обеспечение сейсмобезопасности взрывов при неэлектрическом инициировании зарядов / Б. Н. Кутузов, В. К. Совмен, Б. В. Эквист // Горный журнал. – 2004. – № 2. – С. 41–44.

19. Олофсон Стиг. Настольная книга взрывника компании «Дино Нобель». Прикладная технология взрывной отбойки для строительства и горной промышленности / Стиг Олофсон. – Джеккаган, 2003.

20. Акимущин Ю. А. Совершенствование шпуровой неэлектрической системы инициирования взрыва / Ю. А. Акимущин, В. В. Андреев // Взрывное дело. – 2011. – № 105/62. – С. 162–167.

21. Патент 2211435 Российская Федерация, МПК7 F 42 В 3/10, F 42 С 19/08. Детонирующее устройство [Электронный ресурс] / В. В. Андреев [и др.] ; заявитель и патентообладатель Новосибирский механический завод «Искра». – № 2001115619/02 ; заявл. 06.06.2001 ; опубл. 27.08.2003. – Режим доступа: <http://bd.patent.su/2211000-2211999/pat/servlet/servlet52e6.html> (дата обращения: 28.06.2018).

22. Неэлектрическая система взрывания СИНВ [Электронный ресурс]. Устройства инициирующие с замедлением поверхностные, не содержащие инициирующих взрывчатых веществ : СИНВ-С

ДИШВ 773979.007 ТУ ; Устройства инициирующие с замедлением шпуровые, не содержащие инициирующих взрывчатых веществ : ТУ СИНВ-ПСИНВ-П ДИШВ 773979.010 ; Устройства инициирующие с замедлением поверхностные, не содержащие инициирующих взрывчатых веществ : ТУ СИНВ-ПСИНВ-П ДИШВ 773979.008. – Режим доступа : <http://vpkomplekt.narod.ru/sinv.html> (дата обращения: 17.09.2018).

23. Батуев М. А. VI Всероссийское совещание по взрывным работам. «Взрыв-95» / М. А. Батуев, Б. Н. Кутузов // Горный журнал. – 1995. – № 6. – С. 58–60.

24. Яковлев В. Л. Влияние порядка инициирования скважинных зарядов на величину остаточных деформаций породного массива / В. Л. Яковлев, Э. П. Артемьев, А. В. Дубских // Горный журнал. – 1996. – № 9/10. – С. 57–60.

25. Способ заряжания водосодержащих ВВ в обводненные и трещиноватые скважины / В. Г. Шеменев, В. А. Силицын, С. М. Лебедев, А. В. Дубских // Горный журнал. – 1996. – № 11/12. – С. 58–59.

26. Взрывчатые вещества. Т. 2. Основные свойства. Технология изготовления и переработки / под ред. Л. В. Фомичевой. – Саратов : РЯЦ-ВНИИЭФ, 2007. – 452 с.

27. Милевский К. Е. Теория взрывчатых веществ : учебное пособие / К. Е. Милевский, А. В. Гуськов. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2001. – 139 с.

28. Высокоэнергетические материалы : учебное пособие / В. В. Андреев, А. В. Гуськов, К. Е. Милевский, Е. Ю. Слесарева. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2013. – 326 с.

УЧЕБНОЕ ИЗДАНИЕ

**Андреев Владимир Васильевич
Гуськов Анатолий Васильевич
Милевский Константин Евгеньевич**

ЭКСПЛОЗИВНЫЕ ВЕЩЕСТВА

Учебное пособие

Редактор *И.Л. Кескевич*
Выпускающий редактор *И.П. Брованова*
Художественный редактор *А.В. Ладыжская*
Корректор *И.Е. Семенова*
Рисунки и компьютерная верстка *С.И. Ткачева*

Подписано в печать 08.11.2018
Формат 70 × 100 1/16. Бумага офсетная
Уч.-изд. л. 27,73. Печ. л. 21,5
Тираж 3000 экз. (1-й з-д – 1–70 экз.)
Изд. № 85. Заказ № 1502

Налоговая льгота – Общероссийский классификатор продукции
Издание соответствует коду 95 3000 ОК 005-93 (ОКП)

Издательство Новосибирского государственного
технического университета
630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20
Тел. (383) 346-31-87
E-mail: office@publish.nstu.ru

Отпечатано в типографии
Новосибирского государственного технического университета
630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20