3 05 - 56 / 405

О. Г. Казаков, А. В. Тотай,
В. И. Попков, Н. О. Радькова

ОСНОВЫ ТЕОРИИ НЕУПРАВЛЯЕМОГО ГОРЕНИЯ И ВЗРЫВА

БРЯНСК-2005

3 05 - 56
405

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ
Брянский государственный технический университет

О.Г. Казаков, А.В. Тотай , В.И Попков, Н.О.Радькова

ОСНОВЫ ТЕОРИИ НЕУПРАВЛЯЕМОГО ГОРЕНИЯ И ВЗРЫВА

Утверждено редакционно-издательским советом университета в качестве учебного пособия

Брянск
ИЗДАТЕЛЬСТВО БГТУ
2005

951
Ч32

РОССИЙСКАЯ
ГОСУДАРСТВЕННАЯ
БИБЛИОТЕКА
2005

Казаков, О.Г., Тотай, А.В., Попков, В.И., Радькова, Н.О. Основы теории неуправляемого горения и взрыва: учеб. пособие.– Брянск: БГТУ, 2005.– 259 с.
ISBN 6-89838-158-9

Рассмотрены процессы неуправляемого горения и взрыва с позиции физико-химических законов. Изложены механизмы возникновения, распространения и прекращения горения, теория цепного, теплового и детонационного взрыва. Описаны положения о механическом действии взрыва. Даны характеристики основных взрывчатых веществ, выпускаемых промышленностью и количественные характеристики рассмотренных процессов горения и взрыва.

Учебное пособие предназначено для студентов специальностей «Безопасность технологических процессов и производств», «Безопасность жизнедеятельности».

Табл. 36. Ил. 54. Библиограф.– 15

Научный редактор Казаков О.Г.

Рецензенты: кафедра «Безопасность жизнедеятельности» Брянского государственного университета;
доц., к.в.н. И.А. Менячихин

2005245192

ISBN 6-89838-158-9 © Брянский государственный технический университет, 2005

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ 5
РАЗДЕЛ I. ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОЦЕССОВ ГОРЕНИЯ..... 6
ГЛАВА 1. ВОЗНИКНОВЕНИЕ ПРОЦЕССОВ ГОРЕНИЯ..... 7
1.1 Описание процессов горения с позиции молекулярно-кинетической теории газов..... 7
1.2. Общие положения теории о процессах самовоспламенения 11
1.3. Цепной механизм воспламенения реакционных смесей..... 16
1.4. Тепловое самовоспламенение..... 18
1.5. Температура самовоспламенения и ее зависимость от природы горючего..... 25
1.6. Самовоспламенение гетерогенных систем..... 29
1.7. Вынужденное воспламенение (зажигание) горючих систем.. 31
1.8. Концентрационные пределы зажигания газопаровоздушных смесей 48
ГЛАВА 2. РАСПРОСТРАНЕНИЕ ГОРЕНИЯ ГАЗОВ, ЖИДКОСТЕЙ И ТВЕРДЫХ ТЕЛ..... 54
2.1. Виды и режимы распространения горения..... 54
2.2. Материальный и тепловой баланс процессов горения..... 57
2.3. Тепловая и диффузионная теория распространения пламени по газообразным системам..... 69
2.4. Распространение пламени по поверхности жидкости. Влияние внешних условий на скорость распространения пламени..... 82
2.5. Горение и выгорание твердых веществ..... 93
ГЛАВА 3. ПРЕКРАЩЕНИЕ И ПРЕДОТВРАЩЕНИЕ ПРОЦЕССОВ ГОРЕНИЯ..... 114
3.1. Тепловая теория прекращения горения..... 114
3.2. Способы предотвращения воспламенения материалов и локализация пожаров..... 122
3.3. Оценка необходимого количества охлаждающих огнетушащих средств при тушении пожаров..... 127

РАЗДЕЛ II. ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ВЗРЫВА..... 136
ГЛАВА 4. ФОРМЫ ВЗРЫВЧАТЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ..... 137
4.1. Общая характеристика взрывчатых веществ..... 137
4.2. Классификация взрывчатых процессов..... 139
4.3. Цепной взрыв..... 140
4.4. Тепловой взрыв..... 146
4.5. Основные положения теории детонации..... 149
4.6. Факторы, влияющие на скорость и устойчивость взрывчатых веществ..... 154
4.7. Переход горения газопаровоздушных смесей во взрыв..... 158
ГЛАВА. 5. МЕХАНИЧЕСКОЕ ДЕЙСТВИЕ ВЗРЫВА..... 163
5.1. Механическое действие взрыва в воздухе..... 163
5.2. Механическое действие взрыва в воде..... 191
5.3. Механическое действие взрыва в твердой среде..... 197
5.4. Взрыв газопаровоздушных и пылевоздушных систем в закрытом помещении и открытом пространстве..... 214
ГЛАВА 6. ПРОМЫШЛЕННЫЕ ВЗРЫВЧАТЫЕ ВЕЩЕСТВА.... 232
6.1. Классификация промышленных взрывчатых веществ..... 232
6.2. Физико-химические характеристики взрывчатых веществ.... 234
6.3. Основные компоненты конденсированных взрывчатых веществ..... 240
6.4. Инициирование взрыва промышленных взрывчатых веществ..... 250
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ..... 256

ПРЕДИСЛОВИЕ

Начавшийся с восьмидесятых годов рост промышленного производства и его негативное воздействие на окружающую среду резко увеличили вероятность возникновения чрезвычайных ситуаций техногенного характера. При этом некоторые из них, например пожары и взрывы на атомных электростанциях, химически опасных объектах, могут не только нанести большой ущерб окружающей среде, но и привести к глобальным катаклизмам.

Создание предлагаемого учебного пособия вызвано отсутствием учебной литературы по введенной в учебные планы ряда специальностей университета дисциплины «Теория горения и взрыва».

Учебное пособие состоит из шести глав. В первой главе описаны процессы горения с позиции молекулярно-кинетической теории газов, общие положения теории о процессах самовоспламенения.

Во второй главе приведена информация о видах и режимах распространения горения.

В третьей главе подробно рассмотрены положения о прекращении и предотвращении процессов горения, теория прекращения горения, способы предотвращения воспламенения материалов и локализации пожаров, оценки необходимого количества охлаждающих огнетушащих средств при тушении пожаров.

В четвертой, пятой и шестой главах рассмотрены формы взрывчатых веществ, механическое действие взрыва, классификация промышленных взрывчатых веществ.

Для лучшего усвоения материала учебного пособия в конце каждой главы приведены вопросы для самопроверки.

Данное пособие может быть использовано студентами специальностей «Безопасность технологических процессов и производств», «Безопасность жизнедеятельности» и других специальностей, связанных с безопасностью.

РАЗДЕЛ I. ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОЦЕССОВ ГОРЕНИЯ

ГЛАВА I. ВОЗНИКНОВЕНИЕ ПРОЦЕССОВ ГОРЕНИЯ

1.1 Описание процессов горения с позиции молекулярно-кинетической теории газов

С точки зрения молекулярно-кинетической теории строения материи химические реакции между двумя компонентами, находящимися в газовой фазе, следует рассматривать как взаимодействие молекул реагирующих газов, т. е. взаимодействие молекул горючего, например водорода H_2, с молекулами окислителя O_2. Известно, что силы межмолекулярного взаимодействия, т. е. взаимного притяжения и отталкивания молекул, находящихся в непрерывном хаотическом тепловом движении, проявляются лишь при очень малых расстояниях между ними. Поэтому взаимодействие между молекулами горючего и окислителя возможно только при их полном сближении, которое можно рассматривать как соударение молекул. Без соударения молекул невозможно какое-либо их взаимодействие, а тем более столь сильное, как химическая реакция, связанная с разрывом существующих в молекуле связей между атомами, перераспределением атомов и т. д. Следовательно, химической реакции взаимодействия горючего с окислителем должен предшествовать процесс смешения горючего с окислителем и физический акт сближения молекул горючего и окислителя, рассматриваемый как упругое соударение молекул.

Расчеты показывают, что для смеси стехиометрического состава водорода с кислородом $2H_2+O_2$, находящейся при комнатной температуре и атмосферном давлении, число соударений молекул H_2 и O_2 за 1 с в 1 см^3 достигает величины $Z_{1\text{-}2} = 8{,}3\cdot10^{28}$ см$^{-3}\cdot$ с$^{-1}$. Если бы все эти соударения были эффективны, т. е. приводили к химическому взаимодействию, то вся смесь прореагировала бы за малое время, так как число молекул водорода в этом объеме $n_1 \approx 1{,}7\cdot10^{19}$ см$^{-3}$.

Молекулы, обладающие необходимым запасом энергии, достаточным для разрыва или ослабления существующих связей, называются активными молекулами или активными центрами химических реакций. Разность между средним уровнем запаса энергии молекул в активном, возбужденном состоянии и средним уровнем энергии остальной массы молекул, находящихся в «нормальном», т. е. неактивном, невозбужденном состоянии, называется энергией активизации $E_{акт}$. Чем выше численное зна-

чение $E_{акт}$, тем труднее заставить данную пару компонентов вступить в химическую реакцию. Поэтому величина энергии активизации является как бы косвенным показателем степени пожарной опасности данного вещества. Прочность химических связей находится в пределах сотен килоджоулей на моль (400…700 кДж/моль), а энергия (средняя) теплового движения молекул в пределах единиц килоджоулей на моль $RT \approx 2{,}5$ кДж/моль. На первый взгляд никакого разрушения старых связей не должно происходить. Однако химические реакции протекают, и скорость их с температурой возрастает по экспоненциальному закону. Это свидетельствует о том, что в реакционной системе имеются частицы с достаточно высокими энергиями ($W \geq E_{акт}$). Данные реакционноспособные частицы могут образоваться в результате взаимодействия частиц, при котором они передают энергию друг другу. Поскольку частиц в единице объема много, то всегда существует вероятность того, что многие частицы передадут энергию одной. Таким образом, в системе всегда существует распределение частиц по энергии (рис. 1.1).

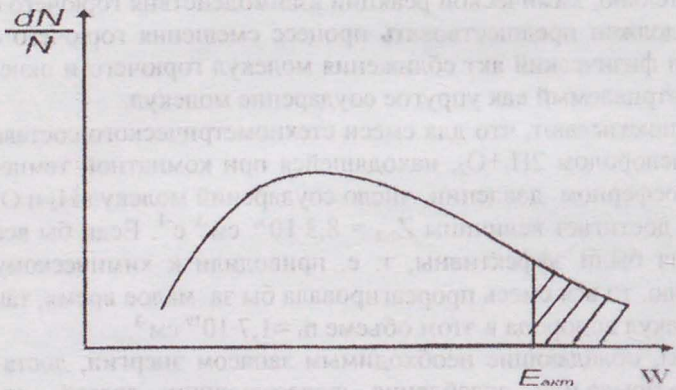

Рис. 1.1. Максвелл–Больцмановский закон распределения частей энергии

Согласно законам статистической физики, в частности в соответствии с законом Больцмана, доля молекул, имеющих энергию,

близкую к $E_ж$,. равна с Распределение энергии между хаотически движущимися молекулами подчиняется статистическому закон} Максвелл-Больцмановского распределения скоростей молекул в газе Поскольку при нормальных температурах доля возбужденных молекул ничтожно мала, го число эффективных соударений Z^,, ~ Z.. е

будет мало, особенно при достаточно большом значении $E_{ак1}$. порядка 100 .200 кДж/моль, как это наблюдается для реакции горения. При комнатной температуре доля возбужденных, химически активных молекул ничтожна, порядка 10 Поэтому реакция практически не идет. При повышении температуры доля химически активных молекул существенно возрастает. При нагревании до 500 *К* в 10¨ раз. а при нагревании от 500 до 1000 К еще более, чем в миллиард раз

Время полного реагирования смеси водорода с кислородом при температуре '1-1000 К составляет величину порядка 1 с, т,,~1 с, такк как число атомов водорода в 1 $см^3$ п~ 10"" $см"^3$. Если два вещества (например, горючее и окислитель), условно А и В, вступают в реакцию, в результате которой образуются два новых вещества, продукгы горения, условно М и N, и при этом возникает какой-то тепловой эффект +Q, го можно записать: A+B =M+N ±Q. В этом уравнении знак (+) или (-) перед Q означает, что это экзотермическая или эндотермическая реакции. Как известно, реакции горения, как правило, экзотермичиы. Если концентрация реагентов и продуктов реакции соответственно равны a, b, m, n, то скорость химических реакций можно выразить через скорость превращения исходных компонентов смеси или, наоборот, через скорость возникновения новых веществ - продуктов реакции. Если изменение концентрации С того или иного вещества в рассматриваемом объеме происходит только в результате химической реакции, то скорость реакции определяется по формуле (1.1.)

(1.1.)

При наблюдении за концентрацией исчезающих реагентов (горючего и окислителя) видно, что скорость реакции будет соответственно равна $\upsilon = -\frac{da}{d\tau} = -\frac{db}{d\tau}$, а при наблюдении за концентрацией образующихся веществ, которая возрастает, то $\upsilon = \frac{dm}{d\tau} = \frac{dn}{dt}$ и т. д. Так

лениях или концентрациях ниже критических значений, а выше этих значений скорости реакций резко возрастают (рис. 1.4, 1.5).

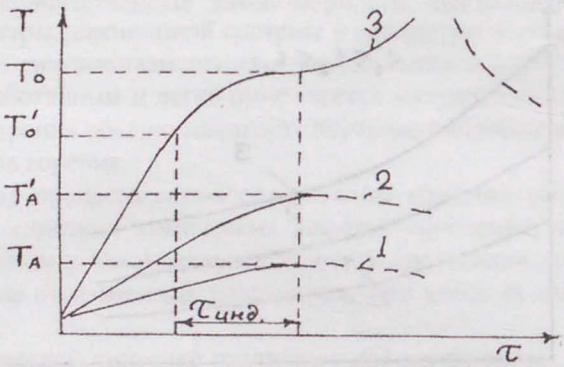

Рис. 1.5. Изменение температуры системы при реакциях взрывного типа во времени: 1 – стационарный нагрев горючей смеси до T_A (воспламенение отсутствует; 2 – предельное состояние на границе воспламенения; 3 – кривая точки перегиба, после которой происходит скачок температуры – воспламенение

Особенности кинетики реакции взрывного типа были описаны еще в середине прошлого века Бунзером и Вант-Гоффом. При изменении температуры или давления в зоне этих реакций скорость протекания их резко изменяется. Так, при комнатной температуре и атмосферном давлении смесь водорода с кислородом даже состава, близкого к стехиометрическому, не вступает в реакцию в течение многих лет. При повышении температуры смеси скорость реакции практически не возрастает, вплоть до некоторого критического значения порядка 550 °С. При дальнейшем повышении температуры скорость химической реакции взаимодействия водорода с кислородом резко возрастает. После повышения температуры смеси всего на несколько градусов выше критической происходит бурное взаимодействие реагентов, скорость химической реакции возрастает почти скачком, давление резко увеличивается и может появится открытое пламя с одновременным разрушением сосуда, если его прочность окажется недостаточной. Воспламенение сопровождается резким, внезапным хлопком, за что эта смесь называется «гремучей». Такое же резкое изменение скорости некоторых реакций «взрывного» типа можно получить, если увеличивать давление смеси при постоянной температуре. При некоторых значениях давления реакция совсем не идет или протекает чрезвычайно медленно. Теперь повысим давление выше

критического значения, реакция пройдет мгновенно, также с хлопком и видимым свечением зоны реакции. Иногда такое резкое изменение скорости химических реакций происходит при изменении концентрации реагентов или других параметров системы. Характерный вид кривой изменения скорости реакции взрывного типа показан на рис. 1.4, температуры – на рис. 1.5, а изменение давления водородно-воздушной смеси, сгорающей в замкнутом сосуде, показан на рис. 1.6. Из графиков (рис. 1.4 – 1.6) видны две характерные особенности кинетики реакций взрывного типа: наличие периода индукции и существование критических условий. Критическое значение температуры, при которой скорость химической реакции изменяется почти скачком, условно называется температурой самовоспламенения. Скачкообразное изменение скорости протекания многих химических реакций горения часто объясняется цепным характером ее развития, т. е. зависимостью скорости реакции от концентрации активных центров (атомов и радикалов), образующихся при реакции.

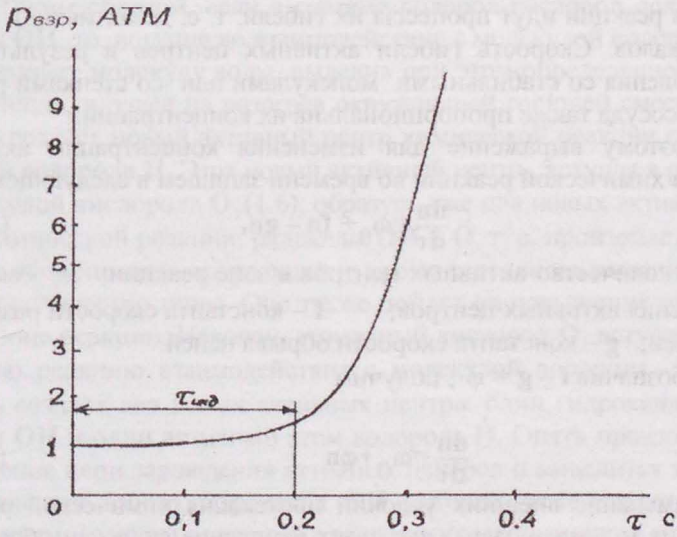

Рис. 1.6. Изменение давления в замкнутом сосуде во времени при реакции взрывного типа

1.3. Цепной механизм самовоспламенения реакционных смесей

Химические реакции окисления, и особенно цепные, идут через образование активных частиц. Скорость протекания таких реакций зависит от концентрации этих частиц в зоне горения. В процессе реакции количество их может возрастать по двум причинам. Активные молекулы могут возникать в результате повышения скорости теплового движения молекул, но скорость этого процесса сравнительно мала. А могут возникать активные центры химической реакции в результате разветвления цепей, когда после элементарного химического акта с участием одного атома или радикала возникают два атома или химически активных радикала. Скорость образования активных радикалов пропорциональна концентрации активных веществ. Скорость образования новых активных центров химической реакции пропорциональна их концентрации и определяет основные закономерности кинетики цепных реакций. Параллельно с образованием активных центров реакции идут процессы их гибели, т. е. дезактивации атомов и радикалов. Скорость гибели активных центров в результате их столкновения со стабильными молекулами или со стенками реакционного сосуда также пропорциональна их концентрации.

Поэтому выражение для изменения концентрации активных центров химической реакции во времени запишем в следующем виде

$$\frac{dn}{d\tau}=\omega_0+fn-gn, \qquad (1.3.)$$

где **n** – количество активных центров в зоне реакции; ω_0 - скорость зарождения активных центров; **f** – константа скорости разветвления цепей; **g** – константа скорости обрыва цепей.

Обозначив $f-g=\varphi$, получим

$$\frac{dn}{d\tau}=\omega_0+\varphi n \quad . \qquad (1.4.)$$

Изменение внешних условий протекания химической реакции (давления и температуры) вызывает изменение скорости обоих процессов – и разветвления, и обрыва цепей, т. е. и **f** и **g**. Причем с ростом или понижением температуры **f** изменяется значительно быстрее, чем **g**, так как для гибели активного центра реакции не требуется энергия активации в отличие от **f**. Поэтому с изменением температу-

ры в зоне реакции знак перед φ изменяется, потому что при достаточно высоких температурах процесс может быть разветвленным, развивающимся, а при низких – регрессивным, затухающим.

Анализ основного уравнения развития цепных реакций (1.3, 1.4.) показывает возможность осуществления цепного механизма процесса воспламенения, который можно рассмотреть на примере реакции водорода с кислородом.

Из химической физики протекания реакций окисления известно, что записанная в конечном виде реакция сгорания водорода в кислороде $2H_2 + O_2 = 2H_2O$ на самом деле протекает через ряд элементарных промежуточных реакций, в которых важную роль играют реакции с участием активных частиц – радикала OH и атомов водорода $\dot{H}$ и кислорода $\ddot{O}$:

$$\dot{OH} + H_2 = H_2O + \dot{H}, \qquad (1.5)$$

$$\dot{H} + O_2 = \dot{OH} + \ddot{O}, \qquad (1.6)$$

$$\ddot{O} + H_2 = \dot{OH} + \dot{H} \qquad (1.7)$$

Таким образом, если в системе водород-кислород появился радикал $\dot{OH}$, то, вступив во взаимодействие с молекулой водорода (1.5), он образует молекулу воды, выделив при этом определенное количество тепла, идущее на разогрев окружающей горючей смеси, а главное – создаст новый активный центр химической реакции окисления – атом водорода $\dot{H}$. Этот новый активный центр , вступая в реакцию с молекулой кислорода O_2 (1.6), образует уже два новых активных центра химической реакции: радикалы $\dot{OH}$ и $\ddot{O}$, т. е. произойдет разветвление цепи химических реакций и, кроме того, вновь выделится некоторое количество тепла. Оно также пойдет на повышение температуры в зоне реакции. Наконец, атомарный кислород $\ddot{O}$, вступая в химическую реакцию взаимодействия с молекулой водорода H_2 (1.7), вновь создаст два новых активных центра: один гидроксильный радикал $\dot{OH}$ и один активный атом водорода $\dot{H}$. Опять произойдет разветвление цепи зарождения активных центров и выделится тепло при образовании нового гидроксила $\dot{OH}$, которое также пойдет на повышение температуры реагентов в зоне химической реакции горения.

Проанализировав промежуточные реакции окисления водорода с кислородом (1.5, 1.6, 1.7) можно увидеть, что реакция (1.5) является продолжением цепи, а две другие (1.6, 1.7) – разветвлением цепи, когда в результате взаимодействия одного активного центра химической реакции (**H** или **O**) возникают два новых: $\dot{OH}$ и $\ddot{O}$; $\dot{OH}$ и $\dot{H}$. По-

этому достаточно в системе водород-кислород, находящейся внутри концентрационных пределов воспламенения при соответствующих температуре и давлении возникнуть одному атому водорода, чтобы вызвать возрастающее появление активных центров химических реакций горения, образование которых прекратиться лишь после израсходования исходных реагентов.

Установлено, что на начальных стадиях реакции этой системы химическая энергия реагирующих веществ переходит не столько в тепловую энергию, сколько в химическую энергию образования новых активных частиц – атомов и радикалов – по цепному механизму.

Следует отметить, что геометрия реакционной системы также влияет на константы скорости разветвления и обрыва цепей. При незначительных размерах реакционной системы скорость гибели радикалов на стенках сосуда будет превышать скорость разветвления цепей. Процесс горения в этом случае может протекать с незначительными скоростями. По мере увеличения размеров сосуда скорость разветвления будет возрастать, а скорость гибели радикалов на стенках сосуда снижаться, и, соответственно, скорость процесса горения должна также возрастать и при критическом объеме процесс горения перейдет во взрыв.

1.4. Тепловое самовоспламенение

Для предотвращения случаев самопроизвольного воспламенения горючих смесей и предупреждения, таким образом, пожаров и взрывов по механизму самовоспламенения большое значение имеет температура самовоспламенения, т. е. наименьшая температура горючей смеси, при которой бесконечно медленный процесс окисления с накоплением тепла, выделяемого в результате реакции, может перейти во взрывное горение. Зависимость температуры самовоспламенения от вида горючего вещества, состава смеси и других параметров системы проще всего устанавливается из тепловой теории самовоспламенения, разработанной Семеновым Н. Н. и его учениками.

Рассмотрим процесс развития экзотермической реакции газопаровоздушных смесей (горючего с окислителем) в закрытом сосуде, стенки которого имеют постоянную температуру T_0. Если $T_0 < T_{кр} \approx T_{св}$, реакции окисления практически отсутствуют. Повы-

сим температуру сосуда и содержащейся в ней смеси до $T_0' \approx T_{кр}$, сообщив системе некоторое количество тепла извне. Скорость химических реакций окисления и, соответственно, скорость тепловыделения в системе резко возрастут. При этом скорость тепловыделения будет соответствовать уравнению вида

$$q_в = QV\upsilon, \qquad (1.8.)$$

где $q_в$ – количество тепла, выделившегося в результате химических реакций компонентов газовой смеси внутри сосуда в единицу времени, кДж/с; Q – теплота реакции горения горючего газа, кДж/моль; V – объем сосуда, $м^3$; υ - скорость химической реакции, моль/($м^3 \cdot$ с).

Подставляя в уравнение (1.8) значение скорости химической реакции по закону Аррениуса, выраженное через состав горючей смеси, константу химической реакции и энергию активации C_1, C_2 , k_0 и **E**, получим:

$$q_в = QV\, k_0 C_1^{\nu_1} C_2^{\nu_2} e^{-\frac{E}{RT}}, \qquad (1.9)$$

где k_0 – константа скорости химической реакции; C_1 , C_2 – соответственно концентрация горючего и окислителя; ν_1, ν_2 – порядок реакции по горючему и окислителю; E – энергия активации реакций горения, кДж/моль; **R** – универсальная газовая постоянная, кДж/(моль·К); **T** – температура реагирующей смеси, К.

Такое количество тепла выделяется в реагирующей системе в единицу времени и идет на повышение ее температуры (и, соответственно, на повышение скорости реакции), т. е. процесс тепловыделения в системе возрастает по экспоненте. Как только температура реагирующей газовой среды внутри сосуда повысится за счет накопления в ней тепла и станет выше температуры стенок сосуда, возникнет конвективный тепловой поток к стенкам сосуда и далее – в окружающую среду. Интенсивность теплового потока (теплоотвода от реагирующей системы) $q_{то}$ будет пропорциональна разности темпера-

тур среды в сосуде и термостате – $(T_{см} - T_0^{/})$, площади поверхности сосуда и коэффициенту теплоотдачи α:

$$q_{то} = \alpha S(T_{см} - T_0^{/}), \qquad (1.10)$$

где $q_{то}$ – количество тепла, отводимого от реагирующей смеси в единицу времени, кВт; α – коэффициент теплоотдачи от реагирующей смеси к стенке сосуда, кВт/(м^2 ·К); **S** – площадь поверхности стенок сосуда, м^2; **T** – температура реакционной смеси, К; $T_0^{/}$ – термостатированная температура стенок сосуда, К.

Если пренебречь изменением концентрации горючей смеси в результате процесса химического взаимодействия горючего с окислителем C_1 и C_2 и влиянием этого изменения на скорость химической реакции ω (рассматривать квазистационарный процесс выгорания), то можно проанализировать тепловое состояние системы.

Если $q_в > q_{то}$, смесь будет продолжать нагреваться с течением времени по мере развития реакции горения и скорость реакции будет возрастать. Если $q_в = q_{то}$, система выйдет на стационарный режим, температура и скорость окисления смеси будут постоянны.

Если $q_в < q_{то}$, система охладиться до равновесной температуры и скорость реакции будет соответствовать первоначальной. Величина $q_в$ увеличивается с температурой, так же как и скорость реакции, – по закону Аррениуса (1.9), а скорость отвода тепла – линейно (1.10).

Проанализируем состояние и поведение данной системы при различном соотношении значений $q_в = f(T)$ и $q_{то} = f(T)$, что соответствующим образом отразиться на взаиморасположении кривых (рис. 1.7, 1.8).

Допустим, что коэффициент теплоотдачи у системы настолько велик, что интенсивность теплоотвода $q_{то} = f(T)$ больше интенсивности тепловыделения $q_в = f(T)$. При повышении температуры с $T_0^{/}$ до T_A, температура системы перестанет возрастать, так как после пересечения кривых $q_в$ и $q_{то}$ в точке А интенсивность теплоотвода $q_{то} = f(T)$ будет выше интенсивности тепловыделения $q_в = f(T)$. Система стабилизируется в точке А при температуре T_A, и дальнейшего ускорения процесса химического взаимодействия горючего с окислителем не происходит, так как в этой точке интенсивность тепловыде-

ления и теплоотвода равны, $q_{то} = q_в$. Таким образом, система приходит в состояние теплового равновесия.

Если даже условно вывести ее из этого состояния, слегка повысив температуру системы с T_A до $T_A + \Delta T$, то она вновь вернется в свое прежнее состояние при температуре T_A, так как при $T_A + \Delta T$ интенсивность теплоотвода $q_{то} = f(T)$ выше интенсивности тепловыделения $q_в = f(T)$. Самовоспламенения или теплового взрыва не произойдет. Сообщим системе большой запас внешнего тепла и переведем ее в новое состояние при температуре T_B, тогда характер процесса существенно изменится. Вновь $q_в$ будет равна $q_{то}$, так как кривые $q_в = f(T)$ и $q_{то} = f(T)$ пересекутся в точке В, но теперь система придет в неустойчивое состояние. Если температуру снизить до значения ниже T_B, т. е. до температуры $T_A - \Delta T$, то интенсивность теплоотвода $q_{то}$ окажется выше интенсивности тепловыделения $q_в$ и система самопроизвольно охладиться до температуры T_A. В точке А система в состоянии устойчивого теплового равновесия, но теплового взрыва не произойдет. Окисление происходило очень медленно. Если же систему перевести в состояние чуть правее точки В, т. е. разогреть ее до температуры $T_A + \Delta T$, то она самопроизвольно выйдет из состояния теплового равновесия, так как интенсивность тепловыделения $q_в$ станет выше интенсивности теплоотвода $q_{то}$. Система быстро разогреется, скорость химических реакций резко возрастет и температура системы повысится до температуры горения $T_{гор}$. Возникнет пламенное горение. Этот случай не будет носить характера теплового взрыва или самовоспламенения, так как процесс горения начался в результате подвода к системе большого количества тепла +Q и принудительного разогрева ее до высокой температуры $T_в$. Изменим внешние или внутренние условия эксперимента, резко уменьшив коэффициент теплоотдачи α, например $\alpha_1 = 0{,}5\alpha$ (рис. 1.7). Тогда, как только разогреется система до температуры термостатирования $T_0^{/}$, произойдет воспламенение горючей смеси, так как при температуре $T_0^{/}$ интенсивность тепловыделения $q_в = f(T)$ выше интенсивности теплоотвода $q_{то} = f(T)$.

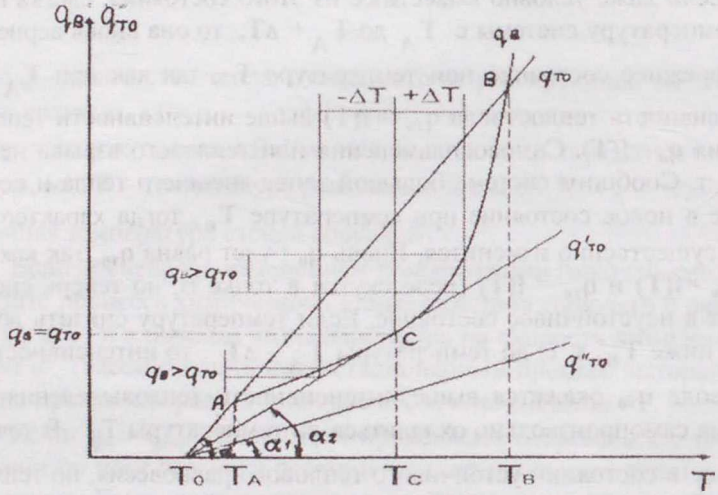

Рис. 1.7. Зависимость интенсивности теплоотвода от изменения коэффициента теплоотдачи

Этот случай также не носит характер теплового взрыва, так как система изначально приведена в состояние, при котором воспламенение ее неизбежно. Это принудительное зажигание системы за счет внешней энергии.

Наибольший интерес с позиции теплового самовоспламенения горючей смеси представляет такой случай, при котором коэффициент теплоотвода имеет такое значение, при котором прямая интенсивности теплоотвода ($q_{то}$) является касательной к кривой интенсивности тепловыделения ($q_в$).

Если систему довести до температуры T'_0 и термостатировать при этой температуре, то в ней начнет выделяться и аккумулироваться тепло, повышая постепенно температуру системы до T_C . При температуре T_C $q_{то} = q_в$, т. е. интенсивность тепловыделения становится равной интенсивности теплоотвода и система приходит в неустойчивое состояние. Если температура понизится до $T = T_C - \Delta T$, система вновь разогреется до T_C за счет того, что снова $q_в > q_{то}$. Если же

температура чуть изменится в большую сторону, то $T = T_C + \Delta T$, система резко, самопроизвольно, перейдет к интенсивному саморазогреву смеси, так как справа $q_в$ тоже больше $q_{то}$. В системе резко увеличивается скорость химической реакции окисления и появится открытое пламя, без видимых внешних причин. Это и есть случай самовоспламенения горючей смеси.

Если, не изменяя интенсивности тепловыделения $q_в = f(T)$и коэффициента теплоотдачи α, изменять интенсивность теплоотвода от системы $q_{то} = f(T)$ за счет изменения начальной температуры термостатирования $T_0^{/}$, то можно подобрать такое значение T_0, при котором также произойдет тепловое самовоспламенение. Из рис. 1.8 видно, что при начальной температуре термостатирования T_0 график $q_{то} = f(T)$ дважды пересекает кривую зависимости $q_в = f(T)$. Первый раз в точке А при температуре T_A, когда $q_в = q_{то}$ и система попадает в стационарное состояние медленного окисления без теплового взрыва, как в рассмотренном выше случае. Теперь системе сообщим дополнительное тепло $+Q$ и переведем ее в точку В второго пересечения, тогда вновь $q_в$ будет равно $q_{то}$, система опять перейдет в состояние неустойчивого равновесия. При температуре $T_в - \Delta T$ система охладиться до T_A и перейдет в стабильное состояние в точке А, так как левее точки В $q_{то} > q_в$, а при переводе ее в состояние $T_в + \Delta T$ произойдет зажигание смеси вследствие того, что справа от точки В $q_в > q_{то}$. Это случай принудительного поджигания смеси за счет подвода к ней большого количества внешней энергии $+Q$ и разогрева ее до высокой начальной температуры $T > T_в$.

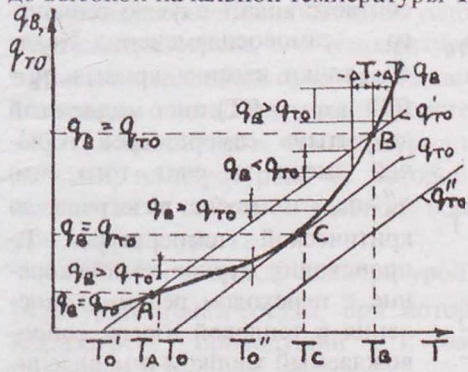

Рис. 1.8. Зависимость интенсивности теплоотвода от изменения начальной температуры смеси

Воспламенение смеси произойдет, если систему разогреть до начальной температуры $T_{0,}$. При этой температуре интенсивность тепловыделения $q_в = f(T)$ выше интенсивности теплоотвода $q_{то} = f(T)$, поэтому произойдет

принудительное зажигание горючей смеси при температуре T_0.

Рассмотрим случай теплового самовоспламенения, когда начальная температура термостатирования системы равна T_{02}, кривая $q_{то} = f(T)$ занимает предельное положение касательной к кривой $q_в = f(T)$ (рис. 1.8). При этом система без видимых внешних причин перейдет из состояния T_{02} в равновесное состояние при температуре T_c, так как до этой точки $q_в > q'_{то}$. Затем самопроизвольно, бурно, без внешнего воздействия перейдет к открытому пламенному горению, потому что правее точки С интенсивность тепловыделения $q_в$ выше интенсивности теплоотвода $q'_{то}$.

Аналогично картину теплового самовоспламенения можно реализовать и при других условиях протекания процесса самовоспламенения. Если коэффициент теплоотдачи α, начальная температура смеси T_0, интенсивность теплоотвода постоянны, а интенсивность тепловыделения $q_в = f(T)$ изменять за счет давления в системе или других параметров (рис. 1.9), то $q'_в = f(T)$ будет соответствовать вынужденному зажиганию. Интенсивность тепловыделения $q'''_в = f(T)$ будет соответствовать либо медленному стабильному окислению без воспламенения при температуре T_A, либо вынужденному зажиганию при температуре $T_в$.

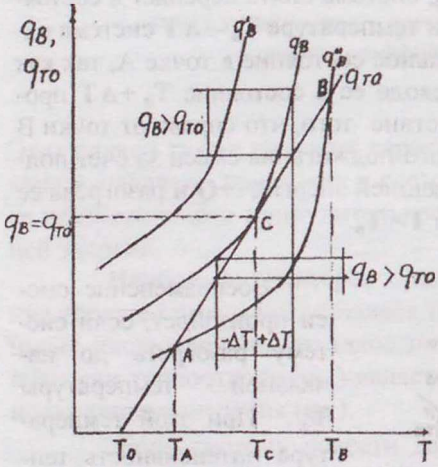

Рис. 1.9 Зависимость интенсивности тепловыделения от изменения давления или концентрации горючей смеси

И только $q''_в = f(T)$ будет соответствовать случаю теплового самовоспламенения. Когда до точки касания кривых $q''_в = f(T)$ и $q_{то} = f(T)$ идет медленный «скрытый» саморазогрев горючей смеси за счет того, что $q''_в > q_{то}$, то после разогрева до критической температуры T_C происходит бурное самоускорение с переходом реакции окисления в тепловой взрыв, сопровождаемый хлопком и появлением открытого пламени.

1.5. Температура самовоспламенения и ее зависимость от природы горючего

За температуру теплового самовоспламенения принимают ту наименьшую температуру, начиная с которой возможен медленный саморазогрев системы, приводящий к ускорению химических реакций окисления, завершающихся тепловым самовоспламенением.

Интенсивное самовозгорание горючей смеси и резкое повышение скорости химических реакций окисления за счет саморазогрева смеси во всех случаях (рис. 1.7 – 1.9) начинается после повышения температуры до T_C, т. е. после точки С – общей точки кривых интенсивности тепловыделения $q_в = f(T)$ и интенсивности теплоотвода $q_{то} = f(T)$. Так как эта точка общая, то в ней интенсивность тепловыделения в системе равна интенсивности теплоотвода от нее

$$q_в = f(T) = q_{то} = f(T).$$

Поскольку кривая $q_{то} = f(T)$ является одновременно и касательной к кривой $q_в = f(T)$ в точке С, соответствующей температуре T_C, значит и их первые производные в этой точке по температуре тоже равны:

$$\left(\frac{dq_в}{dT}\right)T_C = \left(\frac{dq_{то}}{dT}\right)T_C.$$

Эти условия однозначно определяют истинную температуру начала интенсивного саморазогрева горючей смеси или начала теплового взрыва. Поскольку экспериментально замерить истинное значение температуры реагирующей смеси довольно трудно, за температуру самовоспламенения системы условно принимают температуру начала саморазогрева, т. е. температуру стенки сосуда T_0, с которой начинается медленный самоускоряющийся саморазогрев, приводящий к тепловому самовоспламенению системы.

Таким образом, температура стенки сосуда T_{02} является предельной температурой, до которой нельзя разогревать смесь без опасности ее самопроизвольного воспламенения, которое произойдет при температуре T_C.

Разность между температурой самовоспламенения $T_{св}$ и температурой стенки сосуда, при которой начинается необратимый саморазогрев, приводящий к самовоспламенению, составляет в 25…30° К.

Различные соединения отличаются численными значениями $\mathbf{T_{св}}$, так как склонность горючих смесей к реакциям окисления неодинакова. Окилительно-восстановительные реакции, лежащие в основе воспламенения и горения, протекают по цепному механизму, через разрыв связей в молекулах и образование промежуточных активных молекул и радикалов. Чем выше энергия разрыва связи, тем труднее идет реакция окисления, а следовательно, выше температура самовоспламенения.

Так, энергия разрыва С-Н – связи в молекуле метана равна 425,0 кДж/моль, у этана, следующего соединения гомологического ряда парафинов, – 410,1 кДж/моль, а температуры самовоспламенения соответственно равны 810 и 788 К. Закономерность изменения $T_{св}$ одного гомологического ряда показывает, что наибольшей температурой самовоспламенения обладают первые члены ряда. По мере увеличения длины углеродной цепи энергия связи С-Н ослабевает потому, что значительное количество ее расходуется на внутренние степени свободы: вращение и колебание. Происходит изменение геометрической конфигурации молекулы и облегчается возможность реагирования горючего с окислителем. При увеличении длины неразветвленной цепи в молекулах одного гомологического ряда, начиная с $C_9 – C_{10}$, энергия связей и $\mathbf{T_{св}}$ отличаются друг от друга незначительно.

Для углеводородов изостроения соблюдается следующее правило: способность к самовоспламенению (реакции окисления) понижается с увеличением разветвлений в молекуле. В табл. 1.1 приведена температура самовоспламенения некоторых предельных углеводородов в зависимости от их строения.

В общем случае $\mathbf{T_{св}}$ уменьшается с увеличением длины углеводородной цепи:

$$\mathbf{T_{св}} = A(1+e^{B/e}),$$

где А, В – постоянные, определяемые природой углеводородов; е – число атомов углерода в молекуле углеводорода.

Аналогичная зависимость $T_{св}$ от длины углеродной цепи молекулы наблюдается и для других классов органических соединений.

В таблице 1.2 дана $\mathbf{T_{св}}$ некоторых соединений разных классов. Из нее видно, что температура самовоспламенения у разных классов соединений зависит от склонности этих соединений к реак-

ции окисления. Так, соединения с кратными связями окисляются легче, чем насыщенные.

В каждом гомологическом ряду с увеличением молекулярной массы происходит изменение агрегатного состояния соединений: от газов к жидкостям и твердым веществам. Поэтому с переходом к высшим гомологам ряда зависимость $\mathbf{T_{св}}$ от химического строения уже не проявляется так наглядно: сказываются физические эффекты взаимодействия в конденсированной фазе.

Впервые взгляды на горение как окислительно-восстановительные реакции, протекающие с участием радикалов, были высказаны в 1897 году Бахом и Энглером, которые предположили, что окисление кислорода воздуха протекает через стадию образования перекисных радикалов, способных в дальнейшем распадаться и передавать свой кислород другим соединениям. С увеличением ненасыщенности соединения, проявлением неспаренных электронов способность к таким превращениям увеличивается, а следовательно, увеличивается их склонность к самовоспламенению. Процесс самовоспламенения ускоряют также посторонние примеси, стенки сосуда и всякие другие вещества, которые являются катализаторами окислительно-восстановительной реакции. Это необходимо учитывать во всех случаях, когда горючие смеси соприкасаются с каталитическими поверхностями. Так, для бензола $\mathbf{T_{св}}$ меняется от 853 до 1026 К при определении ее в стеклянном или железном сосудах одинакового размера, т. е. диапазон изменения стандартной величины достигает 173 К. Поэтому определение $\mathbf{T_{св}}$ по методу капли проводится в стеклянном сосуде.

Таблица 1.1

Название соединения	$T_{св}$, К	Примечание
Н-гексан	507	Число углеродных атомов во всех соединениях равно шести
2,3-диметилбутан	693	
2-метилпентан	580	
1,2-диметилбутан	698	

Таблица 1.2

Название и класс соединения	Химическая формула (брутто)	$T_{св}$, К
Предельные Метан	CH_4	810
Этан	C_2H_6	788
Пропан	C_3H_8	777
Бутан	C_4H_{10}	704
Пентан	C_5H_{12}	557
Гексан	C_6H_{14}	534
Непредельные Этилен	C_2H_4	813
Пропилен	C_3H_6	638
Бутилен	C_4H_8	657
Амилен	C_5H_{10}	571
Гексилен	C_6H_{12}	545
Ароматические Бензол	C_6H_6	864
Толуол	C_7H_8	841
Этилбензол	C_8H_{10}	733
Диэтилбензол	$C_{10}H_{14}$	677

Экспериментально установлено, что температура самовоспламенения в пределах гомологического ряда снижается с увеличением длины углеродной цепи. Значения $T_{св}$, соответствующие средним длинам углеродных цепей для разных классов органических соединений, приводятся в табл.1.1.–1.2. Поэтому методика нахождения $T_{св}$ сводится к определению средней длины углеродной цепи в молекуле данного класса соединения. Расчет длины цепей для каждого класса соединений имеет свои особенности. Расчетная формула условной средней длины цепи в молекуле имеет вид

$$l_{ср} = \frac{\sum_{i=1}^{n} n_i c_i}{\sum n_i},$$

где c_i - длина i- й углеродной цепи в молекуле; n_i - число цепей, длина которых составляет l_i .

Общее число цепей в молекуле находят по формуле

$$\sum n_i = \frac{M(M-1)}{2},$$

где M – число концевых групп в молекуле, которыми принято считать метильные группы – CH_3, ароматический радикал C_6H_5- или C_6H_4 - и т. д.

Формула радикала определяется числом заместителей в бензольном ядре. Для спиртов алифатического ряда концевой считается и гидроксильная группа OH. Из общего числа цепей последовательно выбирают цепи с одинаковым числом углеродных атомов, причем для ароматических соединений атомы углерода ароматического ядра в расчет не включаются. Для спиртов расчетная длина цепи, содержащей гидроксильную группу, увеличивается на единицу по сравнению с фактической углеродной цепью. Для ароматических соединений длина цепи, содержащая арильный радикал, уменьшается на единицу по сравнению с фактической длиной.

1.6. Самовоспламенение гетерогенных систем

Под гетерогенными системами следует понимать жидкие и твердые горючие вещества, находящиеся в газообразном окислителе (кислород воздуха). С позиции тепловой теории процесс воспламенения гетерогенных горючих систем принципиально не отличается от воспламенения газообразных, рассмотренных ранее (см. параграф 1.4.).

Поскольку твердые и жидкие вещества имеют границу раздела фаз, то величина удельной поверхности ρ/V или дисперсность будет определять скорость диффузионных процессов, т. е. интенсивность тепловыделения и теплоотвода.

Для жидкостей наибольшее испарение при нагревании наблюдается, когда они находятся в диспергированном состоянии, (например, аэрозоли), так как скорость испарения зависит от размеров поверхности раздела фаз. Поэтому самовоспламенение аэрозолей наступает при более низких температурах, чем, если жидкость находится в открытой емкости. Но в обоих случаях концентрация пара в воз-

духе должна достигать критических значений (концентрационных пределов), при которых начинается устойчивый самоускоряющийся процесс, приводящий к горению.

Самовоспламенение твердых веществ связано с разнообразием процессов, происходящих с твердыми горючими материалами при нагревании. Органические твердые вещества и материалы при нагревании, как правило, разлагаются (пиролизуются) с образованием горючих газообразных, парообразных, которые, смешиваясь с кислородом воздуха, образуют взрывоопасные смеси; оставшийся твердый осадок (кокс) также способен к окислению, а следовательно, при определенных условиях самовоспламеняться.

Вопрос о том, что раньше самовоспламенится: твердый остаток или газовая фаза, зависит от многих факторов, например химического состава газообразных продуктов разложения; температуры, при которой они смешиваются с воздухом; условий массо- и теплообмена в конденсированной фазе горючего. У хлопка, например, твердый остаток имеет $\mathbf{T_{св}}$ = 478 К, а газы воспламеняются при температуре 680 К.

Самовоспламенению неорганических твердых веществ (металлов, сплавов) также предшествует плавление и испарение самих материалов и поверхностных пленок окислов, при этом увеличивается поверхность контакта с воздухом и процесс окисления облегчается.

Таким образом, величина удельной поверхности **S/V**, ее физическое состояние (сплошной массив твердого горючего, пористый дисперсный слой материала и аэрозоль) оказывают существенное влияние на условия самовоспламенения.

На практике наибольшую пожарную опасность представляют пыли. Аэрозоли по воспламенению во многом сходны с газовыми системами. При нагревании их до определенной температуры они самовоспламеняются. Если сравнивать $\mathbf{T_{св}}$ геля и золя, то более низкой температурой обладает аэрогель, так как концентрация его в единице объема выше, чем золя, и условия теплового равновесия наступят при более низкой температуре. Например, гель древесной муки самовоспламеняется при температуре 548 К, а аэрозоль – при 1048 К. Поскольку при проведении технологических процессов (сушка, дробление, транспортировка) аэрогели образуются очень легко, то при оценке пожарной опасности пылей необходимо ориентироваться на $\mathbf{T_{св}}$ аэрогелей.

1.7. Вынужденное воспламенение (зажигание) горючих систем

Самовоспламенение горючих систем на практике встречается весьма редко. Чаще горение начинается с вынужденного воспламенения (зажигания). Принципиально, по своей физической сущности, зажигание или вынужденное воспламенение не отличается от процесса самовоспламенения, так как и в этом случае самоускорение реакции воздействия горючего и окислителя наступает после повышения температуры системы выше определенного значения.

Разница в условиях возникновения и в механизмах протекания этих процессов сводится к следующему. Первое, что при самовоспламенении вся смесь разогревается равномерно и доводится постепенно до температуры самовоспламенения. В результате этого реакции окисления возникают и ускоряются во всем объеме газовой смеси, и процесс горения может возникнуть равновероятно в любой точке рассматриваемого пространства или во всем объеме одновременно. А в случае зажигания вся масса реакционноспособной горючей смеси может оставаться относительно холодной, до температуры воспламенения достаточно быстро нагревается только незначительная ее часть. Второе отличие состоит в том, что при самовоспламенении процесс самоускорения реакций горения нарастает сравнительно медленно, т. е. был велик период индукции, а при зажигании процесс воспламенения происходит значительно быстрее, так как разогрев смеси от внешнего источника тепла производиться локально, но значительно быстрее и до более высокой температуры. Поэтому индукционный период зажигания почти отсутствует или очень мал, а возникшее пламя распространяется из зоны его возникновения на всю остальную реакционноспособную смесь с определенной скоростью.

В зависимости от вида внешнего источника тепла и его особенностей различают разные способы или виды зажигания. Источником зажигания может быть разогретое постороннее тело или локально разогретая стенка сосуда с горючей газовой смесью, электрическая искра (емкостная или индукционная), постороннее пламя, внезапное адиабатическое сжатие или ударная волна. При адиабатическом сжатии горючей смеси вынужденное зажигание по своему механизму несколько отличается от других случаев. При этом вся смесь одновременно и равномерно разогревается до высокой температуры, при ко-

торой и происходит ее одновременное воспламенение во всем объеме. Этот процесс происходит значительно быстрее, чем медленный квазистационарный подогрев газовой смеси при самовоспламенении, а температура зажигания при адиабатическом сжатии значительно выше, чем при самовоспламенении, и поэтому при адиабатическом сжатии индукционный период воспламенения так же, как при других видах зажигания, сокращен до минимума.

Рассмотрим случай зажигания горючей смеси от нагретого тела. Упростим для наглядности процесс зажигания до следующей схемы: представим себе «холодную» горючую газовую смесь, заключенную в какой-либо сосуд. Сосуд возьмем «плоский», горизонтальный и подогреваемую стенку расположим сверху, чтобы исключить конвективную теплопередачу, сохранив только кондуктивную передачу тепла за счет теплопроводности газа. Примем горизонтальную ось, параллельную плоской стенке сосуда, за ось температур и предположим, что температура $\mathbf{T_0}$ верхней стенки сосуда равномерна по всей площади и постепенно поднимается до более высоких значений $\mathbf{T_1}$, $\mathbf{T_2}$, $\mathbf{T_3}$ и т. д. В нейтральной среде кривая изменения температуры в газе внутри сосуда имела бы вид линейной зависимости $\mathbf{T=f(y)}$, т.е. она постепенно снижалась бы до начальной температуры газовой смеси по линейному закону по мере удаления от горячей до противоположной, холодной стенки. В реакционноспособной смеси в связи с некоторым выделением теплоты реакции в наиболее разогретой части газовой смеси, вблизи горячей стенки, кривая пойдет несколько круче и линейность ее $\mathbf{T_1' = f(y)}$ вблизи стенки нарушится (рис. 1.10). Если повысить температуру стенки до некоторого значения $\mathbf{T_2}$, кривая температур в нейтральной среде имела бы вид такой, как показано на рисунке, т. е. она снижалась бы до начальной температуры газа $\mathbf{T_0}$, но в реакционноспособной среде, за счет повышения скорости реакций при $\mathbf{T_2}$ и, соответственно, более интенсивного тепловыделения в пристеночном слое газовой смеси вблизи горячей стенки кривая пойдет еще круче и, в принципе, можно подобрать такое значение $\mathbf{T_3}$, когда скорость тепловыделения от реакций в газе возле стенки $\mathbf{q_1=f(T)}$ будет так велика, что температура газа по мере удаления от стенки будет оставаться примерно одинаковой. График температур примет вид $\mathbf{T_i= f(y)}$ (рис. 1.10), когда $T_г = \mathbf{T_i}=$ и $\mathbf{q_в = f(T) = q_{то} = f(T)}$, как при самовоспламенении.

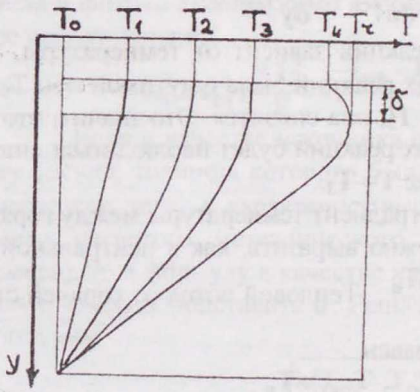

Рис. 1.10. Распределение температуры в газовой среде при воздействии нагретого тела

Если предположить, что температура стенки была квазистационарно поднята до значения $T_4 > T_3$, то система выйдет из стационарного состояния. Газовая смесь вблизи горячей стенки сосуда при температуре T_4 начнет реагировать так интенсивно, что в результате интенсивного тепловыделения в газе его температура возрастет выше T_4, соответственно произойдет самоускорение химических реакций, резко возрастет интенсивность тепловыделения и кривая температур примет вид $T_4 = f(y)$. Произойдет воспламенение горючей меси возле стенки сосуда, и пламя начнет распространяться вниз на остальную реакционноспособную горючую газовую смесь. Соответственно, «горячая» стенка из источника тепла станет стоком тепла. Тепловой поток изменит свое направление на противоположное, так как температура газа возле стенки станет больше $T_г > T_4$ (как при самовоспламенении). $q_в = f(T) = q_{то} = f(T)$. По принятой схеме нарастания температуры T_3 – предельная температура, при которой еще не происходит зажигание горючей газовой смеси, хотя T_3 и больше $T_{св}$. Температура T_3 является в этом случае как бы предельной, критической температурой, при которой не произойдет вынужденное зажигание, так как это нагрев с «одной стороны», поэтому от горячей стенки происходит теплоотвод. чего нет при самовоспламенении, где система изотермична в начальный момент и адиабатична по своей схеме. Температура зажигания T_4 соответственно еще выше $T_{заж} > T_{св}$, так как $T_4 > T_3$. Согласно тепловой теории воспламенения Зельдовича Я. Б., предельным критическим условием зажигания является $\left(\frac{dT}{dn}\right)_{ст} = 0$, где n – нормаль к поджигающей поверхности.

Обозначим вертикальную ось через y (направление вниз).

Тогда $$\left(\frac{dT}{dn}\right)_{ст} = \left(\frac{dT}{dy}\right)_{ст} = 0.$$

Скорость химических реакций зависит от температуры. Поэтому, если скорость химических реакций была ощутимой при T_3, то при удалении от стенки, где $T < T_3$, она снизится. Это значит, что существенная скорость химических реакций будет наблюдаться лишь в тонком приграничном слое δ, где $T \approx T_3$.

Если $\delta << l$, то средний градиент температуры между горячей и холодной стенками сосуда можно выразить, как в нейтральной газовой среде, через $\frac{dT}{dy} \approx \frac{T_{г.ст} - T_0}{l}$. Тепловой поток от горячей стенки к газу соответственно будет равен

$$q_2 = \lambda \frac{dT}{dy} = \lambda \frac{T_{г.ст} - T_0}{l}$$

где λ - теплопроводность газовой смеси.

Если при T_3 поток тепла от стенки к газу, прилегающему к стенке, прекратится, а поток тепла к нижележащим слоям газа из зоны δ будет таким же, как и прежде, это означает, что $q_{ст} = \delta$, где δ – тепло, выделяемое в результате химических реакций в пристеночном слое газа.

Для упрощения задачи сначала пренебрежем изменением концентрации горючего в результате относительно медленных предпламенных реакций в приграничном слое. Тогда можно не рассматривать и процессов молекулярной диффузии, возникающей в результате изменения концентрационного состава смеси в пограничном слое газа. Это означает, что все выделяющееся в результате химических реакций тепло расходуется только на теплопередачу теплопроводностью. Тогда уравнение сохранения энергии можно записать так:

$$\lambda \frac{d^2T}{dy^2} + q\upsilon(T) = 0,$$

где q – тепловой эффект химических реакций в пограничном слое,
$\upsilon(T)$ – зависимость скорости химической реакции от температуры и концентрации.

Проведя элементарные математические преобразования с учетом граничных условий ($y=0$, $T=T_{ст}$, $y=l$, $T=T_0$), можно установить связь геометрических размеров системы l с температурой нагретого

тела и физико-химическими параметрами горючей газовой смеси при ее воспламенении.

$$2q\upsilon(T_{ст})\frac{RT_{ст}^2}{E}=(\frac{T_{ст}-T_0}{e})^2\lambda. \qquad (1.13)$$

Если в качестве источника поджигания взять ненагретую стенку сосуда, толщина которого была принята равной **l**, а поверхность нагретого тела, с характеристическим размером **d** (например, диаметр нагретого металлического шарика, внесенного в горючую смесь), то в формулу в качестве характерного линейного размера системы следует подставить **d**. Решая уравнение (1.13) относительно **d**, получим

$$d=\sqrt{\frac{\lambda(T_{ст}-T_0)^2}{2qw(T_{ст})}\frac{E}{RT_{ст}^2}}. \qquad (1.14)$$

Задавшись размерами нагретого тела **d**, можно определить концентрационные пределы зажигания горючих смесей $\varphi_г=f(T_{ст})$, пределы зажигания по давлению $P_{кр}=f(T_{ст})$ и другие пределы в зависимости от мощности источника зажигания.

Рассмотренная схема механизма вынужденного воспламенения горючей газовой смеси от нагретого тела показала, что температура тела при зажигании выше, чем при самовоспламенении смеси:

1) из-за наличия теплоотвода от горячей стенки в горючий газ;

2) расхода горючих компонентов в пристенном слое;

3) наличия каталитических свойств материала стенки.

Парадоксальная, на первый взгляд, третья причина обусловлена именно интенсивным расходом компонентов горючей смеси вблизи каталитической поверхности. В пограничном слое так интенсивно расходуется горючее, что распространение химических реакций окисления за пределы прилегающей зоны и возникновение процесса горения во всей смеси становится невозможным при тех температурах, при которых оно возникает от некаталитических металлических поверхностей. Особенно хорошо это видно в экспериментах с использованием в качестве поджигающего элемента металлической платины. Так, температура зажигания стехиометрической смеси составляет 1450° для платины и 1020° для стали. Рассмотренные процессы относятся к стационарным, т. е. к разогреву стенки с очень малой скоростью.

Однко в реальных условиях чаще всего возникают нестационарные процессы. При внезапном разогреве стенки до температуры T_1, T_2 или T_3 или внесении в горючую смесь постороннего тела с температурой выше T_3 процесс зажигания качественно будет выглядеть так, как показано на рис. 1.11, т. е. за короткое время зажигания от нагретой стенки (или нагретого тела) прогреется не весь газ, а лишь небольшой пограничный слой газа толщиной δ.

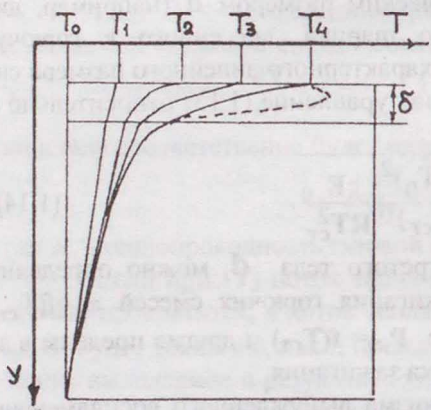

Рис. 1.11. Распределение температуры в горючей газовой среде при быстром нагреве стенки

Температура газовой смеси по всей толщине сосуда **l** останется почти такой же, как и была, т. е. $(\mathbf{T}_г)_{l>\delta} \approx \mathbf{T}_0$ почти весь градиент температур от $\mathbf{T}_г$ до $\mathbf{T}_0$ установится в слое δ. Соответственно этому, тепловой поток от горячей стенки будет значителен только в слое δ.Если в качестве источника зажигания в горючую газовоздушную смесь внезапно вносится нагретое до высокой температуры твердое тело конечных размеров **d**, то картина процесса зажигания будет аналогична рассмотренной.

Но при этом размер и термодинамические параметры зоны разогрева горючей газовой смеси (толщина слоя смеси, ее температура, скорость подогрева и др.) будут зависеть от размеров, формы и температуры поджигающего тела, количества запасенного тепла (т. е. запаса энергии), источника зажигания и других факторов.

Очевидно, что чем меньше площадь поверхности источника зажигания, тем выше должна быть температура его поверхности для обеспечения требуемого запаса тепла в подогретом слое горючего газа; чем меньше собственная теплоемкость источника поджигания (его собственная масса), тем выше должна быть его начальная температу-

ра для сообщения горючей смеси требуемого начального импульса. необходимого для возникновения процессов горения; чем выше температура воспламенения (самовоспламенения) данного вида горючей смеси, тем, соответственно, выше должна быть температура поверхности источника поджигания и т. д.

Эти общие положения хорошо подтверждаются как теоретическими исследованиями (уравнения 1.13, 1.14) так и большим объемом экспериментальных результатов по изучению влияния на температуру зажигания размеров тела, площади его поверхности, давления горючей смеси и ее природы, периода задержки (индукционного периода), скорости потока смеси (рис. 1.12-1.15).

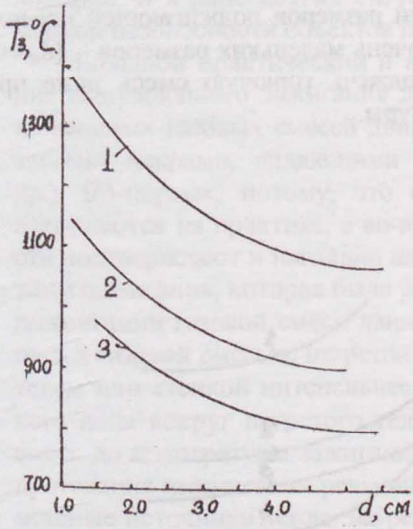

Рис.1.12 Зависимость температуры зажигания горючей смеси от размеров тела: 1 – пентан, 2– светильный газ; 3 – водород

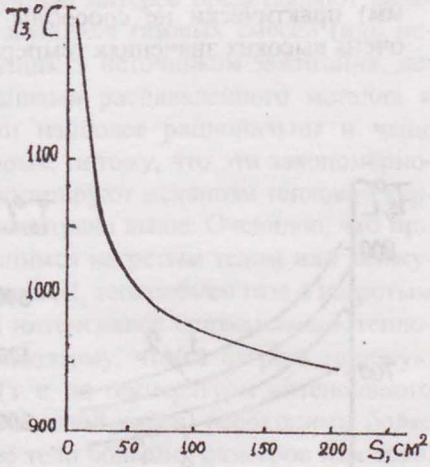

Рис.1.13 Зависимость температуры зажигания горючей смеси от площади нагретой поверхности

Из этих экспериментальных данных видно, что, во-первых, с увеличением диаметра поджигающего шарика с $d_ш$=1 мм до $d_ш$=5 мм температура поджигающей поверхности нагретого тела монотонно снижается для всех трех видов горючей смеси примерно на 250…400 ^{0} С в зависимости от вида горючего. Во-вторых, у легковоспламенимых водородно-воздушных смесей температура воспламенения во всех случаях остается наименьшей (рис. 1.12). Зависимость температуры поджигания от величины площади поджигающей поверхности $T_з$=f(S) наиболее наглядно видна на рис. 1.13. При достаточно большой площади поджигающей поверхности ($S_п$>200 см^2) критическая температура поджигания смеси природного газа с воздухом асимптотически приближается к своему минимальному значению $T_{зиж}$ ≈ 975°С. При уменьшении площади поджигающей поверхности до 50 см^2 она слабо возрастает выше 1000°С, а при дальнейшем уменьшении площади поверхности резко возрастает до 1200°С, стремясь к «бесконечности» при приближении размеров поджигающей поверхности к нулю, т. е. нагретые тела очень маленьких размеров ($d_ш$<<1 мм) практически не способны поджечь горючую смесь даже при очень высоких значениях температуры.

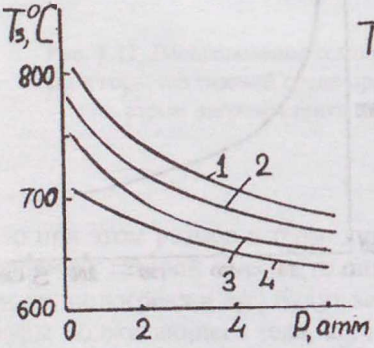

Рис. 1.14 Зависимость температуры зажигания горючей метано-воздушной смеси от давления: 1 – 0,5 с; 2 – 1с; 3 – 2 с; 4 – 3 с

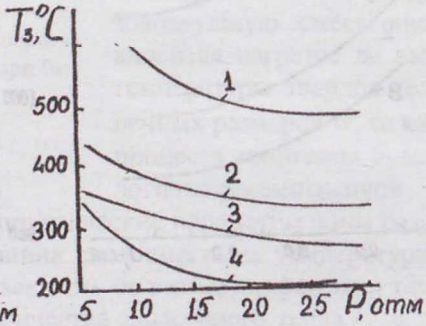

Рис. 1.15 Зависимость температуры зажигания паров горючих жидкостей от давления: 1 – бензол; 2 – цилиндровое масло; 3 – бензин; 4 – нефть

Зависимость температуры зажигающей поверхности от давления и вида горючей смеси показана на рис. 1.14 и 1.15. Из экспериментальных данных, представленных на этих рисунках, видно, что температура вынужденного зажигания горючих газовых смесей и паровоздушных смесей паров горючих жидкостей монотонно снижается до 600 … 650° С для метановоздушных смесей и до минимальной температуры воспламенения углеводородов порядка 200° С для смеси паров нефти с воздухом при высоком давлении порядка 25 … 30 атм. Эти закономерности изменения допустимой (критической) температуры, близкой к температуре зажигания пожароопасных газо- и паровоздушных смесей, от вида горючего, состава смеси, давления, размеров поджигающего тела и других параметров воспламенения необходимо знать для обеспечения пожарной безопасности технологических процессов производства, и для научнообоснованной экспертизы пожаров, и в ряде других ситуаций, связанных с обеспечением пожарной безопасности объектов народного хозяйства.

Большой практический и научный интерес представляют явления вынужденного зажигания движущихся газовых смесей (или неподвижных газовых смесей движущимся источником зажигания: летящими искрами, падающими каплями расплавленного металла и др.). Во-первых, потому, что они наиболее рациональны и чаще встречаются на практике, а во-вторых, потому, что эти закономерности подтверждают и наглядно иллюстрируют механизм тепловой картины зажигания, которая была рассмотрена выше. Очевидно, что при поджигании газовой смеси движущимся нагретым телом или движущейся газовой смесью, нагретой стенкой, теплообмен газа с нагретым телом или стенкой интенсивнее и интенсивнее «размывание» теплового поля вокруг нагретого тела. Поэтому, чтобы нагреть горючую смесь до температуры зажигания (т. е. до температуры интенсивного протекания химических реакций в газовой смеси) необходимы более мощные источники тепла: нагретое тело больших размеров или тело, нагретое до больших температур. Причем чем выше относительная скорость движения горючей газовой смеси или источника поджигания, тем сильнее эта зависимость (например, тем выше критическая температура поджигания).

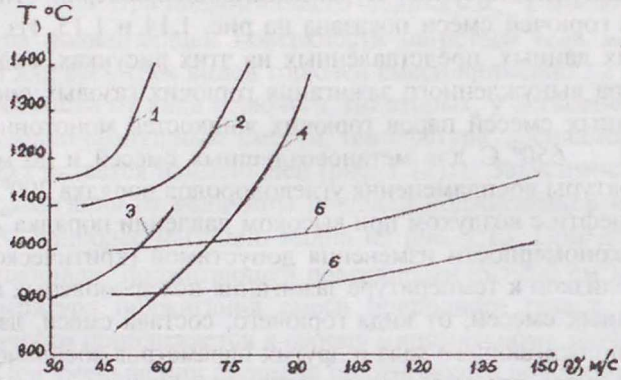

Рис. 1.16. Зависимость температуры зажигания горючей смеси от скорости потока: 1 – пентан; 2 – окись пропилена; 3 – окись этилена; 4 – сероуглерод; 5 – ацетилен; 6 – водород

Экспериментальные данные по зажиганию движущихся газовоздушных смесей нагретыми металлическими стержнями приведены на рис. 1.16. Из приведенных зависимостей видно, что минимальное значение температуры поджигающей поверхности стержня, обтекаемого потоком горючей газовоздушной смеси, у таких легковоспламенимых горючих, как водород и ацетилен. Но и для них с увеличением скорости потока температура поджигающей поверхности возрастает. Наиболее крутой характер зависимости температуры поджигающей поверхности от скорости газового потока у таких горючих, как сероуглерод, окись пропилена, и у пентана. У этих горючих с увеличением скорости потока в два раза температура поджигающей поверхности повышается на 200 … 400°С. Эти закономерности изменения температуры поджигания горючих смесей при тех или иных физических условиях протекания процесса зажигания также необходимо учитывать как при экспертизе пожара (табличное значение минимальной температуры воспламенения сероуглерода всего 100 … 120°С), так и при оценке пожаро-взрывобезопасности тех или иных технологических процессов производств, связанных с обращением, переработкой или сжиганием углеводородных горючих.

Зажигание горючих газовых смесей электрической искрой является довольно распространенным видом вынужденного воспламенения как при управляемом, так и неуправляемом горении. Механизм данного процесса намного сложнее теплового механизма зажигания нагретым телом. При электрическом разряде в горючей смеси образуется канал (определенный объем газа), имеющий высокую температуру (до десятков тысяч градусов) и состоящий из возбужденных и ионизированных молекул (плазмы). Ионизация газов в зоне электрического разряда и образование возбужденных молекул способствует интенсивному течению химических реакций, что, в свою очередь, приводит к воспламенению.

Время действия разряда ничтожно мало, это тысячные доли секунды, но время тепловой релаксации системы достаточно велико. Настолько велико, что его можно рассматривать с позиций термодинамического равновесия при мгновенном выделении тепла и более медленном распределении тепла от первоначально нагретого газа в окружающее пространство, т. е. рассматривать поджигающую искру как своеобразное разогретое газообразное тело.

В соответствии с этим существует две концепции искрового зажигания: ионная теория искрового зажигания и тепловая.

Так как в процессе искрового зажигания имеется наличие элементов того и другого механизма, то можно полагать, что оба они существенны. Вопрос только в том, какой из них является доминирующим и при каких условиях, т.е. когда преобладают одни факторы, а когда другие. Это необходимо знать как для усиления поджигающего действия электрической искры в тепловых установках, двигателях и других устройствах, так и для предотвращения непроизвольных воспламенений горючих газовых смесей для предотвращения пожаров и случайных взрывов газовоздушных и паровоздушных смесей.

При искровом зажигании для каждого вида горючего, каждого состава смеси газов существует некоторое предельное наименьшее значение мощности электрического разряда, начиная с которого смесь способна воспламениться, т. е. возникает фронт пламени и происходит его дальнейшее распространение за пределы зоны зажигания.

Минимальная мощность искры является функцией состава смеси, ее давления, температуры и некоторых других параметров системы. Наименьшее из этих значений мощности электрической искры.

РОССИЙСКАЯ
ГОСУДАРСТВЕННАЯ
БИБЛИОТЕКА
2005

способной поджечь горючую смесь данного вида и состава, называется критической энергией зажигания.

Для каждой горючей смеси имеется наименьшее значение энергии искрового разряда, ниже которой смесь не воспламеняется ни при каком соотношении.

Более значительное внимание в литературе уделяется тепловой теории искрового зажигания. Согласно этой теории, предложенной Зельдовичем Я. Б., электрическая искра заменяется точечным источником тепла, который в момент времени $t=0$ выделяет некоторое количество тепла **Q**. За счет данного тепла разогревается газовое пространство, окружающее источник. Если полученное газом количество тепла достаточно велико и объем газового пространства, разогретого до температуры выше температуры горения $T_г$, больше критической величины $R_{кр}$, то происходит воспламенение горючей смеси. Значение критического объема газовой сферы получают из следующих соображений. Если время охлаждения $T_{охл}$ разогретого энергией искры газового объема от температуры $T_г$ до температуры $T_г-\theta$ больше характеристического времени химической реакции горения t_x, то зажигание горючей смеси, возможно, а если это время меньше $t_x=10^{-4}$ с, то смесь не воспламенится.

$$\theta=\frac{RT_г^2}{E},$$

где θ – интервал температур, при котором скорость реакции уменьшится в *e* раз.

Численное значение критического радиуса разогретой сферы газа, которая способна воспламенить смесь данного вида и состава может быть выражена через толщину фронта пламени $\delta_{пл}$.

$$R_{кр} \geq 3,7\delta_{пл} \approx 4\,\delta_{пл}$$

Для большинства горючих газовых смесей стехиометрического состава при нормальном давлении, температуре и ламинарном режиме горения $\delta_{пл}$ = 0,1 мм. Считают, что слои газовой смеси, прилежащие к сферической поверхности разогретого объема газа, успевают воспламениться прежде, чем рассматриваемый объем газа охладится до температуры ниже температуры поджигания. Количество тепла, которое нагреет такой объем смеси от T_0 до $T_г$, можно подсчитать по формуле

$$Q=\frac{4}{3}\pi R_{экв}^3 c_p \rho (T_г - T_0),$$

где $R_{экв}$ – радиус разогретой сферы газа.

Выраженное через параметры горючей газовой смеси и скорость нормального распространения пламени υ_n, это уравнение дает соотношение критического количества тепла, необходимого для поджигания смеси электрической искрой:

$$Q=\frac{\lambda_г^3 T_0^2 (T_г - T_0)}{\upsilon_n^3 p_0^2 c_p^2}.$$

Это выражение позволяет проанализировать влияние различных физико-химических параметров горючей газовой смеси на энергию вынужденного зажигания $E_{заж} \sim Q$. Известно, что λ, C_P и особенно, υ_n зависят от вида горючего, состава смеси и других условий воспламенения. Соответственно от их изменения меняется и величина Q или $E_{заж}$, необходимая для зажигания горючей смеси данного вида и состава. Количественно энергия вынужденного воспламенения горючих газовых смесей ничтожно малая величина, она колеблется для различных газовых смесей от десятых долей до нескольких миллиджоулей. Минимальное значение критической энергии зажигания наиболее распространенных горючих газовоздушных смесей $E_{кр} \approx 0,2 \ldots 0,3$ мДж , что для некоторых углеводородов $Q_{кр}$ может оказаться несколько ниже, в связи с этим по соображениям техники безопасности следует ввести поправочный коэффициент запаса, критическую энергию зажигания горючих и взрывоопасных углеводородных смесей с воздухом условно можно принять равной $E_{кр} \approx 0,1$мДж.

В ряде работ приведены наглядные иллюстрации процесса вынужденного зажигания горючих газовых смесей электрической искрой, полученные экспериментальным методом скоростной киносъемки. Из этих кинограмм видно, что, если к моменту $t_{охл} \approx t_x \approx 10^{-4}$ с объем сферы разогретых газов и зародившийся очаг горения достигал определенного размера $d_{р.г.} \approx 1$ мм, процесс горения распространялся на всю смесь. Если нет – зона разогретых газов размывалась в той же смеси, но при энергии искры $E_i < E_{кр}$ меньше критической, горения не возникало.

При воспламенении газовозушных смесей неизбежны потери энергии на излучение за счет высоких температур газа в электрической искре, теплопотери на нагрев электродов, а с учетом гасящего действия тела электродов фактическая энергия зажигания будет не-

сколько больше. Поэтому указанное значение критической энергии зажигания $E_{кр} \approx 0$, 1мДж, полученное по тепловой теории, может быть принято в качестве предельного.

Кроме перечисленных факторов, минимальная критическая энергия зажигания углеводородовоздушных смесей зависит от вида горючего, концентрационного состава горючей смеси, давления, диаметра и вида материала электродов и др.

Оценим количественно влияние газового потока. Время продолжительности электрической искры в зависимости от ее мощности Е колеблется в очень широких пределах – от ~ 0,01 до ~ 1000 мкс. Возьмем среднюю продолжительность искры ~ 10 мкс, а характеристическое время тепловых процессов при вынужденном зажигании горючих газовых смесей электрической искрой примем равным характеристическому времени химической реакции $t_x \approx 100$ мс. Тогда при скорости потока в 100 м/с горючая газовая смесь сместится от оси проскока искры на расстояние в 10 мм, т. е. в 10 раз больше характеристического диаметра начального объема разогретой газовой смеси. При скорости газа всего 10 м/с на 1 мм, т. е. на величину, вполне соизмеримую с критическим радиусом сферы разогретого газа. Поэтому при рассмотрении вынужденного зажигания движущихся горючих смесей вводят поправку на П-образную форму разогретой зоны и другие осложняющие факторы типа мелкомасштабной турбулентности, влияющей на условия теплообмена, режим горения и прочие уточнения. Очевидно, что для воспламенения движущихся газовых смесей необходимо большое тепловыделение в электрической искре, и, соответственно, большая электрическая энергия $E_{,}$, пропорционально объему нагреваемой смеси.

В физике дается следующее примерное соотношение

$$Q_{дв} = Q_0 + AU_{см}^{1,5},$$

где Q_0 – энергия воспламенения неподвижной смеси того же состава; $U_{см}$ – скорость течения газовой смеси.

Графически эта зависимость выглядит, как показано на рис. 1.17. С увеличением скорости течения газовой пропано-воздушной смеси энергия вынужденного зажигания растет. Возрастает она и с понижением давления в газовой смеси.

Для пропано- и метано-воздушных смесей стехиометрического состава при нормальном давлении энергия вынужденного зажигания равна 0,2 мДж , при давлении 230 мм рт. ст. она возрастает до 2 мДж (рис. 1.18), а при снижении давления до 125 мм рт. ст. возрастает до 6 мДж. Дальнейшее повышение критической энергии поджигания нопарно-воздушной смеси обусловлено повышением скорости газовоздушного потока и изменением степени его турбулентности, но не превышает 100 мДж даже при зажигании движущихся газовых смесей при пониженном давлении. Для неподвижных смесей и при нормальных условиях (ρ_0, T_0, $\alpha = \alpha_{стех}$) эта величина редко превышает 2 … 3 мДж. Минимальное ее значение еще меньше, порядка 0,2 … 0,3 мДж.

Примерно так выглядит физическая картина и некоторые количественные зависимости основных видов зажигания горючих газовых смесей нагретым телом и электрической искрой.

Существуют еще такие виды вынужденного воспламенения, как зажигание горячими струями газа, зажигание от постороннего источника пламени, зажигание в результате адиабатического сжатия.

Первый и третий виды зажигания применяются преимущественно в технике, в специальных устройствах по сжиганию горючих газов и паров горючих жидкостей, а второй вид зажигания, от постороннего пламени, мало чем отличается от механизма распространения фронта пламени.

При этом в поджигаемую горючую смесь вводятся активные центры химических реакций горения, и подводится тепло, способное инициировать процессы воспламенения и горения поджигаемой газовой смеси. Механизм этих процессов более подробно рассмотрен во второй главе учебного пособия, посвященном явлениям распространения процессов горения.

Зажигание паров горючих жидкостей зависит от вида жидкости и ее температуры. Если она находится при температуре вспышки или несколько выше нее и над ее поверхностью образовалась горючая газовоздушная смесь соответствующей концентрации, то процесс ее поджигания мало отличается от рассмотренного . Если температура жидкости ниже температуры вспышки, то энергии поджигающего тела (раскаленного тела, искр твердого материала или серии электрических искр) должно хватить на испарение некоторого количества легковоспламеняющихся жидкостей (ЛВЖ), горючих жидкостей (ГЖ)

для создания горючей газовоздушной смеси, а затем на ее последующее зажигание по механизму, рассмотренному выше.

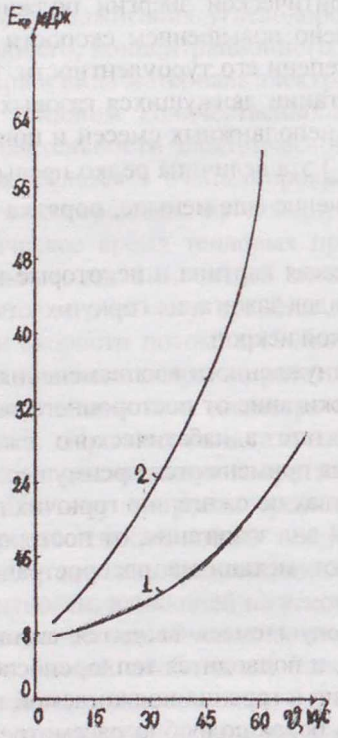

Рис. 1.17. Зависимость минимальной энергии зажигания пропано-воздушной смеси от скорости и режима при давлении 125 мм рт. ст.: 1 – без турбулизатора; 2 – d турбулизатора = 2,5 мм

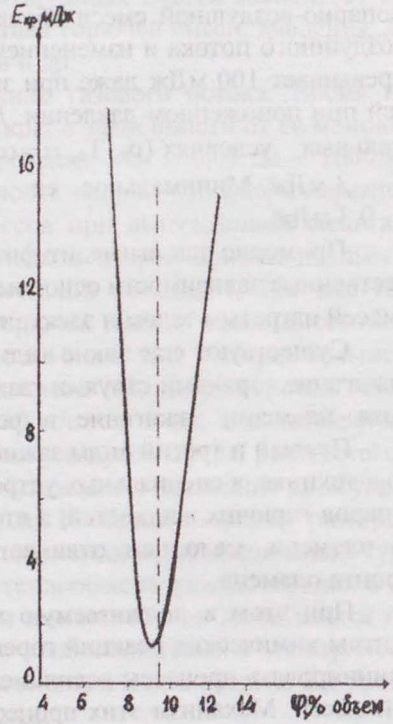

Рис. 1.18. Зависимость минимальной энергии зажигания от состава метано-воздушной смеси при давлении 0,3 атм

Для поджигания твердых горючих веществ и материалов необходим такой запас тепловой энергии искры или другого внешнего источника зажигания, чтобы его хватило либо на пиролиз части мате-

риала и образование горючей газовоздушной смеси, либо на создание малого очага гетерогенного горения – тления, которое при определенных условиях может развиться и перейти в открытое пламенное горение, приводящее к пожару. Поэтому очевидно, что минимальной энергией поджигания обладают горючие газовоздушные и паровоздушные смеси. Именно они являются наиболее пожаро- и взрывоопасными.

Опасность же тех или иных источников зажигания при воспламенении конденсированных видов горючих (горючих жидкостей и твердых горючих материалов) зависит от многих дополнительных факторов и в каждом конкретном случае должны тщательно анализироваться. Они зависят от вида горючей жидкости, ее температуры, теплоты испарения, условий газообмена и т. д., а при поджигании твердых горючих материалов – от их вида, влажности, температуры, дисперсности и др. При этом индукционный период зажигания, в который входят и время фазового превращения горючего, и время смесеобразования, и собственно время поджигания, увеличивается в сотни и тысячи раз. Знание этих данных существенно как с точки зрения изучения физики процесса вынужденного зажигания, так и при расследовании различных причин и обстоятельств возникновения пожаров и загораний при экспертизе пожаров.

Для оценки степени пожаро- и взрывобезопасности тех или иных технологических процессов производств, при экспертизе проектов и экспертизе пожаров нередко возникает необходимость знания численных значений критических энергий зажигания конкретных видов горючих смесей, горючих веществ и материалов. В справочной литературе такие данные для большинства новых видов горючих материалов отсутствуют, и возникает необходимость аналитического расчета этих параметров. Для этих целей рекомендуют, например, сравнительный метод расчета минимальной энергии зажигания, выраженной через нормальную скорость горения:

$$\frac{E'_{кр}}{E''_{кр}} = \frac{(\upsilon''_{н})^2}{(\upsilon'_{н})^2}.$$

Если сравниваемые вещества близки по своему химическому строению, результаты расчета оказываются удовлетворительными

для практических целей. Если в качестве стандартного вещества для сравнения принять бутан, то минимальную критическую энергию зажигания газопаровоздушных смесей при нормальных условиях можно оценить по формуле

$$E_{кр}=0{,}036/\upsilon_н^2.$$

Для веществ и композиций, для которых неизвестны $\upsilon_н$, $E_{кр}$ приходится определять экспериментально.

1.8. Концентрационные пределы зажигания газопаровоздушных смесей

Согласно механизму вынужденного воспламенения горючих смесей, для возникновения и развития процесса горения необходимо наличие горючего, окислителя и высокотемпературного источника зажигания. Источник зажигания активирует некоторую часть молекул, сообщая им энергию, равную или выше энергии активизации. В химическую реакцию вступают лишь молекулы горючего и окислителя, энергия которых в момент соударения превышает энергию активации. В результате образуются новые вещества. Выделившаяся химическая энергия переходит в тепловую. Тепло передается соседним частицам, увеличивая их энергию и, соответственно, обеспечивая тем самым непрерывную цепь последовательных превращений веществ горючей смеси в продукты реакции.

Таким образом, в реакционной системе, содержащей молекулы горючего и окислителя, может происходить три типа столкновений молекул: горючее-горючее, окислитель-окислитель, окислитель-горючее. При этом только последний вид соударений может оказаться эффективным, поскольку только в данном случае могут образоваться продукты реакции и выделяется тепло. Очевидно, что вероятность того или иного типа взаимодействий зависит от количества тех или иных молекул в системе. Если система содержит избыток окислителя (бедная смесь $\alpha > 1$), с большей вероятностью будут протекать взаимодействия (столкновения) молекул окислителя друг с другом. Для богатых смесей, наоборот, с большей вероятностью будут происходить столкновения молекул горючего. Максимальная вероятность столкновения молекул окислителя и горючего будет характерна

для смеси, содержащей окислитель и горючее в стехиометрическом соотношении (α=1).

$$\alpha = \frac{aC_в}{вC_а},$$

где $C_а$ – концентрация горючего; $C_в$– концентрация окислителя;
а, **в** – коэффициенты в уравнении реакции горения при горючем и окислителе.

Следовательно, при отклонении от стехиометрического соотношения горючего и окислителя как в сторону бедных, так и в сторону богатых смесей скорость химической реакции, а соответственно, и интенсивность тепловыделения будет снижаться. Кроме того, выделившееся меньшее количество тепла будет все в большей степени расходоваться на активацию неэффективных процессов, которые не приводят к тепловыделению. Таким образом, при отклонении состава смеси от стехиометрического интервала θ, при котором скорость химической реакции уменьшается в ***e*** раз, самопроизвольное горение смеси прекращается.

$$\theta = \frac{RT_г^2}{E}.$$

Следовательно, для воспламенения и последующего распространения горения по смеси необходимо, чтобы концентрация недостающего компонента (горючего или окислителя) была не ниже некоторого минимального предела. Область концентраций горючего вещества, внутри которой его смеси с окислителем способны воспламеняться от источника зажигания с последующим распространением пламени, называется областью воспламенения.

Минимальная концентрация горючего в области воспламенения называется нижним концентрационным пределом воспламенения (НКПВ). Максимальная концентрация горючего в области воспламенения называется верхним концентрационным пределом воспламенения (ВКПВ),

Таким образом, смеси, содержащие горючее ниже НКПВ и выше ВКПВ, образуют области негорючих концентраций, поскольку энергия инициирования процессов горения за пределами КПВ уходит в бесконечность.

Зависимости минимальной энергии зажигания $E_{кр}=f(\varphi)$ парогазовоздушных смесей от их концентрации φ практически одинаковы.

Некоторые из этих зависимостей представлены на рис. 1.19. Как следует из рисунка, минимальная энергия зажигания составляет порядка 0,2 мДж и соответствует составу, близкому к стехиометрическому. По мере обогащения или обеднения смеси $E_{кр}$ возрастает, уходя в бесконечность на концентрационных пределах. Приведенные экспериментальные результаты подтверждают вывод о том, что за концентрационными пределами воспламенение горючей смеси невозможно и смеси становятся негорючими при любой мощности источника зажигания. Концентрационные пределы характерны также для гетерогенных систем, т. е. аэрозолей (частицы твердого горючего вещества в воздухе). Нижнему концентрационному пределу воспламенения газов, паров горючих жидкостей и аэрозолей в практике пожарной охраны придается большое значение, поскольку он характеризует степень пожарности производств.

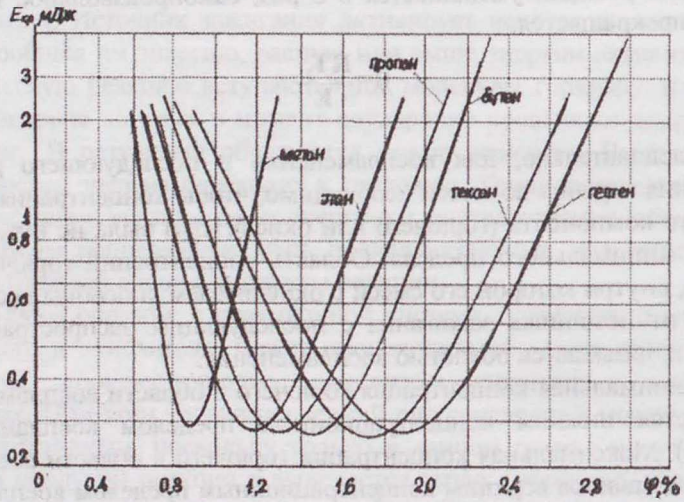

Рис. 1.19. Энергия зажигания как показатель концентрационных пределов воспламенения углеводородо-воздушных смесей

Концентрационные пределы воспламенения можно рассчитать по стандартным методикам или определить экспериментальным путем в стеклянных трубах диаметром 55 мм, высотой 1,5 м. Нижний концентрационный предел воспламенения определяют по предельной теплоте сгорания. Количество тепла, выделяющееся при горении смесей на нижнем КПВ, составляет практически для всех горючих веществ величину, близкую к 1830 кДж/м^3.

$$Q_{пр} = \frac{Q_н - \varphi_н}{100},$$

где $Q_{пр}$ – предельная теплота горения, 1830 кДж/м^3; $Q_н$ – низшая теплота горения стехиометрического состава смеси, кДж/м^3; $\varphi_н$ – нижний КПВ, % объемные.

$$\varphi_н = \frac{Q_{пр}}{Q_н} 100.$$

ВКПВ и НКПВ ориентировочно можно определить по эмпирической зависимости КПВ от количества молекул кислорода, необходимых для полного окисления молекулы горючего:

$$\varphi_{н(в)} = \frac{100}{an + в},$$

где **n** – число молекул кислорода в уравнении горения, **а**, **в** – постоянные (табл. 1.3).

Таблица 1.3

Пределы воспламенения	Значения постоянных	
	а	в
НКПВ	8, 684	4,679
ВКПВ $n \le 7,5$ $n > 7,5$	 1,55 0,768	 0,560 0,554

Оценим НКПВ и ВКПВ для метана по двум приведенным методикам.

Запишем термохимическое уравнение горения метана.

$$CH_4 + 2O_2 + 2 \cdot 3,76N_2 \rightarrow CO_2 + 2H_2O + 2 \cdot 3,76N_2, \quad Q_н = 35875 \text{ кДж/м}^3$$

Согласно методике предельной теплоты горения,

$$\varphi_н = \frac{Q_{пр}}{Q_н} 100 = \frac{1830}{35875} 100 = 5,1\%$$

НКПВ составляет 5,1%.

Согласно эмпирической зависимости,

$$\varphi_н = \frac{100}{2 \cdot 8{,}684 + 4{,}679} = 4{,}55\%$$

$$\varphi_в = \frac{100}{1{,}55 \cdot 2 + 0{,}56} = 27{,}3\%$$

Пределы воспламенения зависят от условий, сопутствующих воспламенению (мощность источника зажигания, температура горючей смеси, давление, присутствие инертных газов и т. п.).

Влияние мощности источника зажигания можно оценить по зависимости $E_{кр}=f(\varphi)$ (рис. 1.18, 1.19). С увеличением мощности источника зажигания область воспламенения расширяется. Это означает, что НКПВ уменьшается, а ВКПВ возрастает. Однако расширение пределов не безгранично. При определенной мощности источника (насыщенной) дальнейшее изменение КПВ не происходит. При снижении мощности источника область воспламенения сужается и при некотором критическом значении происходит выравнивание НКПВ и ВКПВ. Это означает, что при дальнейшем снижении мощности смесь не воспламеняется при любом соотношении горючего и окислителя.

Изменение давления в горючей смеси изменяет область воспламенения и критическую энергию зажигания. Снижение давления в горючей смеси равнозначно снижению концентраций горючего и окислителя. Вероятность соударений молекул снижается, скорость химической реакции при некотором давлении уменьшается, скорость тепловыделения достигает критического значения, и самопроизвольное развитие химической реакции при действии источника зажигания не происходит. Снижение давления приводит к увеличению критической энергии зажигания, сужению области воспламенения, и при достижении определенного давления зажигание вообще не происходит.

Значительное влияние на параметры зажигания оказывают негорючие газы (флегматизаторы). При введении их в горючую смесь сужается область воспламенения, увеличивается критическая энергия воспламенения. Влияние флегматизаторов в значительной степени зависит от их природы (теплопроводности, теплоемкости).

Прежде всего, введение флегматизаторов в горючую систему приводит к снижению концентрации горючего и окислителя, что соответственно снижает скорость химической реакции и тепловыделения, уменьшает область воспламенения. При некотором содержании

флегматизатора вообще создаются условия, при которых зажигание смеси становится невозможным.

Кроме разбавляющего эффекта флегматизатор оказывает влияние на теплофизические характеристики системы (теплопроводность, теплоемкость, температуру). Флегматизатор с большой теплоемкостью в большей степени снижает скорость химической реакции и тепловыделения, а соответственно, и температуру горения.

Флегматизатор с большой теплопроводностью интенсивнее отводит тепло из зоны горения, способствует распространению по смеси тепла и увеличивает скорость распространения зоны горения.

Эффективность флегматизатора зависит от соотношения C_p/λ. Чем выше это соотношение, тем выше эффективность флегматизатора. Для аргона $C_p/\lambda = 3{,}2 \cdot 10^{-2}$, а для углекислого газа $C_p/\lambda = 6{,}7 \cdot 10^{-2}$. Эксперименты показали, что флегматизирующее действие угарного газа в два раза эффективнее аргона.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Опишите механизм процесса горения с позиции молекулярно-кинетической теории газов.
2. Охарактеризуйте цепной механизм самовоспламенения.
3. Охарактеризуйте тепловой механизма самовоспламенения.
4. Каково влияние природы углеводородов на температуру их самовоспламенения?
5. В чем заключается сущность механизма самовоспламенения гетерогенных систем?
6. Укажите принципиальные различия механизмов самовоспламенения и зажигания горючих систем.
7. Каковы существенные особенности влияния некоторых факторов (давления, площади нагретой поверхности, природы горючего вещества, скорости потока горючей смеси) на температуру зажигания?
8. Предельные условия зажигания и последующего распространения пламени. Характеристический интервал температур.
9. В чем заключается сущность количественных оценок концентрированных пределов зажигания?
10. Каково влияние ряда факторов (мощности источника зажигания, давление концентрации флегматизатора и его природы, виды горючего вещества) на величину концентрационных пределов зажигания?

Глава 2. РАСПРОСТРАНЕНИЕ ГОРЕНИЯ ГАЗОВ ЖИДКОСТЕЙ И ТВЕРДЫХ ТЕЛ

2.1. Виды и режимы распространения горения

После возникновения процесса горения источником зажигания новых объемов горючей смеси является сама зона горения , в которой происходит интенсивное выделение тепла . Это тепло и является причиной непрерывного поддержания процесса горения . Таким образом , процесс горения схематически можно представить как непрерывное воспламенение и сгорание все новых и новых порций горючей смеси . В зависимости от механизма распространения зоны химических реакций горения по горючей смеси различают несколько характерных режимов горения : *дефлаграционное* (сравнительно медленное распространение зоны химических реакций со скоростью движения тепловой волны по смеси от 0,5…50 м/с) , *детонационное*, распространяющееся со скоростью ударной волны (1…5) км/с и *взрывное горение* , имеющее скорость от нескольких сот метров до 1,5 км/с . Обычно в условиях пожара горение протекает в дефлаграционном режиме . Детонационное горение газопаровоздушных смесей встречается весьма редко . В зависимости от агрегатного состояния компонентов горючей смеси различают два режима горения : гомогенное горение , когда оба компонента находятся в одинаковой фазе , и гетерогенное горение, когда агрегатное состояние у компонентов горючей системы различное.

Поскольку в качестве окислителя в реакциях горения на пожаре чаще всего участвует кислород воздуха, т.е один из компонентов горючей системы находится всегда в газообразном состоянии , то гомогенным горение в условиях пожара бывает в тех случаях , когда само горючее находится в таком же агрегатном состоянии.

Горючие жидкости и многие твердые горючие материалы так же горят на пожаре преимущественно в режиме гомогенного пламенного горения , так как в зону горения поступают не сами эти жидкости и твердые вещества , а газо- и парообразные продукты их испарения и термического разложения . Примером гетерогенного , беспламенного горения в условиях пожара является тление углеродного остатка твердых горючих материалов , когда все летучие , все пиролизуемые компоненты уже выгорели из прогретого слоя . Тогда наступает ре-

жим беспламенного , гетерогенного горения , называемого еще тлением (хотя оно может быть и очень интенсивным , с выделением большого количества тепла и возможностью повторного перехода – пламенное горение) . Тление может возникнуть и в начальной стадии пожара , когда мощности источника зажигания не хватило для предварительного прогрева твердых горючих материалов , который является необходимым условием их интенсивного пиролиза , следовательно , еще не образовалось горючая паровоздушная смесь , способная к пламенному (гомогенному) горению , а началось медленное тление . Затем , по мере накопления тепла в твердом горючем материале , повышения его температуры и увеличения массы прогретого слоя , интенсифицируется процесс пиролиза и выделения горючих летучих фракций . Смешиваясь с кислородом воздуха , они образуют горючую газовоздушную смесь , которая воспламеняется под действием высоких температур зоны тления .Начинается интенсивное пламенное горение ,быстро распространяющееся по поверхности твердых горючих материалов . По такому механизму возникают многие пожары , связанные с горением твердых горючих материалов , начинающиеся под воздействием слабых источников зажигания : искр , тлеющих окурков , непотушенных спичек и т.д. Реже по такой же примерно схеме начинаются пожары , связанные с самовозгоранием твердых горючих материалов в результате медленно текущих реакций окисления . Они также могут начаться с тления , переходящего затем в открытое пламенное горение . Характерным для гетерогенного режима горения является наличие раздела фаз : твердого горючего и газообразного окислителя . При этом химические реакции окисления идут преимущественно на поверхности раздела фаз (но при большой пористости материала могут идти и в его толще , внутри пор, но тем не менее – на границе раздела твердое тело – газ) .

Скорость распространения гетерогенных процессов горения (тления), как правило, несколько ниже скорости распространения гомогенного (пламенного) горения . Интенсивность процесса гетерогенного горения зависит от поступления горючих компонентов в зону горения (преимущественно кислорода воздуха) и степени развитости поверхности горючего материала , на которой идут химические реакции окисления . В зависимости от условий смесеобразования горючих компонентов и от соотношения скорости химических реакций горения и скорости смесеобразования различают два характерных режима горения: кинетический и диффузионный . Опреде-

ляющим в этом случае является вопрос о том , какая из стадий является лимитирующей в суммарной скорости процесса горения : скорость смесеобразования или скорость химического превращения компонентов смеси в продукты горения .

Горение предварительно равномерно перемешанных газо - или паровоздушных смесей всегда происходит в кинетическом режиме, так как смесь горючего с окислителем существует еще до момента её воспламенения и суммарная скорость процесса горения лимитируется только скоростью (кинетикой) химических реакций окисления и скоростью перемещения зоны реакции горения по горючей смеси . Поэтому такое горение называется кинетическим . Если сгорание такой газовоздушной смеси происходит в замкнутом или ограниченном объеме, оно воспринимается как взрыв , так как энергия , выделяющаяся при сгорании смеси , не успевает отводиться за пределы рассматриваемого объема , давление возрастает и приводит к разрушению конструкции. Примером спокойного кинетического горения является горение газовоздушной смеси на конфорках кухонной газовой плиты , когда смесь хорошо подготовлена и пламя имеет равномерную сине-голубую окраску (без желтых или красноватых оконечностей язычков пламени) . Появление желто-оранжевых зон пламени – признак недостатка воздуха , плохого смешения , образования продуктов неполного сгорания , в том числе светящихся желтым светом сажистых частиц .

Если же компоненты горючей смеси смешиваются непосредственно перед зоной горения или в самой зоне ,то наблюдается диффузионной или диффузионно-кинетический режим горения . Это зависит от интенсивности смешения , степени равномерности и пропорций смешения горючих компонентов , как на плохо отрегулированной газовой горелке кухонной плиты . При пожаре на устье газового факела при истечении метана под большим давлением смесеобразование горючего газа с воздухом перед факелом пламени будет столь интенсивным и равномерным , что пламя будет почти полностью кинетическим . При наличии в горючем газе конденсата оно будет диффузионно-кинетическим , а при горении фонтанирующей нефти и при пожарах в резервуарах с ЛВЖ , ГЖ или штабелей древесины режим горения будет диффузионным . Гетерогенное горение на пожаре также всегда идет в диффузионном режиме . Важной характеристикой процессов горения является также газодинамическое состояние ком-

понентов горючей смеси в зоне реакции . Оно, как правило , характеризуется интенсивностью их поступления в зону горения .

Если компоненты горючей смеси поступают в зону горения сравнительно « спокойно », по законам молекулярной или слабой (не сильно развитой) конвективной диффузии, то процесс горения будет ламинарным (т.е. относительно спокойным) с постепенным, плавным переходом от зоны смесеобразования к зоне горения и далее – к зоне формирования потока оттекающих продуктов горения.

Если потоки газообразного горючего или окислителя, или смеси горючего с окислителем в зону горения поступают достаточно интенсивно , то режим горения будет турбулентным , т.е. с интенсивными завихрениями , перемешиванием продуктов горения с непрореагировавшейся смесью , отрывами клубящихся зон горения от основного факела пламени . Характерным примером такого горения является пожар на мощном газовом фонтане , на крупном резервуаре , на большом штабеле древесины с большим численным значением коэффициента поверхности горения $K_П$.

$$K_П = S_{ГОР} / S_П , \qquad (2.1.)$$

где $S_{ГОР}$ – площадь поверхности горения, $S_П$ – площадь проекции зоны горения на горизонтальную плоскость .

Таким образом , характеризовать процесс горения на пожаре можно по механизму распространения зоны химической реакции (дефлаграционное и детонационное горение) , по его кинетеческим параметрам (диффузионное или кинетическое горение) , по природе химических реакций (в зоне их протекания – гомогенное или гетерогенное горение) и по газодинамическим параметрам режима горения (ламинарное или турбулентное) .

2.2. Материальный и тепловой баланс процессов горения

Горение, как и любой химический процесс, подчиняется основным законам природы, таким как законы сохранения вещества и энергии , что позволяет теоретически оценить количество окислителя, необходимого для горения веществ и материалов , состав и объем продуктов горения , количество выделившегося тепла, температуру горения и д.р.

Главной особенностью реакции горения является то , что при их протекании выделяется большое количество тепла .

Одной из причин повышенной опасности горения на пожаре является большой тепловой эффект , возникающий вследствие его повышения температуры в зоне реакции, и тепловое взаимодействие очага горения с окружающей средой (с расположенными около него горючим материалами и веществами , со строительными конструкциями , с организмом человека , технологическими аппаратами , техникой и т.д.)

В расчете на единицу количества горючего вещества тепловой баланс зоны горения можно записать так :

$$Q_н + Q_{исх} - Q_{недож} = Q_{п.г} + Q_{пот} \quad , \qquad (2.2)$$

где $Q_н = \frac{Q_{х.р}}{n_г}$ – низшая теплота сгорания горючего вещества ;$Q_{исх}$ – количество тепла , не реализуемое в зоне горения вследствие химического и механического недожога ;$Q_{п.г}$ – количество тепла , затрачиваемое на нагрев продуктов горения единицы количества горючего ; $Q_{пот}$ – количество тепла ,теряемое из зоны горения .

Слагаемые правой части уравнения (2.2) формируют специальную обстановку зоны горения . За счет $Q_{п.г}$, например , до сравнительно высоких температур ($\geq 1000^\circ$ C) нагреваются продукты горения , создающие опасность людям , прогревающие горящие и еще не горящие горючие вещества и материалы , а также строительные конструкции до наступления предела их огнестойкости. Нагретые до высоких температур продукты горения создают конвективные потоки , способствующие притоку воздуха к очагу горения и интенсифицирующие процесс распространения горения , вплоть до переноса горящих частиц на большие расстояния.

Потери тепла от зоны горения излучением также способствуют прогреву горючих материалов и строительных конструкций , создают опасность перехода огня через противопожарные разрывы между зданиями и сооружениями . Лучистый тепловой поток от очага горения опасен также для людей и пожарной техники . Как показывают расчеты , величина потерь тепла из зоны горения излучением может достигать $Q_{пот} = 0{,}4Q_н$.

Большой практический интерес в уравнении теплового баланса процесса горения (2.2) представляет величина $Q_{п.г}$ (2.3.) т.е. то тепло ,

которое расходуется на нагрев продуктов горения , на создание температуры горения .

$$Q_{п.г} = Q_н + Q_{исх} - Q_{недож} - Q_{пот}. \qquad (2.3)$$

Величина $Q_{исх}$ определяется как теплосодержание горючего и окислительной смеси , поступающих в зону реакции горения , и составляет , например , для горения древесины в воздухе при T=293 K ~ 0,03 $Q_н$. Для метана при тех же условиях $Q_{исх}$<0,01 $Q_н$.

Количество тепла, не реализуемое вследствие химического и механического недожога $Q_{недож}$, зависит от вида горючего материала и условий горения , и изменяется в пределах (5-25%) $Q_н$.

Таким образом , количество тепла , расходуемое на нагрев продуктов горения , изменяется в зависимости от условий взаимодействия зоны горения с окружающей средой и может составлять (0,4... 1,0) $Q_н$.

В большинстве случаев окислением в процессах горения является кислород воздуха. Поэтому для решения некоторых практических задач противопожарной защиты необходимо знать количество воздуха , требуемое для полного сгорания единицы количества различных веществ и материалов .Значение этой величины необходимы, например , для того ,чтобы определить , какое количество того или иного вещества может выгореть до самопроизвольного потухания в замкнутом помещении , содержащим заданный объем воздуха .

Минимальное количество воздуха (кмоль ; $м^3$) , необходимое для полного сгорания единицы количества горючего вещества (1 кмоль ; 1 кг ; 1 $м^3$) , называется удельным теоретическим количеством воздуха и обозначается $V_в^0$.

При горении вещества в теоретическом количестве воздуха происходит образования продуктов только полного горения и в их составе отсутствует избыточный кислород .

Теоретическое количество воздуха (и любого другого окислителя) рассчитывается по уравнению химической реакции горючего с данной окислительной средой с учетом стехиометрических коэффициентов . В случае горения веществ в воздухе уравнение материального баланса может быть представлено в виде

$$n_г(Г)+n_к[O_2]+n_к\cdot 3{,}76[N_2]=\sum_{i=1} m_i[ПГ]+n_к\cdot 3{,}76[N_2]+Q_{х.р.}, \quad (2.4.)$$

где $n_г$– число молей горючего вещества ; $n_к$– число молей кислорода воздуха ; 3,76 – число молей азота , приходящееся на один моль кислорода.

При оценке количества воздуха необходимого для горения, все горючие вещества разделены на три группы : индивидуальные химические вещества , состав которых выражается химической формулой (C_2H_6 , C_2H_7OH и д.р.) ; сложные смеси веществ , состав которых задается весовым процентом содержащихся в них элементов (древесина , торф и т.д.) ; смеси газов, такие как природный газ , водяной газ, генераторный газ , коксовый газ и т.п.

Для индивидуальных веществ теоретическое количество воздуха определяется по уравнению (2.4) . Теоретическое количество воздуха можно рассчитать в кмолях на 1 кмоль горючего или в м^3 на 1 м^3 горючего газа или пара по формуле

$$V_в^0 = 4{,}76\beta , \quad (2.5.)$$

а в м^3 на 1 кг горючего по формуле

$$V_в^0 = \frac{4{,}76\beta V_t}{M_г} , \quad (2.6)$$

где $\beta=\frac{n_к}{n_г}$; 4,76 – количество воздуха , кмоль (м^3) , в котором содержится 1 кмоль (м^3) кислорода ; $M_Г$ – вес одного киломоля горючего , кг/кмоль ; V_t – объем одного киломоля воздуха при заданных условиях :

$$V_t = \frac{22{,}4Tp_0}{T_0p} , \quad (2.7)$$

где **T** – температура , К ; p_o – нормальное давление (101325 Па) ;T_0– нормальная температура (273 К) ; P – давление , Па.

Формула (2.5) справедлива лишь для случая , когда горючий газ (пар) и воздух находятся при одних и тех же условиях . При других условиях формула принимает вид

$$V_{в}^{0} = 4{,}76\beta \frac{V_{t}^{возд}}{V_{t}^{г}}, \qquad (2.8)$$

где $V_{t}^{возд}$ – объем 1 кмоль газа при температуре и давлении , при которых находится воздух , расходуемый на горение , м^3/кмоль ; $V_{t}^{г}$ – объем 1 кмоль газа в условиях , при которых находится горючий газ (пар) , м^3/кмоль .

К сложному типу веществ относятся различные естественные и искусственные полимерные материалы , такие как древесина , торф , каменный уголь , нефть и продукты её переработки , резина , пластмассы и д.р. Состав таких веществ определяется по известным методикам в лабораториях и выражается , как правило , весовым процентным содержанием в них химических элементов. Для распространенных материалов это **C**, **H**, **O**, **S**, **N**. Кроме этого, в состав горючих материалов входят также влага W и зола, неорганический остаток A. Например, вещество имеет состав: **C**=50 %, **H**=5 %, **S**=5 %, **O**=10 %, **N**=10 %, **W**=10 %, **A**=10 %. Это значит, что в 1 кг вещества содержится 0,5 кг углерода, 0,05 кг водорода, столько же серы, по 0,1 кг кислорода и азота, а также по 0,1 кг влаги и золы.

Кислород воздуха при горении таких веществ будет расходоваться на окисление **C**, **H**, и **S**, причем следует при этом учитывать, что кислород, содержащийся в веществе, уже использован на их частичное окисление. Таким образом, общий объем воздуха, необходимый для горения единицы массы вещества, будет складываться из объемов воздуха, необходимых для горения каждого из названных элементов, за вычетом объема воздуха, соответствующего количеству кислорода, содержащегося в веществе:

$$V_{в}^{0} = V_{в(c)}^{0} \frac{C}{100} + V_{в(н)}^{0} \frac{H}{100} + V_{в(s)}^{0} \frac{S}{100} - V_{в(o)}^{0} \frac{O}{100}, \qquad (2.9)$$

где $V_{в(c),(н),(s)}^{0}$ – количество воздуха, необходимое для горения единицы массы соответствующего элемента, м^3/кг; $V_{в(o)}^{0}$ – количество воздуха, в котором содержится 1 кг кислорода, м^3/кг;**C**, **H**, **S**, **O** – содержание соответствующего элемента в горючем веществе, весовые проценты.

Величины $V^0_{в(с),(н),(s)}$ определим по формуле (2.6). Для этого составив уравнения реакций их горения, найдем коэффициенты $n_г$ и n_{02}:

$$C+O_2=CO_2;\ H_2+0{,}5O_2=H_20;\ S+O_2=SO_2;$$

$$n_c=1\ ;\ n_{02}=1\ ;\ n_{H_2}=1\ ;\ n_{o2}=0{,}5\ ;\ n_s=1\ ;\ n_{o2}=1\ ;$$

$$\beta_{(C)}=1 \qquad \beta_{(H)}=0{,}5 \qquad \beta_{(S)}=1$$

Тогда $$V^0_{в(с)}=\frac{4{,}76\cdot 1V_t}{12};\ V^0_{в(н)}=\frac{4{,}76\cdot 0{,}5V_t}{2};\ V^0_{в(s)}=\frac{4{,}76\cdot 1V_t}{32}.$$

Величину $V^0_{в(о)}$ определим из следующих соображений: 1 кмоль O_2 (32 кг) занимает объем V_t, м^3, так как в воздухе на каждый объем кислорода приходится 79:21=3,76 объема азота, то 32 кг кислорода будут содержаться в 4,76 V_t, м^3 воздуха. Тогда

$$V^0_{в(о)}=4{,}76\frac{V_t}{32}\ \text{м}^3/\text{кг}.$$

Подставляя полученные значения $V^0_{в(с)}$, $V^0_{в(н)}$, $V^0_{в(s)}$ и $V^0_{в(о)}$ в уравнение (2.9), получим:

$$V^0_{в(о)}=\frac{4{,}76V_t}{4\cdot 100}\left(\frac{C}{3}+H+\frac{S-O}{8}\right) \qquad (2.10)$$

Для нормальных условий, когда V_t =22,4 м^3/кмоль, уравнение (2.10) примет вид

$$V^0_{в(о)}=0{,}267\left(\frac{C}{3}+H+\frac{S-O}{8}\right)\ \text{м}^3/\text{кмоль}. \qquad (2.11)$$

В случае смеси газов объем воздуха, необходимый для полного сгорания смеси газов, можно определить по формулам (2.5) и (2.7). Для этого необходимо провести расчет для каждого компонента смеси отдельно и полученные результаты сложить. Когда газовая смесь и воздух находятся в одинаковых условиях, объем воздуха, необходимый для полного сгорания смеси газов, определяется по формуле

$$V^0_{в(о)} = \frac{4,76}{100}\left(\sum_{i=1}^{n}\beta_i\varphi_i - \varphi_{0_2}\right), \qquad (2.12)$$

где φ_i – содержание i-го горючего компонента в газовой смеси, объемные проценты , n – количество горючих компонентов газовой смеси, φ_{02}– содержание кислорода в газовой смеси, объемные проценты.

Формулы (2.5), (2.6), (2.7), (2.8), (2.10), (2.11), (2.12) можно использовать для расчета объема окислительной среды, необходимого для полного сгорания веществ, содержание кислорода в которой отличается от 21 %:

$$V^0_{среды} = V^0_в \frac{100}{4,76\varphi_{0_2}} = V^0_в \frac{21}{\varphi_{0_2}},$$

где $V^0_в$ – объем воздуха, рассчитанный по формулам (2.5), (2.6), (2.7), (2.8), (2.10), (2.11), (2.12); φ_{02} – содержание кислорода в окислительной среде, объемные проценты.

В реальных условиях количество поступающего в зону горения воздуха отличается от теоретически требуемого для полного сгорания горючего вещества. Для характеристики степени обеспеченности зоны горения окислителем (воздухом) вводят понятие **коэффициента избытка воздуха $\alpha_в$**, который показывает, во сколько раз объем воздуха, поступающий в зону горения, больше объема воздуха, теоретически необходимого для полного сгорания единицы количества горючего вещества:

$$\alpha_в = \frac{V^{пр}_в}{V^0_в},$$

где $V^{пр}_в$ – объем воздуха, поступающего в зону горения на единицу количества горючего вещества, кмоль/кмоль; $м^3$/кг; $м^3/м^3$.

В случае кинетического горения при $V^{пр}_в = V^o_в$ и $\alpha_в = 1$ смесь горючего с воздухом является стехиометрической. При $\alpha_в < 1$ – смесь богатая, характерной чертой процесса горения является образование продуктов неполного горения. При $\alpha_в > 1$ смесь бедная и часть воз-

духа, не израсходованная на горение (избыток воздуха), переходит в продукты горения:

$$\Delta V_в = V_в^{пр} - V_в^{о} = V_в^{о}(\alpha - 1). \qquad (2.13)$$

Существуют предельные значения коэффициента избытка воздуха α_{min} и α_{max} , соответствующие смесям горючего с воздухом предельного состава. Минимальный коэффициент избытка воздуха α_{min} соответствует верхнему концентрационному пределу воспламенения, а α_{max} – нижнему концентрационному пределу воспламенения. Для парогазовоздушных смесей их значения могут быть вычислены по формуле

$$\alpha_{min\,(max)} = \frac{100 - \varphi_{в(н)}}{V_в^{о}\varphi_{в(н)}},$$

где $\varphi_{в(н)}$ – соответственно верхний или нижний концентрационные пределы воспламенения горючего в смеси с воздухом, объемные проценты; $V_в^{о}$ – теоретический объем воздуха, необходимый для полного сгорания единицы количества горючего, кмоль/ кмоль, м^3/ м^3.

Если известно содержание кислорода в продуктах горения, то $\alpha_в$ можно оценить по формуле

$$\alpha_в = \frac{21}{21 - \varphi_{O_2}^{п.г}},$$

где $\varphi_{O_2}^{п.г}$ – концентрация кислорода в продуктах горения, объемные проценты.

Несмотря на то, что в реальных условиях горения в ограниченном объеме коэффициент избытка воздуха, как правило, превышает единицу, наблюдается образование продуктов неполного горения. Это связано с тем, что в контакт и реакцию горения с горючими веществами за счет диффузии вступает только часть поступающего в помещение воздуха, а остальной воздух смешивается с продуктами горения.

Существенную роль в процессе горения и распространения горения играют продукты горения, под которыми следует понимать продукты химической реакции горючего вещества с окислителем. Суще-

ствуют продукты полного и неполного горения. Если окислителя в зону горения поступает достаточно для полного окисления горючего, то образуются продукты полного горения. Если окислителем является кислород воздуха, а горючим, вещества, содержащие углерод, водород, серу, то продуктами полного горения являются CO_2, H_2O, SO_2, N_2. Азот поступает с воздухом, но может и образоваться в результате химической реакции, если он содержался в горючем. Когда в зону горения поступает больше воздуха, чем его требуется для полного сгорания горючего ($\alpha>1$), в состав продуктов горения будет входить кислород. Если в зону горения поступает воздуха меньше, чем необходимо для полного сгорания горючего вещества, образуются продукты неполного горения, к которым относятся окись углерода, углерод (сажа), различные продукты термоокислительного разложения исходного горючего вещества.

При горении веществ и материалов при условии $\alpha\geq1$ можно рассчитать состав и объем продуктов горения, который необходим для определения температуры горения веществ и материалов.

В общем случае объем продуктов горения определяется по формуле

$$V_{п.г} = V^{o}_{п.г} + \Delta V_{в} ,$$

где $V^{o}_{п.г}$ – теоретический объем продуктов горения, кмоль/кмоль. м^3/кг; м^3/м^3; $\Delta V_{в}$ – избыток воздуха, кмоль/кмоль; м^3/кг; м^3/м^3, формула (2.13).

Расчетный объем продуктов горения определяется так же для трех различных групп веществ и материалов.

Объем продуктов горения так же, как и воздуха для горения определяется из уравнения химической реакции (2.4), только все соотношения берутся между количеством горючего и образующимися в результате реакции продуктами горения. Например, для расчета количества продуктов горения в киломолях на 1 кмоль горючего используется формула

$$V^{o}_{п.г} = \sum_{i=1}^{к} \frac{m_i}{n_г} + 3{,}76\frac{n_к}{n_г} \quad ;$$

в м^3 на 1 кг горючего – формула

$$V^{o}_{п.г} = V^{o}_{п.г} = (\sum_{i=1}^{к} \frac{m_i}{n_г} + 3{,}76\frac{n_к}{n_г})\frac{V^{п.г}_t}{M_{(г)}};$$

а в м^3 на 1 м^3 горючего газа или пара – формула

$$V^{o}_{п.г} = V^{o}_{п.г} = (\sum_{i=1}^{к} \frac{m_i}{n_г} + 3{,}76\frac{n_к}{n_г})\frac{V^{п.г}_t}{V^{г}_t};$$

где $V^{п.г}_t$ – объем 1 кмоля газа при температуре и давлении продуктов горения, м^3/кмоль. Остальные условные обозначения аналогичны обозначениям, принятым в формулах (2.1), (2.4), (2.5) – (2.8).

В случае сложной смеси химических соединений объем продуктов горения складывается из объемов продуктов, выделяющихся при сгорании каждого из элементов входящих в состав горючего:

$$\mathbf{C+O_2+3{,}76N_2=CO_2+3{,}76N_2;}$$
$$\mathbf{S+O_2+3{,}76N_2=SO_2+3{,}76N_2;}$$
$$\mathbf{H_2+0{,}5O_2+0{,}5\cdot 3{,}76N_2=H_2O+0{,}5\cdot 3{,}76N_2.}$$

Другие компоненты горючих веществ **N**, **W**, **A**, **O** негорючие, однако они будут входить в продукты горения.

Кислород, содержащийся в горючем веществе, будет снижать содержание азота в продуктах горения. Продукты горения будут состоять из углекислого газа (CO_2), образующегося при горении углерода; водяных паров, образующихся при горении водорода и испарений влаги; оксида серы IV, образующейся при горении серы; азота(N_2), образующегося из горючего вещества и из воздуха, израсходованного на горение **C**, **H**, **S**.

$$V_{CO_2} = \frac{22{,}4}{12}\frac{C}{100} = 1{,}86\frac{C}{100}, \text{ м}^3/\text{кг};$$

$$V_{H_2O} = \frac{22{,}4}{2}\frac{H}{100} + \frac{22{,}4}{18}\frac{W}{100} = 11{,}2\frac{H}{100} + 1{,}24\frac{W}{100}, \text{ м}^3/\text{кг};$$

$$V_{SO_2} = \frac{22,4}{32}\frac{S}{100} = 0,7\frac{S}{100}, \text{ м}^3/\text{кг};$$

$$V^o_{N_2} = \frac{3,76 \cdot 22,4}{12}\frac{C}{100} + \frac{3,76 \cdot 22,4}{2}\frac{H}{100} + \frac{22,4}{28}\frac{N}{100} + \frac{3,76 \cdot 22,4}{32}\left(\frac{S-O}{100}\right)$$

или

$$V^o_{N_2} = 0,79V^o_B + 0,8\frac{N}{100},$$

где **C**, **H**, **S**, **N**, **O**, **W** – содержание компонентов в весовых процентах (**W** – влага).

Объем и состав продуктов горения для смеси газов определяется по уравнениям реакции горения для каждого горючего компонента, входящего в смесь. Негорючие компоненты переходят в продукты горения, а содержание кислорода в смеси снижает количество азота в продуктах. Следует учитывать избыток воздуха.

Важными параметрами процесса неуправляемого горения является теплота горения и температура продуктов горения. Под теплотой горения следует понимать количество тепла, выделяющегося при сгорании вещества с образованием продуктов полного горения (кДж/кмоль, кДж/кг, кДж/м^3). Теплота горения или же тепловой эффект реакции горения индивидуальных веществ определяют по следствию из закона Гесса:

$$Q_H = -\frac{\left(\sum_i^K \Delta H_{i\ пр} m_i - \Delta H_Г n_Г\right)}{n_Г} \qquad (2.14)$$

где $\Delta H_{i\ пр}$, $\Delta H_Г$ - стандартные энтальпии образования продуктов горения и горючего, кДж/моль.В качестве одного из продуктов горения в большинстве случаев бывает вода. Поскольку в процессе горения вода находится в парообразном состоянии, то при расчете Q следует учитывать энтальпию образования паров воды.

В случае если вещество представляет собой сложную смесь химических соединений, то для расчета теплоты горения следует пользоваться формулой Менделеева

$$Q_н = 339{,}4C + 1257H - 108{,}9(O + N - S) - 25{,}1(9H - W)$$

где **C**, **H**, **O**, **N**, **S**, **W** – содержание углерода, водорода, кислорода, азота, серы и влаги в горючем веществе, %.

Если горючее представляет собой смесь газов, то теплота горения определяется как сумма теплот сгорания горючих компонентов смеси:

$$Q_н^{см} = \sum_{i}^{к} Q_i \frac{\varphi_i}{100},$$

где Q_i – теплота сгорания i–го компонента смеси, кДж/м³ , кДж/кмоль; φ_i - содержание i –го компонента ,%, к – число компонентов.

Величину Q_i можно определить по формуле 2.14 или по справочнику. Часть тепла, выделяющегося в зоне горения, расходуется на нагрев продуктов горения. Максимальная температура, до которой нагреваются продукты горения, называется температурой горения. Учитывая, что теплоемкости продуктов горения несущественно отличаются от теплоемкостей исходных веществ, можно записать:

$$T_{гор} = T_o + \frac{Q_{п.г.} - Q_{исх}}{\sum_{i=1}^{к} V_{п.г} C_{P_i}},$$

где $T_{гор}$ – температура горения, К ; T_0– начальная температура горючего и окислителя, К; $Q_{п.г.}$ – количество тепла, затраченное на нагрев продуктов горения, кДж/моль, кДж/кг ,кДж/м³.$Q_{исх}$ – количество тепла, поступившее в зону горения с горючим и окислительной средой, кДж/моль, кДж/кг, кДж/м³ .$V_{п.гi}$ объем i-го компонента продуктов горения , кмоль/кмоль, м³/кг, м³/м³; C_{Pi}– удельная теплоемкость i –го компонента продуктов горения при T, кДж/(кмоль·К), кДж/(м³·К).

Различают калориметрическую, адиабатическую теоретическую и действительные температуры горения.

Под *калориметрической* температурой горения понимается та температура, до которой нагреваются продукты горения, если будут выполнены следующие условия:

$$T_0 = 273{,}5\ К,\ \alpha_в = 1,\ Q_{п.г.} = Q_н.$$

При определении *адиабатической* температуры горения учитывается состав горючей смеси $\alpha_в \neq 1$.

Теоретическая температура горения наблюдается в том случае, когда часть тепла расходуется на диссоциацию продуктов горения

$$(Q_{п.г.} = Q_н - Q_{дис}).$$

Действительной температурой горения называется та температура, до которой нагреваются продукты горения в реальных условиях. Уравнение теплового баланса процесса горения позволяет расчетом определять температуру горения. При этой температуре суммарное теплосодержание (энтальпия) компонентов продуктов горения равно количеству тепла, затраченному на их нагрев:

$$Q_{пг.}^{T_{гор}} = \sum_{i=1}^{к} V_{пг._i} C_{p_i} T_{гор} \qquad (2.15)$$

Решить это уравнение относительно $T_{гор}$ непосредственно нельзя, так как удельная теплоемкость газов является функцией температуры. Поэтому задачу по определению $T_{гор}$ решают методом последовательных приближений: задаваясь величиной Т ,находят теплосодержание (энтальпию) продуктов горения при ней. Та температура продуктов горения, при которой выполняется равенство (2.15), и является температурой горения.

2.3. Тепловая и диффузионная теории распространения пламени по газообразным системам

Для понимания механизма распространения пламени по смеси газообразного горючего и окислителя приведем следующую принципиальную схему, (рис.2.1). При распространении горения по некоторой системе исходную смесь 1 от продуктов горения 3 отделяет узкая светящаяся зона 2, называемая *фронтом пламени*. Фронт пламени представляет собой трехмерную область, в которой начинается и завершается химическая реакция взаимодействия горючего с окислителем. В этой зоне в виде теплоты сгорания выделяется вся потенциальная (химическая) энергия топлива и температура повышается до максимального значения – температуры горения (рис.2.2).

В зоне перед фронтом пламени концентрация исходных компонентов почти не меняется, поскольку химическое взаимодействие между ними не протекает и температура горючей смеси равна начальной. Непосредственно перед фронтом пламени (зоной химической реакции) концентрация реагентов понижается главным образом вследствие разбавления ее продуктами реакции.

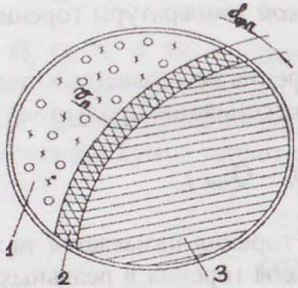

Рис.2.1. Схема распространения пламени по предварительно перемешанной гомогенной смеси: 1 – исходная горючая смесь; 2 –фронт пламени; 3 – продукты горения; $\delta_{фп}$-толщина фронта пламени;

Во фронте пламени в результате химической реакции горения концентрация исходных компонентов резко снижается до нуля а температура достигает максимального значения. Вследствие молекулярной теплопроводности температура перед зоной химической реакции монотонно повышается от начальной температуры горючей смеси до температуры, близкой к температуре горения, образуя зону физического прогрева.

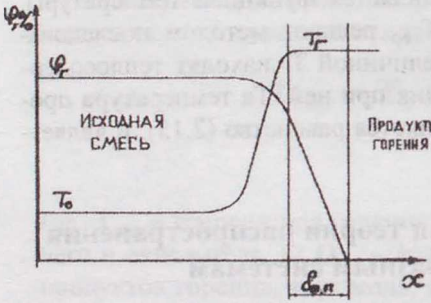

Рис.2.2. Изменение температуры и концентрации исходных компонентов во фронте пламени

Для большинства углеводородных смесей фронт пламени представляет собой яркую зону свечения, которую можно наблюдать визуально или зарегистрировать с помощью фотосъемки. Свечение фронта пламени имеет химическую природу, является результатом превращения вещества определяется радикалами C_2, **CH**, **HCO**. При этом толщина зоны свечения соответствует толщине зоны реакции и не превышает, как правило, долей миллиметра, поэтому условно фронт пламени считают поверхностью. Это значительно облегчает рассмотрение и теоре-

тический анализ явления, позволяя параметры горения относить не к единице объема, а к единице поверхности фронта пламени.

Фронт пламени перемещается по смеси с определенной скоростью. Различают видимую и нормальную скорости распространения. Под нормальной скоростью $U_н$, м/с понимают скорость распространения фронта пламени по нормали к его поверхности.

$$U_н = \frac{dl}{d\tau},$$

где l- расстояние, пройденное фронтом пламени за время τ.
Нормальная скорость горения может быть представлена в виде

$$U_н = \frac{V_{см}}{S\tau},$$

где $V_{см}$ – объем сгоревшей смеси за время **τ**, **S** – площадь поверхности фронта пламени.

Далее рассмотрим тепловую и диффузионную теории распространения пламени.

Сущность тепловой теории заключается в том, что от поверхности фронта пламени, где достигается максимальная температура, к свежей смеси за счет теплопроводности передается поток тепла. Под его действием происходит разогрев смеси до температуры самовоспламенения, в результате чего происходит самопроизвольная химическая реакция.

Согласно диффузионной теории, перемещение зоны химической реакции в пространстве связано с диффузией активных частиц (радикалов) из зоны химической реакции, где при высокой температуре они образуются в свежую смесь. Обладая чрезвычайно высокой реакционной способностью (т.е. очень малым значением энергии активации), они способны уже при нормальной температуре являться центрами химической реакции взаимодействия горючего с окислителем. Поэтому, попадая в относительно холодную свежую горючую смесь перед фронтом пламени, они инициируют химическую реакцию горения, и тем самым осуществляется перемещение фронта пламени в пространстве.

Деление механизма распространения пламени на тепловой и диффузионный является условным и отражает недостаточно полное представление о фактическом механизме процесса. Тепловая теория

может быть применима при различных механизмах реакции в пламени, если только соблюдается подобие полей температур и концентраций. Диффузионная теория применяется при цепном механизме в пламени и особенно в тех случаях, когда велика концентрация атомов водорода в зоне реакции. По-видимому, на самом деле в процессе перемещения фронта пламени по свежей горючей смеси существенны оба фактора: и тепловой, и диффузионный, т.е. наблюдается диффузионно-тепловой механизм распространения пламени.

Однако наиболее разработанной в настоящее время является тепловая теория, которая позволяет с введением ряда упрощающих допущений вывести выражение для нормальной скорости распространения пламени. В основе тепловой теории, разработанной главным образом Зельдовичем Я.Б. и Франк-Каменецким Д.А. при непосредственном участии Семенова Н.Н., лежит представление о подобии поля температур и концентраций в зоне пламени:

$$\frac{\varphi_0 - \varphi}{\varphi_0} = \frac{T - T_0}{T_г - T_0}$$

Таким образом, температура и концентрация связаны линейной зависимостью, следовательно, уравнение для скорости химической реакции можно представить в виде функции только температуры.В этой теории принято, что химическая реакция горения протекает лишь при температуре, близкой к максимальной температуре горения и все тепловыделение сосредоточено в узкой области температур шириной порядка $\frac{RT_г^2}{E}$. Лишь в зоне достижения максимальной температуры происходит снижение концентрации горючего от начальной концентрации до нуля. Некоторое снижение концентрации перед зоной реакции обусловлено разбавлением смеси за счет диффузии продуктов реакции.

Используя метод дискретного решения общего уравнения теплопроводности можно записать

$$\lambda \frac{d^2T}{dx^2} - C_P \rho_0 U_н \frac{dT}{dx} + QV = 0,$$

где λ, C_P, ρ_0 – теплопроводность, теплоемкость и плотность горючей смеси; Q – тепловой эффект химической реакции, V – скорость химической реакции, $U_н$ – нормальная скорость распространения фронта пламени;

Уравнение нормальной скорости распространения горения от физико- химических свойств смеси, скорости реакции, температуры горения может быть представлена в виде

$$U_н = \frac{(2Q\lambda V \frac{RT_г^2}{E})^{0,5}}{C_P \rho_0 (T_г - T_0)} \qquad (2.16)$$

Нормальная скорость распространения пламени является одной из важных характеристик пожарной опасности газообразных веществ. Как следует из уравнения (2.16), ее величина зависит от химической природы горючего и окислителя, физических и теплофизических параметров горючей смеси (C_p, ρ_0, λ, T_0, $T_г$, E, Q), т.е. она определяется физико-химическими свойствами горючей смеси , являясь, по определению Михельсона В.А., ее фундаментальной характеристикой. Сущность горения заключается в том, что оно не может существовать, не распространяясь, и изменение условий его протекания приводит к изменению величины нормальной скорости распространения горения.

Значительное влияние на нормальную скорость распространения пламени оказывает состав горючей смеси. Как следует из соотношения (2.16), $U_н$ пропорциональна скорости химической реакции, которая имеет максимум при стехиометрическом соотношении горючего и окислителя. Однако эксперимент показал, что максимум $U_н$ сдвинут в область более богатых смесей (α<1).

Таблица 2.1

Горючий газ	Стехиометрическая концентрация, %	Нормальная скорость, м/с	Максимальная нормальная скорость, м/с	Концентрация горючего при максимальной скорости, %
Водород	29,5	1,6	2,67	42,0
Окись углерода	29,5	0,3	0,41	43,0
Ацетилен	7,7	1,0	1,35	10,0
Этилен	6,5	0,6	0,63	7,0

Как следует из табл. 2.1 , нормальная скорость распространения пламени имеет определенные пределы изменения. Она редко превышает 2,5 м/с, а для углеводородо-воздушного пламени составляет в среднем 0,4…0,8 м/с. Природа нормальной скорости определяет ее минимальное значение, которое приходится на предельные смеси и составляет ~0,04 м/с. Смеси с меньшей нормальной скоростью уже не способны к распространению горения.

Величина нормальной скорости распространения пламени зависит от природы и концентрации флегматизаторов и ингибиторов. Молекулы флегматизатора (азот, двуокись углерода, водяной пар, инертные газы), разбавляя горючую смесь, снижают вероятность активных соударений между молекулами горючего и окислителя. Вследствие этого скорость химической реакции горения падает и, как следует из (2.16), уменьшается скорость распространения пламени.

Кроме разбавляющего эффекта, скорость распространения пламени снижается при введении флегматизаторов в результате уменьшения температуры в зоне химической реакции – температуры горения. Обладая определённой теплоёмкостью, газы-флегматизаторы поступают в зону химической реакции, нагреваются, отбирая тепло. Очевидно, что чем больше теплоёмкость флегматизатора, тем выше его эффективность. Скорость распространения пламени также зависит от теплопроводности флегматизатора (2.16). Повышение теплоёмкости и снижение теплопроводности при всех прочих равных условиях снижает нормальную скорость горения. Из эксперимента следует, что влияние CO_2 на скорость распространения пламени значительно выше, чем аргона или азота. Это обусловлено их теплофизическими характеристиками. Соотношения Cp/λ для CO_2 составляет 2,69 м·с/ кмоль, а для N_2 и Ar всего лишь ~1,3.

Таким образом, эффективность газов-флегматизаторов определяется их теплофизическими свойствами: чем выше отношение теплоёмкости к коэффициенту теплопроводности, тем сильнее снижают они нормальную скорость распространения пламени.

Сложное влияние на нормальную скорость горения смеси окиси углерода с кислородом оказывают пары воды. Так, высушенная окись углерода с кислородом не воспламеняется. Введения паров воды приводит к возникновению горения от источника зажигания. При увеличении содержания паров воды до 9 % скорость горения смеси растёт, однако при дальнейшем повышении концентрации воды нормальная скорость падает. Установлено, что в реакции окиси углерода

с кислородом вода играет роль катализатора, ускоряя процесс окисления. Однако при большом её количестве (более 9 %) разбавляющее действие паров воды начинает превалировать над каталитическим эффектом, вследствие чего скорость горения снижается. При введении в горючую смесь химически активных ингибиторов (галоид замещенные углеводороды) скорость распространения пламени снижается значительно сильнее, чем в случае флегматизаторов. Прекращение горения пропано-воздушной смеси (срыв пламени) наступает при добавлении 20…40 % флегматизаторов, для фреона 114В2 (1,2 дибромтетрафторэтан) этот процесс наступает при содержании его в количестве, равном 2,5 %. Столь высокую эффективность этого класса соединений связывают с их непосредственным участием в элементарных актах химической реакции горения. При высокой температуре во фронте пламени происходит разложение фреона с образованием галоидных радикалов, которые нейтрализуют активные реакции, приводя к обрыву цепных реакций. Эффективность ингибиторов зависит от вида галоидов, их содержания в молекуле вещества и состава горючей смеси. С увеличением степени замещения водорода эффективность ингибиторов возрастает, при этом значительно сильнее для богатых смесей, чем для бедных. Влияние начальной температуры смеси на нормальную скорость распространения пламени можно проследить, анализируя выражение (2.16). С возрастанием T_0 увеличивается температура горения смеси

$$T_г = T_0 + \frac{Q_H}{\sum c_{pi} V_{п.г.i}},$$

а следовательно, и скорость химической реакции.

На практике (пожары) чаще всего встречается диффузионное горение. Скорость распространения пламени в данном случае зависит от скорости образования горючей смеси.

Типичное диффузионное пламя образуется при сгорании горючего газа, вытекающего из трубки в атмосферу воздуха. Когда скорость струи невелика, граница пламени устойчива, пламя на вид «гладкое», горение протекает спокойно. С увеличением скорости истечения высота пламени пропорционально возрастает. Такое горение является ламинарным. При дальнейшем возрастании скорости истечения ламинарное горение переходит в турбулентное (рис. 2.3).

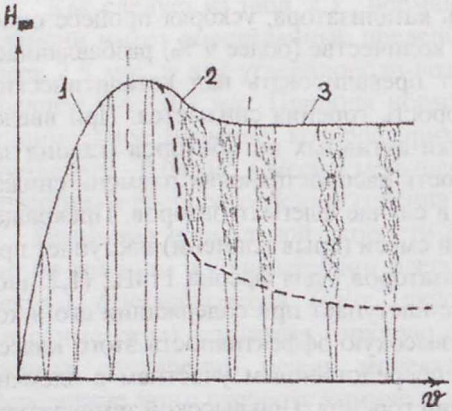

Рис. 2.3 . Изменение высоты пламени от скорости истечения газа из горелки постоянного диаметра: 1 – ламинарный режим горения; 2 – переходный режим горения; 3 – турбулентный режим горения

Согласно общепринятым положениям, при горении вытекающего горючего газа в атмосферу воздуха кислород последнего, диффундируя через слои продуктов горения, поступает к зоне горения, где вступает в химическую реакцию окисления с горючим (рис. 2.3).

Вследствие диффузии окислителя из окружающей среды концентрации горючего на некотором расстоянии от среза горелки $x_в$ снизятся со 100% до верхнего концентрационного предела воспламенения, и с этого момента станет возможным протекание химической реакции (рис. 2.4).

Из-за большого избытка горючего в этой области образуются в основном продукты неполного окисления (**CO**, **CH_4**, углерод и т. п.). Образование в этой области углерода обусловливает ярко-жёлтое свечение диффузионного пламени. По мере расходования горючего и повышения концентрации окислителя вследствие диффузии последнего концентрация горючего снижается. И как только на расстоянии $x_н$ она снижается до нижнего концентрационного предела воспламенения, химическая реакция горения завершается. По мере изменения концентрации горючего в зоне реакции ($x_в$ - $x_н$) от верхнего до нижнего концентрационных пределов воспламенения она проходит через стехиометрическую $x_{ст}$, при которой скорость химической реакции окисления максимальна. Экспериментальные данные показывают, что за счет определяющего влияния диффузии на скорость химической реакции ширина зоны реакции в диффузионных пламенах значительно больше, чем в кинетических и составляет по оценкам Гейдона и Вольфгарда от нескольких миллиметров до сантиметра. Соответственно уменьшается и скорость выделения тепла в единице объёма зоны реакции. Так, для диффузионного пламени **CH_4 – O_2** скорость тепловыделения в $4 \cdot 10^4$ раз ниже, чем кинетического..

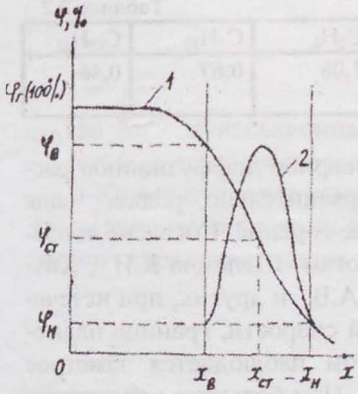

Рис.2.4. Изменение концентрации горючего (1) и скорости химической реакции (2) с увеличением расстояния от центра газового фонтана

В работах по диффузионному пламени нормальная скорость горения не определяется.

Скорость диффузионного горения зависит от коэффициента диффузии окислителя, диаметра горелки и не является константой процесса горения. Поэтому для диффузионного пламени определяют только высоту факела пламени

$$h_{пл} \approx \frac{vr^2}{D}$$

где $h_{пл}$ – высота пламени, м, **V** – скорость истечения газа, м/с, r - радиус струи горючего газа, м, **D** – коэффициент диффузии окислителя в продуктах реакции, м^2/с.

Более точная зависимость высоты пламени даётся в работах Блинова В.И. и Худякова Г.Н.

$$h_{пл} = \frac{m_{ок}\rho_г}{4\varphi_0} \cdot \frac{r^2 \vartheta}{D},$$

где $m_{ок}$ – масса окислителя, необходимого для окисления одного грамма горючего, $\rho_г$ – плотность горючего кг/м^3, φ_0 - концентрация окислителя вне пламени

Коэффициент диффузии зависит от давления и температуры

$$D = D_0 \frac{P_0}{P} \left(\frac{T}{T_0}\right)^n,$$

где D_0 – коэффициент диффузии в газах при изменении давления при нормальных условиях (101,325 КПа, 273 °С), **n** – коэффициент равный 1,5 … 2,0.

D_0 – зависит от природы смеси и может меняться более, чем на порядок. Для предельных углеводородов он монотонно снижается с увеличением длины углеводородной цепи.

Таблица 2.2

Газ	O_2	CO_2	CH_4	C_2H_6	C_5H_{12}	$C_{10}H_{22}$
D_0, $м^2/с10^5$	6,11	1,38	1,96	1,08	0,67	0,46

На практике кинетическое и ламинарное диффузионное распространение пламени встречается сравнительно редко. Чаще встречается диффузионное турбулентное горение. Согласно теоретическим и экспериментальным работам Щелкина К.И. , Хитрина Л.Н., Щетникова Е.С., Талантова А.В. и других, при истечении горючего газа, начиная с некоторой скорости, граница пламени становится неустойчивой. При этом наблюдается заметное уменьшение высоты пламени (рис. 2.3). При большем увеличении расхода газа высота пламени или слабо меняется, или остается практически постоянной, пламя отрывается от среза горелки и устанавливается на некотором расстоянии. Такое пламя называют приподнятым.

Турбулентное движение характеризуется беспорядочным нерегулярным изменением величины и вектора скорости со временем в каждой точке потока.

Картина турбулентного движения в принципе аналогична молекулярному движению, где вместо хаотического движения молекул происходит такое же движение макрочастиц – отдельных объемов газа, при этом сами объёмы не являются устойчивыми в пространстве и времени. Траектории объемов газа при развитой турбулентности очень сложны, что приводит к его сильному перемешиванию, вследствие чего весьма сильно интенсифицируется горение, в частности увеличивается скорость распространения пламени. Турбулизация потока происходит от следующих причин:

- увеличения скорости истечения газа;
- воздействия завихрителей и тел с плохо обтекаемой формой;
- обратного воздействия процесса горебния на характер движения смеси.

Турбулентность имеет статистическую природу: в течение длительного промежутка времени средняя скорость потока в данной точке является постоянной величиной. Однако мгновенная скорость потока непрерывно отклоняется от среднего значения.

Разность между мгновенной и средней скоростями движения потока называют *пульсационной скоростью*

$$\Delta\vartheta = \vartheta_i - \vartheta_{cp},$$

где $\Delta\upsilon$ – пульсационная скорость, м/с, υ_i – мгновенная скорость, м/с, υ_{cp} – средняя скорость, м/с.

Кроме пульсационной скорости различают среднеквадратичную пульсационную скорость $\upsilon_{ск}$, которая является одной из основных величин , характеризующих турбулентность:

$$\vartheta_{ск} = \sqrt{(\vartheta_i - \vartheta_{cp})^2}.$$

Другой характерной величиной для турбулентного горения является масштаб турбулентности или длина пути смешения $l_т$, представляющей собой путь, на протяжении которого перемещающийся объём газа не изменяет своей скорости, температуры и состава.

По аналогии с молекулярным переносом при турбулентном движении за скорость молекул может быть принята среднеквадратичная пульсационная скорость, а за длину их свободного пробега – масштаб турбулентности. В этом случае к турбулентному движению можно применить положения кинетической тории газов, согласно которой коэффициенты массо- и теплопереноса $a_т$, $D_т$, $\nu_т$ пропорциональны произведению среднеквадратичной скорости на масштаб турбулентности ($\upsilon_{ск} \cdot L_т$).

Турбулентные коэффициенты переноса в сотни и тысячи раз больше соответствующих коэффициентов молекулярного переноса. Поэтому и перенос массы и тепла в турбулентном потоке в тысячи раз выше, чем в ламинарно движущемся или неподвижном газе. Это связано главным образом с тем, что длина пути смешения (масштаб турбулентности) на несколько порядков выше длины свободного пробега молекул. Величина же пульсационной скорости меньше скорости движения молекул. Пульсации скорости в турбулентном потоке также вызывают и пульсации концентрации, давления и температуры. Под температурой турбулентно движущегося газа понимают ее усредненное по времени значение. Истинная температура газа испытывает такие же нерегулярные хаотические пульсации, как и скорость. Следует особо подчеркнуть при этом, что скорость химической реакции, например реакции горения, нельзя рассматривать как функцию

средней температуры, поскольку она весьма сильно зависит от температуры (уравнение Аррениуса).

В случае горения предварительно перемешанной кинетической смеси различают мелкомасштабную и крупномасштабную турбулентность. Если масштаб турбулентности $l_т$ меньше толщины фронта пламени δ, турбулентность является мелкомасштабной, в том случае, когда масштаб турбулентности больше толщины фронта пламени – крупномасштабной.

При мелкомасштабной турбулентности повышение скорости сгорания $\upsilon_{м.т.}$ объясняется увеличением скорости массо- и теплопереноса в зоне пламени. Увеличение скорости распространения пламени в этом случае по сравнению с нормальной скоростью в неподвижной горючей смеси пропорционально значению коэффициентов температуропроводности при турбулентном и молекулярном теплопереносе ($a_т$, a)

$$\frac{V_{м.т}}{u_H} \approx \sqrt{1+\frac{a_т}{a}}.$$

Согласно модели, разработанной Щелкиным К.И., при крупномасштабной турбулентности происходит раздробление фронта пламени. Турбулентное пламя состоит как бы из отдельных объемов свежей смеси, горящих с нормальной скоростью и окруженных со всех сторон продуктами горения, имеющими высокую температуру – температуру горения. Горение распространяется за счет «забрасывания» пламени в свежую смесь в результате турбулентных пульсаций. Эта модель известна как эстафетная передача горения. Исходя из ее положений величина турбулентной скорости пропорциональна нормальной скорости и относительному увеличению поверхности горения:

$$V_т = u_н (F / F_0),$$

где **F** – суммарная поверхность фронта горения при крупномасштабной турбулентности, F_0 – поверхность фронта пламени при горении в неподвижной или ламинарно движущейся смеси.

В дальнейшем Талантов А.В., анализируя увеличение поверхности фронта пламени, предложил скорость турбулентного горения принимать равной сумме нормальной скорости и среднеквадратиче-

ной скорости пульсаций $\mathbf{V_{ск}}$, что более полно соответствует модели «забрасывания» пламени турбулентными пульсациями:

$$\mathbf{V_т = u_н + V_{ск}} ,$$

Наряду с турбулентностью, вызванной характером движения горючей смеси, наблюдается и турбулентность, порождаемая пламенем. Она существует лишь в зоне турбулентного горения.

Модель поверхностного турбулентного горения имеет границы применения. Она справедлива лишь в условиях, когда характерное время турбулентного горения $\tau_т = \mathbf{l_т / V_{ск}}$ выше для такового в случае нормального горения $\tau_н = \delta / \mathbf{u_н}$.

Если $\tau_т < \tau_н$, т.е. когда характерное время турбулентного горения ниже нормального, справедлив механизм объемного горения ниже нормально. Ведущее место в разработке теории объемного турбулентного горения принадлежит Щетинкову Е.С. и Саммерфильду М.

В противоположность поверхностной модели, в которой скорость горения не зависит от масштаба турбулентности, скорость объемного турбулентного горения пропорциональна квадратному корню из масштаба турбулентности.

Поверхностная и объемная модели представляют собой предельные случаи турбулентного горения. В реальных условиях возможны любые промежуточные стадии.

Горение на пожаре, как уже отмечалось, в подавляющем большинстве случае протекает в диффузионном режиме в условиях развитой турбулентности. Проявление пульсационной скорости приводит к взаимному переносу целых объемов воздуха и горючего. Это резко интенсифицирует процесс массообмена и, следовательно, скорость горения.

При турбулентном режиме горения отношение высоты пламени к расходу газа в 10 раз меньше чем при ламинарном (табл. 2.3.) и соответственно интенсивность турбулентного горения на несколько порядков выше ламинарного. На участке турбулентного горения с увеличением расхода газа величина несколько снижается. Так, при увеличении расхода в 6 раз, с 5 до 30 м^3/с, значение $\mathbf{H_{пл}/V_г}$ снижается в 2,5 раза. Эти результаты показывают, что с повышением скорости истечения струи на участке турбулентного горения продолжается интенсификация процесса смешения горючего с окислителем и, следовательно, увеличивается скорость диффузионного горения.

Таблица 2.3

Режим горения	Расход газа Vг, м³/с	Высота пламени Hпл, м	Hпл/Vг, с/м²
Ламинарный	$4,5 \cdot 10^{-6}$	$5,1 \cdot 10^{-2}$	$1,13 \cdot 10^{4}$
	$8,8 \cdot 10^{-6}$	$12,7 \cdot 10^{-2}$	$1,44 \cdot 10^{4}$
	$17,1 \cdot 10^{-6}$	$23,9 \cdot 10^{-2}$	$1,4 \cdot 10^{4}$
Турбулентный	6	18,60	3,1
	12	25,2	2,1
	18	27,0	1,5
	30	35,0	1,17

2.4. Распространение пламени по поверхности жидкости. Влияние внешних условий на скорость распространения пламени

Над поверхностью жидкого или твердого вещества при любой температуре существует паровоздушная смесь, которая в состоянии равновесия обладает давлением насыщенных паров или их концентрация. С увеличением температуры давление насыщенных паров возрастает по экспоненциальной зависимости (уравнение Клапенрона-Клаузиса):

$$P_{н.п.} = P_{oe} - Q_{исп} / RT$$

где $P_{н.п.}$ – давление насыщенного пара, Па, $Q_{исп}$ – теплота испарения, кДж/моль, Т – температура жидкости, К

Таким образом, для любой жидкости всегда существует такой интервал температур, при котором концентрация насыщенных паров над зеркалом будет находится в области воспламенения, т.е. НКПВ ≤ φn ≤ ВКПВ .

Для создания НКПВ паров над поверхностью жидкости достаточно нагреть до температуры, равной НТПВ, не всю массу жидкости, а лишь только ее поверхностный слой.

При наличии источника зажигания такая смесь будет способна к воспламенению. На практике чаще используют понятия температура вспышки и воспламенения.

Под температурой вспышки понимают наименьшую температуру жидкости, при которой над ее поверхностью образуется концентрация паров жидкости, способная к воспламенению от источника зажигания, но скорость их образования недостаточна для последующего горения. Таким образом, как при температуре вспышки, так и при нижнем температурном пределе воспламенения над поверхностью жидкости образуется нижний концентрационный предел воспламенения, однако в последнем случае НКПВ создается насыщенными парами. Поэтому температура вспышки всегда несколько выше, чем НТПВ. Хотя при температуре вспышки наблюдается кратковременное воспламенение паров в воздухе, которое не способно перейти в устойчивое горение жидкости, тем не менее при определенных условиях вспышка паров жидкости способна явиться источником возникновения пожара.

Температура вспышки принята за основу классификации жидкостей на легковоспламеняющиеся (ЛВЖ) и горючие жидкости (ГЖ). К ЛВЖ относятся жидкости, имеющие температуру вспышки в закрытом сосуде 61°С и ниже, к горючим – с температурой вспышки более 61°С.

Кроме температуры вспышки, различают еще температуру воспламенения. Это наименьшая температура жидкости, при которой после воспламенения паров от источника зажигания устанавливается стационарное горение.

Экспериментально температуру вспышки определяют в приборах открытого и закрытого типа. В сосудах закрытого типа значения температуры вспышки всегда ниже, чем в открытом, поскольку в этом случае пары жидкости имеют возможность диффундировать в атмосферу и для создания горючей концентрации над поверхностью требуется более высокая температура.

В табл. 2.4 приведены значения температур вспышки некоторых жидкостей, определенных приборами открытого и закрытого типа.

Таблица 2.4

Жидкость	Температура вспышки, К	
	Прибор закрытого типа	Прибор открытого типа
Нефть	303	319
Мазут	369	382
Масло цилиндровое	488	509

У легковоспламеняющихся жидкостей температура воспламенения выше, чем температура вспышки на 1…5° С, при этом чем ниже температура вспышки тем меньше разность между температурами воспламенения и вспышки.

У горючих жидкостей, имеющих высокую температуру вспышки, различие между этими температурами доходит до 25…35° С ,между температурой вспышки в закрытом тигле и нижним температурным пределом воспламенения имеется корреляционная связь, описываемая формулой

$$T_{вс} - T_{н.п} = 0{,}125\, T_{вс} + 2.$$

Это соотношение справедливо при $T_{вс} \leq 433$ К.

Существенная зависимость температур вспышки и воспламенения от условия эксперимента вызывает определенные трудности при создании расчетного метода оценки их величин. Одним из наиболее распространенных из них является полуэмпирический метод, предложенный Блиновым В.И.:

$$T_{вс} = \frac{B}{D_0 \cdot \beta \cdot \rho_{вс}}, \qquad (2.17)$$

где $T_{вс}$ – температура вспышки (воспламенения), К; $\rho_{вс}$ – парциальное давление насыщенного пара жидкости при температуре вспышки (воспламенения), Па; D_0 – коэффициент диффузии паров жидкости, с/м^2; β – количество молекул кислорода, необходимое для полного окисления одной молекулы горючего; **B** – константа метода определения.

Рекомендуется при расчете температуры вспышки в замкнутом сосуде принимать B = 28, в открытом сосуде B = 45, при расчете температуры воспламенения – B = 53.

Температурные пределы воспламенения могут быть рассчитаны по известным значениям температуры кипения

$$t_{н(в)} = \kappa t_{кип} - l,$$

где $t_{н(в)}$, $t_{кип}$ – соответственно нижний (верхний) температурный предел воспламенения и температура кипения, °С; **к**, ***l*** – параметры, величины которых зависят от вида горючей жидкости.

Температурные пределы воспламенения могут быть вычислены по известным значениям концентрационных пределов. Определим концентрацию насыщенных паров над поверхностью жидкости

$$\varphi_{н.п} = (p_{н.п}\ 100) / p_0 , \qquad (2.18)$$

где $\varphi_{н.п}$ – концентрация насыщенных паров, %; $p_{н.п}$ – давление насыщенных паров, Па; p_0– внешнее (атмосферное) давление, Па.

Из формулы (2.18) следует

$$p_{н.п} = (\varphi_{н.п}\ p_0) / 100$$

Определив по известному значению нижнего (верхнего) предела воспламенения давление насыщенного пара, находим температуру, при которой это давление достигается. Она и является нижним (верхним) температурным пределом воспламенения.

По формуле (2.18) можно решать и обратную задачу: рассчитывать концентрационные пределы воспламенения по известным значениям температурных пределов.

Свойство пламени к самопроизвольному распространению наблюдается не только при горении смесей горючих газов с окислителем, но и при горении жидкостей и твердых веществ. При локальном воздействии тепловым источником, например открытым пламенем, жидкость будет прогреваться, возрастет скорость испарения и при достижении поверхностью жидкости температуры воспламенения в месте воздействия теплового источника произойдет зажигание паровоздушной смеси и установится устойчивое пламя, которое затем с определенной скоростью будет распространяться по поверхности холодной жидкости.

Что же является движущей силой распространения процесса горения и каков его механизм?

Распространение пламени по поверхности жидкости протекает в результате теплопередачи излучением, конвекцией и молекулярной теплопроводностью от зоны пламени к поверхности зеркала жидкости.

По современным представлениям основной движущей силой распространения процесса горения является теплоизлучение от пламени. Пламя, обладая высокой температурой (более 1000°С), способно, как известно, излучать тепловую энергию. Согласно закону Стефана-Больцмана, интенсивность лучистого теплового потока, отдаваемого нагретым телом, определяется соотношением

$$q_л=\varepsilon_0\sigma(T_г^4-T_0^4),$$

где $q_л$ – интенсивность лучистого теплового потока, кВт/м^2; ε_0 – степень черноты тела (пламени) (ε_0 = 0,75 ÷1,0); σ – постоянная Стефана-Больцмана, 5,7·10^{-11} кДж/(м^2·с·К^4); $T_г$ – температура тела (пламени), К; T_0 – температура среды, К.

Тепло, излучаясь во все стороны, частично поступает и на еще не горящие участки поверхности жидкости, прогревая последние. Вследствие повышения температуры поверхностного слоя интенсифицируется процесс испарения жидкости и образования паровоздушной смеси над прогретым участком. Как только образуется горючая паровоздушная смесь, т.е. концентрация паров жидкости превысит нижний концентрационный предел воспламенения, произойдет ее зажигание от пламени. Переместившись на этот участок поверхности жидкости, пламя интенсивнее прогревает следующий участок поверхности жидкости и т.д. Скорость распространения пламени по жидкости будет зависеть от скорости прогрева поверхности жидкости лучистым тепловым потоком от пламени, т.е. от скорости образования горючей паровоздушной смеси над поверхностью жидкости, которая, в свою очередь, зависит от природы жидкости и начальной температуры.

Влияние природы жидкости заключается в величине ее теплоты испарения и температуры вспышки. Чем выше их значения для той или другой жидкости, тем более длительное время необходимо, чтобы ее прогреть до образования горючей провоздушной смеси, тем, следовательно, ниже скорость распространения пламени. С увеличением молекулярной массы вещества в пределах одного гомологического ряда снижается давление паров упругости, как известно, возрастает теплота испарения и температура вспышки и, соответственно снижается скорость распространения пламени.

Увеличение температуры жидкости повышает скорость распространения пламени, так как время, необходимое для прогрева жидкости до температуры вспышки перед зоной горения, уменьшается.

Начиная с температуры вспышки, скорость распространения пламени по зеркалу жидкости будет по физическому смыслу представлять собой скорость распространения пламени по паровоздушной смеси состава, близкого к НКПВ, т.е. 4…5 см/с. При повышении начальной температуры жидкости выше температуры вспышки скорость распространения пламени будет изменяться аналогично зависимости видимой скорости распространения пламени от состава горючей смеси. Действительно, при увеличении температуры жидкости выше температуры ее вспышки концентрация паровоздушной смеси над поверхностью зеркала будет возрастать от нижнего концентрационного предела воспламенения до 100 %, когда будет достигнута температура кипения.

Следовательно, вначале при повышении температуры жидкости от температуры вспышки до температуры, при которой над поверхностью образуется концентрация насыщенных паров, равная стехиометрической (точнее, несколько выше, чем стехиометрическая), скорость распространения пламени будет возрастать. В закрытых сосудах по мере дальнейшего повышения температуры жидкости, скорость распространения пламени начинает снижаться, вплоть до начальной температуры жидкости, равной верхнему температурному пределу воспламенения, при котором распространение пламени по паровоздушной смеси станет уже невозможным из-за недостатка кислорода в паровоздушной смеси над поверхностью жидкости. Над поверхностью же открытого резервуара концентрация паров по высоте будет различной: у поверхности она будет максимальной и соответствовать концентрации насыщенного пара при данной температуре, а по мере подъема над поверхностью постепенно будет снижться вследствие конвективного и молекулярного уноса.

Таким образом, над поверхностью зеркала жидкости в открытом резервуаре при любой начальной температуре жидкости выше, чем $T_{ст}$, будет находиться область, в которой концентрация паров в воздухе будет стехиометрической. При температуре жидкости, близкой к температуре вспышки, скорость, распространение пламени по поверхности жидкости будет равной скорости его распространения по смеси паров в воздухе, на НКПВ, т.е. 3…4 см/с. При этом фронт пламени будет расположен у поверхности жидкости. При дальнейшем

увеличении начальной температуры жидкости скорость распространения пламени по жидкости будет возрастать аналогично изменению нормальной скорости распространения пламени по паровоздушной смеси с увеличением ее концентрации. С максимальной скоростью пламя будет распространяться по смеси с концентрацией, близкой к стехиометрической. Следовательно, с увеличением начальной температуры жидкости выше $T_{ст}$ скорость распространения пламени будет оставаться постоянной, равной максимальному значению скорости распространения горения по стехиометрической смеси или несколько больше нее (рис. 2.5). Таким образом, при изменении начальной температуры жидкости в открытой емкости в широком диапазоне температур, вплоть до температуры кипения, скорость распространения пламени будет изменяться от нескольких мм $\cdot$ $с^{-1}$ до 3…4 м $\cdot$ $с^{-1}$.

С максимальной скоростью пламя всегда будет распространяться по смеси с концентрацией, близкой к стехиометрической. С увеличением температуры жидкости выше $т_{ст}$ будет возрастать лишь высота, на которой будет достигаться стехиометрическая концентрация, а скорость распространения пламени будет оставаться постоянной (рис. 2.5.). Это обстоятельство всегда надо иметь в виду как при организации профилактической работы, так и при тушении пожаров, когда, например, возникает опасность подсоса воздуха в закрытую емкость, ее разгерметизация.

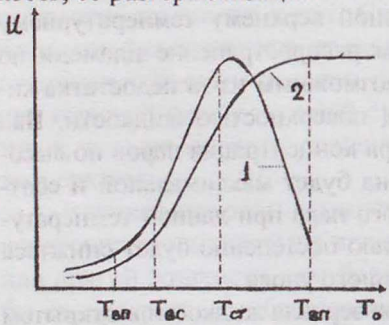

Рис. 2.5. Изменение скорости распространения пламени по зеркалу жидкости от ее начальной температуры: 1 – горение жидкостей в закрытой емкости; 2 – горение жидкости в открытой емкости

После воспламенения жидкости и распространения пламени по ее поверхности устанавливается диффузионный режим ее выгорания, который характеризуется удельной массовой u_m и линейной $u_л$ скоростями. Удельная массовая скорость – количество вещества, выгорающего с единицы площади зеркала жидкости в единицу времени (кг $\cdot$ $м^{-2}$ $\cdot$ $с^{-1}$). Линейная скорость – расстояние, на которое перемещается уровень зеркала жидкости в единицу времени за счет ее выгорания (м $\cdot$ $с^{-1}$).

Массовая и линейная скорости выгорания взаимосвязаны друг с другом через плотность жидкости ρ:

$$u_m = u_л \rho. \qquad (2.19)$$

После воспламенения жидкости температура ее поверхности повышается от температуры воспламенения до кипения, происходит формирование прогретого слоя. В этот период скорость выгорания жидкости постепенно повышается, возрастает высота факела пламени в зависимости от диаметра резервуара и вида горючей жидкости. После 1…10 мин горения наступает стабилизация процесса: скорость выгорания и размеры пламени остаются в дальнейшем неизменными.

Высота и форма пламени при диффузионном горении жидкости и газа подчиняются одним и тем же закономерностям, поскольку в обоих случаях процесс горения определяется взаимной диффузией горючего и окислителя. Однако если при диффузионном горении газов скорость струи газа не зависит от процессов, протекающих в пламени, то при горении жидкости устанавливается определенная скорость выгорания, которая зависит как от термодинамических параметров жидкости, так и от условий диффузии кислорода воздуха и паров жидкости.

Между зоной горения и поверхностью жидкости устанавливается определенный тепло- и массообмен, который схематически показан на рис. 2.6.

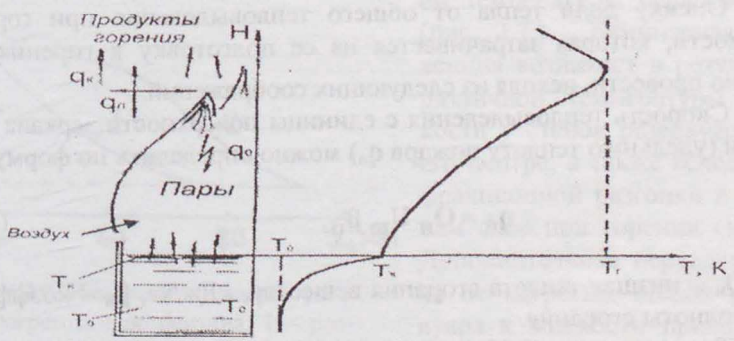

Рис. 2.6. Распределение температуры (поле температур) при горении жидкости: T_0 – начальная температура; $T_к$ – температура кипения; $T_г$ – температура горения; q_k, $q_л$ – соответственно конвективный и лучистый тепловые потоки; q_0 – тепловой поток, поступающий на поверхность жидкости

Часть теплового потока, поступающего к поверхности жидкости q_0, затрачивается на ее нагрев до температуры кипения q_k и испарения жидкости $q_{исп}$. Кроме того, тепло $q_{ст}$ на нагрев жидкости поступает от факела пламени через стенки резервуара за счет теплопроводности. При достаточно большом его диаметре величиной $q_{ст}$ можно пренебречь, тогда $q_0 = q_k + q_{исп}$.

Очевидно, что $q_k = c\rho\upsilon_{п.с}(T_к - T_о)$; $q_{исп} = \rho u_л Q^{ск}_{исп}$,

где **C** – теплоемкость жидкости, кДж/(кг · К); ρ – плотность жидкости, кг/м^3; $\upsilon_{п.с}$ – скорость роста прогретого слоя, м/с; $u_л$ – линейная скорость выгорания, м/с; $Q^{ск}_{исп}$ - теплота парообразования, кДж/кг; $T_к$ – температура кипения жидкости, К.

Принимая для простоты $u_л = \upsilon_{п.с}$, получим

$$q_0 = \rho u_л \left[c(T_к - T_о) + Q^{ск}_{исп}\right]. \qquad (2.20)$$

Из формулы (2.20) следует, что интенсивность теплового потока из зоны пламени обусловливает определенную скорость поставки горючего в эту зону, химическое взаимодействие которого с окислителем, в свою очередь, влияет на величину q_0. В этом и состоит взаимосвязь массо- и теплообмена зоны пламени и конденсированной фазы при горении жидкостей и твердых веществ.

Оценку доли тепла от общего тепловыделения при горении жидкости, которая затрачивается на ее подготовку к горению q_0, можно провести, исходя из следующих соображений.

Скорость тепловыделения с единицы поверхности зеркала жидкости (удельную теплоту пожара $q_п$) можно определить по формуле

$$q_п = Q_н U_m \beta_п, \qquad (2.21)$$

где $Q_н$ – низшая теплота сгорания вещества, кДж/кг; $\beta_п$ – коэффициент полноты сгорания.

Тогда с учетом (2.19), разделив (2.20) на (2.21), получим:

$$\frac{q_о}{q_п} = \frac{Q^{ск}_{исп} + c(T_к - T_о)}{Q_н \beta_п}.$$

Расчеты показывают, что около 2 % от общего тепловыделения при горении жидкости затрачивается на образование и доставку паров жидкости в зону горения. При установлении процесса выгорания температура поверхности жидкости возрастает до температуры кипения, которая в дальнейшем остается неизменной. Данное утверждение относится к индивидуальной жидкости. Если же рассматривать смеси жидкостей, имеющих разную температуру кипения, то вначале происходит выход легкокипящих фракций, затем – все более высококипящих.

На скорость выгорания значительное влияние оказывает прогрев жидкости по глубине. Происходит передача тепла от нагретой лучистым потоком q_0 поверхности жидкости в глубь ее. Этот теплоперенос осуществляется за счет теплопроводности и конвенции. Прогрев жидкости за счет теплопроводности может быть, представлен экспоненциальной зависимостью вида

$$\mathbf{T_x - T_0 = (T_к - T_0)\, e^{-кx}}.$$

где T_x – температура слоя жидкости на глубине **x**, К; $\mathbf{T_к}$ – температура поверхности (температура кипения), К; к – коэффициент пропорциональности, $м^{-1}$.

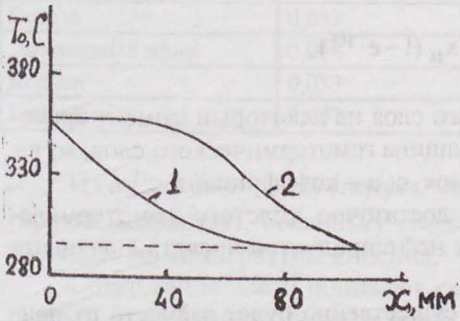

Рис.2.7. Изменение температуры в прогретом слое бензина: 1 – распределение температуры первого рода; 2 – распределение температуры второго рода

Этот тип температурного поля называется распределением температуры первого рода (рис. 2.7.). Ламинарная конвенция возникает в результате различной температуры жидкости у стенок резервуара и в его центре, а также вследствие фракционной разгонки в верхнем слое при горении смесей. Дополнительная передача тепла от нагретых стенок резервуара к жидкости приводит к прогреву ее слоев у стенок до более высокой температуры, чем в центре.

Более нагретая у стенок жидкость (или даже пузырьки пара в случае ее перегрева у стенок выше температуры кипения) поднимает-

ся вверх, что способствует интенсивному перемешиванию и быстрому прогреву слоя жидкости на большую глубину. Образуется так называемый гомотермический слой, т.е. слой с практически постоянной температурой, толщина которого растет во времени горения. Такое температурное поле называют распределением температуры второго рода (рис. 2.7.). Образование гомотермического слоя возможно также и в результате фракционной перегонки приповерхностных слоев смесей жидкостей, имеющих различную температуру кипения. По мере выгорания таких жидкостей приповерхностный слой обогащается более плотными высококипящими фракциями, которые опускаются вниз, способствуя тем самым конвективному прогреву жидкости.

Установлено, что чем ниже температура кипения жидкости (дизельное топливо, трансформаторное масло), тем труднее образуется гомотермический слой. При их горении температура стенок резервуара редко превышает температуру кипения. Однако при горении влажных высококипящих нефтепродуктов вероятность образования гомотермического слоя также высока. При прогреве стенок резервуара до 100° С и выше образуется пузырьки водяного пара, которые, устремляясь вверх, вызывают интенсивное перемещение всей жидкости и быстрый прогрев в глубину. Изменение толщины гомотермического слоя от времени горения описывается соотношением следующего вида:

$$x = x_{п}\,(1 - e^{-\mu\tau}),$$

где x – толщина гомотермического слоя на некоторый момент времени горения, м; $x_{п}$ - предельная толщина гомотермического слоя, м; τ – время от начала формирования слоя, с; μ – коэффициент, $с^{-1}$.

Возможность образования достаточно толстого гомотермического слоя при горении влажных нефтепродуктов чревата явлениями вскипания и выброса жидкости.

Скорость выгорания также существенно будет зависеть от природы жидкости, начальной температуры, влажности и концентрации кислорода в атмосфере.

Из уравнения (2.20) с учетом (2.19) определим массовую скорость выгорания

$$m = \frac{q_o}{c(T_к - T_щ) + Q^{ск}_{исп}} \qquad (2.22)$$

Из формулы (2.22) видно, что на скорость выгорания оказывают влияние интенсивность теплового потока, поступающего от пламени к зеркалу жидкости, и теплофизические параметры горючего: температура кипения, теплоемкость и теплота испарения.

Приведенные в табл. 2.5 данные показывают, что есть определенное соответствие между скоростью выгорания и затратами тепла на прогрев и испарения жидкости. Так, в ряду бензолксилолглицеринов с увеличением затрат тепла на прогрев и испарения скорость выгорания снижается. Однако при переходе от бензола к диэтиловому эфиру затраты тепла на парообразование уменьшаются с 0,052 до 0,048 мм · $с^{-1}$. Это кажущееся несоответствие обусловлено различием в интенсивности тепловых потоков, поступающих от факела к поверхности жидкости. Лучистый поток достаточно велик для коптящего пламени бензола и мал для относительно прозрачного пламени диэтилового эфира. Как правило, отношение скоростей выгорания наиболее быстрогорящих жидкостей к наиболее медленно горящим относительно невелико и составляет 3,0…4,5.

Таблица 2.5

Горючая жидкость	Линейная скорость выгорания, мм · $с^{-1}$	Величина $\rho\left[c\left(T_к - T_о\right) + Q_{исп}^{ск}\right]$, кДж · $м^{-3}$ · 10^{-3}
Бензол	0,052	440
Диэтиловый эфир	0,048	283
Ксилол	0,033	488
Глицерин	0,007	1510

Из выражения (2.22) следует, что с увеличением T_0 скорость выгорания возрастает, поскольку снижаются затраты тепла на прогрев жидкости до температуры кипения.

Содержание влаги понижает скорость выгорания жидкости, во-первых, вследствие дополнительных затрат тепла на ее испарение, а во-вторых, в результате флегматизирующего влияния паров воды в газовой зоне. Последнее приводит к снижению температуры пламени, а следовательно, согласно формуле (2.17), уменьшается и его излучательная способность. Строго говоря, скорость выгорания влажной жидкости не постоянна, она увеличивается или уменьшается в процессе горения в зависимости от величины температуры кипения жидкости.

Влажное горючее может быть представлено как смесь двух жидкостей (горючее + вода), в процессе горения которых происходит их фракционная разгонка. Если температура кипения горючей жидкости меньше температуры кипения воды (100° С), то происходит преимущественное выгорание горючего, смесь обогащается водой, скорость выгорания снижается и, наконец, горение прекращается. Если температура кипения жидкости больше 100° С, напротив, вначале преимущественно испаряется влага, концентрация ее снижается: скорость выгорания жидкости возрастает, вплоть до скорости горения чистого продукта.

Как правило, с повышением скорости ветра скорость выгорания жидкости увеличивается. Ветер интенсифицирует процесс смешения горючего с окислителем, повышая температуру пламени (табл. 2.6.) и приближая пламя к поверхности горения.

Таблица 2.6

Скорость ветра, $м \cdot с^{-1}$	Температура пламени, К
0,8	1393
1,0	1453
2,1	1463

Все это повышает интенсивность теплового потока, поступающего на нагрев и испарение жидкости, следовательно, приводит к увеличению скорости выгорания. При большей скорости ветра пламя может срываться, что приведет к прекращению горения. Так, например, при горении тракторного керосина в резервуаре диаметром 3 м наступал срыв пламени при достижении скорости ветра 22 $м \cdot с^{-1}$.

Большинство жидкостей не способны к горению в атмосфере с содержанием кислорода менее 15%. С повышением концентрации кислорода выше этого предела скорость выгорания возрастает. В атмосфере, обогащенной кислородом, горение жидкости протекает с выделением большого количества сажи в пламени и наблюдается интенсивное кипение жидкой фазы. Для многокомпонентных жидкостей (бензин, керосин и т.п.) температура поверхности с увеличением содержания кислорода в окружающей среде возрастает.

Повышение скорости выгорания и температуры поверхности жидкости с ростом концентрации кислорода в атмосфере обусловлено увеличением излучающей способности пламени в результате роста температуры горения и высокого содержания сажи в нем.

Рис. 2.8. Схема отрыва зоны пламени от поверхности жидкости при понижении ее уровня в резервуаре

Скорость выгорания также значительно изменяется с понижением уровня жидкости в резервуаре. С понижением уровня жидкости происходит снижение скорости выгорания, вплоть до прекращения горения. Поскольку подвод кислорода воздуха из окружающей среды внутрь резервуара затруднен, то при понижении уровня жидкости происходит удаление зоны пламени от поверхности горения (рис. 2.8.). Величина лучистого потока к зеркалу жидкости снижается, а следовательно, уменьшается и скорость выгорания, вплоть до затухания. При горении жидкостей в резервуарах большого диаметра предельная глубина $\mathbf{H_{пр}}$, при которой происходит затухание горения, очень большая. Так, для резервуара с диаметром 5 м она составляет 11 м, а с диметром 11 м – около 35 м.

2.5. Горение и выгорание твердых веществ

Твердые вещества и материалы являются наиболее распространенными на практике и в быту. В настоящее время, наряду с материалами естественного происхождения, весьма широкое применение находят твердые вещества, получаемые синтетически. Мировое производство полимеров удваивается через каждые пять лет. При этом в строительстве используется 20…25 % от производимого количества

полимерных материалов. Несмотря на большую работу по огнезащите естественных и особенно искусственных материалов, основная их масса относится к группе горючих. Это обстоятельство является одной из причин неуклонного увеличения количества пожаров твердых материалов. При контакте твердых горючих веществ с нагретым до высокой температуры источником зажигания возникает теплообмен. В реальных условиях наблюдаются все три вида теплообмена: конвекция, излучение, кондукция. При этом, как правило, один из них является доминирующим. При воспламенении, например, от открытого пламени (горящая спичка, газовая горелка и т. п.) превалирует теплообмен конвекцией. Нагретая спираль, не имеющая непосредственного контакта с горючим материалом, воспламеняет последний за счет лучистого тепла. Воспламенение от тлеющих частиц (искр) протекает главным образом за счет теплообмена теплопроводностью (кондукция).

Механизм воспламенения твердых материалов во многом сходен с воспламенением жидкости, однако имеет и ряд существенных отличительных особенностей. При воздействии теплового потока от высокотемпературного источника зажигания горючих материалов в некотором интервале температур (для веществ растительного происхождения 50...150° С) из него испаряется влага. После испарения влаги материал вновь нагревается как инертное тело до температуры начала разложения, которая для растительных материалов составляет 250° С. Процесс разложения сопровождается выделением в окружающую атмосферу летучих продуктов. Параллельно с этим протекает смешение летучих продуктов с окислителем и образование парогазовоздушной смеси. Если мощность источника зажигания достаточна, то при достижении горючими продуктами разложения концентрации, равной нижнему концентрационному пределу воспламенения, происходит зажигание парогазовой смеси с появлением пламенного горения.

Если же по каким-либо причинам парогазовая смесь не воспламеняется, твердое тело будет нагреваться с выделением продуктов пиролиза. Если горючее вещество в процессе пиролиза образует углистый остаток (вещества растительного происхождения), то скорость термического распада по мере выхода летучих продуктов будет снижаться. При определенных условиях может возникнуть гетерогенное горение (тление) углистого слоя вследствие его взаимодействия с кислородом окружающей среды и с продуктами разложения

твердой фазы. В свою очередь, при благоприятных условиях, а именно если концентрация парогазовой смеси будет находиться в области воспламенения, может произойти ее зажигание от раскаленного углистого слоя.

Таким образом, общая продолжительность процесса воспламенения складывается из стадий нагрева влажного материала, сушки, нагрева сухого материала, газификации и стадии нагрева углеродистого остатка при появлении гетерогенного воспламенения. Ориентировочные оценки показывают, что для материалов растительного происхождения наиболее продолжительными являются стадии сушки влажного и нагрева сухого материала, которые составляют соответственно 55 и 25 % от общей продолжительности воспламенения.

Время воспламенения определяется интенсивностью излучения, природой твердого тела, температурой поверхности:

$$\tau_в = A / q^n,$$

где $\tau_в$ – время воспламенения, с; q – интенсивность теплового потока, кВт·м$^{-2}$; A, n – эмпирические константы.

Значение параметров A и n приведены в табл. 2.7

Таблица 2.7

Порода древесины	Плотность, кг·м$^{-3}$	Значения параметров		Температура поверхности в момент воспламенения,°С		
		A	n	20к·Вт/м^2	24к·Вт/м^2	30к·Вт/м^2
Бук	680	$2{,}4 \cdot 10^5$	2,63	350	330	285
Береза	650	$1{,}9 \cdot 10^5$	2,5	350	330	295
Ель	470	$8{,}1 \cdot 10^5$	3,1	360	345	300
Сосна	450	---	---	360	340	320

Из табл. 2.7 следует, что температура на поверхности древесины в момент воспламенения почти не зависит от породы древесины и несколько снижается с увеличением интенсивности излучения.

В отсутствие зажигающего пламени наступает гетерогенное воспламенение (тление) образующегося при пиролизе углистого слоя. Зависимость времени гетерогенного воспламенения сосны от интенсивности теплового потока может быть представлена в виде

$$\tau_{г.в} = 1{,}2 \cdot 10^6 / q^{2{,}8},$$

где $\tau_{г.в}$ – время гетерогенного воспламенения древесины, с; q – интенсивность теплового потока, под воздействием которого происходит нагрев поверхности, кВт·м$^{-2}$.

После воспламенения твердого материала в место воздействия источника зажигания происходит перемещение фронта пламени на его поверхности. Количественной характеристикой процесса распространения пламени по поверхности твердых веществ, как и в случае горения жидкостей, является линейная скорость распространения пламени, представляющая собой путь, пройденный фронтом пламени в единицу времени.

Процесс распространения пламени по поверхности твердых веществ протекает за счет передачи части тепла, выделяющегося в зоне пламени, к поверхности горящего материала. Передача тепла от факела пламени осуществляется за счет лучеиспускания, конвекции и теплопроводности. В зависимости от условий горения соотношение количества тепла, поступающего этими видами теплопередачи, может быть различным. Это обстоятельство и является одной из главных причин зависимости скорости распространения пламени по поверхности твердых горючих материалов от условий горения.

Прогрев участков поверхности, расположенных перед фронтом пламени, за счет теплопровода излучением, конвекцией и кондукцией приводит к разложению слоев твердого вещества с образованием летучих продуктов (рис.2.9). Выделяющиеся продукты пиролиза смешиваются с воздухом, образуя гомогенную кинетическую систему.

При превышении концентрации горючих компонентов нижнего предела их воспламенения смесь воспламеняется от пламени и сгорает в кинетическом режиме. Таким образом, процесс распространения пламени по твердым материалам (как и по жидкостям) характеризуется двумя существенными признаками: скорость перемещения пламени равна скорости образования горючей смеси над поверхностью, материалагорение на передней кромке пламени (носике) всегда протекает в кинетическом режиме, т. е. горит предворительно перемешанная смесь горючего и окислителя.

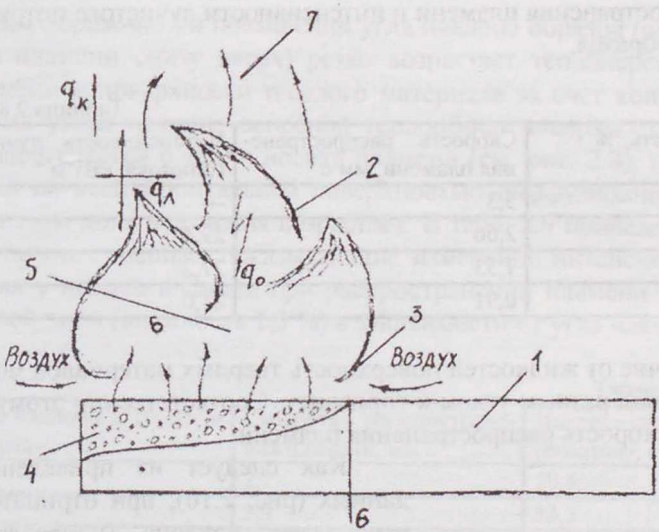

Рис.2.9. Схема распространения пламени по поверхности твердого материала: 1- исходный образец; 2- зона диффузионного горения; 3- зона кинетического пламени (носик); 4- зона газификации твердого материала; 5- зона газообразных продуктов разложения; 6- зона разложения твердого материала перед фронтом пламени; 7- продукты горения; $q_к$ – интенсивность конвективного потока; $q_л$ – интенсивность лучистого потока

Скорость распространения пламени по поверхности твердого тела зависит от влажности вещества, ориентации его в пространстве, геометрии горючего образца, скорости и направления ветра, природы твердого тела.

Установлено, что с увеличением влажности горючего материала скорость распространения пламени по нему снижается и при достижении W=14 % горение прекращается.

Снижение скорости распространения пламени с увеличением влаги связано главным образом с затратами тепла на ее испарение из поверхностных слоев материала, вследствие чего скорость разложения вещества замедляется. Кроме того, поры воды, являясь флегматизаторами, поступая в газовую зону, снижают температуру пламени, уменьшая его излучательную способность. Прямые измерения интенсивности лучистого потока, поступающего к поверхности горизонтального слоя сосновой хвои разной влажности, подтверждают сказанное. В табл. 2.8 приведены данные, показывающие изменение ско-

рости распространения пламени и интенсивности лучистого потока от влажности образца.

Таблица 2.8

Влажность, %	Скорость распространения пламени, мм·с$^{-1}$	Интенсивность лучистого потока, кВт·м$^{-2}$
0	3,3	---
1,6	2,66	29,4
7,6	1,53	27,2
13,0	0,91	21,0

В отличие от жидкостей поверхность твердых материалов может находиться под разным углом к горизонту. Соответственно этому изменяется и скорость распространения пламени.

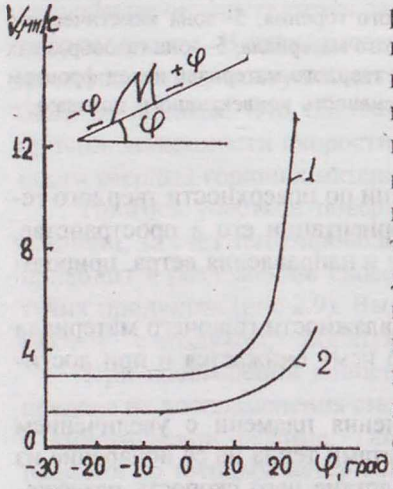

Рис.2.10 . Зависимость скорости распространения пламени по сосновой хвое от угла ее наклона:1- при влажности образца до 2 %; 2- при влажности образца 12 %

Как следует из приведенных данных (рис. 2.10), при отрицательных углах наклона (направление движения пламени сверху вниз) скорость распространения пламени или не изменяется, или же слабо уменьшается. Напротив, при увеличении положительного угла наклона (направление движения пламени снизу вверх) свыше 10...15° скорость распространения пламени резко возрастает. При этом наблюдается эффект дополнительного наклона факела пламени к поверхности горючего вещества, что объясняется поджатием пламени к горящей поверхности спутными конвективными потоками, окружающего воздуха. При больших углах наклона отдельные вихри пламени, касаясь поверхности горючего материала, вызывают его воспламенение еще до подхода носика пламени.

Таким образом, при повышении угла наклона образца (распространение пламени снизу вверх) резко возрастает теплоперенос от зоны пламени к поверхности твердого материала за счет конвекции. При малых углах наклона основной теплообмен поверхности материала осуществляется с зоной носика пламени (см. рис. 2.8), при больших углах со всей фронтальной поверхностью диффузионного пламени. При этом доля излучения возрастает. В табл. 2.9 приведены экспериментальные данные, показывающие изменение интенсивности излучения у носика пламени при распространении пламени по слою сосновой хвои (влажность 1,5 %) в зависимости от угла наклона.

Таблица 2.9

Угол наклона к горизонту, град.	Скорость распространения пламени, мм·с$^{-1}$	Интенсивность лучистого потока, кВт·м$^{-2}$
0	2,7	29,4
7,7	2,9	33,5
21,5	8,5	37,7
26,5	13,2	41,9

Из табл. 2.9 видно, что при изменении угла наклона от 0 до 26,5° скорость распространения пламени возрастает в 5 раз, а интенсивность лучистого потока – только в 1,4 раза.

Скорость распространения пламени зависит от направления и скорости воздушного потока. При увеличении скорости ветра в направлении распространения пламени скорость вначале возрастает линейно, а затем описывается степенной или даже экспоненциальной зависимостью. Очевидно, в этом случае механизм влияния ветра аналогичен механизму влияния угла наклона образца.

Рассмотрим, как изменяется скорость распространения пламени в зависимости от скорости воздушных потоков, направленных против движения пламени (противоток). При охлаждении нагретых участков поверхности перед фронтом пламени скорость распространения пламени будет снижаться. С другой стороны, поток воздуха интенсифицирует смешение продуктов пиролиза с окислителем, быстрее происходит образование гомогенной горючей смеси, носик пламени приближается к поверхности твердого материала, что, в свою очередь, приводит к дальнейшему увеличению интенсивности, и это ускоряет распространение пламени. Кроме того, в этом случае наблюдается образование перед фронтом пламени ламинарных вихрей, которые

способствуют появлению конвективного прогрева поверхности перед фронтом пламени. При малых скоростях движения воздуха определяющее влияние оказывают интенсификация смешения продуктов и появление ламинарных вихрей, и скорость распространения пламени возрастает. При дальнейшем увеличении скорости ветра эффект аэродинамического торможения и охлаждения поверхности образца возрастает и скорость распространения пламени начинает уменьшаться, вплоть до его срыва.

Основное влияние на скорость распространения пламени оказывает толщина образца. Различают термически тонкие термически толстые образцы. Такое деление основано на сравнении геометрической или физической толщины с термической, под которой понимают толщину слоя твердого материала, прогретого перед фронтом пламени выше начальной температуры к моменту распространения пламени на данный участок поверхности.

Если физическая толщина превышает термическую (рис.2.11, а), такой образец называют термически толстым, если наоборот (рис. 2.11, б),– термически тонким. На рис. 2.11 показано распределение температуры непосредственно перед фронтом пламени при горении термически толстого и термически тонкого образцов. Отсюда следует, что температура образца со стороны, противоположной той, по которой распространяется пламя, перед фронтом пламени для термически толстого равна начальной температуре образца, а для термически тонкого – выше.

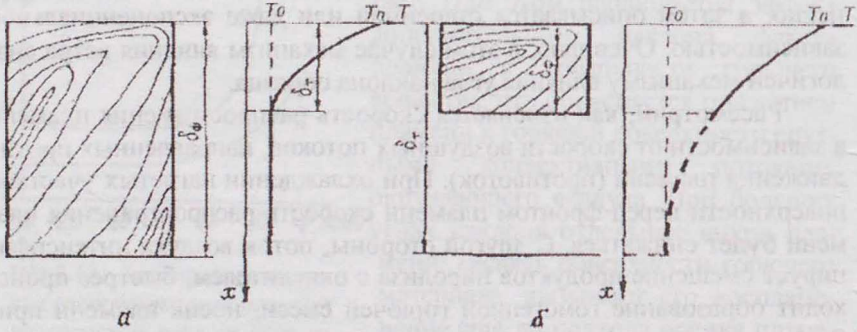

Рис.2.11. Поле температур при распространении пламени по твердым материалам: а- термически толстый образец; б – термически тонкий образец; $\delta_ф$, $\delta_т$ – соответственно физическая и термическая толщины образцов; T_0, $T_п$ – соответственно начальная температура и температура вспышки (на поверхности) материала

При увеличении толщин термически тонких образцов снижение скорости распространения пламени происходит главным образом вследствие увеличения теплопотерь от поверхности горения, связанных с прогревом материала вглубь. Для термически толстых образцов скорость распространения пламени не зависит от их толщин. Действительно, если физическая толщина превышает термическую, то дальнейшее увеличение толщины не приведет к изменению характера распределения температуры по глубине материала перед фронтом пламени и скорость горения останется неизменной. Большинство материалов растительного происхождения в виде термически толстых образцов в горизонтальном или вертикальном (сверху вниз) положении на воздухе при нормальной температуре не способны к самостоятельному распространению пламени. Так, потребительская бумага толщиной более 0,7 мм уже не распространяет горение по вертикальному образцу сверху вниз.

Одновременно с распространением пламени по поверхности материала наступает процесс его выгорания. Закономерности выгорания твердых материалов существенно зависят от характера превращения твердой фазы в газообразные продукты.

Если разложение твердой фазы протекает в узком приповерхностном слое без образования углистого слоя, то в этом случае горение протекает с постоянной скоростью. На поверхности твердой фазы после воспламенения устанавливается постоянная температура, равная температуре кипения или возгонки вещества. Прогрев твердой фазы по глубине описывается уравнением Михельсона:

$$T_x = T_0 + (T_п - T_0)e^{-u \cdot x} \qquad (2.23)$$

где T_x – температура на глубине x от поверхности горения, К; $T_п$, T_0 – соответственно температура поверхности и начальная температура образца, К; **u** – линейная скорость выгорания, $м \cdot с^{-1}$; **x** – коэффициент температуропроводности твердой фазы, $м^2 \cdot с^{-1}$.

Из выражения (2.23) следует: чем меньше скорость выгорания одного и того же материала, тем больше толщина прогретого слоя. Количество тепла, необходимое для создания прогретого слоя, описываемого уравнением (2.23), можно определить по формуле

$$Q = \int c\rho(T_x - T_0)\,dx, \qquad (2.24)$$

где **Q** – приведенное теплосодержание прогретого слоя, кДж·м$^{-2}$;с – теплоемкость твердой фазы, кДж·кг$^{-1}$·К$^{-1}$; ρ – плотность материала, кг·м$^{-3}$.

В зависимости от внешних факторов в твердой фазе устанавливается определенное поле температур, которое в процессе выгорания не изменяется. Скорость выгорания также остается постоянной. Изменение внешних условий, приводящее к изменению скорости выгорания, неизбежно отражается на характере распределения температур в твердой фазе и, следовательно, на величине приведенного теплосодержания.

Решение уравнения (2.23) с учетом (2.24) дает выражение, непосредственно связывающее скорость выгорания и величину приведенного теплосодержания:

$$\mathbf{Q = (\lambda / u)(T_п - T_0)}, \qquad (2.25)$$

где **Q** – приведенное теплосодержание твердой фазы, кДж·м$^{-2}$; **u** – скорость выгорания (линейная), м·с$^{-1}$; **λ** - коэффициент теплопроводности твердой фазы, кВт·м$^{-1}$·с$^{-1}$·К$^{-1}$, $T_п$ – температура на поверхности горения, К; $\mathbf{T_0}$ – начальная температура, К.

Из уравнения (2.25) следует, что с увеличением скорости выгорания теплосодержание прогретого слоя, необходимое для поддержания стационарного горения, снижается.

Однако многие материалы горят с образованием углистого остатка (древесина, композиционные материалы и др.). Механизм выгорания подобных веществ более сложен. Наиболее распространенным горючим веществом подобного рода является древесина. В момент воспламенения за счет теплового потока от зоны пламени температура поверхностного слоя древесины быстро возрастает до 400… 500° С. Происходит интенсивное разложение веществ с образованием летучих продуктов и древесного угля, при этом температура на поверхности повышается до 600° С.

Таким образом, температура в твердой фазе древесины при ее горении изменяется от 600 до 20°С. Поскольку древесина является сложным веществом с различной термической устойчивостью составляющих ее компонентов, то ее разложение протекает не только по поверхности, но и по глубине прогретых слоев твердой фазы.

В условиях горения температура начала разложения древесины в среднем составляет 220° С. При температуре 330° С устанавливает-

ся максимальная скорость выхода летучих продуктов пиролиза, а при достижении температуры 380°С происходит аморфизация древесины, т. е. потеря материалом волокнистой структуры.

В табл. 2.10 приведены приближенные значения некоторых характерных для горения древесины температур.

Таблица 2.10

Характерная температура	Индекс	Числовое значение, °С
Температура начала пиролиза	$T_{н.п}$	220
Температура вспышки (воспламенения)	$T_{в.с}$	250…280 (350)
Температура достижения максимальной скорости пиролиза	T_w	330…360
Температура аморфизации	T_a	380
Температура переугливания	$T_у$	500…600
Температура поверхностного слоя	$T_п$	650…700
Температура горения	$T_г$	1150…1200

Таким образом, по глубине горящей древесины наблюдаются области с различными физическими и физико-химическими характеристиками. Условно их можно разделить на четыре зоны:

I – древесный уголь, состоящий на 99% из углерода;

II – древесина с различной степенью пиролизованности;

III – непиролизованная, сухая древесина;

IV – исходная древесина.

По мере выделения летучих продуктов из твердой фазы при горении древесины протекает переугливание материала на все большую глубину. Рост толщины углистого слоя обусловливает повышение его термического сопротивления, и, следовательно, снижается скорость прогрева и пиролиза еще не разложившихся слоев древесины, скорость пламенного горения постепенно снижается.

В процессе выгорания древесины возрастает теплосодержание прогретого слоя за счет нагрева углистого остатка и снижается коэффициент теплопроводности (коэффициент теплопроводности древесного угля составляет 25 % от теплопроводности древесины) и, следовательно, уменьшается скорость горения.

$$U_г = \frac{\lambda}{Q}(T_п - T_0).$$

При диффузном горении твердых материалов, жидкостей и газов размер и форма пламени определяются соотношением между скоростью поступления в зону пламени газообразных горючих компонентов термического разложения твердой фазы и скоростью их превращения в конечные продукты. При этом, если скорость доставки летучих продуктов по каким-либо причинам станет ниже скорости их диффузионного горения, пламенное горение прекратится. Согласно экспериментальным данным, пламенное горение древесины прекращается при снижении массовой скорости выделения летучих продуктов до 0,005 $кг \cdot м^{-2} \cdot с^{-1}$. Толщина слоя угля при этом достигает 15…20 мм.

Прекращение пламенного горения древесины открывает доступ кислорода воздуха к нагретому до температуры 650 … 700° С углю. Начинается второй этап горения древесины – гетерогенное окисление углистого слоя в основном по реакции $\mathbf{C + O_2 = CO_2}$. В результате протекания этой реакции выделяется тепло в количестве $33 \cdot 10^3$ кДж на 1 кг углерода, температура углистого слоя возрастает до 800°С и процесс гетерогенного горения угля еще более интенсифицируется.

Реальная картина перехода гомогенного горения в гетерогенное несколько отличается от приведенной. При горении древесины углистый слой растрескивается и летучие продукты разложения твердой фазы выходят преимущественно через образовавшиеся трещины: наступает так называемый смешанный или гомогенно-гетерогенный режим, когда пламя теряет сплошность, разбиваясь на отдельные очаги, над поверхностью трещин протекает гомогенное горение, остальная часть поверхности окисляется по гетерогенному механизму. Этот режим является переходным от гомогенного к гетерогенному.

В результате реакции гетерогенного окисления углерода уменьшается толщина углистого слоя и возрастает доля тепла от поверхности окисления, поступающая за счет теплопроводности в глубь твердой фазы. При определенных условиях это может интенсифицировать дальнейшее разложение твердой фазы, т. е. скорость выделения летучих продуктов разложения, которые при смешении с воздухом над поверхностью образуют горючую смесь, способную вновь воспламениться. При этом источником зажигания может явиться раскаленный

углистый слой. Так может вновь возникнуть повторное гомогенное горение древесины.

Основным количественным параметром, характеризующим процесс выгорания твердых материалов, является массовая скорость выгорания. Важность этого параметра заключается прежде всего в том, что он является одним из параметров, обусловливающих динамику пожара. Скорость выгорания определяет тепловой режим пожара, т. е. величину и скорость изменения температуры пожара. В свою очередь, это определяет допустимое время эвакуации, фактическую огнестойкость конструкции и, кроме того, влияет на скорость распространения пламени, а следовательно, на изменение площади пожара. Как и в случае горения жидкостей, выделяют массовую линейную скорость выгорания ТГМ. Однако для твердых материалов в практике пожарно-технических расчетов (расчет сил и средств, необходимых для тушения, расчет продолжительности пожара и т. д.) чаще используют приведенную массовую скорость выгорания. Приведенная массовая скорость выгорания представляет собой количество вещества, выгорающего в единицу времени с единицы площади пожара. Связь между приведенной и действительными скоростями выгорания выражается следующим соотношением:

$$U_{m_{пр}} = U_m K_п,$$

где $U_{m_{пр}}$ – приведенная массовая скорость, выгорания, кг·м$^{-2}$·с$^{-1}$; U_m – удельная массовая скорость выгорания (с единицы поверхности горения), кг·м$^{-2}$·с$^{-1}$; $K_п$ – коэффициент поверхности горения;

$$K_п = \frac{F_{п.г}}{F_п},$$

где $F_{п.г}$ – поверхность горения, м^2; $F_п$ – площадь пожара, м^2.
Так, при горении образца твердого материала в виде куба, лежащего на одной из граней, $K_п$ =5.

Как и линейная скорость распространения пламени по поверхности материала, массовая скорость выгорания не является константой горючего и даже не остается постоянной в процессе пожара, а существенно зависит от условий, в которых протекает горение. По

физической сущности скорость выгорания эквивалентна скорости пиролиза материала, приведенной к единице поверхности, под влиянием теплового потока той или иной интенсивности. Этот тепловой поток формируется от собственного пламени горящего образца и от

Таблица 2.11.

Материал	Массовая скорость выгорания $Um \cdot 10^3$ кг·м$^{-2}$·с$^{-1}$ ($f_{пр}$=0,16)	
	действительная	приведенная
Бумага разрыхленная	-	8,0
Древесина (бруски, мебель в помещении)	7-8	15,0
Калий металлический	17-23	-
Карболитовые изделия	-	6,3
Каучук натуральный	-	13,3
Каучук синтетический	-	8,8
Книги на деревянных стеллажах	-	5,5
Натрий металлический	12-15	-
Органическое стекло	-	16,0
Полистирол	-	14,3
Резина	-	11,2
Текстолитовые изделия	-	6,7
Торф в караванах (влажность 40%)	-	3,0
Хлопок разрыхленный	-	4,0
Штапельное волокно разрыхленное	-	6,7
Фенопласты	-	5,8

К твердым горючим веществам относятся и некоторые металлы, особенно в диспергированном состоянии. По характеру горения металлы делят на летучие и нелетучие. Летучие обладают относительно низкими температурами плавления (< 1000 К) и кипения (<1500 К). Это литий, натрий, кальций, магний. Нелетучие имеют температуры плавления выше 1000 К, а кипения выше 2500 К (табл. 2.12.).

Таблица 2.12

Группа	Химическая формула		Температура плавления, К		Температура кипения, К	
	Металл	Окисел	Металл	Окисел	Металл	Окисел
Летучие	Li	Li_2O	454	1700	1620	2823
	Na	Na_2O	317	1190	1156	2190
	K	K_2O	337	700	1052	1750
	Mg	MgO	923	3075	1381	3350
Нелетучие	Al	Al_2O_3	932	2418	2679	3800
	Be	BeO	1556	2823	2750	4123
	Ti	TiO_2	1950	2138	3550	4100

Процесс горения металлов существенно зависит от состояния их окислов. Летучие металлы имеют низкие температуры плавления и пористый окисел.

При поднесении источника зажигания к поверхности металла происходит его испарение и окисление. При достижении концентрации паров, равной нижнему концентрационному пределу, происходит их воспламенение. Зона диффузного горения устанавливается у поверхности, большая доля тепла передается металлу и он нагревается до температуры кипения. Образующиеся пары, свободно диффундируя через пористую окисную пленку, поступают в зону горения. Кипение металла вызывает периодическое разрушение окисной пленки, что интенсифицирует горение. Продукты горения (окислы металлов) диффундируют не только к поверхности металла, способствуя образованию корки окисла, но и в окружающее пространство, где, конденсируясь, образуют твердые частички в виде белого дыма. Образование белого плотного дыма является визуальным признаком горения летучих металлов.

У нелетучих металлов, обладающих высокими температурами фазового перехода, при горении на поверхности образуется весьма плотная окисная пленка, которая хорошо сцепляется с поверхностью металла. В результате этого скорость диффузии паров металла через пленку резко снижается и крупные частицы, например алюминия и бериллия, гореть не способны. Как правило, пожары таких металлов наблюдаются в том случае, когда они находятся в виде стружки, порошков и аэрозолей. Их горение происходит без образования плотного дыма. Образование плотной оксидной пленки на поверхности металла приводит к взрыву частиц. Это явление особенно часто наблюдается при движении частицы в высокотемпературной окислительной среде; его связывают с накоплением паров металлов под окисной пленкой с последующим внезапным ее разрывом. Это, естественно, приводит к резкой интенсификации горения.

Основными параметрами их горения являются время воспламенения и сгорания. Из теории диффузного горения следует, что время сгорания частички металла $\tau_г$ пропорционально квадрату ее диаметра d_0. Экспериментальные данные показывают, что фактическая зависимость несколько отличается от теоретической. Так, для алюминия $\tau_г \sim d_0^{1,5 \div 1,8}$, магния $\tau_г \sim d_0^{2,6} d$, а для титана $\tau_г \sim d_0^{1,59} d$.

Для пожарно-технических расчетов большой интерес представляет скорость распространения пламени по потоку взвеси частиц ме-

талла в окислителе. В табл. 2.13 приведены экспериментальные данные о скорости распространения пламени и массовой скорости выгорания взвеси частиц диаметрами менее 10^{-2}мм и $3\cdot10^{-2}$мм алюминия в воздухе при различном коэффициенте избытка воздуха.

Таблица 2.13

Концентрация алюминия, г/л · 10^3	Коэффициент избытка воздуха	Скорость распространения пламени, м/с		Массовая скорость выгорания, кг/(м^2·с)	
		d < 10^{-2}мм	d < $3\cdot10^{-2}$мм	d < 10^{-2}мм	d < $3\cdot10^{-2}$мм
100	3,15	0,21	0,15	0,275	0,196
150	2,1	0,285	0,19	0,387	0,258
200	1,58	0,345	0,23	0,486	0,324
250	1,26	0,395	0,26	0,577	0,38

Анализ данных табл. 2.13 позволяет сделать следующие выводы:

1. С увеличением размера частиц горючего в воздухе скорость распространения пламени уменьшается.

2. При приближении состава горючей смеси (металл – воздух) к стехиометрической (α =1) скорость распространения пламени возрастает.

3. Скорость горения взвеси частиц металла в воздухе одного порядка с нормальной скоростью распространения пламени по стехиометрическим смесям предельных углеводородов в воздухе – 0,4 м/с (табл. 2.13).

Горение металлов возможно не только в окислительной среде, но и в продуктах горения органических веществ. В этом случае горение протекает за счет экзотермической реакции восстановления воды до водорода, а двуокиси углерода до его окисла по реакциям

$$2Al + 3H_2O = Al_2O_3 + 3H_2 + 1389{,}4 \text{ кДж/моль};$$
$$2Al + 3CO_2 = Al_2O_3 + 3CO + 1345{,}3 \text{ кДж/моль}.$$

Ранее процесс горения аэрозольных систем считали аналогичным горению гомогенной газовой смеси и процесс перемещения фронта пламени объясняли передачей тепла из зоны пламени к свежей смеси посредством теплопроводности. Однако высокие скорости распространения пламени по органическим пылевоздушным смесям

(свыше 10 м/с) не могли быть объяснены с позиции этих представлений.

В последующем было выдвинуто и обосновано предположение, что пламя распространяется по пылевоздушным смесям главным образом за счет прогрева холодной смеси лучистым тепловым потоком от фронта пламени. Твердые частицы, поглощая лучистый поток, нагреваются, разлагаются с выделением горючих продуктов, которые образуют горючие смеси с воздухом. Особенностью данного механизма распространения пламени является то, что глубина прогрева и разложения твердых частиц лучистым потоком достаточно велика, вследствие чего перед фронтом пламени образуется значительный слой парогазовоздушной смеси, прогретой до высокой температуры, соизмеримой с температурой разложения твердой фазы.

Скорость распространения пламени по аэровзвеси органических веществ может быть представлена следующим образом:

$$U = \frac{q_0}{C_э(T_c - T_0)},$$

где $C_э$ – эффективная теплоемкость дисперсной фазы; T_c – температура самовоспламенения; q_0 – интенсивность лучистого потока, кВт/м^2;

$$q_0 = \sigma T_э^4,$$

где σ – постоянная Стефана-Больцмана; $T_э$ – температура лучеиспускания (фронта пламени).

Влияние таких факторов, как концентрация аэрозоля и кислорода (пыли, взвеси и т. п.), температуры, влажности и других факторов на скорость распространения пламени для аэрозолей аналогично, их влиянию на скорость распространения пламени для гомогенных парогазовоздушных смесей.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Перечислите виды и режимы распространения пламени. Поясните, что понимается под дефлаграционным, взрывным и детонационным горением, кинетическим, диффузионным и

кинетическо-диффузионным горением, ламинарным и турбулентным горением.

2. Опишите материалы и тепловой баланс процесса горения.
3. От чего зависит количество воздуха,необходимого для горения.?
4. Как рассчитывается состав и объем продуктов горения?
5. Каковы существенные особенности тепловой и диффузионной теории распространения пламени по газообразным системам.?
6. Опишите влияние ряда факторов на скорость распространения пламени по газообразным системам.
7. Выделите основные элементы распространения пламени по поверхности жидкости.
8. Каково влияние внешних условий на скорость распространения пламени по поверхности жидкости?
9. От чего зависит выгорание жидких веществ?
10. От чего зависит горение и выгорание твердых веществ.
11. В чем заключается сущность влияния ряда факторов на скорость распространения пламени по поверхности твердых тел.

ГЛАВА 3. ПРЕКРАЩЕНИЕ И ПРЕДОТВРАЩЕНИЕ ПРОЦЕССОВ ГОРЕНИЯ

3.1. Тепловая теория прекращения горения

Горение – главный процесс пожара, тушение пожара всегда сводится к созданию условий, при которых происходит прекращение процесса горения во всех видах и формах.

Особое внимание заслуживают предельные явления при горении. Это те условия и параметры, за пределами которых процессы горения возникнуть или существовать не могут. Наибольший практический интерес представляют те параметры процесса горения, изменяя которые, мы можем полностью прекратить горение или значительно снизить вероятность его возникновения. К их числу относятся концентрационные пределы воспламенения, скорости распространения горения, скорости выгорания и температура горения.

Известно, что если снизить температуру в зоне горения до 1273 К, то процесс горения прекратится.

Добиться такого снижения температуры в зоне горения можно различными способами, в том числе изменением соотношения компонентов горючего и окислителя в ту или другую сторону (доводя их до бедного или богатого концентрационного предела горения); разбавлением зоны горения нейтральными газами; введением химически активных ингибиторов, снижающих скорость химических реакций; снижением давления в зоне реакций горения (если это возможно) и многими др. Во всех указанных способах будет снижаться скорость протекания химических реакций окисления, в результате чего уменьшится интенсивность тепловыделения в зоне горения. Возможны и принципиально иные способы снижения температуры в зоне горения, основанные не на уменьшении интенсивности процессов тепловыделения в зоне горения, а на интенсификации процессов теплоотвода из зоны горения. Повысить интенсивность теплоотвода из зоны горения можно, увеличивая либо излучательную способность компонентов в зоне горения, либо теплопроводность, либо отнимая значительную часть тепла на эндотермические процессы фазового превращения посторонних компонентов в зоне протекания высокотемпературных реакций горения, либо одновременным сочетанием и комбинацией некоторых из указанных способов. Осуществление этих способов можно добиться путем введения некоторых специаль-

ных ингредиентов в зону протекания химических реакций горения, например тонкодисперсных нейтральных термостойких порошков, металлизированных частиц, тонкораспыленной воды и др. Схематическое изображение возможных процессов горения приведены на рис.3.1.

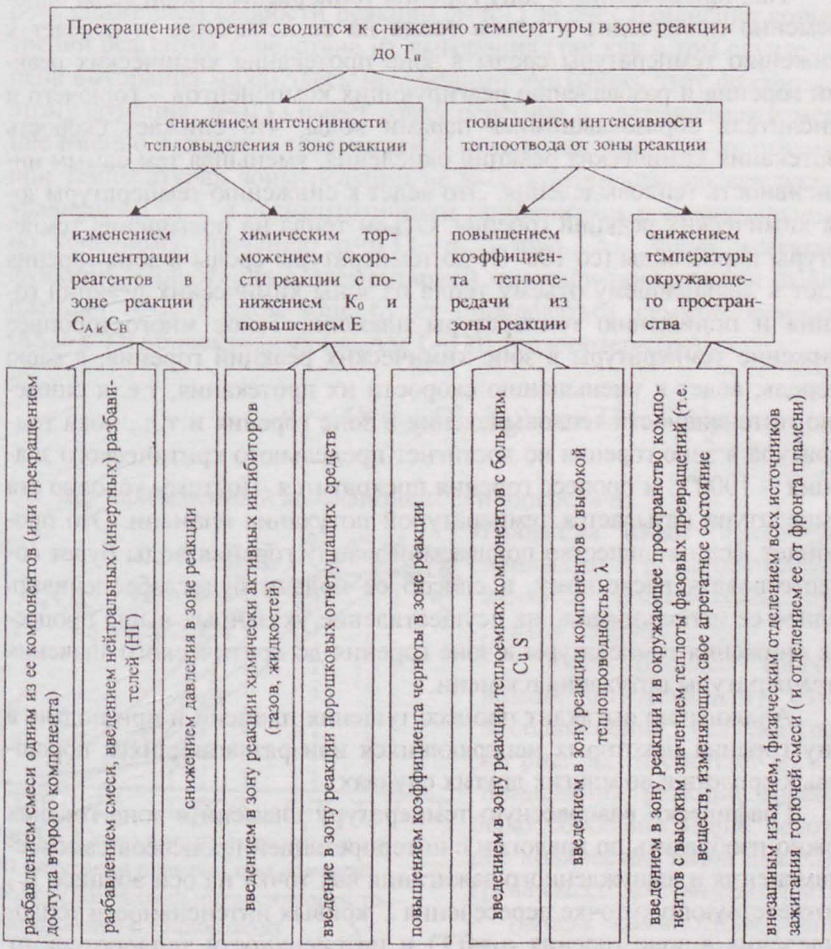

Рис.3.1. Схема снижения температуры пламени до температуры потухания при тушении пожаров

На практике редко удается реализовать в чистом виде какой-нибудь один из этих способов. Чаще всего они неизбежно проявляются совокупно, т.е. в комбинации, в сочетании тех, других и третьих механизмов одновременно.

Так, при введении в зону горения тонкораспыленной воды одновременно происходит и отъем тепла на ее испарение ,что ведет к снижению температуры среды в зоне протекания химических реакций горения и разбавлению реагирующих компонентов – горючего и окислителя образовавшимися парами воды, что снижает скорость протекания химических реакций окисления, уменьшая тем самым интенсивность тепловыделения. Это ведет к снижению температуры зоны химических реакций горения. Отъем тепла на повышения температуры паров воды (со 100^0 С) до температуры среды в зоне горения ведет к дальнейшему отъему тепла из зоны химических реакций горения и понижению температуры пламени. Такое многостороннее снижение температуры в зоне химических реакций горения, в свою очередь, ведет к уменьшению скорости их протекания, т.е. к снижению интенсивности тепловыделения в зоне горения и т.д., пока температура в зоне горения не достигн

цессов воспламенения, можно записать в виде функции скорости химической реакции горения:

$$q_1 = f(T) = Q\Delta Vw = Q\Delta Vk_0 c_1^{\nu_1} c_2^{\nu_2} e^{-\frac{E}{RT}} \qquad (3.1)$$

В отличие от процессов воспламенения, когда можно пренебречь снижением скорости реакции ω=f(T) за счет изменения концентрации реагентов вследствие их выгорания (так как в том случае степень выгорания мала), здесь необходимо учитывать этот фактор. Поэтому функция **q=f(T)** имеет точку перегиба и претерпевает изменение именно в области сравнительно невысоких температур, стремясь при температурах зоны реакции не к бесконечности как следует из уравнения (3.1.), а ассимптотически приближаясь к максимальному, но конечному значению $q=f(T)\rightarrow q_{max}$ (рис.3.2.). Закон изменения функции теплоотвода с элементарной площади поверхности фронта пламени $\Delta S_{пл}$ в этой зоне будет определяться суммой лучистых ($\Delta S\varepsilon\sigma T^4$) и конвективных ($\alpha_{пр}\Delta S(T-T_0)$) теплопотерь ($q_2$):

$$q_2 = \Delta S\left[\alpha_{пр}(T - T_0) + \varepsilon\sigma(T^4 - T_0^4)\right],$$

где $\alpha_{пр}$- приведенный коэффициент теплопередачи.

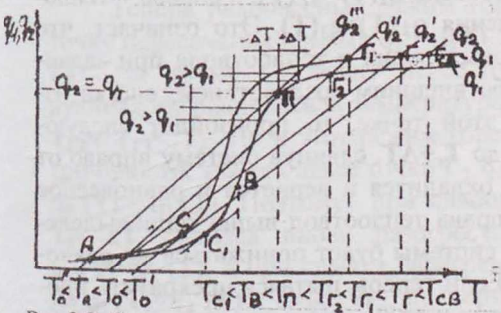

Рис.3.2. Схема достижения температуры потухания пламени при одновременном изменении интенсивности тепловыделения и теплоотвода

Проекция точки пересечения кривых q_1 и q_2 на ось абсцисс является температурой продуктов горения.

Если процесс горения возник по механизму самовоспламенения, как показано на рис. 3.2, и системе до возникновения реакции горения было сообщено извне некоторое количество тепла для разогрева смеси до температуры T_0' – начала самовоспламенения (точнее, саморазогрева),

то температура продуктов горения будет выше примерно на величину начального разогрева.

$$T_{п.г.} \approx T_0' + \frac{Q - \Delta Q_{пот}}{\sum V_i C_{Pi}},$$

где V_i – объем i-го продукта горения, C_{Pi} – теплоемкость i-го продукта горения, будет соответствующая точке $Г_{св}$: $T_{п.г.} = T_{Гсв}$ (рис.3.2). Если процесс горения возник при меньшей начальной температуре, близкой к температуре окружающей среды T_0, по механизму вынужденного зажигания, то температура продуктов горения в зоне пламени будет несколько ниже $T_{Гсв}$ примерно на величину $T_0' - T_0$, т.е. она будет равна $T_г \approx T_{Гвс} - (T_0' - T_0)$, соответствующей температуре точки пересечения Г кривой интенсивности тепловыделения $q_1 = f(T)$ и кривой интенсивности теплоотвода $q_2' = f(T)$, проходящей левее $q_2 = f(T)$, на величину ~ $(T_0' - T_0)$. При этом предполагается, что закон тепловыделения $q_1 = f(T)$ остался таким же, как при самовоспламенении, а интенсивность теплоотвода $q_2' = f(T)$ возросла. Эта точка равновесного, стационарного теплового режима в зоне горения, которая соответствует динамическому равновесию процессов тепловыделения и теплоотвода $q_1 = f(T) = q_2' = f(T)$. Устойчивым процесс горения в этой точке является потому, что тепловыделение q_1 в этой точке равно сумме теплопотерь q_2', а первые производные от них по температуре в этой точке не равны между собой, т.е. слева от точки Г тепловыделение интенсивнее теплоотвода $q_1(T) > q_2'(T)$, а справа – теплоотвод интенсивнее тепловыделения $q_2'(T) > q_1(T)$. Это означает, что если, не изменяя законов тепловыделения и теплоотвода при заданном режиме горения каким-либо внешним воздействием, слегка изменить температуру среды в этой точке, то произойдет следующее.Если температуру поднять до $T_г + \Delta T$, сдвинув систему вправо от точки Г, она самопроизвольно охладится и вернется в равновесное состояние в точку Г, так как справа теплоотвод выше тепловыделения $q_2'(T) > q_1(T)$ и температура системы будет понижаться до равновесной точки, где $q_1(T) = q_2'(T)$. Если теперь, пытаясь прекратить процесс горения, слегка понизить температуру в зоне горения, переведя систему из точки Г левее, до температуры $T_г - \Delta T$, то система вновь самопроизвольно вернется в точку Г к устойчивому режиму горения, так как слева от точки Г интенсивность тепловыделения $q_1(T) > q_2'(T)$ выше интенсивности теплоотвода $q_2'(T)$ и система саморазогреется до прежнего стабильного состояния в точке Г, где $q_1(T) = q_2'(T)$. Вот почему, подав малое количество воды или другого огнетушащего сред-

ства, нельзя изменить закон тепловыделения $q_1 = f(T)$ или теплоотвода $q_2' = f(T)$, прекратить процесс горения, потушить мощное пламя. Это объясняется тем, что при установившемся режиме горения, данный процесс обладает свойством стационарности, точнее динамической устойчивости к внешним воздействиям.

Далее попытаемся воздействовать на процесс горения более активно, например, изменив закон теплоотвода $q_2' = f(T)$ за счет увеличения коэффициента теплопередачи α из зоны горения. Графически это выразится в увеличении угла наклона кривой $q_2'' = f(T)$ с α_1 до α_2 (рис.3.2). Теперь точка пересечения кривых q_1 и q_2'' Γ_1 переместится левее точки Γ и соответствующая ей температура пламени $T_{\Gamma 1}$ будет меньше прежней T_Γ ($T_{\Gamma 1}<T_\Gamma$), но процесс горения при этой меньшей температуре будет по-прежнему устойчив. Предпримем второй шаг, введя нейтральные разбавители, например пары воды, в зону горения, и тем самым снизим интенсивность тепловыделения в зоне горения до значения $q_1'(T)<q_1(T)$. Допустим, что это произойдет только за счет уменьшения скорости химических реакций горения $\omega=f(T, c_1, c_2)$ вследствие того, что концентрация горючего C_1' и окислителя C_2' стали ниже, чем были C_1 и C_2 из-за разбавления среды нейтральным газом. Соответственно уменьшится и интенсивность тепловыделения с $q_1 = f(T)$ до $q_1' = f(T)$.

Теперь равновесный режим горения переместится еще левее в точку пересечения кривых $q_1' = f(T)$ до $q_2'' = f(T)$, которую обозначим Γ_2. Эта точка Γ_2 лежит левее точки Γ и Γ_1. Поэтому соответствующая ей равновесная температура $T_{\Gamma 2}$ будет меньше T_Γ и $T_{\Gamma 1}$, т.е. $T_{\Gamma 2}< T_{\Gamma 1}< T_\Gamma$. Но и этот режим горения еще обладает свойством устойчивости, так как левее точки Γ_2 $q_1'(T)>q_2''(T)$, а правее – наоборот, $q_2''(T)> q_1'(T)$. Поэтому при слабом охлаждении зоны горения до $T_{\Gamma 2}-\Delta T$ система вновь разогреется до равновесного состояния $q_1'(T)=q_2''(T)$, а при слабом перегреве – до $T_{\Gamma 2}+\Delta T$, вновь охладится до $q_1'(T)=q_2''(T)$ в точке $T_{\Gamma 2}$, т.е. вернется в свое исходное стабильное состояние и горение не прекратится.

Однако из приведенного анализа очевидно, что любым из рассмотренных трех способов снижения температуры в зоне горения, а тем более применяя совокупность двух или всех трех способов одновременно, можно так изменить соотношение интенсивностей тепловыделения $q_1 = f(T)$ и теплоотвода $q_2 = f(T)$, чтобы в точке их пересечения были равны не только значения самих функций $q_1(T)= q_2(T)$,

но и их первых производных по температуре, т.е чтобы в этой точке $\left(\frac{dq_1}{dT}\right)=\left(\frac{dq_2}{dT}\right)$.Графически это означает, что кривая $q_2 = f(T)$ должна занять крайнее левое положение по отношению к $q_1 = f(T)$, чтобы иметь с ней в области высоких температур (выше точки перегиба **В** на кривой $q_1 = f(T)$, являющейся точкой воспламенения) только одну общую точку – точку касания **П**. Это означает, что в точке **П** при температуре $T_п$ интенсивность тепловыделения в зоне горения $q_1' = f(T)$ равна интенсивности теплоотвода $q_2''' = f(T)$, а также что их первые производные по температуре в точке **П** также равны между собой $\left(\frac{dq_1'}{dT}\right)_{T_п}=\left(\frac{dq_2'''}{dT}\right)_{T_п}$, так как кривая $q_2''' = f(T)$ является касательной к кривой $q_1' = f(T)$ в точке **П**. Заметим при этом, что температура $T_п$, соответствующая точке **П**,есть наименьшая из рассмотренных выше стабильных температур $T_п < T_{Г2} < T_{Г1} < T_Г$. Этого можно добиться, например, введением в зону горения бо́льшего количества воды, чем вводили при снижении температуры до $T_{Г1}$ и $T_{Г2}$. Испарившаяся в зоне горения вода снизит температуру горения до $T_{Г1}$, повысив теплоотвод из зоны горения за счет увеличения $\lambda_{см}$ и $\varepsilon_{см}$; пары воды, разбавив реагенты в зоне горения C_1' и C_2', одновременно снизят интенсивность тепловыделения $q_1 = f(T)$ до $q_1' = f(T)$ за счет уменьшения скорости реакции $\omega = f(T, c_1', c_2')$.Это обстоятельство, в свою очередь, снизит температуру до $T_{Г2}$. Вода, испарившаяся вокруг зоны горения, снизит температуру окружающей среды с T_0 до T_0'', что повысит интенсивность теплоотвода от зоны горения с $q_2 = f(T)$ до $q_2''' = f(T)$ за счет роста интенсивности и конвективного и лучистого теплоотвода от пламени. Графически это выразится как параллельный перенос кривой $q_2''' = f(T)$ до $q_2'' = f(T)$. Допустим при этом, что кривые займут такое расположение, какое показано на (рис. 3.2), т.е. когда $q_2''' = f(T)$ стала касательной к кривой $q_1' = f(T)$ в точке **П**, следовательно, выполняются условия равенства интенсивностей тепловыделения и теплоотвода в этой точке (при температуре $T_п$) и их первых производных по температуре. Проанализируем состояние и «поведение» системы в точке **П** при температуре потухания пламени $T_п$ методом малых возмущений.

Если внешним воздействием температуру системы несколько повысить выше равновесной $T_п$ на величину ΔT, т.е. до значения

$T=T_п+\Delta T$, то система вновь самопроизвольно охладится до температуры $T_п$ и вернется в точку П, так как правее этой точки, куда перевели систему, тепловыделение $q_1' = f(T)$ меньше теплоотвода $q_2''' = f(T)$, т.е. система относительно устойчива. Если теперь столь же малым внешним воздействием понизить температуру системы на величину ΔT до температуры $T=T_п - \Delta T$ и перевести ее чуть левее точки П, то система мгновенно самопроизвольно начнет охлаждаться дальше, так как слева от точки П интенсивность теплоотвода, как и справа, больше интенсивности тепловыделения, т.е. $q_2''' = f(T) > q_1' = f(T)$. Поэтому левее точки П температура системы будет продолжать прогрессирующе снижаться, пока не дойдет до второй равновесной температуры T_A, где реакции окисления практически не идут.

Таким образом, доказано, что при малейшем смещении от точки П влево, что соответствует снижению температуры системы ниже $T_п$, процесс горения становится невозможным и пламя потухает.

Из графика (рис.3.2) видно, что температура потухания кинетического пламени $T_п$ на оси абсцисс лежит правее точки T_c, соответствующей температуре самовоспламенения горючей смеси данного состава, т.е. численное значение температуры потухания пламени оказывается выше температуры самовоспламенения. Это парадоксальное явление называется в теории процессов горения гистерезисом температурной кривой потухания пламени.

Аналитический расчёт численного значения температур потухания для различных режимов горения сопряжен с определенными трудностями вычисления параметров процессов горения в околопредельных состояниях, и поэтому носит ориентировочный характер. Так, максимально возможная величина снижения температуры кинетического пламени по сравнению с расчетным значением температуры пламени с учетом теплопотерь равна

$$T_{п.г} - T_п = \frac{RT_{п.г}^2}{E},$$

где $T_{п.г.}$- температура продуктов горения, $T_п$- температура потухания.

Знание численного значения температуры потухания, которую можно условно принять примерно одинаковой для всех углеводородно-воздушных пламен, позволяет путем несложных термодинамических расчетов вычислить требуемый удельный или (зная секундный

расход горючего вещества) секундный расход огнетушащих средств, действующих по механизму охлаждения зоны горения.

3.2. Способы предотвращения воспламенения материалов и локализации пожаров

Наиболее эффективным и надежным способом борьбы с пожарами являются меры профилактики, основанные на использовании знаний о предельных параметрах процессов воспламенения, так как всякий пожар начинается с воспламенения, самовозгорания или вынужденного воспламенения-зажигания горючей системы от постороннего источника.

Одним из основных способов профилактики пожаров в технологических процессах производств, а также при хранении и транспортировке горючих газов, ЛВЖ и ГЖ является обеспечение определённого концентрационного состава газовых или парогазовых смесей: ниже нижнего концентрационного предела воспламенения (или выше верхнего концентрационного предела воспламенения для закрытых систем, аппаратов, трубопроводов и резервуаров). Эта мера профилактики основана на поддержании безопасной концентрации окислителя в указанных системах: ниже нижнего концентрационного предела воспламенения, по концентрации окислителя.Обеспечение пожаро- и взрывобезопасности на основе концентрационных пределов воспламенения достигается либо определением и соблюдением температурных регламентов каждого конкретного вида производства, хранения и транспортировки горючих веществ и материалов (ограничениями по НТПВ и ВТПВ), либо обеспечением заданных условий по давлению и расходам горючих компонентов в системах и аппаратах или по интенсивности вентиляции.

В тех случаях, когда выполнение этих условий оказывается невозможным, прибегают к методу обеспечения пожаро- и взрывобезопасности за счёт поддержания требуемой концентрации нейтральных газов или химически активных ингибиторов. Их концентрация должна быть постоянно выше предельного значения, исключающего возможность возникновения процессов горения. К таким же способам прибегают иногда при профилактике пожаров и взрывов на объектах, связанных с опасностью воспламенения и взрыва аэродисперсных газожидкостных и пылевоздушных смесей.

Другим, не менее широко применяемым в профилактике пожаров способом обеспечения пожаро- и взрывобезопасности объектов и технологических процессов производств является ограничение потенциальных источников инициирования процессов горения (по мощности электрических разрядов и т. п.). Для этого используются данные по критическим энергиям зажигания, температурам самовоспламенения и вынужденного зажигания горючих систем. Как следует из приведенных данных, эти величины, так же как и концентрационные пределы воспламенения, зависят от вида и состояния горючего, состава смеси, ее концентрации, давления, температуры и многих других физических условий возникновения процесса горения. В зависимости от этих условий численные значения предельно допустимых температур, потенциально опасных источников зажигания или мощностей электрических источников инициирования процессов горения колеблются в широких пределах, изменяясь в 5 – 10 и более раз. Эти обстоятельства также должны учитываться при разработке регламентов по обеспечению пожаро- и взрывобезопасности технологических процессов производств, систем отопления и вентиляции, электроустановок и в других областях профилактики пожаров. В частности, при производстве электросиловых агрегатов (двигателей вентиляторов, электроприводов, осветительных и нагревательных устройств и т. п.) во взрывобезопасном исполнении, предназначенных для применения в пожаро - и взрывоопасных средах, также широко используют предельные параметры процессов горения, в том числе такое понятие, как «критический размер гасящей щели», основанный на существовании предельно малых геометрических размеров зазоров, отверстий и каналов, через которые не способны распространяться процессы горения.

Механизм гашения пламени в узких каналах огнепреградителей также основан на тепловой теории гашения пламени за счет интенсивного теплоотвода от зоны горения.

При прохождении пламени через узкие щели, каналы фронт пламени разбивается на множество мелких ячеек, от которых интенсивно отводится тепло в стенки материалов огнепреградителя.

Закон теплообмена между газом и стенкой при течении газа вдоль твердой поверхности позволяет оценить критический диаметр гасящего канала щели

$$d_{кр} = \frac{60RT_{пл}}{U_н C_p P}, \qquad (3.2.)$$

где $T_{пл}$ – температура пламени, λ, C_p – теплопроводность и теплоемкость горячей смеси, P – давление смеси, $U_н$ – скорость распространение пламени. Для углеводородов со скоростью горения порядка 40 см/с, критический диаметр составляет величину порядка 1 мм.

Из формулы (3.2) видно, что критический диаметр гасящего канала зависит от давления, скорости распространения пламени, т. е. от концентрации горючей смеси, вида горючего состава, атмосферы и др. Как и для многих других предельных параметров процесса горения, численное значение критического гасящего диаметра пламени изменяется в зависимости от параметров горючей смеси в широком диапазоне значений в 50 – 100 и более раз. Для кислородных смесей углеводородных горючих численное значение $d_{кр}$ уменьшается в десятки раз, до 0,1 – 0,2 мм, а для таких быстрогорящих смесей, как водородо-кислородные и ацетиленокислородные смеси состава, близкого к стехиометрическому, эта величина еще меньше, порядка $d_{кр}$ = 0,04 мм.

Если по условиям производства, а также с учетом возможных отказов, поломок, аварий и нарушений технологическою процесса не удается полностью исключить вероятность возникновения пожара, то для обеспечении требуемого уровня пожаро- и взрывобезопасности таких объектов применяют конструктивно-технологические меры защиты, также основанные на использовании предельных явлений при горении. К ним относятся огнепреградители, быстродействующие пламеотсекатели, разгрузочные взрывные клапаны, мембраны, люки, легко сбрасываемые конструкции и другие, предназначенные для ограничения распространения или локализации зоны горения.

Расчет и конструирование этих предохранительных систем также основан на понятии предельных параметров в горении:

- на численном значении гасящего размера в огнепреградителях;
- предельных значениях скорости распространения пламени и давления взрыва при проектировании пламеотсекателей и разгерметизирующих устройств;
- предельных параметрах динамики взрывного горения при проектировании взрывозащитных устройств и автоматических систем взрывоподавления и т. п.

Наконец, многочисленные приемы и способы локализации пожаров, применяемые в профилактике пожаров в строительном деле, расчет огнестойкости конструкции при проектировании объектов и сооружений, расчет допустимого времени эвакуации и противопожарных разрывов и т.д. также основаны на использовании предельных параметров при горении: скоростей распространения процессов горения, температуры пламени, теплоты сгорания и т. д. Широко используются данные предельных параметров горения при разработке и проектировании автоматических систем сигнализации и средств локализации пожаров. Так, существует широкий класс датчиков и целых систем сигнализации, основанных на регистрации пожаро- и взрывоопасных концентраций горючих газов или паров горючих жидкостей. Они предназначены для обеспечения пожаро- и взрывобезопасности объектов и технологических процессов, связанных с использованием наиболее опасных в пожарном отношении горючих веществ и материалов и могут рассматриваться как предупредительные, профилактические системы, извещающие о возникновении опасности и как сигнальные устройства для включения (или отключения) определенных систем (отключения систем подачи горючих компонентов; отключения энергоснабжения; включения принудительной аварийной вентиляции, а на особо пожаро- и взрывоопасных объектах даже включения установок для подачи огнетушащих средств). Очевидно, что от точности установленных предельных значений концентрации горючего (или окислителя) в значительной степени зависит надежность и эффективность таких систем в целом.

На использовании предельных параметров процессов горения основаны практически все приемы и способы прекращения процессов горения при тушении пожаров. При введении к зону горения нейтральных разбавителей процесс горения прекратится либо после достижения концентрации нейтрального газа выше предельной, либо скорость распространения пламени при данной концентрации нейтрального газа станет ниже аэродинамической скорости движения горючей смеси в зоне горения. При введении в зону горения химически активных ингибиторов снижается скорость протекания химических реакций в зоне горения. При этом соответственно снижается скорость распространения пламени, интенсивность тепловыделения, температура пламени, и тушение происходит также только после дос-

тижения одного из предельных параметров процесса горения ($Q_{выд} < Q_{пред}$ или $T_{пл} < T_{кр}$ и т. д.).

При тушении реальных пожаров еще большая совокупность факторов влияет на процесс прекращения горения, когда для их тушения применяются такие сложные по механизму своего огнетушащего действия средства, как вода, водные растворы загустителей и смачивателей, воздушно-механическая или химическая пена, огнетушащие порошки и др.

В этих случаях количество действующих механизмов снижения интенсивности процесса горения, вплоть до его полного прекращения, возрастает до 8 – 10. И подчас бывает трудно установить, какой из них является главным, доминирующим (эти вопросы более подробно рассматриваются в специальном курсе «Физико-химические основы развития и тушения пожаров»).

Тем не менее все огнетушащие средства, применяемые для тушения пожаров, условно делятся на несколько характерных видов по доминирующему (главному) механизму их воздействия на процессы горения. Так, вода и многие огнетушащие составы на ее основе относятся к категории охлаждающих, т. е.действующих по механизму охлаждения. Все виды пен, применяемые в практике пожаротушения, условно относятся к категории изолирующих огнетушащих средств, т. е. действующих по механизму изоляции горючего вещества от зоны горения.

Нейтральные газы условно называются разбавляющими огнетушащими средствами, т. е. действующими по механизму разбавления компонентов горючей смеси в зоне реакций горения, а химически активные ингибиторы называются веществами, тормозящими скорость химических реакций в зоне горения, и т. д.Во всех случаях прекращение процессов горения (т. е. тушения пожара) наступит в тот момент, когда во всей зоне горения будут созданы такие физические (или химические) условия, при которых параметры процесса горения: скорость распространения пламени ($V_{пл} < V_{пред}$), либо предельная теплота сгорания ($Q < Q_{пред}$), либо температура в зоне реакции горючего с окислителем – снизятся ниже температуры потухания ($T_{пл} < T_{кр}$), достигнут предельного, критического значения.

3.3. Оценка необходимого количества охлаждающих огнетушащих средств при тушении некоторых пожаров

Ранее было показано, что для того чтобы потушить пожар, необходимо создать в зоне горения такие физико-химические условия, при которых самопроизвольное горение данного вида горючего материала в рассматриваемый момент времени станет невозможным ни в какой форме. Эти условия зависят от вида горючего, его агрегатного состояния и режима горения, который определяется условиями тепло- и массообмена и зоне горения.

В случае диффузионного горения газов в смеси с воздухом, способных только к гомогенному пламенному горению, прекращение его может быть осуществлено либо прекращением доступа горючего или окислителя в зону горения, либо охлаждением этой зоны до температуры потухания пламени, либо торможением скоростей реакции горения с помощью химически активных ингибиторов. На практике, если не удается прекратить доступ горючего механическим путем (например, перекрытием запорного крана), чаще всего применяют охлаждение как наиболее простой, доступный и достаточно эффективный способ. В качестве огнетушащего средства широко используется вода или другие средства на ее основе. При этом важно отметить, что охлаждение самих компонентов горючей смеси (перед зоной горения) практически бесполезно, так как газовоздушные смеси соответствующего состава способны гореть практически при любой начальной температуре. Тепло необходимо отводить непосредственно от зоны горения, т. е. от зоны реакции.

В случае диффузионного горения паров, оттекающих со свободной поверхности горючей жидкости, процесс горения также можно прекратить охлаждением зоны горения до температуры потухания, химическим торможением, а также изоляцией горючего от зоны горения (или прекращением доступа в зону горения окислителя при пожарах внутри зданий и помещений, т.е. на внутренних пожарах).

Однако все эти способы в реальных условиях трудно осуществимы, требуют больших затрат, применения специальных видов пожарной техники и нередко сопряжены с опасностью для жизни и здоровья людей. Поэтому разработка новых, более эффективных средств и способов тушения пожаров ЛВЖ и ГЖ интенсивно ведется во многих странах мира. Причем, как показывает анализ механизмов дейст-

вия большинства разрабатываемых новых огнетушащих средств, надежного эффекта тушения пожара удается добиться только после того, как температура поверхностных слоев горючей жидкости будет существенно снижена по сравнению с ее значением при длительном, развитом пожаре. Поэтому представляется весьма перспективным способ прекращения доступа паров горючей жидкости в зону горения путем внезапного охлаждения поверхностного слоя горючей жидкости. Особенность этого приема состоит в осуществлении экстренного снижения температуры прогретого поверхностного слоя жидкости до температуры ниже температуры вспышки паров упругости данной жидкости. Такой способ тушения наиболее эффективно может быть реализован с помощью криогенных хладоагентов, например с помощью жидкого азота или твердой углекислоты с конструкционной плотностью ниже плотности горючей жидкости, т.е. $\rho^{кон}_{CO2} \leq \rho_{гж}$ каким-либо иным способом.

При диффузионном горении твердых горючих веществ и материалов, склонных к гомогенному пламенному горению продуктов пиролиза в смеси с воздухом и к гетерогенному беспламенному горению твердого углеродистого остатка, необходимо соответственно выполнить два условия тушения: прекратить пламенное горение продуктов пиролиза ТГМ над его поверхностью и гетерогенное горение углеродного остатка в поверхностном прогретом слое ТГМ.

Пламенное горение так же, как и в первых двух случаях, может быть прекращено охлаждением зоны горения, химическим торможением процессов горения в зоне реакций или прекращением доступа кислорода воздуха в зону горения (если это возможно) или доступа продуктов пиролиза к факелу пламени.

С помощью огнетушащих средств, действующих по механизму охлаждения, это может быть достигнуто только после охлаждения прогретых слоев ТГМ до температуры ниже температуры начала пиролиза данного материала. Это, в свою очередь, и будет условием прекращения процесса горения ТГМ во всех его видах и режимах, так как температура начала их пиролиза значительно ниже температуры протекания гетерогенных процессов диффузионного горения углеродистого остатка ТГМ.

Рассмотренные три концепции тушения горючих веществ и материалов в зависимости от их агрегатного состояния позволяют сформулировать условия, необходимые и достаточные для прекраще-

ния процессов горения практически для всех случаев тушения пожаров с помощью огнетушащих средств, действующих по механизму охлаждения. Это, в свою очередь, позволяет написать критериальные выражения условий, необходимых и достаточных для тушения пожаров, связанных с горением углеводородных горючих веществ и материалов во всех трех агрегатных состояниях средствами, действующими по механизму охлаждения.

Для случая горения газов и фонтанирующих под большим давлением горючих жидкостей условием тушения является

$$T_{з.г} \leq T_{пот} \qquad (3.3.)$$

где $T_{з.}$ – температура среды в зоне горения; $T_{пот}$ – температура потухания пламени.

Необходимо снизить температуру в зоне горения примерно на 300 К, так как под $T_{пот}$ понимается критическая температура потухания пламени предварительно не смешанных газов. Условие (3.3) реализуется путем обеспечения определенной интенсивности теплоотвода из зоны горения

$$q_{з.г}^{отв} \geq \sum C_{Pi} V_i (T_{з.г} - T_{пот}), \qquad (3.4)$$

где $q_{з.г.}^{отв}$ – интенсивность теплоотвода от зоны горения, кДж/с; C_{Pi} – удельная теплоемкость отдельных компонентов продуктов горения, кДж/(м^3· К); V_i – секундный объем каждого из образующихся компонентов продуктов горения, м^3/с.

Для случая диффузионного горения жидкостей со свободной поверхности (в больших резервуарах) справедливо то же условие, что и для газов (3.3)(путем снижения интенсивности поступления паров в зону горения за счет охлаждения поверхностного слоя.)

$$T_{г.ж.}^{пов} \leq T_{всп}, \qquad (3.5)$$

где $T_{г.ж.}^{пов}$ – температура поверхностного слоя горючей жидкости, °С; $T_{всп}$ – температура вспышки паров горючей жидкости, °С.

В момент начала тушения при длительном горении ЛВЖ и ГЖ в резервуаре, т.е. при развившемся пожаре, вышедшем на стационарный режим горения, температура поверхностного слоя для чистых горючих жидкостей близка к температуре кипения данной жидкости или чуть ниже этого значения. Для многокомпонентных жидкостей сложного фракционного состава она может значительно превышать условную температуру кипения исходной горючей жидкости, так как в поверхностном прогретом слое происходит как бы «разгонка» с уходом легких фракций и состав жидкости в поверхностном слое является неравновесным и не соответствует ее начальному фракционному составу. Это реализуется путем обеспечения условия

$$q_{г.ж}^{отв} \geq q_{л}^{пл} + q_{конв}^{пл} + Q_{г.ж.}^{зап} / \tau_{т}, \qquad (3.6)$$

где $q_{г.ж.}^{отв}$ – интенсивность теплоотвода от поверхностного слоя горючей жидкости, кДж / (м^2·с); $q_{л}^{пл}, q_{конв}^{пл}$ – лучистый и конвективный тепловые потоки от факела пламени к поверхности горючей жидкости, кДж / (м^2·с); $\tau_т$ – время тушения, с; $Q_{г.ж.}^{зап}$ – удельное (или приведенное) количество тепла, запасенное в прогретом слое горючей жидкости, кДж/м^2. Его можно выразить через теплофизические параметры прогретого слоя горючей жидкости

$$Q_{г.ж.}^{зап} \approx C_{г.ж} \int t(x)dx, \qquad (3.7)$$

где $C_{г.ж.}$ – удельная теплоемкость горючей жидкости, кДж /(кг ·°С); $\rho_{гж}$ – плотность горючей жидкости, кг/м^3 ; $t(x)$ – функция распределения поля температур по толщине прогретого слоя горючей жидкости.

Приняв условно $t(x)$ стационарным и линейным, выражение (3.7) с достаточной для практических целей точностью можно записать в виде

$$Q_{г.ж}^{зап} \approx C_{г.ж.} \rho_{г.ж.} \delta^{п.с} (T_{кип} - T_{всп})/2, \qquad (3.8)$$

где $\delta^{п.с}$ – толщина прогретого слоя горючей жидкости, м (для пожаров, при которых на поверхности резервуара не образуется гомотермический слой горючей жидкости) $\delta^{п.с} \approx 0{,}05$.

Для случая прекращения диффузионного горения ТГМ путем прекращения доступа продуктов их пиролиза в зону горения за счет охлаждения прогретого слоя условием, необходимым и достаточным для тушения пожаров, т.е. полного прекращения горения, будет

$$T_{ТГМ}^{пс} \le T_{пир}^{нач}, \qquad (3.9)$$

где $T_{ТГМ}^{пс}$ – температура поверхностного слоя твердого горючего материала (обычно в момент начала тушения максимальная температура прогретого слоя ТГМ на развитом пожаре составляет ≈ 700 °С); $T_{пир}^{нач}$ – температура начала пиролиза (для большинства ТГМ численное значение температуры пиролиза ≈ 200 °С).

Это условие реализуется путем обеспечения такой интенсивности отвода тепла от горящей поверхности ТГМ, при которой

$$\begin{aligned} &Q_{ТГМ}^{отв} \ge q_{л}^{пл} + q_{конв}^{пл} + Q_{ТГМ}^{зап} / \tau_{т}, \\ &Q_{ТГМ}^{зап} \approx \int C_{т} \rho_{т} T(x) dx, \end{aligned} \qquad (3.10)$$

где $C_{т}$ – удельная теплоемкость частично пиролизованного слоя твердого горючего материала, кДж / (кг·°С) (зависит от температуры и степени пиролизованности слоя); $\rho_{т}$ – плотность частично пиролизованного слоя ТГМ, кг/м^3 (зависит от температуры и степени пиролизованности слоя); $T(x)$ – функция распределения поля температур в прогретом слое ТГМ по толщине прогретого слоя.

Как видно из выражений (3.4), (3.6), (3.10), во всех трех случаях условием, необходимым и достаточным для прекращения процесса горения, т.е. условием тушения пожара, является обеспечение определенной интенсивности теплоотвода от зоны горения или горючего вещества, приводящей к снижению их температуры до определенного численного значения, при котором горение полностью прекратится. Оптимальным режимом тушения будет тот, при котором значение $Q_{i}^{отв} = q_{i}^{отв} \tau_{т}$ будет наименьшим. Анализ выражений для $Q_{i}^{отв}$ во всех случаях показывает, что численное значение его зависит от вида горючего вещества, режима его горения и времени тушения, причем оно тем ниже, чем меньше время тушения $\tau_{т}$. Однако самое минимальное значение времени тушения определяется в первом случае величиной объема зоны горения (линейные размеры которого дости-

гают 70 … 100 м), а в остальных случаях физическими параметрами горючего материала: температуропроводностью $a = \frac{\lambda}{c\rho}$ и толщиной прогретого слоя горючего вещества $\delta^{пс}$.

Минимальное значение физического времени тушения $\tau_т$ для газовых и газонефтяных фонтанов большой мощности, полученные аналитически и экспериментально, составляют 2 … 3 с, охлаждение прогретого слоя горючей жидкости на поверхности резервуара ≈ 15…20 с, а охлаждение прогретого пиролизованного слоя ТГМ на поверхности, доступного прямому воздействию охлаждающей жидкости ≈ 25 … 30 с. Подстановка численных значений этих и других входящих в выражениях (3.5) – (3.10) величин, определяемых режимом горения и физическими параметрами горючей среды, показывают, что отопление оптимальных интенсивностей теплоотвода (от зон горения – в первом случае и от поверхности горючего вещества – во втором и третьем случаях), к интенсивности тепловыделения при этих режимах горения, есть величина примерно постоянная. Выразив отношение интенсивности теплоотвода, требуемой для прекращения горения, к интенсивности тепловыделения через $K_т^{кр}$, можно получить выражение для критерия процесса тушения в следующем виде:

$$K_т^{кр} = \frac{q_{отв}^{кр}}{q_{выд}}.$$

Для случая тушения факела пламени горючих газов

$$K_т^{гг(кр)} = \frac{q_{з.г}^{отв(кр)}}{q_{выд}} \approx \frac{\sum_{i=2}^{n} C_{Pi} V_i \left(T_{пл} - T_{пот}\right)}{\beta V_г Q_н^р},$$

где $q_{з.г}^{отв(кр)}$ – интенсивность теплоотвода от зоны горения, кДЖ/с; $q_{выд}$ – интенсивность тепловыделения при сгорании горючего газа с расходом $V_г$, м^3/с; β – коэффициент полноты сгорания.

Для случая тушения пожара, обусловленного горением паров, оттекающих со свободной поверхности горючей жидкости (ЛВЖ и ГЖ), путем охлаждения ее поверхностного слоя уравнение можно представить в следующем виде:

$$K_{т}^{гг(кр)} = \frac{q_{зг.}^{отв(кр)}}{q_{выд}} \approx \frac{V_{м}\left[C_{г.ж.}(T_{кип} - T_{0}) + r_{г.ж}\right] + \frac{Q_{г.ж.}^{зап}}{\tau_{т}}}{\beta V_{м} Q_{н}^{р}},$$

где $q_{зг}^{отв(кр)}$ – интенсивность теплоотвода с единицы поверхности горючей жидкости, кДж/с ($м^2 \cdot с$); $q_{выд}$ – интенсивность тепловыделения с единицы поверхности горючего вещества, кДж/($м^2 \cdot с$); $V_г$ – массовая скорость выгорания горючего вещества, кг/($м^2 \cdot с$); $r_{г.ж.}$ – удельная теплота испарения горючей жидкости, кДж/кг; β – коэффициент полноты сгорания; $Q_н^р$ – низшая теплота сгорания по рабочей массе горючего, кДж/кг, $\tau_т$ – время тушения.

Для случая тушения пожара ТГМ методом охлаждения прогретого слоя горючего материала до температуры начала его пиролиза воспользуемся известными данными, что теплота пиролизных твердых горючих материалов при диффузионном горении, как правило, не превышает 5 … 6 % от общего количества тепла, выделяемого при горении. Тогда в уравнении (3.10) суммарное количество тепла, поступающее к горючему материалу от факела пламени по механизму лучистой и конвективной передачи, выразим через теплоту пиролиза:

$$q_{л}^{пл} + q_{конв}^{пл} \approx q_{ТГМ}^{пир} \approx 0{,}06 q_{выд}. \qquad (3.11)$$

В таком случае уравнение (3.10) примет вид

$$K_{т}^{гг(кр)} = \frac{q_{ТГМ}^{отв(кр)}}{q_{выд}} \approx \frac{0{,}06 q_{выд} + \frac{Q_{ТГМ.}^{зап}}{\tau_{г}}}{\beta V_{м} Q_{н}^{р}}, \qquad (3.12)$$

где $q_{ТГМ}^{отв(кр)}$ – интенсивность теплоотвода с единицы поверхности ТГМ, кДж/ ($м^2 \cdot с$); $0{,}06 q_{выд}$ – среднее значение теплоты пиролиза большинства натуральных и синтетических полимерных ТГМ, кДж/ ($м^2 \cdot с$). Следует отметить, что отношение минимального количества тепла, которое следует отвести от горючей системы для эффективного тушения пожара, к удельной теплоте сгорания данного вида

горючего вещества $\frac{Q_i}{Q^p_{нi}}$ – также величина относительно постоянная, которая для горючих газов составляет≈ 0,1, а для горючих жидкостей и большинства горючих материалов даже меньнее: (5 … 8)·10^{-3} в расчете на 1 $м^3$ горючего при площади поверхности горения 1$м^2$. Из этого видно, что осуществлять тушение энергетически выгоднее путем отвода тепла от горючего вещества, как это можно сделать во втором и третьем случаях, а не от зоны горения. Зная минимально возможное время прекращения процессов горения и выполняя необходимые и достаточные условия охлаждения зоны горения или горючего материала до заданного значения температуры, т.е. значение критерия тушения $К_т^{(кр)}$ для горючих веществ и материалов во всех агрегатных состояниях, можно рассчитать все основные параметры, обеспечивающие оптимальный режим тушения. Подстановка численных значений величин в формулы (3.11) и (3.12) показывает, что для тушения пожаров, связанных с диффузионным горением газов и паров горючих жидкостей, методом охлаждения зоны горения $К_т^{(кр)}$= 0,1. Для тушения пожаров, связанных с диффузионным горением ЛВЖ, ГЖ и ГТМ, методом охлаждения горючего материала $К_т^{гж(кр)}$= 0,2 …0,4 и $К_т^{тгм(кр)}$= 0,3 соответственно. Как было отмечено ранее, зная численное значение, всех горючих веществ и материалов можно рассчитать требуемый расход огнетушащих средств V, л/с, интенсивность их подачи $J_{тр}$, л/($м^2$·с), удельные расходы на единицу площади тушения пожара $V_{уд}$, л/$м^2$ и теоретические необходимые суммарные запасы огнетушащих веществ на весь процесс тушения, т.е. все основные параметры тушения пожара (без учета реальных потерь огнетушащих средств, которые неизбежны при всяком тушении пожаров.

Все это позволяет разработать научные основы проектирования автоматических установок пожаротушения с оптимальными параметрами систем и процесса тушения, рассчитать оптимальные параметры тушения пожаров силами и средствами пожарной охраны, а также получить объективные критерии эффективности и качества тушения пожаров.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ.

1. Приведите общие положения теории о прекращении горения.
2. Каковы существенные особенности тепловой теория прекращения горения?
3. Дайте характеристику основных способов предотвращения воспламенения материалов и локализации пожаров.
4. Чем вызвана необходимость оценки требуемого количества охлаждающих огнетушащих средств при тушении некоторых пожаров?

РАЗДЕЛ 2. ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ВЗРЫВА

ГЛАВА 4. ФОРМЫ ВЗРЫВЧАТЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ

4.1 Общая характеристика взрывчатых веществ

Основным признаком взрыва является резкий скачок давления в среде, окружающей место взрыва. Это служит непосредственной причиной разрушительного действия взрыва.

Взрывы могут быть вызваны физическими, химическими или ядерными явлениями.

Можно привести следующие примеры взрывов, обусловленные физическими причинами:

1. Взрыв парового котла или баллона со сжатым воздухом. В обоих случаях явление вызвано быстрым переходом накопленной потенциальной энергии пара (газа) в механическую при разрушения стенок резервуара. Разрушительный эффект в данном случае определяется давлением пара или газа, находящихся в резервуаре.

2. Взрывы возникают при мощных электрических разрядах (молнии) или при пропускании электротока высокого напряжения через тонкие металлические нити. При мощных разрядах потенциалы выравниваются в течение 10^{-6}… 10^{-7}с, благодаря чему в зоне разряда концентрируется значительная плотность энергии, канал разряда разогревается до высоких (порядка десятков тысяч градусов) температур, что, в свою очередь, приводит к подъему давления воздуха в месте разряда и, соответственно, распространению интенсивного возмущения в окружающую среду.

Взрывы, основанные на физических явлениях, составляют незначительную часть от общего количества взрывов. Большая часть взрывов относится к химическому превращению взрывчатых систем.

Все взрывчатые вещества представляют собой термодинамически неустойчивые системы, способные под влиянием внешних воздействий к быстрым экзотермическим превращениям.

Газообразные продукты взрыва благодаря большой скорости химической реакции в первый момент времени занимают объем самой взрывчатой системы и находятся в сильно сжатом состоянии. Поэтому в месте взрыва резко повышается давление.

Способность химических систем к взрывчатым превращениям определяется тремя факторами: экзотермичностью процесса,

большой скоростью его распространения и наличием газообразных продуктов реакции.

Экзотермичность реакции является первым необходимым условием, без которого взрывчатый процесс вообще невозможен. За счет тепловой энергии реакции происходит разогрев газообразных продуктов до температуры в несколько тысяч градусов и последующее их расширение. Чем больше температура реакции, тем больше разрушительное действие взрыва.

Теплота взрыва является важнейшей характеристикой взрывчатого вещества (системы). Для твердых взрывчатых веществ она составляет 3861 … 7722 КДж/кг, для газообразных систем 8580 …15015 КДж/кг.

Другой важнейшей характеристикой взрыва является ***скорость процесса***, которая резко отличается от обычных химических реакций. Переход к конечным продуктам происходит за стотысячные или миллионные доли секунды. По общему запасу энергии на единицу массы взрывчатые системы не превосходят обычные горючие системы, однако при их взрыве достигается значительно более высокая объемная концентрация или плотность энергии.

Горение обычных систем протекает весьма медленно, что приводит к значительному расширению продуктов реакции и существенному рассеянию выделенной энергии путем теплопроводности и излучения. В связи с этим достигается незначительная плотность энергии в продуктах горения.

Взрывчатые процессы протекают столь быстро, что объем системы не успевает измениться и вся энергия выделяется в исходном объеме, который занимала взрывчатая система. В результате достигаются чрезвычайно высокие плотности энергии. Особенно большие плотности энергии характерны для конденсированных взрывчатых систем (твердых или жидких). Плотность энергии твердых веществ может превосходить газообразные в 300…1000 раз. (нитроглицерин – 10210КДж/кг, гремучий газ– 7,3 КДж/кг).

Третьей важнейшей причиной взрыва является ***газообразование***. Высокое давление, возникающее при взрыве и обусловленный им разрушительный эффект не может быть достигнут без образования в процессе реакции большого количества газообразных продуктов. Эти продукты, находящиеся в момент взрыва в сжатом состоянии,

являются теми физическими агентами, которые осуществляют крайне быстро переход потенциальной энергии взрыва в механическую работу или кинетическую энергию движения газов (скорее, наоборот).

Для твердых взрывчатых веществ на 1 г вещества приходится около 1000 л газообразных продуктов реакции. Максимальное давление при взрыве конденсированных веществ составляет сотни тысяч атмосфер.

При взрыве газообразных систем увеличение объема газа, отнесенного к обычным температурам, не происходит, а иногда даже и уменьшается. Например: $2H_{2\,(г)} + O_{2\,(г)} \rightarrow 2H_2O_{(пар)}$.

Однако это уменьшение компенсируется экзотермичностью и скоростью процесса. В результате давление при взрыве достигает 10 атм. Если же в экзотермической реакции твердых тел отсутствуют газообразные продукты, то взрыв будет невозможен независимо от скорости распространения процесса.

$$Fe_2O_3 + 2Al \rightarrow Al_2O_3 + 2Fe.$$

Конечные продукты Al_2O_3 и **Fe** нагреваются до 300°С.

4.2. Классификация взрывчатых процессов

В зависимости от условий возбуждения химической реакции, характера взрывчатой системы процессы взрывчатого превращения могут распространяться с различными скоростями и обладать существенными качественными различиями.

По характеру и скорости распространения все взрывчатые процессы делятся на горение, взрыв и детонацию.

Процессы ***горения*** протекают сравнительно медленно и с переменной скоростью от долей сантиметра до нескольких метров в секунду. Скорость горения существенно зависит от давления, заметно возрастает с его повышением.

На открытом воздухе этот процесс протекает сравнительно медленно и не сопровождается звуковым эффектом. В ограниченных объемах процесс горения протекает значительно интенсивнее, характеризуется относительно быстрым увеличением давления и способностью продуктов горения производить

механическую работу, как это наблюдается при выстреле. Горение является характерным видом взрывчатого превращения порохов.

Отличительной чертой ***взрыва*** является резкий скачок давления в месте взрыва. Скорость распространения процесса (тысячи метров в секунду) не зависит от внешних условий. Характер взрыва – резкий удар газов по окружающей среде, вызывающий разрушение и деформацию веществ, материалов на относительно небольших расстояниях от места взрыва.

4.3. Цепной взрыв

Цепной взрыв наблюдается при протекании цепных реакций, в которых появление активной частицы вызывает большее число превращений неактивных молекул вследствие регенерации активной частицы в каждом элементарном акте реакции. При цепной реакции активирование одной частицы приводит к тому, что не только данная частица, но и значительное число других частиц вступает в реакцию, в результате чего кроме продуктов реакции образуются новые активные частицы. Под термином «активные частицы» понимают свободные атомы, ионы, радикалы и молекулы. Свободные радикалы – частицы, имеющие хотя бы один неспаренный электрон на внешней орбитали и поэтому обладающие валентной ненасыщенностью. В зависимости от типа реакции свободная валентность у радикала или сохраняется, или исчезает. Исчезновение свободной валентности может произойти при взаимодействии радикала со стенкой сосуда, молекулой примеси или растворителя с другим свободным радикалом или с соединением переходного металла, способным отнять или передать ему один электрон. Взаимодействие радикала с насыщенными молекулами приводит к образованию новых свободных радикалов, которые, в свою очередь, вступают в реакцию. Этот процесс будет продолжаться до тех пор, пока существуют свободные радикалы.

В цепных реакциях превращение исходных веществ в продукты осуществляется путем чередования нескольких реакций с участием свободных радикалов.

Цепная реакция начинается с зарождения цепи, а именно с образования свободного радикала. Например:

крекинг этана $C_2H_6 \rightarrow 2CH_3$;

синтез хлороводорода $Cl_2 + Na \rightarrow NaCl + Cl$

Образование радикалов может происходить при действии света и излучений.

После зарождения цепи наступает её развитие, что характеризуемся длиной цепи, под которой понимают число молекул данного вещества, вступивших в реакцию в результате одного акта зарождения цепи.

Рост зарождения цепи продолжается до тех пор, пока активная частица или исчезнет или дезактивируется. Исчезновение или дезактивация активной частицы называется обрывом цепи.

Обрыв может происходить в результате адсорбции на стенке сосуда или взаимодействия двух радикалов.

$$Cl + Cl + M \rightarrow M + Cl_2$$

где М – стенка сосуда.

Примерами цепных реакций могут служить реакции образования HCl из H_2 и Cl_2 и также горения водорода в кислороде. Смесь водорода с хлором при комнатной температуре и в темноте практически не взаимодействует. Но стоит внести натрий (инициатор) или осветить, как начинается бурное взаимодействие.

$$Cl + h\nu \rightarrow 2\,Cl_2$$

1) $Cl_2 + Na \rightarrow NaCl + Cl$ – зарождение цепи;

2) $Cl + H_2 \rightarrow HCl + H$;

3) $H + Cl_2 \rightarrow HCl + Cl$ – рост цепи;

2) $Cl + H_2 \rightarrow HCl + H$;

4) $Cl + Cl + M \rightarrow Cl_2 + M$ – обрыв цепи;

5) $H + H + M \rightarrow H_2 + M$.

Суммарный процесс в звене роста цепи можно выразить в формуле $Cl + H + H_2 + Cl_2 \rightarrow 2HCl + H + Cl$.

В результате химической реакции в звене роста цепи число радикалов не увеличивается. Цепная реакция продолжается до тех пор, пока не исчезнут радикалы. Подобного рода цепные реакции называются неразветвленными.

Реакцию горения водорода можно представить следующим образом:

$$1)\ H_2 \rightarrow \dot{H} + \dot{H}\ ; \qquad 2)\ \dot{H} + O_2 \rightarrow \dot{H}O + \dot{O};$$

$$3)\ O\dot{H} + H_2 \rightarrow H_2O + \dot{H}; \qquad 4)\ \dot{O} + H_2 \rightarrow \dot{H}O + \dot{O};$$

$$5)\ \dot{H} + \dot{H} + M \rightarrow M + H_2; \qquad 6)\ O\dot{H} + \dot{H} \rightarrow H_2O;$$

$$7)\ \dot{O} + \dot{O} + M \rightarrow M + O_2.$$

В данном случае реакция 1 – зарождения цепи, реакции 2 – 4 рост цепи и реакция 5 – 7 – обрыв цепи. Проанализируем уравнения реакции роста цепи

$$2H_2 + O_2 \rightarrow H_2O + OH + H.$$

Из уравнения видно, что в результате элементарных реакций, составляющих звено роста цепи, образуются новые радикалы, и, соответственно, число радикалов в системе возрастает. Такого рода цепные реакции называют разветвленными. Представляет интерес проанализировать изменения скорости цепных (разветвленных и неразветвленных) реакций во времени, что позволяет сделать вывод о влиянии внешних условий на возможность цепного взрыва. Оценить изменение скорости реакции во времени позволяет вероятностная теория цепных реакций. Рассмотрим реакции, у которых при каждом акте взаимодействия образуется только одна активная частица (неразветвленные реакции – синтез хлорводорода). Допустим, что время между двумя последовательными стадиями – τ. Число молекул продукта, образующееся в единицу времени от одной активной части будет равно $1/\tau$. Если концентрация активных частиц в момент времени t равна n, то скорость реакции будет равна

$$V = \frac{n}{\tau}$$

Если известна зависимость числа активных частиц от времени **n = f(t)**, то можно определить временную зависимость скорости цепной реакции. Для этого определим скорость изменения концентрации активных частиц **dn/dt**. Допустим, что m_0 - скорость возникновения активной частицы в единице объема реактивной смеси. Рассмотрим случай, когда концентрация исходных веществ поддерживается постоянно, а продукты реакции выводятся из среды реакции. Кроме того, температура в зоне реакции также не меняется. В этом случае скорость возникновения активных частиц под влиянием внешних воздействий не будет меняться (m_0 – **const**). Скорость исчезновения активных частиц можно представить в виде $n/\nu\tau$, где ν – среднее число звеньев в цепи. Цепь существует в течение времени $\nu\tau$, поскольку через данное время активная частица прекращает свое существование и цепь обрывается. Если в момент времени t имеется n активных частиц, то через время $\nu\tau$ они все исчезнут, а скорость их исчезновения будет равна $n/\nu\tau$.

Скорость изменения концентрации активных частиц равна

$$\frac{dn}{dt} = m_0 - \frac{n}{\nu\tau}.$$

Для решения этого дифференциального уравнения с неразделяющими переменными, умножим его обе части $e^{\frac{t}{\nu\tau}}$ на преобразуем к виду

$$\frac{d}{dt}\left(ne^{\frac{t}{\nu\tau}}\right) = m_0 e^{\frac{t}{\nu\tau}}.$$

Интегрируя данное уравнение от 0 до $e^{\frac{t}{\nu\tau}}$ и от 0 до t, получим

$$n = m_0 \nu\tau\left(1 - e^{\frac{t}{\nu\tau}}\right);$$

$$V = \frac{n}{\tau} = m_0 \nu\left(1 - e^{\frac{t}{\nu\tau}}\right). \qquad (4.1.)$$

Как следует из уравнения (4.1),со временем ($t \to \infty$) скорость реакции стремится к постоянному значению $m_0 V$. Таким образом, для неразветвленных цепных реакций устанавливается стационарное протекание реакций, и переход во взрыв исключается. Однако при других условиях взрыв может происходить за счет повышения температуры, образования конвективных процессов, детонации.

Рассмотрим разветвленные цепные реакции, для чего введем понятие вероятности обрыва цепи β и вероятности разветвления цепи δ.

Вероятность обрыва цепи для разветвленных реакций будет меньше и её приближенно можно выразить как

$$\beta - \delta = 1/\nu .$$

Скорость разветвленной цепной реакции равна

$$V = \frac{m_0}{\beta - \delta}\left(1 - e^{-\frac{(\beta-\delta)t}{\tau}}\right). \qquad (4.2)$$

Проанализируем уравнение (4.2.):

1. Если $0<\delta<\beta$, то $\beta - \delta > 0$ и при $t \to \infty$, $V = \frac{m_0}{\beta - \delta} = const$ так же как и при неразветвленной реакции.
2. Если $0<\delta>\beta$, то $\beta - \delta < 0$,

$$V = \frac{m_0}{\beta - \delta}\left(1 - e^{-\frac{(\beta-\delta)t}{\tau}}\right).$$

Поскольку $\beta - \delta < 0$ и $(1 - e^{-\frac{(\beta-\delta)t}{\tau}}) < 0$, то уравнение может быть преобразовано

$$V = \frac{m_0}{\delta - \beta}\left(e^{-\frac{(\beta-\delta)t}{\tau}} - 1\right)$$

при $t \to \infty$ скорость реакции неограниченно увеличивается по экспоненциальному закону

$$V = \frac{m_0}{\delta - \beta} e^{\frac{(\delta-\beta)t}{\tau}} ; e^{\frac{(\delta-\beta)t}{\tau}} >> 1$$

и заканчивается взрывом даже при постоянной температуре.

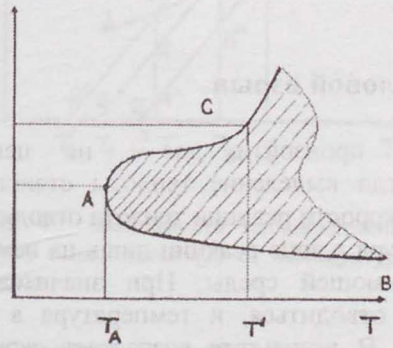

Рисунок 4.1. Зависимость границ взрываемости от температуры и давления

Цепной взрыв наблюдается при протекании цепных реакций с разветвленными цепями. Эти реакции характеризуются верхними и нижними пределами взрыва, которые зависят от температуры, геометрии сосуда и содержания примесей в газовой смеси. Для водороднокислородных смесей при стандартных условиях нижний предел по кислороду составляет 6 об. %, а верхний 95 об. %. Существуют аналогичные пределы и для других смесей.

Зависимость нижнего и верхнего пределов от температуры представлена на рисунке 4.1. Кривая САВ является границей взрываемости горячей смеси. Ветвь АВ отвечает нижнему, а ветвь АС верхнему пределу взрываемости по давлению. В заштрихованной области реакция достигает стадии взрыва; вне этой области реакция течет медленно и стационарно. Ниже температуры T_A воспламенение и взрыв невозможны ни при каких давлениях. При температуре выше T_A, например T,' существует нижний P_1 и верхний P_2 пределы взрываемости, ниже и выше которых взрыв невозможен. Если цепная реакция протекает ниже нижнего предела давления, то цепи не разрыветвляются из-за их обрыва на стенках сосуда. Поэтому нижний предел зависит от состава смеси, диаметра сосуда и материала его стенок и слабо зависит от температуры. С ростом давления обрыв цепи затрудняется, они сильно разветвляются, реакция идет самоускоряясь и заканчивается взрывом. При достижении верхнего

предела разветвление цепи снова затрудняется из-за их обрыва в результате тройных столкновений с частицами загрязнений, концентрация которых растет с давлением. Поэтому верхний предел сильно зависит от температуры, природы и количества примесей и мало зависит от геометрии сосуда и природы его стенок. Возникновение цепного взрыва объясняется лавинообразным нарастанием числа активных частиц (свободных радикалов) в результате протекания разветвленной цепной реакции.

4.4. Тепловой взрыв

Тепловой взрыв может произойти для не цепных экзотермических реакций, когда выделение теплоты становится выше теплоотдачи. При малой скорости реакции теплота отводится в окружающую среду, и температура в зоне реакции лишь на немного превышает температуру окружающей среды. При значительной скорости теплота не успевает отводиться, и температура в зоне реакции начинает повышаться. В результате возрастает скорость реакции и вместе с тем увеличивается тепловыделение. Одновременно растет и скорость теплоотдачи, но значительно медленнее, чем скорость тепловыделения. Известно, что скорость реакции, а соответственно и тепловыделение, возрастает с температурой по экспоненциальному закону (уравнение Аррениуса), а скорость теплоотдачи – по линейному закону, так как тепловой поток прямо пропорционален градиенту температур.

На рис. 4.2 представлено три принципиально возможных случая теплоотвода в зависимости от температуры наружной стенки сосуда (реактора) $\mathbf{T}_0^{/}$, $\mathbf{T}_0^{//}$, $\mathbf{T}_0^{///}$ (прямые $2^{/}$, $2^{//}$, $2^{///}$). Тепловыделение характеризуется кривой 1. В первом случае (кривые 1, $2^{/}$) при температуре $\mathbf{T < T_A}$ скорость тепловыделения выше, чем скорость теплоотвода ($\mathbf{Q_1 > Q_2^{/}}$), температура будет повышаться.

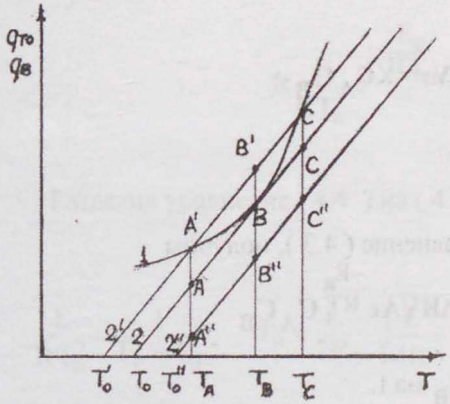

Рис. 4.2. Зависимость тепловыделения (1) и теплоотдачи (2) от температуры сосуда

В точке A', когда $Q_1 = Q'_2$ разогрев прекратится, так при $T > T_A$, как это следует из рисунка, $Q_1 < Q'_2$, и система будет охлаждаться. Если же ввести в систему дополнительный источник тока и поднять температуру выше T_C, то тепловыделения будут превышать теплоотвод ($Q_1 > Q'_2$) и начнется самопроизвольный разогрев, который закончится взрывом. Во втором случае (1 и 2) кривая 1 и прямая 2 касаются только в одной точке B .

Температура T_B соответствует точке B и называется температурой воспламенения (взрыва). При незначительном превышении данной температуры начнется процесс самопроизвольного разогрева, который приведет к взрыву. В третьем случае тепловыделение всегда будет превышать теплоотвод (кривые 1, $2''$), и поэтому при любой температуре процесс будет протекать с саморазогревом, который приведет к взрыву. Оценим температуру воспламенения реакционной смеси (T_B). Очевидно, что в точке B'' тепловыделение и теплоотвод равны $Q_1 = Q''_2$ и будут равны их первые производные по температуре

$$\frac{dQ_1}{dT} = \frac{dQ''_2}{dT}.$$

Скорость тепловыделения, то есть количество теплоты, выделяемое в единицу времени равно

$$Q = \Delta H V v, \qquad (4.3)$$

где ΔH– тепловой эффект реакции; V– скорость реакции; v – объем реактора.

Если в реакторе протекает реакция второго порядка A + B → Продукт, то

$$V = -KC_A C_B,$$

где $K = Ae^{\frac{-E_a}{RT}}$.

Подставляя значения V в уравнение (4.3), получим

$$Q_1 = \Delta HVAe^{\frac{-E_a}{RT}} C_A C_B.$$

Заменим $\Delta H \cdot V \cdot A \cdot C_A \cdot C_B$ на L

$$Q_1 = Le^{-\frac{E_a}{RT}};$$

$$\frac{dQ_1}{dT} = L\frac{E_a}{RT_2}e^{-\frac{Ea}{RT}}.$$

Скорость теплоотвода через стенки реактора, согласно законам теплоотдачи, равна

$$Q_2'' = S\chi(T - T_0''),$$

где S - площадь поверхности стенки сосуда; χ - коэффициент теплопередачи, равный количеству теплоты, которая передается в единицу времени от единицы поверхности стенки в окружающую среду при разности температур в один градус.

$$\frac{dQ_2''}{dT} = S\chi.$$

Приравнивая полученные выражения по Q и по dQ/dT, получим

$$Le^{-\frac{E_f}{RT_B}} = S\chi(T_B - T_0), \qquad (4.4)$$

$$L\frac{E}{RT_в^2}e^{-\frac{E_a}{RT_в}}=S\chi \qquad (4.5.)$$

Разделив уравнение (4.4) на (4.5), получим

$$\frac{E}{RT_в^2}=\frac{1}{T_в-T_0}; \quad T_в=\frac{E}{2R}-\sqrt{\frac{E^2}{4R^2}-\frac{E}{R}T_0}. \qquad (4.6)$$

Как следует из уравнения (4.6.) температура самовоспламенения в основном определяется величиной энергии активации.

4.5. Основные положения теории детонации

Процессы взрывчатого превращения в зависимости от природы взрывчатых веществ (ВВ), условий инициирования и ряда других факторов могут протекать с различной скоростью и существенно отличаться по характеру.

Все взрывные процессы могут быть подразделены на две принципиально отличные формы: горение и взрыв. Процессы горения протекают с переменной скоростью в зависимости от внешних условий, особенно от давления.

Скорость же взрыва от внешних условий практически не зависит. Между горением и взрывом есть строгая количественная разница. Скорость горения всегда меньше, а скорость взрыва всегда больше скорости звука в исходном ВВ. В передаче горения по веществу определяющую роль играют законы теплопроводности, в передаче взрыва – ударная волна.

Горение при определенных условиях (критических) может скачкообразно переходить во взрыв. Процессы взрыва при определенных условиях могут протекать в форме детонации.

Детонация представляет собой наиболее совершенную форму

взрыва, протекающую с постоянной и максимально возможной при заданных условиях для данного ВВ скоростью. Детонация – это частный случай, особая стационарная форма взрыва, а скорость детонации является константой и одной из важнейших характеристик ВВ.

С этой точки зрения взрыв представляет собой неустановившийся процесс, который при своем распространении либо переходит в детонацию, либо затухает. Неустановившиеся режимы взрыва характерны на участках заряда, прилегающих к месту инициирования. К настоящему времени наиболее полно изучены процессы детонации, имеющие исключительное значение в технике применения инициирующих и бризантных ВВ. Большинство исследований относятся к газовым смесям. На основе данных исследований разработана теория детонационной волны, основные закономерности которой оказались применимы для жидких и твердых ВВ.

Явление детонации было открыто в 1881 году Бертло и Вьель Маглер и Ле-Шетелье при исследовании распространения пламени в трубах.

Первые опыты показали, что детонация распространяется с постоянной скоростью, достигающей для газовых смесей 3,5…4 км/с, что значительно выше скорости звука. Далее была разработана гидродинамическая теория детонации. Она позволила объяснить качественные особенности детонационных процессов и рассчитать все параметры (скорость, давление, плотность, температуру, энергию) детонационной волны.

Основоположником гидродинамической теории детонации является российский физик Михельсон В.А. (1889г.), который разработал основные её положения. Дальнейшее развитие, применительно к газовым и конденсированным ВВ, гидродинамическая теория получила в работах Ландау, Зельдовича, Гриба, Саломахина и др.

Согласно гидродинамической теории, передача детонации обусловлена распространением по ВВ ударной волны. Если амплитуда на фронте этой волны больше некоторой величины, то волна при своем распространении способна за своим фронтом возбуждать интенсивную химическую реакцию за счет энергии, которой поддерживает постоянство параметров волны. Таким

образом, скорость детонации может быть рассчитана, как скорость распространения ударной волны по взрывчатому веществу. Детонационная волна, проходя по ВВ, не затухает; она поддерживается энергией, выделяемой химической реакцией. Когда ударный фронт проходит через вещество, оно почти мгновенно нагревается до температуры в несколько тысяч градусов (около 4000°С). При такой температуре реакция идёт с большой скоростью. Она начинается сразу же за фронтом и заканчивается очень быстро. Время её протекания составляет несколько десятков наносекунд. Толщина зоны реакции примерно порядка десятков мкм (30 мкм). Ударный фронт и следующая за ним зона реакции образуют установившуюся конфигурацию. Эта структура и называется детонационной волной , а скорость её распространения – скоростью детонации D (рис.4.3.).

Распространение детонации существенно зависит от ряда факторов (примесей, геометрии, плотности ВВ и др.), что обусловлено возникновением и протеканием химической реакции в детонационной волне.

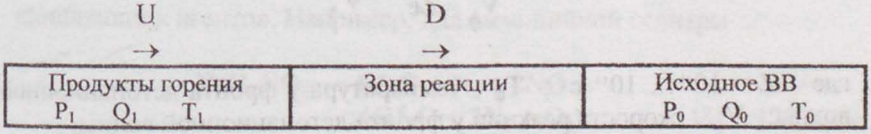

Рис 4.3. Схема детонационной волны

Распространение детонации существенно зависит от ряда факторов (примесей, геометрии, плотности ВВ и др.), что обусловлено возникновением и протеканием химической реакции в детонационной волне.

Условия протекания химической реакции в детонационной волне в значительной степени зависят от физических свойств и состава ВВ.

Согласно теории Ю.Б. Харитона, существуют три механизма химических реакций в зоне детонации: ударный, баллистический и смесевой.

Ударный механизм – ВВ сначала претерпевает сжатие и разогрев, а затем химическое превращение. Причем ВВ считается

гомогенным, и химическая реакция протекает во всем объеме вещества, находящегося в зоне превращения. Этот механизм характерен для газообразных и жидких ВВ.

Баллистическим называется такой процесс превращения исходного вещества, при котором продукты взрыва образуются путем сгорания отдельных частиц вещества. При этом предполагается, что химическому превращению подвергается гомогенное вещество, но превращение идет не по всему объему, а лишь в тонком поверхностном слое отдельных сгорающих частиц. Этот тип реакции является основным при детонации твердых ВВ.

При прохождении фронта ударной волны в твердом ВВ возникают многочисленные очаги химической реакции. Газообразные продукты их превращения охватывают зерна вещества, которые быстро сгорают в условиях высоких температур и давлений.

Рассмотрим наиболее простой случай мономолекулярной реакции.

$$V_ф = Ze^{-\frac{E_a}{RT_ф}},$$

где $Z = 10^{13} \div 10^{14}$ с$^{-1}$; $T_ф$ – температура у фронта детонационной волны; $V_ф$ – скорость реакции у фронта детонационной волны.

Время реакции при изотермическом процессе

$$t = \frac{1}{V_ф},$$

Большая скорость реакции на фронте детонационной волны обеспечивает адиабатический характер процесса. Выделяющаяся энергия расходуется на повышение температуры и давления, что в свою очередь, приводит к увеличению скорости реакции. В адиабатических условиях

$$t = t_{min} = \frac{RT_ф^2}{ET_e},$$

где T_c – величина, близкая к температуре взрыва.

Между предельным диаметром ВВ и скоростью реакции существует связь:

$$d_{пр.} = tV_ф,$$

$$d_{пр.} = \frac{RT_ф^2}{ZET_e} V_д e^{\frac{1}{RT_ф}}.$$

где $V_д$ – скорость детонации ВВ при данной плотности.

Смесевой механизм соответствует случаю, когда реакция на уровне детонационной волны (ДВ) связана с взаимодействием двух или нескольких веществ, не находящихся в молекулярном контакте. Этот механизм характерен для гетерогенных взрывчатых систем и взрывчатых смесей. Наиболее вероятна следующая схема процесса.

1.Предварительное разложение ВВ с образованием окисляющих агентов. Например, для аммонийной селитры

$$2NH_4NO_3 \rightarrow 4H_2O + N_2 + 2NO$$
$$(4H_2O + 2N_2 + O_2)\ ; \qquad \Delta H = 120\ КДж.$$

2. Взаимодействие горючего компонента взрывчатой смеси с NO. Во время этой фазы реакции выделяется часть теплоты взрыва. Естественно, что одним из важнейших условий увеличения скорости реакции на фронте детонационной волны (ДВ), а соответственно, и мощности ВВ, его геометрии ($d_{пр}$), является тщательность смешения составных компонентов, это относится и к аммонитам, и к динамитам).

Некоторые авторы (Апин) считали, что распространение процесса детонации происходит не за счет ударной волны, а в результате струйчато-пробивного механизма возбуждения химической реакции. Согласно этому механизму, при детонации происходит пробой и поджигание впереди лежащих слоев ВВ. Однако известно, что передача детонации легко осуществляется через прослойки металла, воды и других плотных сред. Очевидно, что инициирование взрыва в основном происходит лишь под непосредственным воздействием ударной волны.

4.6. Факторы, влияющие на скорость и устойчивость детонации зарядов ВВ

Установлено, что скорость детонации заряда ВВ зависит от характеристик самого ВВ (тип ВВ, его дисперсность, теплота взрыва, плотность ВВ в заряде), диаметра заряда и условий взрывания (наружный или внутренний заряд в шпуре или скважине, наличие забойки). Во всех случаях задача сводится к оценке устойчивости и скорости детонации по сравнению с максимально достижимой или оценке величины критического диаметра заряда. Для каждого ВВ можно найти два характерных диаметра заряда (критический и предельный).

Критический диаметр $\mathbf{d_{кр}}$ – диаметр заряда, при дальнейшем уменьшении которого детонация заряда ВВ становится неустойчивой и при дальнейшем уменьшении полностью затухает. С увеличением диаметра заряда больше критического, скорость детонации возрастает до определенного значения и при дальнейшем увеличении диаметра заряда ВВ не меняется. Диаметр заряда, при котором скорость детонации достигает максимального значения, называется предельным $\mathbf{d_{пр}}$ (рис. 4.4.) Влияние диаметра на скорость детонации заряда было впервые теоретически объяснено Харитоном Ю.Б. и развито в трудах Баумана Ф.А.

Высокое давление на фронте волны детонации вызывает интенсивное расширение продуктов детонации в стороны. Возникающие при этом волны разряжения будут распространяться в зону химической реакции и снижать давление и температуру продуктов взрыва, а следовательно, снижать скорость детонации за счет снижения величины энергии подпитки фронта волны детонации. Характер протекания этого процесса зависит от соотношения ширины химической реакции L_p и диаметра заряда d. Время химической реакции τ_1 будет равно $\tau_1 = \frac{L_h}{V_Д}$, а время прохождения волной разряжения расстояния до центра заряда

$$\tau_2 = \frac{d}{2V_p}.$$

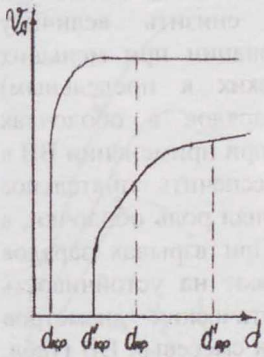

Рис.4.4. Зависимость скорости детонации зарядов ВВ от их диаметра

Время химической реакции τ_1 будет равно $\tau_1 = \frac{L_h}{V_Д}$, а время прохождения волной разряжения расстояния до центра заряда

$$\tau_2 = \frac{d}{2V_p}.$$

Здесь V_p– скорость волны разряжения, м/с. При $\tau_1 < \tau_2$ детонация затухает, так как начнется расширение продуктов взрыва до завершения химической реакции. При критическом диаметре должно соблюдаться условие $\tau_1 = \tau_2$, откуда

$$\frac{L_p}{V_Д} = \frac{d}{2V_p}; \quad d_{кр.} = \frac{L_p 2V_p}{V_d},$$

а поскольку $V_Д \approx 2V_p$, то $L_p \approx d$, то есть критический диаметр приблизительно равен ширине зоны химической реакции в заряде.

Отсюда следует, что любое химическое соединение или смесь способны детонировать, если реакция их разложения экзотермична, а выделение энергии реакции во фронт детонационной волны достаточно для обеспечения распространения по веществу детонационной волны с постоянными параметрами.

Таким образом, у грубодисперсных ВВ с широкой зоной химической реакции критический диаметр будет больше, чем у порошкообразных ВВ. Если заряд окружен оболочкой, затрудняющей разлет продуктов взрыва, критический диаметр заряда уменьшается. Так, замена стеклянной оболочки на стальную снижает критический диаметр для аммиачной селитры со 100 до 7 мм. Оболочка не оказывает существенного влияния на скорость детонации зарядов однокомпонентных ВВ большой плотности, но значительно влияет на

скорость детонации зарядов средней плотности, а также смесевых ВВ. На скорость детонации влияют главным образом инертные свойства оболочки и её сжимаемость. При малых плотностях заряжения оказывает влияние на устойчивость детонации и прочность оболочки. Оболочка позволяет снизить величину критического диаметра, т. е. достигнуть детонации при меньших диаметрах. При больших диаметрах (близких к предельным) скорости детонации открытых зарядов и зарядов в оболочках становятся примерно одинаковыми. Поэтому при применении ВВ в зарядах небольшого диаметра необходимо обеспечить тщательное заполнение шпура ВВ, чтобы последний выполнял роль оболочки, а также делать качественную забойку заряда. При взрывах зарядов большого диаметра эти факторы меньше влияют на устойчивость детонации. Ниже приведены величины критических диаметров открытых зарядов некоторых индивидуальных и смесевых ВВ (табл. 4.1).

Таблица 4.1.

Наименование взрывчатого вещества	Показатели		
	Теплота взрыва КДж/кг	Критический диаметр мм	Скорость детонации км/с
Азид свинца	1590	0,01 … 0,02	5,3
Гексоген	5450	1,0 …1,5	8,4
Тротил (гранулированный)	3450	5 …10	5,5 … 6,5
Аммонит 6ЖВ	4300	12 ….14	3,6 … 4,8
Аммонит скальный № 1	5400	5 … 6	6,0 … 6,5
Аммонит скальный № 3	4950	8… 10	4,0 … 4,5
Гранулит АС – 8	70 … 100	3,0 … 3,6	4500
Граммонит 79/21	4300	40… 60	3,5 …4,2
Игданит	3800	100 ... 120	2,2 …2,7
Детонит М	5800	8 … 10	4,0 … 4,6

Плотность ВВ по-разному влияет на скорость детонации для индивидуальных и смесевых ВВ. Для индивидуальных ВВ скорость детонации увеличивается с увеличением плотности до максимальных значений. Смесевые ВВ имеют критическую плотность 1,4 – 1.5 г/см^3, при которой скорость детонации максимальна (рис. 4.5 кривые 2, 3). При дальнейшем увеличении плотности увеличение скорости

детонации прекращается и она начинает уменьшаться (рис. 4.5).

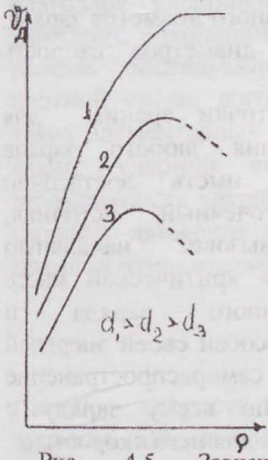

Рис. 4.5. Зависимость скорости детонации от плотности ВВ: 1 – для однокомпонентных; 2,3– для смесевых

Это происходит за счет того, что при изменении плотности ВВ химическое превращение компонентов ВВ и химическое взаимодействие продуктов взрыва изменяются, что ухудшает условия протекания химических реакций. Так, при сильном уплотнении аммиачная селитра в аммонитах ведет себя как инертное вещество и, поглощая энергию, делает невозможным распространение детонации по заряду. При наличии большого процента мощного компонента в составе ВВ (тротил, гексоген) можно достичь такого уплотнения, что детонация будет распространяться в заряде только по этому компоненту, что приведет к увеличению ее скорости. При большом диаметре заряда или размещении его в оболочке критическая плотность ВВ увеличивается.

С увеличением теплоты взрыва скорость детонации ВВ увеличивается, а критический диаметр уменьшается. Так, теплота взрыва тротила 3450 КДж/кг, скорость детонации 6,0 км/с, критический диаметр 10 мм, а для гексогена эти же величины соответственно равны 5700 КДж/кг, 8,4 км/с и 1,5 мм (табл. 4.1).

Значительное влияние оказывает дисперсность ВВ. При снижении размера частиц для тротила от 0,5 до 0,01 мм критический диаметр снижается от 28 до 9 мм. Все грубодисперсные ВВ имеют большие критические диаметры, чем порошкообразные ВВ того же состава.

Критический диаметр для смесевых ВВ зависит от их процентного соотношения компонентов. Так, с уменьшением содержания тротила в аммонитах с 21 до 5 % их критический диаметр увеличивается с 12 до 25 мм.

Влияние мощности (скорость детонации) инициатора сказывается лишь на начальном участке развития детонации, где в зависимости от величины импульса может быть получена скорость детонации выше или ниже характерной для данного диаметра заряда, но в любом случае на участке 1 – 2 диаметров скорость стабилизируется (рис. 4.6).

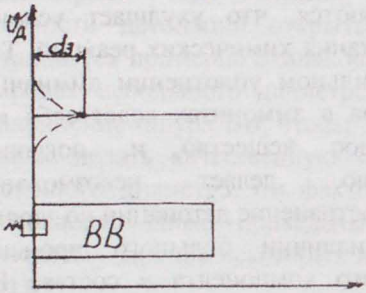

Рис.4.6. Изменение детонации заряда ВВ в зависимости от мощности (скорости) начального импульса

С этой точки зрения для инициирования любого заряда необходимо иметь достаточно мощный точечный источник, который вызовет начальную детонацию в критической массе инициированного заряда и который способен своей энергией обеспечить самораспространение детонации по всему заряду с характерной для него скоростью.

4.7. Переход горения газопаровоздушных смесей во взрыв

Ранее мы рассмотрели процессы горения газопаровоздушных смесей (ГПВС). Установили закономерности начала горения (воспламенение, вспышка), течения горения, то есть скорость распространения горения и, наконец, прекращения горения. Однако при определенных условиях процесс горения ГПВС переходит в детонацию и, соответственно, во взрыв. В чем же заключается механизм перехода горения в детонацию? Равномерное распространение пламени с постоянной скоростью осуществляется лишь при зажигании на начальном этапе. Со временем происходит горение с непрерывно возрастающей скоростью. Причиной самоускорения процесса является сжатие смеси впереди фронта горения. Это явление было экспериментально подтверждено Киркби и Вилером.

Благодаря непрерывному повышению давления, а следовательно плотности и температуры, реакция в каждом последующем слое газа

идет быстрее и заканчивается в более короткий промежуток времени. Повышение давления впереди фронта пламени происходит вследствие возникновения в газе волн сжатия, которые образуются благодаря расширению продуктов горения. Пламя приводит в движение находящийся перед ним газ, действие подобно поршню. Каждая последующая волна сжатия распространяется в более плотной среде, догоняет предыдущую, и в результате наложения таких элементарных волн постепенно образуется достаточно крутой фронт ударной волны. По мере распространения пламени интенсивность ударной волны возрастает, а вместе с ней возрастает и скорость движения газа. Таким образом, скорость распространения пламени относительно неподвижной смеси будет

$$\mathbf{U} = \mathbf{U}_1 + \mathbf{U}_2,$$

где :U_1 - скорость пламени относительно движущегося газа; U_2- скорость газа, сжатого ударной волной.

Возникновение волн сжатия было доказано экспериментально.

Таким образом, механизм перехода горения в детонацию заключается в следующем. Горение вызывает движение газа и образование ударной волны.(рис.4.7).

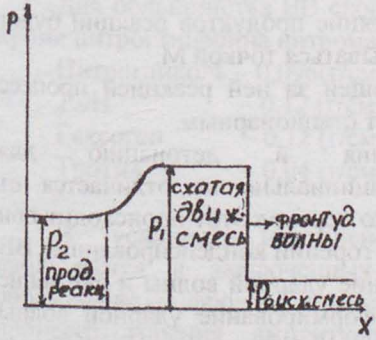

Рис. 4.7.Распределение давления в горящем газе

Вследствие этого распространение пламени осуществляется в сжатом и движущемся газе. По мере ускорения пламени растет и амплитуда ударной волны, вызывая последующее его ускорение и т. д.

Детонация возникает в тот момент, когда амплитуда (интенсивность) ударной волны достигает критического значения при котором обеспечивается воспламенение газа и постоянство режима на фронте волны за счет энергии химической реакции. В нормальных условиях скорость пламени в самых быстрогорящих смесях не превышает 10м/с.

Однако переход горения в детонацию проходит через промежуточные значения порядка сотен метров в секунду. Это движение пламени со скоростью, слишком большой для распространения за счет теплопроводности и слишком малой для распространения по детонационному механизму, может быть объяснено из условий протекания процессов в движущихся газах. Рассмотрим зависимость давления от скорости распространения горения (кривая Гюгония).

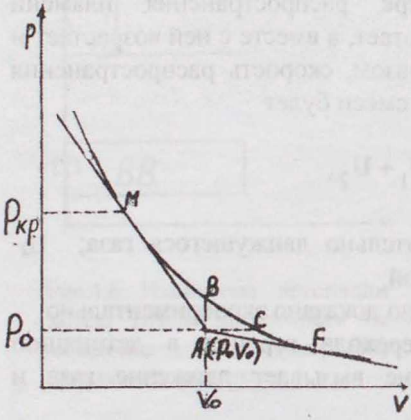

Рис.4.8. Кривая Гюгония

Эти промежуточные значения скорости между детонацией и медленным горением находятся на участке ВС. Точка М соответствует процессу стационарной детонации; точка F – процессу стационарного медленного горения, если пламя распространяется по газу, параметры состояния которого P_oV_o Когда давление на фронте ударной волны достигнет своего критического значения $\mathbf{P_{кр}}$, при котором скорость её станет равной скорости детонации, то произойдет самовоспламенение сжатого газа, а состояние продуктов реакции будет описываться точкой М.

Только при этих условиях и следующей за ней реакцией процесс распространение ударной волны станет стационарным.

Механизм перехода горения в детонацию для конденсированных систем ВВ принципиально не отличается от механизма для газовых смесей. Однако переход этот происходит при существенно отличных условиях. При горении конденсированных ВВ практически исключается возникновение ударной волны и движение вещества впереди фронта пламени, формирование ударной волны происходит позади фронта пламени в горячих газообразных продуктах реакции. Характерной особенностью реакции горения конденсированных ВВ является резкое увеличение объема в зоне пламени вследствие перехода вещества в газообразные продукты. При недостаточно быстром отводе газов давление в зоне реакции

будет непрерывно повышаться, а скорость горения возрастать. Когда скорость горения достигает критического значения, горение переходит в детонацию. Горение ВВ может быть устойчивым, если газоприход вследствие реакции и газоотвод находятся в равновесии. Если скорость газоприхода будет выше газоотвода, то процесс будет ускоряться. Нарушение газового баланса – важнейшая причина перехода горения в детонацию.

$$U_3 = U_4,$$

где: U3 – скорость газоприхода, равная скорости горения; U4 – скорость газоотвода.

Согласно Ландау, нарушение стационарного горения происходит в тех случаях, когда массовая скорость горения переходит некоторый предел.

$$U_m = (4a_к \cdot q\rho^2\delta_ж)1/4,$$

где $a_к$ - поверхностное натяжение жидкости; $\delta_ж$ - плотность жидкости; ρ – плотность газообразных продуктов; q – ускорение силы тяжести.

U_m для большинства ВВ составляет величину, равную 0,25 (г/см²·с).

Для большинства ВВ скорость горения меньше этой величины, кроме нитроглицерина нитроманита 0,5 – 0,7 (г/см²·с.).

Нитрогликоль – 0,096(г/см²·с) ;
ТЭН – 0,12 (г/см²·с);
Гексоген – 0,12 (г/см²·с);
Тротил – 0,04 (г/см²·с).

В условиях некомпенсирующего газоотвода, как это наблюдается в заключенных в оболочку зарядах, происходит образование за фронтом пламени ударной волны с возрастающей в процессе горения амплитудой и последующим переходом к детонации.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Дайте характеристику взрывчатых веществ.
2. От чего зависит цепной взрыв?
3. Каковы существенные особенности теплового взрыва?
4. Опишите основные положения теории детонации.
5. Охарактеризуйте влияния диаметра заряда, плотности, мощности начального импульса и других факторов на скорость детонации.
6. Опишите механизм перехода горения газопаровоздушных смесей в детонацию

ГЛАВА 5. МЕХАНИЧЕСКОЕ ДЕЙСТВИЕ ВЗРЫВА

5.1. Механическое действие взрыва в воздухе

Действие взрывных газов в атмосфере ограничено тем, что сопротивление воздуха тормозит расширяющиеся газы, а в случае направленных газовых струй, кроме того, заставляет газовые струи расширяться и в конечном счете сливаться друг с другом. Таким образом, на некотором расстоянии от заряда облако расширяющихся взрывных газов приобретает в целом правильную шарообразную форму, хотя в деталях остаются отступления от этой формы из-за того, что расширяющиеся газы начинают вихреобразно смешиваться с окружающим воздухом (турбулентное перемешивание).

При этом наблюдается интересное и важное явление. Если взрывные газы содержат достаточное количество таких веществ, которые не окислились (т.е. не соединились с кислородом) в процессе детонации, то перемешивание с воздухом вызывает интенсивное догорание взрывных газов. Появляется яркое пламя, и энергия взрывных газов возрастает. Это явление особенно характерно для взрыва тротиловых зарядов в воздухе. Оно дает увеличение энергии взрыва до 10…20 %. Поэтому удельная энергия тротила при взрыве в атмосфере соответственно больше энергии, выделяемой тротилом при взрыве в грунте. Однако энергия, получаемая дополнительно, не успевает передаться передней части ударной волны и идет главным образом на дополнительное нагревание взрывных газов. В некоторых случаях при взрыве в воде возможны также и сложные химические реакции.

Чтобы охарактеризовать зону, где действуют взрывные газы и происходит их направленное расширение, необходима условная мера длины, позволяющая свести к единой системе взрывы любого масштаба.

Допустим, что взрывчатое вещество представлено в виде шара. Радиус этого шара для тротила и многих других взрывчатых веществ средней мощности можно приближённо принять

$$r_0 = 0{,}053 m^{\frac{1}{3}}.$$

Здесь r_0 – радиус заряда, приведенного сферической форме , м; m – масса заряда, кг.

Величина r_0 является очень распространенной мерой длины при описании действии взрыва в самых разнообразных средах. Удобство применения этой формулы состоит в возможности свести к единой картине взрывы зарядов всех размеров.

При расширении взрывных газов они встречают и оттесняют воздух, окружающий заряд. Если воздух имеет давление, близкое к нормальному, т. е. если не рассматриваются взрывы, происходящие на больших высотах, где воздух менее плотен, то можно считать, что плотность воздуха примерно в 1200…1500 раз меньше плотности обычных взрывчатых веществ.Поэтому масса воздуха, равная массе заряда, должна содержаться в объеме, равном примерно 1200…1500 объемам заряда, или в шаре, имеющем радиус, равный

$$r_к = (11...12) r_0 .$$

Этот радиус имеет существенное значение при рассмотрении действий взрыва в воздухе. Дело в том, что, пройдя расстояние, равное r_k, масса взрывных газов вытесняет во все стороны равную себе массу воздуха. Этого оказывается достаточно, чтобы затормозить расширение взрывных газов и расстроить их направленные струи. Именно на расстоянии, близком к $r_к$ взрывные газы формируются в сферическое облако, дальнейшее расширение которого протекает медленно. При $r \le 12 r_0$ механизм механического воздействия на окружающую среду существенно отличается от механизма при воздействия $r > 12 r_0$.

При взрыве в воздухе взрывные газы (рис.5.1), не встречая заметного сопротивления со стороны воздуха, находящегося возле свободных поверхностей заряда, начинают интенсивно расширяться в направлениях, перпендикулярных этим поверхностям заряда. Скорость этого расширения у молекул газов, разлетающихся с поверхности заряда, наибольшая, следующие за ними молекулы движутся все медленнее. Можно с некоторым приближением считать, что взрывной газ расширяется подобно сильно сжатой и мгновенно освобожденной пружине.

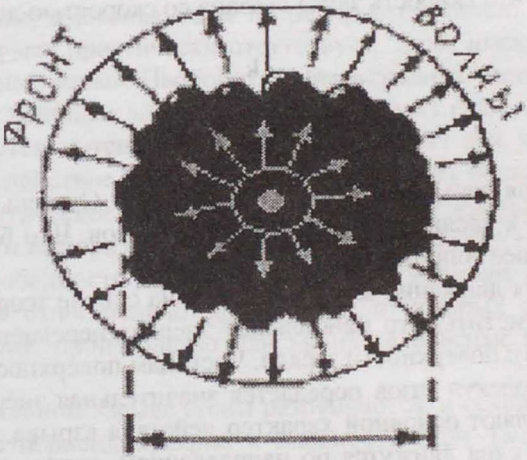

Рис. 5.1. Схема образования воздушной ударной волны в воздухе.

Скорость наиболее быстрых молекул нарастает до тех пор, пока к ним не передастся энергия изнутри массы газов. Это возможно до тех пор, пока скорость движения наиболее быстрых молекул не достигнет некоторой предельной величины с, с которой передается энергия во взрывном газе. Эта величина – скорость звука.

Скорость звука можно определить в рассматриваемых условиях взрыва, исходя из величин, определенных ранее. Волна детонации распространяется по взрывчатому веществу вследствие передачи энергии от сильно сжатых взрывных газов еще не детонировавшей части заряда. Сами газы движутся со скоростью u. Волна детонации обгоняет их и движется со скоростью $V_д$. Почему волна детонации может обогнать взрывные газы? Очевидно, потому, что энергия этих газов передается от них вслед за фронтом волны со скоростью звука с. Иначе говоря, скорость детонации превосходит скорость движения газов u на величину скорости звука с. На этом основании можно написать, что

$$v_д = u + c.$$

Известно, что скорость звука связана со скоростью детонации:

$$c = V_д \frac{k}{k+1},$$

$$c = ku.$$

Так как для взрывных газов **k**=3, то **c**=3u. Степень жесткости взрывных газов k увеличивается с давлением газов. Чем больше давление, тем сильнее сопротивляется газ сжатию.

Анализируя движение взрывных газов на основе теории детонации, следует отметить, что наибольшая энергия передаётся молекулами, летящими с поверхности заряда. Частицам поверхностного слоя от остальных молекул газов передаётся значительная энергия, и эти частицы определяют основной характер действия взрыва. Молекулы поверхностного слоя движутся по направлениям, которые определяются сложением векторов двух скоростей. Первая скорость, приобретаемая под действием волны детонации, направлена по линии, идущей от места инициирования, т. е. от детонатора к той точке поверхности заряда, где рассматривается движение взрывных газов. Вторая скорость, равная скорости звука **c** и превосходящая скорость u в три

Характерной особенностью такого разлета продуктов взрыва является то, что в пространстве, примыкающем к исходящим углам и ребрам заряда, взрывные газы не распространяются. В этих местах действие взрыва практически отсутствует. Здесь имеются своеобразные «защитные зоны». Наоборот, против средних частей граней заряда, где идет наиболее мощный поток взрывных газов, действие взрыва проявляется интенсивно. Здесь происходит так называемое направленное действие взрыва. Это явление имеет большое теоретическое и практическое значение. Оно позволяет управлять действием взрыва путем выбора формы заряда и места инициирования его.

Эта особенность имеет также большое значение при планировании зданий относительно друг друга, в которых осуществляется взрывоопасное производство или хранятся опасные взрывчатые вещества.

При сильном взрыве стены разрушаются, и осколки разлетаются в основном перпендикулярно к плоскости стен. Если отметить на плане зоны разлета этих осколков, получится ярко выраженная крестообразная фигура. Зона наиболее сильного поражения осколками будет находиться против средней части стен. Наоборот, около исходящих углов здания окажутся защитные зоны, где действие взрыва практически отсутствует. С учетом направленного действия взрыва хранилища взрывчатых веществ и помещения, где находятся взрывоопасные установки, надо располагать так, чтобы они находились в защитных зонах по отношению друг к другу.

Обычно в природе всякое движение осуществляется так, что энергия из мест, где она сконцентрирована в более значительной степени, переходит в места, где концентрация энергии меньше. При взрыве эта закономерность соблюдается тоже: взрывные газы движутся из места, где их давление больше, туда, где давление меньше. Энергия, выделенная при взрыве, быстро рассеивается, и температура взрывных газов постепенно приближается к температуре окружающей среды.

Направленное действие взрыва в целом не изменяет этой закономерности. Однако можно создать такие условия, когда с помощью направленного действия взрыва получается необычайный результат – создается более высокое давление, более высокая температура и более высокая скорость движения взрывных газов.

Для получения такого результата необходимо применить заряд с выемкой той пли иной формы. При взрыве взрывные газы устремля-

ются в основном перпендикулярно к поверхности выемки, к ее центральной оси. Сходящиеся струи газов соударяются друг с другом и образуют очень мощный газовый поток, направленный вдоль оси выемки. Этот поток называется кумулятивной струей. Выемка в заряде, вызывающая формирование такой струи, называется кумулятивной выемкой, а все явление – кумуляцией, т.е. собиранием энергии взрыва, повышением ее концентрации (рис. 5.3).

Газовая кумулятивная струя имеет очень высокую плотность. Скорость ее движения заметно выше скорости расширения взрывных газов. Однако газовая кумулятивная струя, едва успев образоваться, немедленно после этого быстро расширяется. Её плотность, давление и скорость быстро снижаются. Поэтому кумуляция взрывных газов не может считаться наиболее ярким и сильным проявлением повышенной концентрации энергии направленного взрыва.

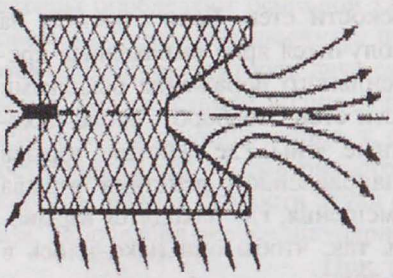

Рис. 5.3. Схема кумуляции взрывных газов

Явление кумуляции можно существенно усилить и сделать более устойчивым, если осуществить кумулятивную струю не из взрывных газов, а из металла. Это осуществляется лучше всего при наличии в заряде конической кумулятивной выемки. Выемка снабжается металмасской облицовкой, плотно прилегающей к поверхности взрывчатого вещества. Если облицовка изготовлена из стали, то ее толщина должна составлять примерно $\frac{1}{30}...\frac{1}{60}$ часть диаметра отверстия кумулятивной выемки.

При взрыве металл облицовки с такой силой сжимается под действием взрывных газов, что внутри металла возникают давления, измеряемые миллионами атмосфер. Металл при таких условиях начинает течь подобно жидкости, потому что давление существенно превосходит временное сопротивление любого самого прочного металла. В результате этого из сжимающейся массы металла выплескивается, но оси выемки тонкая струя металла, движущаяся необычайно быстро.

Расчеты, выполненные на основе гидродинамической тео-

рии кумуляции, приводят к следующим формулам. Скорость кумулятивной струи равна

$$V_k = V_0\left(\frac{1}{\sin\alpha} + \frac{1}{tg\alpha}\right).$$

Здесь α – угол между образующими конической кумулятивной выемки и ее осью; V_0 – скорость, сообщаемая взрывными газами металлу облицовки кумулятивной выемки. Величина V_0 составляет примерно 2…3 км/с. Расчёты показывают, что скорость кумулятивной струи может достигать 17 км/с.

Если кумулятивная струя движется в воздухе сравнительно недолго, то она интенсивно разрушается и сгорает в воздухе подобно тому, как это происходит с метеоритами. Устойчивые струи в воздухе получаются при скоростях V_k, заметно меньших, чем те рекордные величины, которые были приведены выше. Эти скорости находятся в пределах 5…10 км /с.

Кумулятивная струя, ударяясь о преграду, производит на нее чрезвычайно большое давление, которое составляет, например при ударе струй из металла с плотностью ρ_0 по преграде из такого же металла, $2\cdot10^6$ кгс/см^2.

При давлении в миллион килограммов на квадратный сантиметр металл становится подвижным, как жидкость, и кумулятивная струя пробивает и нем отверстие, диаметр которого примерно в 10 раз больше диаметра кумулятивной струи.

Толщина пробиваемого слоя, согласно гидродинамической теории (формула Лаврентьева – Тейлора), равна

$$B = L\sqrt{\frac{\rho_0}{\rho_П}}.$$

Здесь ρ_0 – плотность материала струи, а $\rho_п$ – плотность преграды.

Длина кумулятивной струи L должна теоретически равняться длине образующей кумулятивной выемки. Фактически она оказывается нередко значительно больше. Это обусловлено тем обстоятельством, что при полете кумулятивной струи ее «голова» имеет более значительную скорость, чем ее «хвост». Поэтому струя в полёте растягивается и ее пробивная способность растет.

Обычно кумулятивная струя достигает наиболее значительной пробивной силы на расстоянии от заряда, равном примерно двум диаметрам отверстия кумулятивной выемки. При этом струя способна пробить стальную броню, в три раза и более превосходящую по толщине диаметр отверстия кумулятивной выемки. На более значительных расстояниях от заряда струя начинает разрушаться и быстро теряет свою пробивную силу.

Если выемка имеет небольшую глубину, то при взрыве образуется сравнительно короткая кумулятивная струя, движущаяся сравнительно медленно. Она пробивает небольшие по толщине преграды. Однако в этом случае разрушение струи в полете протекает значительно медленнее и струя сохраняет пробивное действие на расстояниях, в сотни раз превышающих диаметр кумулятивной выемки.

Примером таких зарядов с неглубокими кумулятивными выемками являются обычные детонаторы и электродетонаторы в металлических оболочках с углублением в торцовой части.

При взрыве таких детонаторов возникают очень маленькие кумулятивные струи, имеющие форму кусочков металла размером в 1…2 мм. Если оболочка детонатора медная, то возникающая при его взрыве кумулятивная струйка сохраняет сильное пробивное действие на расстоянии до 5 м. В гражданской взрывной технике кумулятивные заряды применяются сравнительно редко. Их мощное пробивное действие пока еще не нашло достаточно широкого применения.

Совершенно другой механизм механического действия наблюдается на расстояниях, превышающих $12r_0$. Согласно закону механики «действие равное противодействию», взрывные газы при торможении воздухом сжимают этот воздух и сообщают ему некоторую скорость в направлении радиусов, идущих от центра взрыва. Масса взрывных газов, расширяясь, вытесняет окружающий ее воздух и образует вокруг себя зону сжатого, уплотненного и разогретого воздуха. Эта зона действует на окружающий, еще не возмущенный воздух, и сжимает его. Таким способом сжатие быстро передается все дальше и дальше от места взрыва (рис. 5.1.).

Чтобы пояснить это явление, можно рассмотреть вместо невидимых молекул воздуха обычную металлическую витую пружину, подвешенную горизонтально на достаточно длинных нитях. Если с одного конца ударить по этой пружине, то она сожмется сначала в пределах сравнительно небольшого участка, а потом это сжатие станет быстро, но все же заметно распространяться по пружине, пока не

достигнет другого конца. Здесь можно наблюдать, как возникает и распространяется в телах вызываемая быстрым ударом волна сжатия (рис. 5.4).

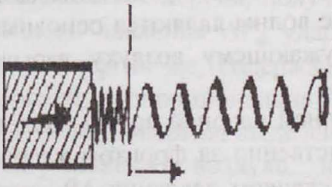

Рис. 5.4. Схема распространения волны сжатия по пружине

Именно такая волна сжатия образуется при взрыве и в воздухе. Разница состоит только в том, что в отличие от опыта с пружиной волна сжатия в воздухе распространяется во все стороны от места взрыва. Впрочем, и при взрыве можно получить движение волны только в одном направлении. Это наблюдается тогда, когда взрыв происходит в штольне, туннеле, т. е. тогда, когда волны взрыва передаются в ограниченном столбе воздуха.

При внимательном наблюдении за волной, распространяющейся вдоль пружины, можно заметить, что вслед за волной сжатия следует волна разрежения.

Теория и опыт показывают, что в воздухе вслед за волной сжатия также следует волна разрежения. В волне сжатия давление, плотность и температура воздуха превышают эти величины для воздуха, еще не захваченного волной. В волне разрежения, наоборот, давление, плотность и температура воздуха ниже своих значений, чем в невозмущенной атмосфере.

Совокупность волн сжатия и разрежения передает действие взрыва через воздух на значительные расстояния, существенно превышающие величину r_0.

Если взрыв очень сильный, то воздушные волны могут охватить весь земной шар, что наблюдалось при взрыве Тунгусского метеорита в 1908 г., при взрыве вулкана Кракатау в 1883 г., а также при ядерных взрывах.

Во всех таких случаях волна сжатия проявляется в виде плавного увеличения давления воздуха, регистрируемого самопишущими барометрами – барографами. Такие волны отмечаются на расстояниях, не превышающих нескольких сотен километров от взрыва.

Волны сжатия распространяются в воздухе несколько быстрее, чем звук. При этом чем значительнее повышение давления, тем быстрее движется волна. Эта простая и естественная закономерность приводит к тому, что волна сжатия имеет в своей передней части наибо-

лее высокое давление. Далее давление постепенно падает, и зона сжатия переходит плавно в зону разрежения. Таким образом, на переднем фронте волны сжатия давление скачкообразно возрастает до некоторого максимального значения. Волны такого рода называются *ударными волнами*. Воздушные ударные волны являются основными носителями энергии, переданной окружающему воздуху взрывом взрывчатого вещества.

Основной характеристикой воздушной ударной волны является избыточное давление воздуха непосредственно за фронтом ударной волны. Избыточное давление является скачком давления $\Delta P_ф$, который происходит практически мгновенно при подходе волны к месту регистрации давления.

Воздушные ударные волны несколько напоминают детонационные волны. Однако между ними есть принципиальное различие: детонационная волна освобождает энергию, скрытую во взрывчатом веществе, и, так сказать, сама себя движет. Поэтому в каждом взрывчатом веществе скорость волны детонации вполне определенная и постоянная (если детонация осуществляется полностью).Ударная волна, наоборот, движется за счет энергии, полученной вначале от взрывных газов, и постепенно теряет ее, во-первых, расходуя на нагревание воздуха, через который она проходит, и, во-вторых, потому, что объем воздуха, захватываемого волной, все время растет и в результате уменьшается количество энергии в единице объема. Поэтому по мере ее удаления от места возникновения давление на фронте ударной волны непрерывно падает. Падение давления ударной волны в зависимости от расстояния представляет собой весьма сложный процесс, который нельзя полностью изобразить при помощи простых формул.

Основной особенностью ударных волн взрыва, как это было впервые установлено Садовским М.Л, Седовым Л.И., Тейлором, является то, что избыточное давление на фронте волны подчиняется закону подобия. Это значит, что давление не зависит от абсолютных размеров и веса заряда, а полностью определяется отношением расстояния от места взрыва r к радиусу заряда r_0, удельной энергией взрыва U_1 для данного взрывчатого вещества и давлением окружающего воздуха P_0.

Основой теории расчета избыточного давления является допущение, что отношение дополнительной энергии, имеющейся в воздухе вследствие сжатия его избыточным давлением, к первоначальной

энергии воздуха находится в зависимости от отношения энергии, выделенной при взрыве, ко всей первоначальной энергии, содержавшейся до взрыва в объеме, который в данный момент захвачен ударной волной. Энергия, полученная единицей объема воздуха от избыточного давления $\Delta P_ф$ ударной волны, пропорциональна давлению $\Delta P_ф$. Энергия же, содержавшаяся первоначально в единице объема воздуха, пропорциональна P_0 (P_0 – давление невозмущенного воздуха). Общая энергия, выделенная при взрыве, равна U. Общая энергия. содержащаяся в воздухе, захваченном ударной волной, распространившейся на расстояние r от места взрыва сосредоточенного заряда (свободно расположенного в воздухе), пропорциональна

$$\frac{4\pi}{3} r^3 P_0 .$$

На основании сформулированного допущения можно написать, что

$$\frac{\Delta P_ф}{P_0} = f\left(\frac{mU_1}{\frac{4\pi}{3} r^3 P_0}\right).$$

Символ f (...) означает, что в этой части формулы стоит какая-то величина, зависящая только от отношения, записанного в скобках, т.е. функция этого отношения.

Путем подбора такого выражения, которое удовлетворяло бы опытным наблюдениям и расчетам, проведенным с помощью электронных счетных машин, можно установить, что

$$f\left(\frac{mU_1}{\frac{4\pi}{3} r^3 P_0}\right) = a_1 \frac{mU_1}{r^3 P_0} + a_2 \left(\frac{mU_1}{r^3 P_0}\right)^{\frac{2}{3}} + a_3 \left(\frac{mU_1}{r^3 P_0}\right)^{\frac{1}{3}}.$$

Здесь a_1, a_2, a_3 – постоянные величины, в которые введен множитель $\frac{4\pi}{3}$ и которые могут быть выражены определенными числами для всех взрывчатых веществ.

На основании двух последних формул можно написать

$$\frac{\Delta P_{\Phi}}{P_0} = a_1 \frac{mU_1}{r^3 P_0} + a_2 \left(\frac{mU_1}{r^3 P_0}\right)^{\frac{2}{3}} + a_3 \left(\frac{mU_1}{r^3 P_0}\right)^{\frac{1}{3}}.$$

Произведя сокращения, можем написать

$$\Delta P_{\Phi} = a_1 U_1 \frac{m}{r^3} + a_2 U_1^{\frac{2}{3}} P_0^{\frac{1}{3}} \frac{m^{\frac{2}{3}}}{r^2} + a_3 U_1^{\frac{1}{3}} P_0^{\frac{2}{3}} \frac{m^{\frac{1}{3}}}{r}.$$

Можно установить следующее: если m выражено в кг, r – в м и ΔP_{Φ} в кгс/см^2, то для взрывчатых веществ средней мощности на основе опытов и расчетов

$$a_1 U_1 = 7;$$

$$a_2 U_1^{\frac{2}{3}} P_0^{\frac{1}{3}} = 2{,}7;$$

$$a_3 U_1^{\frac{1}{3}} P_0^{\frac{2}{3}} = 0{,}84.$$

Покровский Г.И. предлагает на основании простых логических рассуждений без привлечения сложного математического аппарата и положений газодинамики определять значение величины $a_1 U_1$.

Рассмотрим давление на фронте ударной волны в момент её зарождения, когда расстояние r равно радиусу заряда. В этом случае

$$r = r_0 = \sqrt[3]{\frac{m}{\frac{4\pi}{3}\rho_{ВВ}}}.$$

Здесь $\rho_{вв}$ – объёмный вес взрывчатого вещества, равный для тротила 1600 кг/м^3. Если m =1кг, то

$$r = r_0 = 0{,}053 \text{ м}.$$

При таком небольшом значении r второй и третий члены в

формуле для расчета ΔP_{Φ} оказываются очень небольшими по сравнению с первым, поэтому можно принять, что вблизи заряда

$$\Delta P_{\Phi} = a_1 U_1 \frac{m}{r^3}.$$

Заменяя r^3 его значением, которое было определено, получим

$$\Delta P_{\Phi} = a_1 U_1 \frac{4\pi}{3} \rho_{вв}.$$

Среднее значение давления во взрывных газах, равное с некоторым приближением согласно кинетической теории газов ΔP_{Φ}, можно выразить так:

$$\Delta P_{\Phi} = \frac{2}{3} U_1 \rho_{вв}.$$

Приравнивая правые части двух последних равенств, после несложных преобразований получаем

$$a_1 U_1 = \frac{U_1}{2\pi}.$$

Если величина $a_1 U_1$ определяется, когда давление измеряется в килограммах на квадратный сантиметр, то ее следует разделить на 10000 (число квадратных сантиметров в квадратном метре). Следовательно, можно написать

$$a_1 U_1 = \frac{U_1}{2\pi 10000} = \frac{U_1}{62800}.$$

Удельная энергия U_1 тротила равна, как известно, примерно 430 000 кгс·м/кг. Следовательно,

$$a_1 U_1 = \frac{430000}{62800} \approx 7.$$

Именно это значение и следует принять для всех последующих расчетов, как было указано .

К сожалению, величины $a_2 U_1^{\frac{2}{3}} P_0^{\frac{1}{3}}$ и $a_3 U_1^{\frac{1}{3}} P_0^{\frac{2}{3}}$ не удается обосновать так просто, и их значение необходимо устанавливать на основании опытов или расчетов, проводимых на электронных счетных машинах. Следует отметить, что при очень больших расстояниях от места взрыва, когда r в сотни раз больше радиуса заряда, величина избыточного давления на фронте волны ΔP_{Φ} практически определяется одним только третьим членом в приведенной формуле. Для таких значений r можно написать

$$\Delta P_{\Phi} = a_3 U_1^{\frac{1}{3}} P_0^{\frac{2}{3}} \frac{m^{\frac{1}{3}}}{r}.$$

Это обстоятельство упрощает нахождение величины $a_3 U_1^{\frac{1}{3}} P_0^{\frac{2}{3}}$.

На основании всего сказанного можно написать (для тротила и других взрывчатых веществ средней мощности), что ΔP_{Φ}, кгс/см^2, равно

$$\Delta P_{\Phi} = 7\frac{m}{r^3} + 2{,}7\frac{m^{\frac{2}{3}}}{r^2} + 0{,}84\frac{m^{\frac{1}{3}}}{r}.$$

Эта формула известна под названием формулы Садовского М.А., впервые установившего ее коэффициенты.

Если вспомнить, что радиус заряда, приведенного к сферической форме, равен в рассматриваемом случае

$$r_0 = 0{,}05\sqrt[3]{m},$$

то можно написать

$$\Delta P_{\Phi} = 56000\left(\frac{r_0}{r}\right)^3 + 1080\left(\frac{r_0}{r}\right)^2 + 16{,}8\frac{r_0}{r}.$$

Другие авторы, оценивая изменение величины $\Delta P_ф$ от расстояния до точки взрыва, предлагают уравнение Садовского М.А., но с другими значениями коэффициентов. Например, Саломахин Т.Н:

$$\Delta P_Ф = 56000\left(\frac{r_0}{r}\right)^3 + 1080\left(\frac{r_0}{r}\right)^2 + 15{,}2\frac{r_0}{r}.$$

Броуд Г. считает, что

$$\frac{P_ф}{P_0} = 2 + 44200\left(\frac{r_0}{r}\right)^2, \text{ если } \frac{P_ф}{P_0} > 11;$$

$$\frac{P_ф}{P_0} = 0{,}981 + 14{,}7\frac{r_0}{r} + 496\left(\frac{r_0}{r}\right)^2 + 37000\left(\frac{r_0}{r}\right)^3, \text{ если } \frac{P_ф}{P_0} \le 11.$$

Предложенные выражения справедливы при взрыве заряда в воздухе. Отличие в коэффициентах формул, предложенных разными авторами, может быть обусловлено различными факторами, такими как структура частиц взрывчатого вещества, плотность ., химсостав (наличие примесей) и т.п. Оценка $\Delta P_Ф$, проведенная для одного и того же ВВ, приводит к разнице результатов в пределах 10…20 %. Таким образом, для расчётов величины $\Delta P_Ф$ можно пользоваться формулами Садовского, предложенными для тротила.

При необходимости определения $\Delta P_Ф$ взрывчатого вещества, отличающегося удельной энергией от тротила, можно написать

$$\Delta P_ф = 56000\frac{U_1}{U_{1_т}}\left(\frac{r_0}{r}\right)^3 + 1080\left(\frac{U_1}{U_{1_т}}\right)^{\frac{2}{3}}\left(\frac{r_0}{r}\right)^2 + 16{,}8\left(\frac{U_1}{U_{1_т}}\right)^{\frac{1}{3}}\frac{r_0}{r}.$$

Здесь U_1 – удельная энергия взрывчатого вещества, при взрыве которого определяется $\Delta P_Ф$ и $U_{1т}$ – удельная энергия тротила.

Можно также написать

$$\Delta P_{ф} = 7\frac{U_1}{U_{1_т}}\frac{m}{r^3} + 2{,}7\left(\frac{U_1}{U_{1_т}}\right)^{\frac{2}{3}}\frac{m^{\frac{2}{3}}}{r^2} + 0{,}86\left(\frac{U_1}{U_{1_т}}\right)^{\frac{1}{3}}\frac{m^{\frac{1}{3}}}{r}$$

Если взрыв происходит не в воздухе, а в каком-либо другом газе с иным давлением P_{01} при нормальных условиях, то можно написать

$$\Delta P_{ф} = 7\frac{U_1}{U_{1_т}}\frac{m}{r^3} + 2{,}7\left(\frac{U_1}{U_{1_т}}\right)^{\frac{2}{3}}\left(\frac{P_{0_1}}{P_0}\right)^{\frac{1}{3}}\frac{m^{\frac{2}{3}}}{r^2} + 0{,}84\left(\frac{U_1}{U_{1_т}}\right)^{\frac{1}{3}}\left(\frac{P_{0_1}}{P_0}\right)^{\frac{2}{3}}\frac{m^{\frac{1}{3}}}{r}.$$

Величина P_{0_1} для различных сред не всегда известна. Поэтому можно воспользоваться для замены этой величины известной в газовой динамике формулой для скорости звука

$$c_1 = \sqrt{k_1\frac{P_{0_1}}{\rho_1}}.$$

Здесь ρ_1– плотность соответствующей среды, а величина k_1 соответствует величине k в формуле Ландау и Станюковича, связывающей давление и объем:

$$\frac{P_1}{P_2} = \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^k.$$

Тогда

$$P_{0_1} = \frac{\rho_1}{k_1}c_1^2.$$

При таких условиях

$$\Delta P_{ф} = 7\frac{U_1}{U_{1_т}}\frac{m}{r^3} + 2{,}7\left(\frac{U_1}{U_{1_т}}\right)^{\frac{2}{3}}\left(\frac{\rho_1 c_1^2}{k_1 P_0}\right)^{\frac{1}{3}}\frac{m^{\frac{2}{3}}}{r^2} + 0{,}84\left(\frac{U_1}{U_{1_т}}\right)^{\frac{1}{3}}\left(\frac{\rho_1 c_1^2}{k_1 P_0}\right)^{\frac{2}{3}}\frac{m^{\frac{1}{3}}}{r}.$$

Эти формулы справедливы при взрыве заряда, окруженного со всех сторон воздухом. Если заряд взрывается на поверхности грунта, то волна распространяется не в полной сфере, а только в полусфере (рис. 5.5).

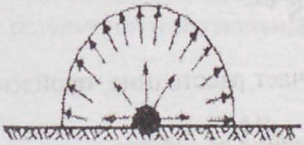

Рис. 5.5. Схема полусферической ударной волны

В результате этого объем воздуха, захватываемого ударной волной, уменьшается вдвое. В этом случае получается такое усиление $\Delta P_ф$, которое равняется усилению при взрыве заряда весом вдвое большим. Поэтому для расчета ударной волны, возникающей при взрыве заряда, лежащего на земле (или находящегося вблизи земной поверхности), необходимо в формулы расчета $\Delta P_ф$ подставить вместо величины q удвоенную величину 2q.

В результате этого формула Садовского изменится следующим образом:

$$\Delta P_ф = 14\frac{q}{r^3} + 4{,}3\frac{q^{\frac{2}{3}}}{r^2} + 1{,}1\frac{q^{\frac{1}{3}}}{r}.$$

Описанный способ расчета избыточного давления на фронте ударной волны может быть применен не только тогда, когда заряд взрывается в воздухе или на поверхности земли, но и в других условиях.

Рассматривая такой важный для практики случай, как взрыв в штольне или туннеле, необходимо учитывать два варианта. Во-первых, штольня может продолжаться в обе стороны от места взрыва, тогда воздушная ударная волна идет в обе стороны от места взрыва. Во-вторых, взрыв может произойти в туннеле штольни. Тогда волна идет только в одну сторону и соответственно усиливается.

При взрыве на земной поверхности площадь фронта ударной волны уменьшается вдвое по сравнению с тем случаем, когда взрыв происходит в воздухе. Вследствие этого происходит усиление волны. Поэтому, чтобы учесть это, необходимо расчетный вес заряда увеличить во столько раз (по сравнению с действительным весом его), во сколько раз площадь фронта ударной волны в рассматриваемых ус-

ловиях меньше площади поверхности соответствующего шара.

Если имеется двустороннее распространение ударной волны в штольне с поперечным сечением S, то расчетное значение веса заряда будет равно

$$m' = m\frac{4\pi r^2}{2S} = 2\pi\frac{r^2}{S}m.$$

Здесь r, как и в предыдущих расчетах, означает расстояние, пройденное ударной волной от центра взрыва.

Подставляя в формулу Садовского значение m' вместо m получим

$$\Delta P_{\Phi} = 44\frac{m}{Sr} + 9{,}2\left(\frac{m}{Sr}\right)^{\frac{2}{3}} + 1{,}46\left(\frac{m}{Sr}\right)^{\frac{1}{3}}.$$

Если взрыв происходит в тупиковой штольне, то расчетное значение веса заряда удваивается, и формула для расчета избыточного давления получает вид

$$\Delta P_{\Phi} = 88\frac{m}{Sr} + 14{,}6\left(\frac{m}{Sr}\right)^{\frac{2}{3}} + 1{,}81\left(\frac{m}{Sr}\right)^{\frac{1}{3}}.$$

Такую же формулу можно применить для определения избыточного давления на фронте воздушной волны достаточно длинного линейного заряда. В этом случае действие волны на расстоянии r от заряда длиной L при условии, что r меньше L, в основном распределяется по боковой поверхности цилиндра, имеющей площадь $2\pi rL$.

В соответствии с этим расчетную величину веса заряда необходимо определить по формуле

$$m' = m\frac{4\pi r^2}{2\pi rL} = 2\frac{r}{L}m.$$

Подставляя эту величину вместо m в формулу Садовского, получаем

$$\Delta P_{\Phi} = 14\frac{m}{Lr^2} + 4{,}3\left(\frac{m}{Lr^2}\right)^{\frac{2}{3}} + 1{,}1\left(\frac{m}{Lr^2}\right)^{\frac{1}{3}}.$$

Если удлиненный заряд расположен на земной поверхности, то происходит, помимо уже введенного перерасчета, еще удвоение q. В результате этого получается

$$\Delta P_{\phi} = 28\frac{m}{Lr^2} + 6{,}9\left(\frac{m}{Lr^2}\right)^{\frac{2}{3}} + 1{,}3\left(\frac{m}{Lr^2}\right)^{\frac{1}{3}}.$$

Воздушная ударная волна, встречая какую-либо преграду, отражается от нее. При этом давление увеличивается. Если от прочных, неподвижных преград отражаются сравнительно слабые волны, у которых ΔP_{ϕ} меньше P_0, то давление при отражении примерно удваивается. Если волны более сильные, то избыточное давление в отраженной волне возрастает более чем в 2 раза. Теоретический расчет дает следующую величину избыточного давления на фронте отраженной волны:

$$\Delta P_{отр} = \Delta P_{\phi}\left(2 + \frac{6}{1 + 7\frac{P_0}{\Delta P_{\phi}}}\right).$$

Величина, добавляемая к коэффициенту 2 тем больше, чем меньше отношение $\frac{P_0}{\Delta P_{\phi}}$, т. е. чем сильнее ударная волна.

Если ΔP_{ϕ} очень велико по сравнению с P_0, то при отражении сильной воздушной волны от массивной, неподвижной преграды давление на ее фронте может возрасти в 8 раз.

Приведенный способ расчета $\Delta P_{отр}$ можно применить на практике при условии, что направление движения волны до отражения отклоняется не более чем на 45° от перпендикуляра, построенного на отражающей поверхности. Если отклонение значительнее, то расчет $\Delta P_{отр}$ становится сложным. Здесь нет возможности его рассмотреть, можно отметить лишь, что при углах между направлением волны и

перпендикуляром к отражающей поверхности, превосходящих 60°, давление в отраженной волне снижается и приближается к $\Delta P_ф$, если указанный угол увеличивается до 90°.

Другой важной характеристикой является скорость ударной волны.

Ударная воздушная волна распространяется со скоростью, которая превосходит скорость звука тем больше, чем значительнее избыточное давление на фронте ее. Расчеты, основанные на гидродинамической теории, дают формулу для определения ее скорости

$$V_y = c\sqrt{1+0{,}83\frac{\Delta P_ф}{P_0}}.$$

Здесь с – скорость звука в воздухе. Она зависит от температуры воздуха θ:

$$c = 331\left(1+\frac{\theta}{546}\right),$$

(*c* выражено в м/с, а θ в градусах Цельсия).

Из приведенной для расчета V_y формулы следует, что при распространении ударной волны от заряда к тому или иному месту скорость фронта волны непрерывно уменьшается и постепенно приближается к скорости звука. Это обусловлено тем, что давление на фронте волны непрерывно уменьшается по мере ее удаления от места взрыва, что затрудняет расчеты времени t, которое необходимо волне, чтобы пройти то или иное расстояние r.

Приближенный расчет этого времени с некоторым преувеличением результата (по сравнению с истинным значением t) можно получить, если определить избыточное давление на середине участка, проходимого ударной волной, рассчитать по этому избыточному давлению скорость фронта волны V_y и, деля путь волны на эту скорость, вычислить время t.

$$t = \frac{r}{V_y}.$$

Значительный интерес для практики представляет скорость воздуха в ударной волне. Очевидно, что давление в ударной волне зависит от времени.

Если ударная волна сравнительно слабая, то падение давления происходит практически по прямолинейному графику. Длившаяся некоторое время зона сжатия сменяется обычно более продолжительной зоной разрежения (рис. 5.6). Общий удельный импульс от положительного избыточного давления сменяется импульсом «подсоса», т. е. не отталкивается, а притягивается к месту взрыва. Обычно импульс подсоса несколько больше, чем импульс сжатия.

Это наглядно видно, например, когда ударная волна взрыва выбивает стекля. Очень часто выбитые стекла падают не внутрь помещения, а вылетают наружу, навстречу ударной волне.

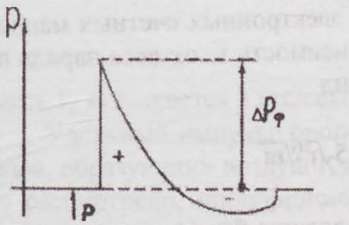

Рис. 5.6. График изменения давления со временем при прохождении воздушной ударной волны

Воздух, через который проходит ударная волна, движется в зоне сжатия в ту же сторону, куда идет волна, а в зоне подсоса в противоположную сторону.

Скорость движения воздуха в м/с наибольшая непосредственно за фронтом волны и равна

$$U_ф = \frac{\Delta P_ф \cdot 10^4}{V_у \cdot \rho_0},$$

где ρ_0 – плотность невозмущенного воздуха,

$$U_ф = 8 \cdot 10^4 \frac{\Delta P_Ф}{V_у}.$$

Ранее отмечалось, что скорость фронта ударной волны с увеличением расстояния приближается к скорости звука. Для приближенного расчёта можно считать, что $V_у \approx 400$ м/с.

$$U_ф \approx 200 \Delta P_ф.$$

Если избыточное давление составляет 0,3…0,5 кгс/см^2, то скорость воздуха за фронтом будет составлять 60…100 м/с, что соответствует скорости ветра при сильнейшем урагане.

Естественно, что при таком давлении и такой скорости воздуха за фронтом волны ударные волны мощных взрывов могут разрушать капитальные здания и тяжело травмировать людей.

Важнейшими характеристиками ударной волны является ее время действия и импульс. Время действия положительного избыточного давления представляет собой важную практическую характеристику ударной волны, потому что именно это давление вызывает основные разрушения.

На основе опытов и расчетов на электронных счетных машинах оказалось возможным установить зависимость t_+ от веса заряда m и расстояния r. Эта зависимость имеет вид

$$t_+ = 0{,}0015\sqrt{r}\sqrt[6]{m}\,.$$

Здесь, как и в других формулах, r должно быть выражено в м, а т в кг; время t_+ выражается в с.

С некоторым приближением можно написать

$$t_+ = \frac{r}{2c}\sqrt[6]{\frac{m}{r^3}}\,.$$

Здесь с – скорость звука. Величина $\frac{r}{c}$ приближенно равна времени, в течение которого ударная волна идет от места взрыва к месту, где определяется время действия ее избыточного давления. Величина $\sqrt[6]{\frac{m}{r^3}}$ приблизительно равна единице, поскольку корень высокой степени должен сравнительно мало отличаться от единицы. Так, при изменении $\frac{m}{r^3}$ в десять раз $\sqrt[6]{\frac{m}{r^3}}$ изменяется всего на 29 %.

Отсюда следует, что приближенно время действия избыточного давления вдвое меньше времени движения волны от места взрыва до данной точки.

При сравнительно небольших значениях времени t_+ разруше-

ния, производимые воздушной ударной волной, определяются удельным импульсом избыточного давления I_1.

Эта величина может быть получена из графика зависимости давления от времени в воздушной ударной волне. Удельный импульс численно равен площади, которая ограничена кривой давления в зависимости от времени, и горизонтальной линией, соответствующей давлению в невозмущенном воздухе. Наблюдения и расчеты для взрывчатых веществ нормальной мощности дают зависимость удельного импульса от массы тротила и расстояния

$$I_T = 40\frac{m^{\frac{2}{3}}}{r}.$$

Здесь I_T выражается в кгс/сек/м^2, m – в кг и r в м.

Удельный импульс пропорционален скорости разлета взрывных газов, образующих воздушную ударную волну. Эта скорость, как было рассмотрено, пропорциональна квадратному корню из удельной энергии взрыва U_1. Поэтому можно написать, что

$$I_T = 40\frac{m^{\frac{2}{3}}}{r}\sqrt{\frac{U_1}{U_{1_T}}}.$$

Здесь U_1 – удельная энергия взрывчатого вещества, взрыв которого произвел удельным импульс I_T; U_{1T} – удельная энергия тротила, равная, как указывалось, примерно 400000 кгс·м/кг.

Приведенные формулы для расчета I_T относятся к взрыву заряда в воздухе. Если заряд взрывается в иных условиях, то необходимо ввести поправки, исходя из тех же соображений, какие были учтены при расчетах избыточного давления. Например, если заряд расположен на поверхности земли, то расчетное значение веса заряда должно быть удвоено. Поэтому для взрывчатых веществ нормальной мощности

$$I_T = 63\frac{m^{\frac{2}{3}}}{r}.$$

Коэффициент в правой части этой формулы получен путем умножения: $40 \cdot 2^{\frac{2}{3}} = 63$.

Если взрыв происходит в штольне без тупика, то расчетная величина веса заряда будет

$$m\frac{4\pi r^2}{2S} = 2\pi\frac{r^2}{S}m.$$

Поэтому

$$I_T = 136\left(\frac{m}{S}\right)^{\frac{2}{3}}\sqrt[3]{r}.$$

Эта формула может вызвать недоумение. Ведь из нее следует, что удельный импульс положительного избыточного давления при удалении от места взрыва не только не уменьшается, но даже увеличивается. Между тем опыт показывает, что в штольнях действие взрыва уменьшается при увеличении расстояния от места взрыва.

Это противоречие объясняется следующим образом. При движении воздушной ударной волны вдоль штольни все время увеличивается масса воздуха, передающая энергию взрыва, в то время как площадь, на которую может подействовать эта масса, остается неизменной. Импульс зависит от массы, несущей энергию. Поэтому при увеличении расстояния удельный импульс взрыва, безусловно, должен увеличиваться. Однако при этом увеличивается также и время действия импульса.

Если расчетное значение веса заряда для взрыва в штольне, равное $2\pi\frac{r^2}{S}m$, подставить и формулу для определения времени то получится

$$t_+ = 0{,}92\frac{r}{c}\sqrt[6]{\frac{m}{rS}}.$$

Эта формула показывает, что время t_+ при взрыве в штольне заметно больше, чем при взрыве заряда в воздухе.

Соответствующие расчеты показывают, что

$$\frac{t_{+\text{в штольне}}}{t_{+\text{в воздухе}}} = 1{,}358 r^{\frac{1}{3}} S^{-\frac{1}{6}}.$$

При взрыве в штольне сечением 2×2 м (S = 4 м^2) на расстоянии 10 м от места взрыва время действия избыточного давления в 2,3 раза больше, чем в свободном пространстве.

Если расстояние от места взрыва увеличивается до 100 м, то эта величина возрастает в 5 раз.

При очень длительном импульсе определяющее значение, как указывалось, имеет избыточное давление на фронте волны, которое при увеличении расстояния уменьшается также и при взрыве в штольне. Этим обусловлено то, что при взрывах в штольнях, шахтах, туннелях действие взрыва на очень больших расстояниях все же затухает.

Весьма опасны в штольнях и шахтах взрывы смеси воздуха с горючими газами, выделяющимися нередко из горной породы (метаном), а также взрывы смеси воздуха с угольной пылью. В таких случаях ударная волна первоначального взрыва может перерасти в детонационную волну, способную идти неограниченно далеко по подземным коммуникациям и наносить огромный ущерб.

Приведенные здесь расчеты являются приближенными, в частности, потому, что не учитывались потери энергии при движении волны вдоль неровных стенок подземной выработки. Если стенки массивны и очень гладки (бетонированный туннель), то эти потери невелики и при приближенном расчете ими можно пренебречь. Однако в большинстве случаев потери становятся значительными, что приводит к уменьшению расчетного веса заряда.

Удельный импульс линейного заряда весом q и длиной L при условии, что L больше r можно определить, используя расчетное значение веса заряда, равное $2\frac{r}{L}m$.

Подставляя эту величину в формулу для удельного импульса при взрыве заряда нормальной мощности, получаем

$$I = \frac{63}{\sqrt[3]{r}}\left(\frac{m}{L}\right)^{\frac{2}{3}}\sqrt{\frac{U}{U_т}}.$$

Если линейный заряд находится на поверхности земли, расчетное значение веса заряда, удваивается. В этом случае

$$I = \frac{100}{\sqrt[3]{r}}\left(\frac{m}{L}\right)^{\frac{2}{3}}\sqrt{\frac{U}{U_T}}.$$

При непосредственном контакте заряда ВВ с преградой суммарный импульс, переданный преграде за время разлета продуктов взрыва, может быть представлен в виде

$$I = \sqrt{2U\mu m},$$

где U – теплота (энергия) взрыва, m – масса взрывчатого вещества, μ – коэффициент, учитывающий геометрию заряда.

Для цилиндрических зарядов высотой h, диаметром *b* и в форме параллелепипеда со стороной основания b

$$\mu = 1 - 2\frac{h}{b} + \frac{4}{3}\frac{h^2}{b^2}, \quad \text{если } \frac{b}{h} \geq 2,$$

$$\mu = \frac{b}{6h}, \quad \text{если } \frac{b}{h} \leq 2.$$

Коэффициент μ в зависимости от геометрии заряда представлен в таблице 5.1.

Таблица 5.1

Величина	Заряд					
	Полусферический	цилиндрический			плоский	полуцилиндрический удлиненный
		$\frac{b}{h}=1$	$\frac{b}{h}=2$	$\frac{b}{h}=4$		
μ	0,5	0,166	0,333	0,600	1,0	0,63

В случае плоского заряда тротила массой m величина импульса будет составлять U =92,1 т.

Результаты оценки механического действия взрыва в воздухе представлены в виде краткой сводки:

I. Избыточное давление на фронте ударной волны при взрыве в воздухе:

1) взрыв над поверхностью земли

$$\Delta P_{ф} = 7\frac{m}{r^3}\left(\frac{U}{U_т}\right) + 2{,}7\frac{m}{r^2}^{\frac{2}{3}}\left(\frac{U}{U_т}\right)^{\frac{2}{3}} + 0{,}84\frac{m}{r}^{\frac{1}{3}}\left(\frac{U}{U_T}\right)^{\frac{1}{3}},$$

где U – удельная энергия взрывчатого вещества для которого определяется $\Delta P_ф$; U_T – удельная энергия тротила;

2)взрыв заряда на поверхности земли

$$\Delta P_{ф} = 14\frac{m}{r^3}\left(\frac{U}{U_т}\right) + 4{,}3\frac{m}{r^2}^{\frac{2}{3}}\left(\frac{U}{U_т}\right)^{\frac{2}{3}} + 1{,}06\frac{m}{r}^{\frac{1}{3}}\left(\frac{U}{U_т}\right)^{\frac{1}{3}};$$

3)взрыв заряда в штольне неограниченной длины и сечением *S*,м

$$\Delta P_{ф} = 44\frac{m}{Sr}\left(\frac{U}{U_т}\right) + 9{,}2\left(\frac{m}{Sr}\right)^{\frac{2}{3}}\left(\frac{U}{U_т}\right)^{\frac{2}{3}} + 1{,}46\left(\frac{m}{Sr}\right)^{\frac{1}{3}}\left(\frac{U}{U_т}\right)^{\frac{1}{3}};$$

4) взрыв заряда в тупике штольни

$$\Delta P_{ф} = 88\frac{m}{Sr}\left(\frac{U}{U_т}\right) + 14{,}6\left(\frac{m}{Sr}\right)^{\frac{2}{3}}\left(\frac{U}{U_т}\right)^{\frac{2}{3}} + 1{,}81\left(\frac{m}{Sr}\right)^{\frac{1}{3}}\left(\frac{U}{U_т}\right)^{\frac{1}{3}};$$

5) взрыв линейного заряда длиной *L* в воздухе (*L*>*r*)

$$\Delta P_{ф} = 14\frac{m}{Lr^2}\left(\frac{U}{U_т}\right) + 4{,}3\left(\frac{m}{Lr^2}\right)^{\frac{2}{3}}\left(\frac{U}{U_т}\right)^{\frac{2}{3}} + 1{,}06\left(\frac{m}{Lr^2}\right)^{\frac{1}{3}}\left(\frac{U}{U_т}\right)^{\frac{1}{3}};$$

6) взрыв линейного заряда на поверхности земли

$$\Delta P_{ф} = 28\frac{m}{Lr^2}\left(\frac{U}{U_т}\right) + 6{,}9\left(\frac{m}{Lr^2}\right)^{\frac{2}{3}}\left(\frac{U}{U_т}\right)^{\frac{2}{3}} + 1{,}34\left(\frac{m}{Lr^2}\right)^{\frac{1}{3}}\left(\frac{U}{U_т}\right)^{\frac{1}{3}}.$$

2. Удельный импульс избыточного давления ударной волны, кг·с:

1) заряд ВВ находится на преграде

$$I = 92{,}1m\left(\frac{U}{U_T}\right)^{\frac{1}{2}};$$

2) заряд находится на расстоянии $r < 12r_0$ ($r_0 = 0{,}053\sqrt{m}$)

$$I = 25\left(\frac{U}{U_T}\right)^{\frac{1}{2}}\frac{m}{r^2}\cos\alpha;$$

где α – угол отклонения направления движения газов от перпендикуляра к плоскости;

3) заряд расположен на расстоянии $r > 12r_0$:

- взрыв в воздухе

$$I = 40\frac{m^{\frac{2}{3}}}{r}\left(\frac{U}{U_T}\right)^{\frac{1}{2}};$$

- взрыв в штольне неограниченной длины с сечением S, м^2,

$$I = 136\left(\frac{m}{S}\right)^{\frac{2}{3}}r^{\frac{1}{3}}\left(\frac{U}{U_T}\right)^{\frac{1}{2}};$$

- взрыв заряда на поверхности земли

$$I = 63\frac{m^{\frac{2}{3}}}{r}\left(\frac{U}{U_T}\right)^{\frac{1}{2}};$$

- взрыв заряда в тупике штольни

$$I = 216\left(\frac{m}{S}\right)^{\frac{2}{3}}r^{\frac{1}{3}}\left(\frac{U}{U_T}\right)^{\frac{1}{2}};$$

- взрыв линейного заряда длиной L в воздухе (L >r)

$$I = 63\left(\frac{m}{L}\right)^{\frac{2}{3}} r^{-\frac{1}{3}} \left(\frac{U}{U_т}\right)^{\frac{1}{2}};$$

- взрыв линейного заряда на поверхности земли (L>r)

$$I = 100\left(\frac{m}{L}\right)^{\frac{2}{3}} r^{-\frac{1}{3}} \left(\frac{U}{U_т}\right)^{\frac{1}{2}};$$

- скорость воздуха за фронтом ударной волны

$$U_ф = 200\Delta P_ф.$$

5.2. Механическое действие взрыва в воде

При взрыве в воде, так же как и при взрыве в воздухе или другой среде, происходит детонация заряда. В результате образуются взрывные газы, которые в первый момент имеют давления во много раз превышающие давление окружающей среды. Образуется и также распространяется ударная волна. Однако взрыв в воде обладает и некоторыми особенностями.

Первая из них является следствием более высокой плотности воды. При взрыве в воздухе начальная плотность продуктов взрыва примерно в 1000 раз больше плотности окружающей среды, а потом по мере расширения области, занятой продуктами взрыва, очень быстро падает, асимптотически приближаясь к плотности окружающей среды. В отличие от этого при взрыве в воде плотность продуктов взрыва уже в начале процесса примерно равна плотности окружающей среды, а по мере их расширения становится значительно меньше ее. В связи с этим область, занятая продуктами взрыва, называемая газовым пузырем, ведет себя в воде иначе, чем в воздухе. Ее расширение идет значительно медленнее, поэтому параметры продуктов взрыва очень быстро выравниваются.

С другой стороны, из-за большого различия в плотностях продуктов взрыва и окружающей среды на газовый пузырь в воде дей-

ствует значительная архимедова сила, поэтому при рассмотрении пульсации газового пузыря нельзя пренебрегать ускорением силы тяжести, что можно было свободно делать при исследовании взрыва в воздухе.

Вторая особенность взрыва в воде является следствием малой сжимаемости воды. Из уравнений динамических адиабат воды

$$\frac{\mathbf{P}-\mathbf{P}_{0_1}}{\mathbf{P}_{0_1}}=\mathbf{B}\left[\left(\frac{\rho}{\rho_0}\right)^{\mathbf{n}}-1\right], \qquad (5.1.)$$

$$\mathbf{B}=\frac{\rho_0\mathbf{C}_3^2}{\mathbf{n}\mathbf{P}_0}=2945,$$

где $\mathbf{P}_{0_1}, \rho_0$, C_3 – давление, плотность и скорость звука на поверхности водоема; n = 7,15 при $\frac{\mathbf{P}}{\mathbf{P}_0}<3\cdot10^4$, n =6,29 при $\frac{\mathbf{P}}{\mathbf{P}_0}>3\cdot10^4$. Можно легко установить по формуле (5.1), что даже при давлении $\frac{\mathbf{P}}{\mathbf{P}_0}=3\cdot10^4$, которое наблюдается при взрыве сферических зарядов тротила нормальной плотности $\rho_0 = 1560$ кг/м^3 на относительном расстоянии $\frac{\mathbf{r}}{\mathbf{r}_0}=2$, то плотность воды можно определить по формуле

$$\frac{\rho}{\rho_0}=\left(\frac{3\cdot10^4}{2945}+1\right)^{1/7,15}=11,18^{1/7,15}=1,40$$

увеличивается не более, чем на 40 % по сравнению с первоначальным. По этой причине плотность воды на поверхности газового пузыря (по мере его расширения и падения давления в продуктах взрыва) очень быстро убывает до начального значения ρ_i, так что, не внося большой погрешности, можно считать, что на контактной поверхности плотность воды

$$\rho.(r_*, t) = \rho.$$

По этой же причине жидкость в центральной части возмущен-

ной области может нести в себе преимущественно кинетическую энергию. Вследствие этого слои жидкости, непосредственно примыкающие к газовому пузырю, двигаются по инерции до тех пор, пока не будет погашена кинетическая энергия этих слоев. Так как давление в продуктах взрыва из-за значительного их расширения по прошествии некоторого времени становится меньше давления не только в периферийных слоях возмущенной области, но и в окружающей ее среде, то жидкость начинает обратное движение к центру. Газовый пузырь сжимается, а достигнув некоторого минимального объема и накопив некоторый запас внутренней энергии за счет кинетической энергии жидкости, снова расширяться и т. д. Наряду с этим, как уже указывалось, он под действием архимедовой силы поднимается вверх. Так, пульсируя с убывающей во времени амплитудой и поднимаясь вверх, газовый пузырь постепенно приходит в равновесное состояние. Если глубина погружения заряда не велика, но все же достаточна, чтобы воспрепятствовать непосредственному прорыву продуктов взрыва в атмосферу, то после трех – четырех пульсаций газовый пузырь достигает свободной поверхности и рассеивается в атмосфере. При значительной глубине погружения заряда может наблюдаться до десяти и более пульсаций.

Ударная волна в йоде может рассматриваться исходя из тех же предпосылок, которые положены в основу изучения воздушных ударных волн. Можно считать, что вода представляет собой газ, чрезвычайно сильно сжатый молекулярными силами, т. е. с очень сильным притяжением молекул воды друг к другу. Это притяжение настолько уплотняет воду, как если бы она была сжата внешним давлением, примерно в 10000 раз превосходящим нормальное давление атмосферного воздуха. Так как различные внешние нагрузки почти не могут изменить плотность воды, то обычно она считается несжимаемой. Но при взрыве некоторое сжатие ее все же возникает, и это сопровождается появлением в воде весьма высоких давлений за фронтом водяной ударной волны.

Еще недавно расчет избыточного давления в водяной ударной волне считался очень сложным и недоступным. Однако в настоящее время оказалось возможным найти такие способы расчета, которые вполне доступны любому взрывнику, знакомому со средней математикой. Здесь мы и приводим этот расчет.

Обобщенная формула Садовского для различных сред, внутри которых действует давление P_{01}, отличное от нормального давления

воздуха P_0, может быть представлено в виде

$$\Delta P_{ф} = 7\frac{m}{r^3}\left(\frac{U}{U_т}\right) + 2{,}7\frac{m^{\frac{2}{3}}}{r^2}\left(\frac{U}{U_т}\right)^{\frac{2}{3}}\left(\frac{P_{0_1}}{P_0}\right)^{\frac{1}{3}} + 0{,}84\frac{m^{\frac{1}{3}}}{r}\left(\frac{U}{U_т}\right)^{\frac{1}{3}}\left(\frac{P_{0_1}}{P_0}\right)^{\frac{2}{3}}.$$

Поскольку можно считать, что давление воды в 10000 раз больше давления воздуха, то

$$\Delta P_{ф} = 7\frac{m}{r^3}\left(\frac{U}{U_т}\right) + 58\frac{m^{\frac{2}{3}}}{r^2}\left(\frac{U}{U_т}\right)^{\frac{2}{3}} + 391\frac{m^{\frac{1}{3}}}{r}\left(\frac{U}{U_т}\right)^{\frac{1}{3}}.$$

Однако расчеты, производимые таким путем, сложны, в то время как на практике оказывается вполне достаточным применять и более простые способы, хотя они и не вполне точны при очень больших или очень малых давлениях, не имеющих практического значения.

Учитывая сказанное, на практике обычно применяют для расчета давления на фронте ударной волны в воде формулу американского ученого Коула

$$\Delta P_{ф} = 533\left(\frac{m^{\frac{1}{3}}}{r}\right)^{1{,}13}.$$

Здесь, как и в предыдущих случаях, избыточное давление измерено в килограммах на квадратный сантиметр, вес заряда m – в килограммах и расстояние r – в метрах.

Салжановским предложены следующие формулы для расчета избыточного давления на фронте ударной волны:

- для сферического заряда

$$\frac{\Delta P_{ф}}{P_0} = 14700\left(\frac{r_0}{r}\right)^{1{,}13};$$

- для удлиненных цилиндрических зарядов

$$\frac{\Delta P_{ф}}{P_0} = 15700\left(\frac{r_0}{r}\right)^{0,71}.$$

Данные выражения справедливы на расстоянии $\frac{r}{r_0} > 10$.

Расчет $\Delta P_ф$, проведенный по трем разным формулам, дает практически одинаковые результаты в интервале r =0,50…40 м.

В табл. 5.2 дано сопоставление значений $\Delta P_ф$, вычисленных по приведенным формулам для заряда тротила весом в 1 кг.

Таблица 5.2

Расстояние, м	0,53	1,06	2,12	4,24	8,48	16,96	38,92
$\Delta P_ф$ по обобщенной формуле Садовского	995	428	200	96	43	23,2	10,1
$\Delta P_ф$ по формуле Коула	1095	502	229	105	48	22	8,5
$\Delta P_ф$ по формуле Салжановского	1089	497	227	104	47,5	21,7	8,5

При рассмотрении действия взрыва в воде чрезвычайно большое значение имеет свободная поверхность.

Когда фронт водяной ударной волны доходит до свободной поверхности, дальнейшее распространение волны сжатия становится невозможным.

Вода, находящаяся под действием огромного давления за фронтом ударной волны, получает возможность свободно двигаться в сторону слабо сопротивляющегося воздуха. При этом происходит следующее. Сначала наблюдается небольшой всплеск за счет быстрого расширения сильно сжатого поверхностного слоя воды. Далее начинается общий подъем всей массы воды, находящейся между ее поверхностью и газовым пузырем. В результате этого возникает мощный столб воды («султан»), поднимающийся на значительную высоту над местом взрыва.

Энергия, необходимая для образования этого столба, передается

воде в основном за счет расширения взрывных газов, находящихся в газовом пузыре. Энергия сжатия быстро переходит в энергию движения воды и избыточное давление в воде и в газовом пузыре весьма быстро исчезает.

В глубь воды от ее свободной поверхности движется фронт волны разрежения, за которым избыточное давление практически сразу исчезает.

Волна разрежения является волной, отраженной от поверхности воды. В отличие от условий отражения ударных волн от массивных несжимаемых преград, когда давление повышается, при отражении волн от свободной поверхности избыточное давление исчезает вовсе.

Фронт волны разрежения представляет собой шаровую поверхность, центр которой находится в воздухе, над поверхностью воды на высоте w. Эта высота равна глубине, на которой расположен центр взрыва, под поверхностью воды.

При таких условиях зона повышенного давления в воде имеет в вертикальном разрезе форму полумесяца. Она ограничена снизу фронтом волны сжатия, я сверху фронтом волны разрежения. Оба фронта пересекаются на поверхности волны (рис. 5.7). Значительное влияние свободная поверхность оказывает на движение воды при взрыве. Если на пути движения фронта ударной волны находится преграда, за которой находится воздух, то механическое действие волны будет в 2…6 раз интенсивнее, нежели в случае, когда за преградой находится вода.

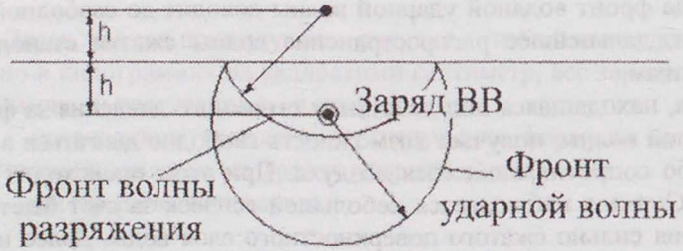

Рис. 5.7. Схема сжатия и разряжения при взрыве в воде

При действии взрыва в воде после прохождения фронта ударной вол-

ны вода получает сначала движение по направлению радиусов, исходящих от центра взрыва. Скорости движения воды обратно пропорциональны квадрату расстояния от центра взрыва. Энергия взрыва распределяется между энергией движения воды, энергией израсходованной на сжатие воды и оставшейся во взрывных газах. Общая энергия движения воды будет равна bUm. В данном случае b означает долю энергии, переданной на движение, m – масса заряда, U – энергия ВВ.

$$bUm = \frac{2\pi}{3}\rho_0 r_0^3 V_0^2,$$

где ρ_0– плотность воды, r_0 – радиус заряда, V_0 – скорость воды в начальный момент времени,

$$V_0 = \sqrt{\frac{3bmU}{2\pi\rho_0 r_0^3}}.$$

На любом расстоянии от места взрыва скорость движения воды будет определяться выражением

$$V_r = V_0\left(\frac{r_0}{r}\right)^2.$$

После установления в воде такого движения через воду проходит волна разряжения. Эта волна создает дополнительные скорости в воде, поскольку вода устремляется в сторону свободной поверхности по направлению к центру, из которого как бы исходит волна разряжения (рис. 5.7). Центр находится над поверхностью воды на высоте, равной глубине, на которой находится заряд ВВ. При возникновении новых скоростей старые скорости сохраняются. В каждой точке обе стороны складываются по закону параллелограмма скоростей.

5.3. Механическое действие взрыва в твёрдой среде

Твёрдая среда – это неоднородная многокомпонентная среда, основу которой составляют твёрдые частицы, соединённые в единую массу связями, обычно менее прочными, чем сами частицы, а в качестве других компонентов выступают газы и жидкости (в частности,

воздух и вода), заполняющие промежутки между твёрдыми частицами. Таковы естественные горные породы и различные искусственные материалы: цемент, бетон, кирпич, железобетон, пластмассы и т.п.

Основу горных пород составляют минеральные частицы различных размеров и разнообразных форм. По типу связей между частицами и размерами частиц горные породы принято делить на скальные и полускальные, несвязанные (сыпучие) и связанные грунты. К скальным породам относят горные породы, частицы которых соединены в монолит жёсткими связями, по прочности приближающиеся к прочности самих частиц. К полускальным относят сильно трещиноватые скальные породы. Несвязанные (или сыпучие) грунты состоят из отдельных зёрен (различимых невооружённым глазом), связанных силами трения и частично силами капиллярного притяжения воды.

Связанные грунты состоят из мельчайших минеральных частиц, соединённых электростатическими связями в агрегаты, которые, в свою очередь, соединяются в единую массу эластичными водноколлоидными плёнками или связями, образуемыми при высыхании грунта выпадающими из раствора солями.

Учесть в теоретических исследованиях всё многообразие особенностей горных пород и искусственных материалов не представляется возможным. Поэтому при изучении взрывов в таких средах прибегают к упрощённым моделям среды.

При взрыве в твёрдой среде происходит её возмущение, наблюдается упругая и остаточная деформация, меняется плотность и т.д. Типичная зависимость относительной деформации грунта от величины давления представлена на рис. 5.8. При небольших деформациях эта зависимость линейна и скорость распространения малых возмущений

$$a_1 = \left(\frac{\mathbf{k}\mathbf{P}_0}{\rho_1}\right)^{\frac{1}{2}},$$

где $\mathbf{k} = \mathbf{tg}\,\alpha_1$; $\mathbf{P}_0, \rho_1$ – исходные значения давления, плотности. С увеличением относительной деформации угол наклона убывает, соответственно убывает и скорость распространения возмущений.

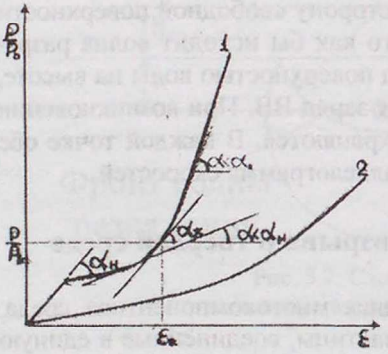

Рис.5.8 Зависимость $P-\varepsilon$ для грунта(1) и газа(2).

В газовой же среде скорость звука непрерывно увеличивается, так как тангенс угла наклона кривой (кривая 2, рис.5.8.) возрастает с увеличением относительной деформации. Такое качественное различие в поведении грунта и газовой среды приводит к тому, что в них по-разному распространяются возмущения. В газовой среде более интенсивное возмущение распространяется с большей скоростью, чем менее интенсивное: оно, возникнув даже с некоторым запозданием, через известный промежуток времени нагоняет слабое возмущение, сливается с ним, образуя единый фронт. По этой причине в газовой среде волна сжатия неизбежно преобразуется в ударную волну с крутым фронтом.

В грунте скорость распространения возмущения убывает с увеличением деформации, поэтому более сильные возмущения отстают от более слабых, и волна сжатия с течением времени растягивается.

По мере увеличения относительной деформации (рис.5.8) тангенс угла наклона кривой начинает снова возрастать, при этом увеличивается и скорость распространения возмущения. При некотором значении $\varepsilon=\varepsilon_*$ угол наклона кривой становится равным начальному углу ($\alpha=\alpha_*=\alpha_н$). Выше точки ($\varepsilon_*, \mathbf{P}_*$) грунт ведёт себя подобно газу, т.е. при интенсивности возмущения $\mathbf{P}>\mathbf{P}_*$ волна сжатия вырождается в ударную волну.

В силу этих особенностей грунта при взрыве в нём зарядов конденсированных взрывчатых веществ давление продуктов взрыва которых во много раз превосходит критическое значение $\mathbf{P}_*$, в очаге взрыва возникает ударная волна с характерным для неё круглым фронтом. По мере распространения этой волны интенсивность её убывает. Когда давление на фронте волны оказывается сначала равным, а потом меньше $\mathbf{P}_*$, слабые возмущения, всегда имеющиеся в полном спектре, обгоняют фронт; крутизна волны фронта убывает, пространственная протяжённость возмущения растёт, ударная волна вырождается в волну сжатия.

Относительное расстояние, на котором происходит вырождение ударной волны в волну сжатия, зависит только от свойств грунта, формы заряда и начальных параметров продуктов взрыва, и поэтому может быть определено формулой

$$\frac{r_s}{r_0} = R_s,$$

где R_s – величина, зависящая от свойств грунта и взрывчатого вещества и от формы заряда.

Ориентировочные значения R_s для сосредоточенных зарядов тротила и некоторых грунтов могут быть определены (табл.5.3). В этой же таблице приведены примерные значения критического давления P_*.

Таблица 5.3

Грунт	R_S	P_*/P_1
Песчаный :		
ρ = 1520 ... 1600 кг/м^3; ω = 8 ...10 %	11 ... 17	10 ... 15
ρ = 1500 ... 1550 кг/м^3; ω = 2 ... 4 %	9,5 ... 15	4 ... 6
ρ = 1450 ... 1500 кг/м^3; ω = 3 ... 16 %	11 ... 15	4 ... 6
Суглинок	11 ... 17	10 ... 20
Лессовидный	13 ... 15	8 ... 10

Представляет интерес проанализировать влияние взрыва на твёрдое тело в ближней зоне ($\mathbf{r_*/r_0 < R_s}$).

Под действием развивающегося в ударной волне чрезвычайно большого давления, во много раз превышающего динамический предел прочности, частицы скелета грунта переупаковываются и под действием расширяющихся продуктов взрыва вытесняются в радиальном направлении. В результате необратимых деформаций грунта в нём образуется полость, носящая название *камуфлетной пустоты* или *котла*. Иногда её называют *зоной вытеснения.*

В настоящее время теоретическое решение задачи о взрыве в грунте возможно только для ограниченного перечня грунтов. Поэтому характеристики возмущённой области приходится определять по данным экспериментальных исследований с привлечением результатов качественного анализа. Это в полной мере относится и к размерам полости. Наиболее общим методом качественного анализа является метод размерностей, в основе которого лежит π-теорема. Применим этот метод для оценки размеров плоскости, образуемой при взрыве в грунте. Рассмотрим сначала случай, когда в грунте взрывается сферический заряд. Из условий симметрии следует, что если грунт, ок-

ружающий заряд, однороден, то плоскость будет сферической и для её характеристики достаточно ввести один линейный размер – радиус полости $\mathbf{r_п}$.

Из простых логических соображений ясно, что размеры полости должны зависеть от массы и размеров заряда, удельной энергии взрывчатого вещества, а также от свойств грунта. Масса сферического заряда однозначно определяется радиусом заряда r_0 и плотностью вещества в нём ρ_0. Энергия взрыва при этом определяется, если дополнительно задать удельную энергию взрывчатого превращения $\mathbf{U_0}$. При контактном размещении заряда в грунте на механическое действие взрыва заметное влияние будет оказывать скорость детонации $\mathbf{V_д}$.

В качестве характеристик среды учтём её прочностную характеристику – предел прочности на сжатие $\sigma_в$, инерционные свойства – плотность ρ_1, способность к уплотнению – коэффициент пористости $\alpha_з$, упругие свойства – модуль упругости E и начальные условия, в которых она находится, давление P_1. Так как процесс образования полости происходит в поле тяжести, то в общем случае в число определяющих параметров следует ввести также ускорение силы тяжести $\mathbf{g}$.

В систему определяющих параметров входит 10 размерных величин и одна безразмерная. Среди размерных величин можно выбрать три величины (например, $\mathbf{r_0}, \rho_0$ и $\mathbf{U_0}$), которые имеют независимые размерности. Согласно основной теореме теории размерности (π-теореме), всякая физическая связь между n размерными величинами, из которых k величин имеют независимые размерности, может быть сведена к равноценной связи между n-k независимыми безразмерными параметрами. В нашем случае n=10, k=3 следовательно, безразмерных параметров должно быть n-k=10-3=7. В качестве таких параметров могут быть следующие:

$$\frac{\mathbf{r_п}}{\mathbf{r_0}}, \frac{\rho_1}{\rho_0}, \frac{\sigma_в}{\mathbf{P_0}}, \frac{\mathbf{E}}{\mathbf{P_0}}, \frac{\mathbf{U_0}}{\mathbf{V_д^2}}, \frac{\mathbf{P_0}}{\rho_1 \mathbf{U_0}}, \frac{\mathbf{g r_0}}{\mathbf{U_0}}.$$

Легко видеть, что условия π-теоремы выполнены, количество параметров равно семи и все независимы. К полученной системе необходимо добавить безразмерный параметр $\alpha_з$ – коэффициент по-

ристости, вошедший в основную систему. Разрешив полученную систему параметров относительно первого параметра, получим, согласно π-теореме основную зависимость

$$\frac{r_п}{r_0}=\Phi\left(\frac{\rho_1}{\rho_0},\frac{\sigma_в}{P_0},\frac{E}{P_0},\frac{Q_0}{D_0^2},\frac{P_1}{\rho_1 Q_0},\frac{gr_0}{Q_0},\alpha_з\right), \qquad (5.2)$$

которая в самом общем виде и определяет размеры полости при взрыве сферического заряда в грунте. Если зафиксировать свойства взрывчатого вещества и свойства среды, то зависимость (5.2) можно существенно упростить. В самом деле, для фиксированной совокупности среды и взрывчатого вещества все параметры, стоящие под знаком функции, кроме одного $\frac{gr_0}{Q_0}$, принимают фиксированное значение. Поэтому для данного случая общая зависимость (5.2) может быть переписана так:

$$\frac{r_п}{r_0}=f\left(\frac{gr_0}{Q_0}\right).$$

Если размеры полости не велики, то влиянием силы тяжести можно пренебречь, положив g=0. Тогда

$$\frac{r_п}{r_0}=f\left(\frac{gr_0}{Q_0}\right)=m_c=const\ ;$$

$$\frac{r_п}{r_0}=m_c;$$

$$r_п=m_c r_0=m_c 0{,}052\sqrt[3]{mk_T},$$

где m– масса взрывчатого вещества; $k_т$– тротиловый эквивалент.

В общем случае согласно зависимости (5.2):

$$m_c=\varphi\left(\frac{\rho_1}{\rho_0},\frac{\sigma_в}{P_0},\frac{E}{P_0},\frac{Q_0}{D_0^2},\frac{P_0}{\rho_1 Q_0},\frac{gr_0}{Q_0},\alpha_з\right), \qquad (5.3)$$

т.е. коэффициент m_c зависит от свойств разрушаемой среды и свойств взрывчатого вещества. Его значение устанавливаются по результатам экспериментальных исследований. Для некоторых грунтов ориентировочные значения этого коэффициента применительно к тротилу приведены в табл. 5.4.

При взрыве в грунте удлинённого цилиндрического заряда значительной длины полость в средней части (там, где не сказывается влияние концов заряда) имеет форму правильного цилиндра. Если обозначить радиус этого цилиндра через $r_п$, а радиус цилиндрического заряда через r_0, то в рамках принятых допущений общая зависимость (5.2), полученная для сферического заряда, будет верна и для удлинённого заряда; конечно, вид функции для сосредоточенного заряда будет отличаться от функции для удлинённого заряда. По этой же причине общая зависимость (5.2) в случае фиксированной среды и взрывчатого вещества для удлинённых зарядов переходит в формулу

$$\frac{r_п}{r_0} = m_у$$

аналогично формуле (5.3). Численные значения коэффициента m_c, m_y приведены в табл.5.4.

Таблица 5.4

Грунт	m_c	m_y
Глина весьма пластичная	11,2…12,9	37,6…46,0
Глина черная юрская	8,5…9,8	24,8…30,8
Глина моренная	7,0…9,40	18,5…28,8
Глина желтобурая жирная	7,0…9,50	18,5…20,6
Глина темнокрасная жирная	6,42...7,3	16,3…19,7
Мергель мягкий сильно трещиноватый	6,54…7,58	16,7…20,8
Мергель мягкий трещиноватый	5,38…6,42	12,5…15,3
Глина песчаная; суглинок тяжелый	4,77…6,65	10,4…17,1
Мел мягкий; известняк-ракушечник	3,80…4,65	7,4…10,0
Мергель; доломит, известняк мягкий сильно трещиноватый	1,78…2,90	2,38…5,65

Установлено что, $\mathbf{m}_{\text{у}} = \mathbf{m}_{\text{с}}^{\frac{3}{2}}$. Оценим, какую массу тротила следует взять для того, чтобы в чёрной глине образовать полость с радиусом 2 метра. Согласно табл. 5.4, $\mathbf{m}_{\text{с}}$=7,0...9,40. Для расчёта используем меньшее значение $\mathbf{r}_0 = \frac{2}{7{,}0} \approx 0{,}285$ м.

Расход тротила $\mathbf{m} = \frac{3}{4}\pi \mathbf{r}_0^3 \rho = \frac{3}{4} \cdot 3{,}14 \cdot 0{,}285^3 \cdot 1600 \approx 87{,}225$ кг.

С увеличением расстояния от центра взрыва интенсивность ударной волны убывает. На некотором расстоянии напряжения в волне становятся равными пределу прочности грунта на сжатие, а потом и меньшими. Начиная с данного расстояния, и далее раздавливание грунта прекращается, и структура грунта не меняется. Однако до некоторых расстояний ещё значительны радиальные смещения частиц грунта, которые приводят к образованию тангенциальных напряжений, превышающих предел прочности на разрыв. В результате возникают радиальные трещины (рис. 5.9).

Зону раздавливания и зону разрыва горной породы можно объединить в единую зону разрушения. Нашей ближайшей задачей и будет установление зависимости размеров такой зоны от характеристик взрыва и грунта. В кольцевой области, непосредственно примыкающей к полости, грунт уплотняется, однако даже наиболее пористые грунты на границе полости не увеличивают своей плотности более чем на 10 % против первоначального значения.

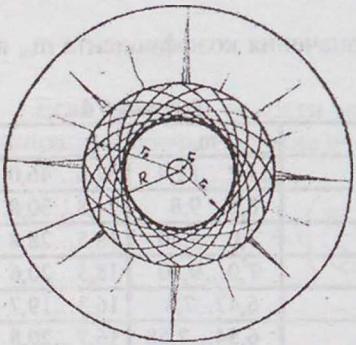

Рис. 5.9. Радиальные трещины

Как уже отмечалось, с увеличением расстояния от центра взрыва относительная деформация грунта быстро уменьшается. Это обстоятельство позволяет во многих задачах пренебрегать изменением плотности грунта и считать его в первом приближении неуплотняемой средой.

Такая модель грунта, в частности, может быть применена и при определённой внешней границы зоны разрушения грунта.

Радиус зоны разрушения R зависит от теплоты взрыва **U**, удельной работы разрушения $\mathbf{A_m}$, массы взрывчатого вещества.

$$\mathbf{R} = \sqrt[3]{\frac{\mathbf{m}}{\mathbf{A}}}, \qquad (5.5)$$

$$\mathbf{A} = \frac{4}{3}\pi\rho_0\left(\frac{3\mathbf{A_m}}{\rho_0\mathbf{U}}\right)^{\frac{3}{4}}.$$

Величина **A** есть увеличенный в $\frac{3}{4}\pi$ раз удельный расход взрывчатого вещества на 1м^3 разрушенной породы при взрыве в условиях неограниченной среды. Для некоторых материалов величина **A** представлена в таблице 5.5.

Таблица 5.5

Материал	A,кг/м^3
Супесок	0,5 ...0,65
Суглинок	0,58 ... 0,71
Глина	0,70 ... 0,76
Песчаник	0,76 ...0,98
Гранит	1,05 ...1,35
Кварцит	1,05 ... 1,20
Базалт	1,05 ... 1,35
Бетон	1,50 ... 1,80
Кирпичная кладка	0,75 ... 1,20
Железобетон (выбивание бетона)	5,0

Формула 5.5 определяет заряд, необходимый для получения зоны разрушения радиуса R в неограниченной среде. Если же взрыв производится вблизи свободной поверхности, то это взрыв на выброс с образованием воронки. Теории образования воронок и теории движения породы при взрывах на выброс посвящено значительное количество исследований выполненных Станюковичем Е.П., Беляевым А.Ф., Покровским Г.И. и многими другими учёными. Взрыв на выброс можно разделить на два этапа: сначала выбрасываемая порода приводится в движение взрывными газами, затем куски породы разлетаются в стороны, преодолевая сопротивление воздуха, и падают под действием силы тяжести. Первый этап выброса можно представить сле-

дующим образом. При взрыве в породе образуется взрывная волна, которая движется весьма быстро. Эта волна достигает поверхности породы и, отражаясь от неё, превращается из волны, сжимающей породу, в волну разряжения. Волна разряжения вызывает растяжения, растрескивание и разрушение породы. Далее начинается постепенное нарастание смещения больших масс породы, т.е. проявляется механическая работа расширяющихся взрывных газов.

Приближённо можно предположить, что порода движется первоначально прямолинейно по радиусам, расходящимся из центра взрыва. Наиболее быстро должна двигаться та часть твёрдого вещества, которая перемещается по кратчайшей линии между центром взрыва и свободной поверхностью (линия наименьшего сопротивления). Необходимо также учесть, что вблизи заряда образуется зона раздробленной и сжатой породы. Эта зона принимает на себя значительную часть энергии взрыва и, расширяясь, действует на наружные слои породы. При сравнительно незначительных первоначальных затратах энергии образуется твёрдая масса, воздействующая на грунт и превосходящая массу взрывных газов. В результате удельный импульс, передаваемый породе, возрастает в несколько десятков раз по сравнению с импульсом, который передают взрывные газы в воздухе. Скорость первоначального выброса породы должна зависеть от направления. Она должна быть тем меньше, чем большая масса породы находится в пределах определённого телесного угла.

$$\mathbf{V_{ср} = B\frac{m}{\rho_п R^3}},$$

где B – постоянная, пропорциональная удельной энергии взрывчатого вещества; **R** – расстояние от центра тяжести массы породы, заключённой в определённом телесном угле; $\rho_п$ – плотность породы.

При движении внутренняя часть основания конуса, заключённого в телесном угле, будет раздавливаться. В результате этого площадь основания будет расти, а высота уменьшаться. Скорость движения внутренней поверхности будет выше, а внешней ниже $V_{ср}$. Полость, заполненная взрывными газами, будет расширяться в сторону свободной поверхности, превращаясь в удлинённый эллипсоид.

Второй этап выброса отсчитывается от времени, когда в породе распределятся скорости движения и передача энергии взрыва породе

прекратится. Кроме того, давление газа в полости может быть меньше атмосферного, поскольку полость расширяется, и, соответственно, приведённая в движение порода должна будет затратить часть своей энергии на преодоление избыточного давления. Газовая полость, продолжает расширяться в сторону свободной поверхности, внешняя поверхность породы выпучивается. Разрушенная порода образует как бы растягивающуюся оболочку газового пузыря. Эта оболочка состоит из множества летящих осколков, расположенных пока ещё близко друг к другу.

В этот момент начинается перестройка геометрии газового пузыря. В верхней его части летящие куски рассосредотачиваются, и воздух начинает прорываться внутрь пузыря, изменяя несколько направление движения породы. В результате образуется как бы основание оболочки газового пузыря.

Вокруг места взрыва остаётся узкая, но очень высокая кольцевая волна, которая получила название базисной. Данная волна окружает снизу высокий султан выбрасываемой породы (рис.5.10).

Нижняя часть поверхности пузыря постепенно превращается в донную часть воронки выброса.

В дальнейшем базисная волна опрокидывается аналогично водной волне, набегающей на берег. В результате чего образуется кольцевой навал раздробленного твёрдого тела (породы) вокруг воронки.

Часть твёрдого вещества, поднятого взрывом вверх, при обратном падении образует на дне воронки сравнительно тонкий слой раздробленной породы. За кольцевым навалом простирается зона, где падают отдельные куски породы (примерно 4…5 радиусов воронки), которые попали при выбросе в струи, образовавшиеся позади крупных и тяжёлых кусков породы.

Рассмотренный механизм образования воронки при взрыве, даёт основание для связи энергии заряда, глубины его заложения h и механических свойств твёрдого тела.

$$\mathbf{m = KMh^3},$$

где m – масса заряда тротила; $K = \frac{A_m}{U_0}$ – удельный расход взрывчатого вещества; A_m – удельная работа разрушения; U_0 – энергия взрыва.

$$M = \frac{2\left(3n^2+4\right)^2}{(n+97)},$$

где $n = \frac{r}{h}$ – показатель действия взрыва; $r_в$ – радиус воронки.

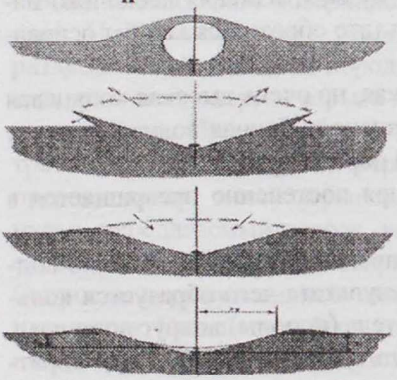

Рис. 5.10 Стадии образования воронки выброса.

Глубина воронки $h_в$ может быть выражена через радиус воронки $r_В$:

$$h_в = kr_в,$$

где k – коэффициент, зависящий от свойств грунта (для сухого песка k =0,4…0,5); для влажного песка k= 0,45…0,55; для глины k = 0,5 …0,7. В скальных породах при n =1,75…2 глубина воронки равна глубине заложения заряда ($h_в$=h), а при n=2,5…3 превышает её (но не более чем на 10…20 %).

Наибольшая высота гребня вала вокруг воронки $t_в$ и наибольшая дальность развала породы $l_в$ может быть оценена по формулам

$$t_в = 0{,}15r,$$
$$l_в = (5–7)\ r_в\ .$$

Расчёт удлинённых зарядов, расположенных параллельно свободной поверхности на глубине h, можно осуществлять по формуле

$$m_у = k_у M_у h^3,$$

где $m_у = \frac{m}{l_0}$; $k_у = 0{,}92k$, l_0 – длина заряда в метрах; k– удельный расход сосредоточенного заряда; $k_у$ – удельный расход удлинённого заряда,

$$m_у = \frac{7{,}5\left(n^2+1\right)^{\frac{8}{7}}}{n^{\frac{2}{7}}+15{,}6}.$$

При взрыве на поверхности грунта сосредоточенного заряда зависимость массы заряда тротила, удельного расхода заряда и радиуса воронки может быть получена на основании формулы

$$m = \frac{2k(3n^2+4)^2}{n+97}h^3 = \frac{18k(1+\frac{4}{3n^2})^2}{1+\frac{97}{n}}r_в^3 \text{ при } n \to \infty, m = 18kr_в^3.$$

С учётом влияния силы тяжести грунта масса заряда, необходимая для образования воронки с определёнными размерами, в связных грунтах можно оценить:

$$m = k(1+0{,}02h)Mh^3.$$

Представляет интерес оценить изменение радиуса воронки при изменении глубины заложения заряда одинаковой массы. Допустим m = 300 кг тротила h =0, 5, 10, 15, 20, 50 метров, грунт – суглинок (k =1,1кг/м^3). Для проведения расчёта $r_в$ при h =0 воспользуемся формулой $r_в = \left(\frac{m}{18k}\right)^{\frac{1}{3}} = \left(\frac{300}{18 \cdot 1{,}1}\right)^{\frac{1}{3}} = 2{,}74$ м. Расчёт $r_в$ при h>0 следует проводить по формуле $M = \frac{m}{k(1+0{,}02h)h^3}$. На основании табл. 5.6 и величины M определим показатель действия взрыва n и соответственно $r_в = nh$. Результаты расчетов приведены в табл. 5.7.

Таблица 5.6

H,м	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
M	0,33	267,4	32,8	9,53	3,49	1,98	1,12	0,69	0,46	0,31	0,27
N	0	6,1	3,47	2,43	1,82	1,4	1,07	0,78	0,5	0,0	0,0
$r_в$	2,47	6,1	6,94	7,29	7,28	7,0	6,42	5,46	4,0	0	0

Таким образом, как показали расчёты, радиус воронки изменяется по кривой с максимумом.

По радиусу воронки можно оценить массу взрывчатого вещества в тротиловом эквиваленте, механическое действие взрыва в грунте на расстояниях .

Возмущенная область, возникающая при взрыве в грунте, только на расстояниях $\frac{r}{r_0} < R_s$ ограничена фронтом ударной волны.

Таблица 5.7

n	M	M_y	n	M	M_y	n	M	M_y
n = 0,00….1,50			n = 1,50 …4,00			n = 4,00…25,0		
0,00	0,330	0,469	1,50	2,346	1,725	4,00	53,54	11,19
0,10	0,334	0,470	1,60	2,767	1,912	4,40	76,01	13,71
0,20	0,349	0,483	1,70	3,253	2,113	4,80	105,0	16,54
0,30	0,374	0,507	1,80	3,119	2,329	5.20	141,8	19,68
0,40	0,412	0,543	1,90	4,798	2,560	5,60	187,5	23,14
0,50	0,463	0,589	2,00	4,991	2,806	6,00	243,6	26,92
0,60	0,529	0,647	2,10	5,952	3,344	7,00	438,5	37,81
0,70	0,612	0,717	2,30	10,40	3,945	8,00	731,17	50,83
0,80	0,717	0,798	2,50	13,42	4,611	9,00	1151	66,05
0,90	0,845	0,892	2,60	17,10	5,343	10,0	1727	83,54
1,00	1,000	1,000	2,80	21,53	6,141	11,0	2494	103,3
1,10	1,187	1,116	3,00	26,81	7,009	13,0	4748	150,2
1,20	1,410	1,248	3,30	33,05	7,946	15,0	8233	206,9
1,30	1,674	1,393	3,50	40,34	8,953	17	13309	273,9
1,40	1,984	1,552	3,70	48,82	10,03	19	20372	351,5
1,50	2,346	1,725	4,00	53,54	11,19	25	57879	650,5

На больших расстояниях внешняя граница возмущённой области представляет собой кольцевую область, в которой деформации и напряжения нарастают постепенно до некоторой максимальной вели-

чины, а потом плавно убывают. В связи с этим нагрузка в фиксированной точке пространства меняется с течением времени не так, как это наблюдается в воздухе и в воде при прохождении ударной волны (рис.5.11). По этой причине для характеристики волны сжатия в грунте приходится вводить дополнительные показатели. Если для характеристики механического действия ударной волны достаточно было указать давление на фронте, закон спада давления и продолжительность его действия, то для волны сжатия надо указать максимальное значение давления P_m, продолжительность нарастания $\tau_н$ давления от начального до P_m, продолжительность спада τ_c давления от p_m до начального, законы нарастания и спада давления. Кроме того, для волны сжатия надо указать скорость распространения головы волны сжатия a и скорость движения максимума давления $v_д$.

Очевидно, что $\tau_+ = \tau_н + \tau_c$, поэтому удельный импульс волны сжатия определяется общей формулой

$$i = \int_0^{\tau_+} (p - p_1)dt = \int_0^{\tau_н} (p - p_1)dt + \int_{\tau_н}^{\tau_н + \tau_c} (p - p_c)dt \quad ,$$

справедливой и для ударной волны, с той лишь разницей, что закон изменения давления с течением времени для волны сжатия будет иным, чем для ударной волны.

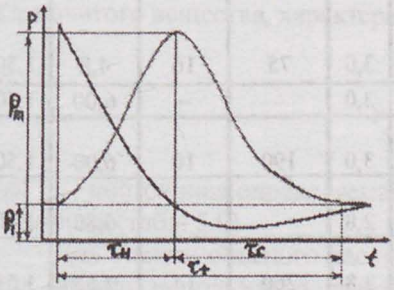

Рис.5.11. Сравнение профилей ударной волны и волны сжатия

Теоретических данных о параметрах волн сжатия в грунте недостаточно, поэтому в настоящее время расчёт параметров осуществляют на основании эмпирических зависимостей, полученных экспериментально:

$$p_m = p_0 \Pi \left(\frac{r_0}{r}\right)^{\alpha};$$

$$\tau_+ = r_0 \left(a + b\frac{r}{r_0}\right);$$

$$i = r_0 L \left(\frac{r_0}{r}\right)^{\gamma},$$

где a, П, α, b, L γ – постоянные, определяемые природой грунта (табл. 5.8.)

Для некоторых грунтов эти постоянные определены (таблица по данным Г.М.Ляхова). Скорость распространения максимума давления

$$v_д = 335.4\left(\frac{r_0}{r}\right)^{0.4} \quad \text{(влажность лёсса 19…21 %)},$$

$$v_д = 500\left(\frac{r_0}{r}\right)^{0.66} \quad \text{(влажность лёсса 22…25 %)}.$$

Таблица 5.8

Грунт и его состояние	П	α	a, мс/м	b, мс/м	$L \cdot 10^{-6}$, Н·с·м^3	γ
Водонасыщенный песок с содержанием защемленного воздуха: 0,0	13000	1,05	–	–	3,2	1,05
$4 \cdot 10^{-2}$	68200	2,5	–	–	4,5	1,40
Песчаный грунт при плотности в кг/м^3 и влажности в %: ρ = 1250… 1600; ω = 8 …10	61000	3,0	75	16	4,8	1,50
ρ = 1450…1550; ω = 10…12	65000	3,0	–	–	6,00	1,50
Суглинок при плотности ρ = 1600…1650 кг/м^3	65000	3,0	190	10	6,00	1,50
Глина при плотности ρ = 1700…1750 кг/м^3	65500	2,8	–	–	6,80	1,40
Лесс при плотности ρ = 1340…1380 кг/м^3	16400	2,8	260	14	7,55	1,65

При распространении волны сжатия в массиве грунта возникают упругие колебания. Период колебаний грунта $T_г$ ориентировочно можно определить на основании формулы

$$T_г = T_0 \lg \frac{r}{r_0},$$

где T_0 – постоянная, характеризующая свойства грунта. Для торфяников, плывунов $T_0 = 0{,}12$ с; для суглинков, глины $T_0 = 0{,}06...0{,}09$ с; для скальных пород $T_0 = 0{,}01...0{,}03$ с.

Возникновение упругих колебаний обусловлено движением в твёрдом теле от центра взрыва волн сжатия и разряжения (растяжения). Действие взрыва на фундамент сооружения в конечном итоге будет полностью определяться удельным импульсом, передаваемым волной.

$$i = \lambda \rho_m \tau = \lambda \Pi \left(\frac{r_0}{r} \right)^{\alpha} \rho_0 \tau,$$

где λ– коэффициент, $\lambda < 1$; τ – время сжатия ,

$$\tau = \frac{r_1}{a_1} - \frac{r}{a_1}.$$

Радиус опасного сейсмического давления взрыва r_c зависит от массы взрывчатого вещества, характера грунта и характера сооружения.

$$r_c = K_c (m)^{\frac{1}{3}},$$

где K_c– постоянная, определяемая природой грунтов и характером сооружения (табл. 5.9)

Для оценки опасного расстояния от центра взрыва до сооружения можно использовать выражение предложенное Саломахиным Г.И.:

$$r_c = Б \left(\frac{r_0}{h} \right)^{\frac{\alpha}{\alpha+1}},$$

где Б – постоянная, зависящая от природы грунта. Для плывуна и торфа Б =131…470; для грунтов средней прочности Б = 56…112; для скалы Б = 5…11.

Таблица 5.9

С, 10^3, кг	Водонасыщенный грунт		Грунты средней прочности		Скала	
	$T_c < 0,4$ с	$T_c > 0,4$ с	$T_c < 0,4$ с	$T_c > 0,4$ с	$T_c < 0,4$ с	$T_c > 0,4$ с
10	25	7	6	3	–	–
50	25	7	–	–	–	–
100	25	7	10	3	1	–
500	25	7	–	–	1	–
1000	25	7	13	4	1	0,5
5000	25	7	–	–	1	0,5
10000	25	7	15	5	1,5	0,5

5.4. Взрыв газопаровоздушных и пылевоздушных систем в закрытом помещении и открытом пространстве

Взрывы газопаровоздушных смесей (ГПВС) могут происходить как в замкнутом пространстве, так и в открытом, в то время как взрывы пылевоздушных смесей (ПВС) происходят только в закрытых помещениях.

Взрывы ГПШС в помещениях (зданиях) возникают в результате утечки газа из элементов оборудования. Взрывы ГПВС могут также возникать в емкостях (резервуарах, газгольдерах, цистернах, грузовых отсеках танкеров) для хранения и транспортировки взрыво- и пожароопасных веществ. Взрывы смесей горючих газов с воздухом с тяжелыми последствиями происходят на шахтах.

Взрывы ГПВС в неограниченном пространстве могут происходить в результате разрушений газопроводов, разлива сжиженного горючего газа, его испарения с переходом в детонацию. Известно большое число аварийных взрывов резервуаров с большим количеством сжиженного горючего газа, сопровождаемых образованием осколочного поля.

В зависимости от давления Р и температуры Т вещество может находиться в различных агрегатных состояниях рис.5.12 . Для сжи-

жения газов их охлаждают и сжимают до параметров, соответствующих жидкой фазе, которые в общем случае отличаются от давления и температуры окружающей среды. Участок кривой *AB* представляет условия равновесия двух фаз — жидкости и пара (линия насыщенного пара). Тройная точка А фиксирует одновременное равновесие трех фаз. В критической точке *B* пропадает граница между жидкостью и паром: при $\mathbf{T \geq T_{кр}}$ вещество находится в газообразном состоянии независимо от давления. Резкой границы между паром и газом провести нельзя. Поэтому оба эти состояния для краткости обозначаются как ГПВС. Сжиженные углеводородные газы, хлор, аммиак, фреоны, находящиеся под сверхатмосферным давлением при температуре выше или равной температуре окружающей среды в сосудах, резервуарах и другом технологическом оборудовании, являются перегретыми жидкостями.

В теплоизолированных ("изотермических") сосудах и резервуарах при отрицательных температурах хранят сжиженные газы (метан, азот, кислород), которые называют криогенными веществами. Критическая температура таких веществ значительно ниже, чем температура окружающей атмосферы.

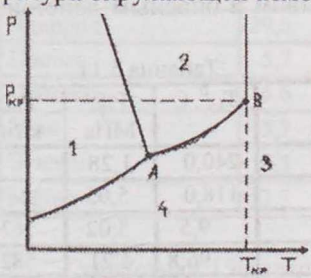

Рис. 5.12. Диаграмма состояния вещества: А-тройная точка; В-критическая точка; 1-твёрдая фаза; 2-жидкость; 3-газ; 4-пар

Вещества другой характерной группы (пропан, бутан, аммиак, хлор) хранят в жидком состоянии под давлением в однослойных сосудах и резервуарах при температуре окружающей среды

В.Маршал классифицировал вещества по признаку их расположения в зонах диаграммы состояния :

1-я категория – вещества с критической температурой ниже температуры среды (криогенные вещества — сжиженный природный газ (СПГ) содержащий в основном метан, азот, кислород);

2-я категория – вещества с критической температурой выше, а точкой кипения ниже, чем в окружающей среде (сжиженный нефтяной газ (СНГ), пропан, бутан, аммиак, хлор). Их особенностью является "мгновенное" (очень быстрое) испарение части жидкости при разгерметизации и охлаждение оставшейся доли до точки кипения при атмосферном давлении;

3-я категория – жидкости, у которых критическое давление выше атмосферного и точка кипения выше температуры окружающей среды (вещества, находящиеся в обычных условиях в жидком состоянии). Сюда попадают также некоторые вещества предыдущей категории, например бутан в холодную погоду и этиленоксид в жаркую;

4-я категория — вещества, содержащиеся при повышенных температурах (водяной пар в котлах, циклогексан и другие жидкости под давлением и при температуре, превышающей их точку кипения при атмосферном давлении).

При разлитии жидкостей 3-й категории их испарение зависит от свойства летучести, температуры внешней среды и скорости ветра.

В табл. 5.10 представлены критические параметры для ряда веществ.

При полном разрушении емкостей с криогенными жидкостями, веществами 2-й категории – происходит их выброс в атмосферу, вскипание с быстрым испарением и образованием облаков газопаровоздушных смесей.

Аварийное вскрытие емкостей с негорючей или горючей перегретыми жидкостями сопровождается взрывом и опасным действием осколков.

Таблица 5.11

Вещество	Т, ^{0}С кипения при давлении 0,1 МПа	$T_{кр}$ ^{0}, С	$P_{кр}$, МПа	$P_{сж}$, кг/м^3
Водород	-252,0	-240,0	1,28	–
Кислород	-183,0	-118,0	5,05	–
Этилен	-103,7	9,5	5,02	567
Пропан	- 42,17	96,8	4,21	582
Хлор	- 34,5	144,0	7,70	–
Аммиак	-33,35	132,4	11,30	682
Изобутан	-11,7	133,7	–	580
Двуокись углерода	-78,52	31,0	–	1180
Вода	+100	374,0	21,8	1000

Воспламенение облака ГПВС происходит при наличии источника зажигания. При этом возможен переход дозвукового дефлаграционного режима с ускоряющимся пламенем к детонационному сверхзвуковому.

Огненный шар без детонации возникает обычно при горении ГПВС, переобогащённой топливом, а также при горении состава, близкого к стехиометрическому.

Переходу к детонации способствуют различные препятствия на пути распространения пламени, вызывающие турбулизацию (строения, предметы, пересечённая местность).

Сферическая детонационная волна может образоваться в ГПВС от слабого энергетического источника, если размер облака превышает некоторый критический диаметр и при определённых концентрациях смеси. В табл. 5.11 представлены минимальная энергия E_{min} инициирования некоторых ГПВС, наиболее чувствительных к детонации с объемной концентрацией ω_v топлива, и минимальные диаметры облака, способного детонировать. В табл. 5.12 представлены концентрационные пределы (в объемных %) детонации и воспламенения ГПВС в неограниченном пространстве и в замкнутых объемах.

Таблица 5.11

Горючий компонент	μ, об.%	E_{min}, Дж	d_{min}, м
Ацетилен	12,5	$1{,}3\cdot10^{2}$	3,12
Водород	29,6	$4{,}2\cdot10^{6}$	109,6
Пропан	5,7	$2{,}5\cdot10^{6}$	85,8
Пропилен	6,6	$7{,}6\cdot10^{5}$	58,5
Этан	5,7	$5{,}1\cdot10^{6}$	109,6
Этилен	9,5	$1{,}2\cdot10^{5}$	31,2
Метан	12,3	$2{,}3\cdot10^{8}$	398,0

Статистика 150 аварий в России и странах СНГ показывает, что в 42,5 % случаев взрывов облаков ГПВС участвовали углеводородные газы, 15,5 % – пары легковоспламеняющихся жидкостей, 18,0 % – водород, 5,3 % – пыль органических продуктов. Аварийные взрывы конденсированных нестабильных веществ составили 12,0 %. В 30 случаях при авариях происходили выбросы значительных масс токсичных веществ: хлора – 17, аммиака – 11, оксидов углерода и азота – 2.

Из 150 крупных взрывов 84 произошло в технологической аппаратуре, 66 – в атмосфере. В 73 случаях при взрывах были серьёзные разрушения зданий, сооружений и различного оборудования промпредприятий.

Таблица 5.13

Горючий компонент	Детонация				Воспламенение	
	Неограниченное пространство		Замкнутый объем			
	Нижний	Верхний	Нижний	Верхний	Нижний	Верхний
Ацителен	–	–	4,2	50,0	2,5	80,0
Бутан	2,5	5,2	1,98	6,18	1,8	8,4
Водород	–	–	18,3	58,9	4,0	75,0
Пропан	3,0	7,0	2,57	7,37	2,1	9,5
Пропилен	3,5	8,5	3,55	10,40	2,4	11,0
Этан	4,0	9,2	2,87	12,2	3,0	12,4
Этилен	–	–	3,32	14,7	2,7	36,0
Бензол	–	–	1,6	5,55	1,3	7,9
Ксилол	–	–	–	–	1,1	6,4
Циклогексан	–	–	–	–	0,57	7,8
Метан	–	–	–	–	5,0	15,0
Аммиак	–	–	–	–	15,5	27,0

Для сшивания параметров на границе облака величина r_0 заменяется на близкое значение R_0, определяемое из условия непрерывности функции $\Delta P_m(R)$ точке $r = R_0$:

$$R_0 = 10^{\alpha}\sqrt[3]{m_T},\ \alpha = K_1 - \sqrt{K_1^2 - A},$$

$$K_1 = 1{,}09/0{,}52,\ A = 1{,}25 - \frac{\lg\frac{\Delta P_2}{P_0}}{0{,}52}.$$

Параметры ударной волны на расстояниях, превышающих начальный размер облака $r \geq r_0$, м, определим по формулам, аппроксимирующим численное решение задачи о детонации пропано-воздушной смеси (Б.Е. Гельфанд и др., 1985). Предложены универсальные зависимости максимума избыточного давления (ΔP_m, Па) и удельного импульса (I, Па·с) от расстояния до центра взрыва.

$$\lg\frac{\Delta P_m}{P_0} = 0{,}65 - 2{,}18\lg\bar{r} + 0{,}52(\lg\bar{r})^2,$$

$$\bar{r} = \frac{r}{(m_T)^{\frac{1}{3}}},$$

$$I = \bar{I}(m_T)^{\frac{1}{3}},$$

$$\lg\bar{I} = 2{,}11 - 0{,}97\lg\bar{r} + 0{,}44(\lg\bar{r})^2.$$

Эффективное время θ, с, действия фазы сжатия ударной волны с давлением, аппроксимируемым треугольником $\Delta P(t) = \Delta P_m\left(1 - \frac{t}{\theta}\right)$, определяется по формуле

$$\theta = \frac{2I}{\Delta P_m}.$$

Рассмотрим приведённые теоретические положения на примере.

Допустим произошёл взрыв облака ГПВС, образовавшегося при разрушении резервуара с $6 \cdot 10^4$ кг сжиженного пропилена (C_3H_6). Определить $V_д, \Delta P_2, I_0$, значения ΔP_m и I на расстоянии 200 метров от центра взрыва.

Объём ГПВС определяем по формуле

$$V_0 = \frac{V_\mu m_Г k}{\mu_Г \omega_{стх}},$$

где $k = 0{,}5$ $\mu_Г = 42$ г/моль.

Процентную концентрацию горючего вещества $\omega_{стх}$ определим по уравнению горения пропилена:

$$C_3H_6 + \frac{9}{2}O_2 \rightarrow 3CO_2 + 3H_2O. \qquad (5.9.)$$

Согласно уравнению (5.9.), стехиометрический состав содержит один объём пропилена и $4{,}76\frac{9}{2}$ объёмов воздуха.

$$\omega_{стх} = \frac{1 \cdot 100}{4{,}76 \cdot 4{,}5} = 4{,}67\%.$$

Плотность стехиометрического состава смеси

$$\rho_{ст} = \frac{\mu_{возд} N_{возд} + \mu_{C_3H_6} N_{C_3H_6}}{V_{возд} + V_{C_3H_6}} = 1{,}24 \text{ кг/м}^3,$$

$\gamma = 1{,}259$ (из табл. 5.12).

$$V_0 = \frac{22{,}4 \cdot 6 \cdot 10^4 \cdot 0{,}5}{42 \cdot 0{,}0467} = 3{,}426 \cdot 10^5 \text{ м}^3,$$

$$V_д = \sqrt{2(\gamma^2 - 1)U} = \sqrt{2(1{,}259^2 - 1)2{,}86 \cdot 10^6} = 1{,}83 \cdot 10^3 \text{ м/с}.$$

Определим теплоту взрыва смеси по следствию из закона Теса:

$$U_{m,стх} = \frac{(3(393)+3(241))10^6}{42+21,42\cdot 29} = 2,86\cdot 10^6\,Дж/кг;$$

$$\Delta P_2 = \frac{V_д^2 \rho_{ст}}{\gamma+1} - \rho_0 = \frac{(1,83\cdot 10^3)^2 1,24}{1,259+1} - 1,013\cdot 10^5 = 17,36\cdot 10^5\,Па.$$

Масса газового облака

$$m = \rho_{стх} V_0 = 1,24\cdot 3,426\cdot 10^5 = 4,248\cdot 10^5\,кг.$$

Тротиловый эквивалент

$$m_T = \frac{2mU_{m,стх}}{U_T} = 0,58\cdot 10^6\,кг;$$

$$A = 1,25 - \frac{\lg\frac{\Delta P_2}{P_0}}{0.52} = -1,123;$$

$$K_1 = \frac{1,09}{0,52} = 2,096;$$

$$\alpha = K_1 - \sqrt{K_1^2 + A} = 2,096 - 1,808 = 0,288;$$

$$R_0 = 10^{\alpha}\sqrt[3]{m_T} = 10^{0,288}\sqrt[3]{58\cdot 10^4} = 161,87\,м;$$

$$\overline{R}_0 = \frac{R_0}{\sqrt[3]{m_T}} = \frac{161.87}{\sqrt[3]{58\cdot 10^4}} = 1,941\,м/кг^{\frac{1}{3}}.$$

Определим значение импульса при $r \le r_0$:

$$\lg \overline{I}_0 = 2,11 - 0,97\lg\overline{R}_0 + 0,04(\lg\overline{R}_0)^2 = 2,11 - 0,28 + 0,0033 = 1,833;$$

$$\overline{I}_0 = 68,1\,Па\cdot с/кг^{\frac{1}{3}};$$

$$\mathbf{I}_0 = \bar{\mathbf{I}}_0 \sqrt[3]{\mathbf{m}_\mathbf{T}} = 68{,}1\sqrt[3]{580 \cdot 10^3} = 5{,}68 \cdot 10^3\,\mathbf{Па \cdot с}.$$

Определим параметры ударной волны на расстоянии $\mathbf{R} = 200$ м от центра взрыва.

$$\bar{\mathbf{R}} = \frac{\mathbf{R}}{\sqrt[3]{\mathbf{m}_\mathbf{T}}} = \frac{200}{\sqrt[3]{58 \cdot 10^4}} = 2{,}4\,\mathbf{м/кг^{\frac{1}{3}}};$$

$$\lg\frac{\Delta\mathbf{P}_\mathbf{m}}{\mathbf{P}_0} = 0{,}65 - 2{,}18\lg 2{,}4 + 0{,}52(\lg 2{,}4)^2 = -0{,}104;$$

$$\lg\frac{\Delta\mathbf{P}_\mathbf{m}}{\mathbf{P}_0} = 0{,}787 \quad \Delta\mathbf{P}_\mathbf{m} = 0{,}787 \cdot 1{,}013 \cdot 10^5 = 7{,}97 \cdot 10^4\,\mathbf{Па};$$

$$\lg\bar{\mathbf{I}} = 2{,}11 - 0{,}97\lg 2{,}4 + 0{,}04(\lg 2{,}4)^2 = 1{,}747;$$

$$\bar{\mathbf{I}} = 55{,}8 \quad \mathbf{I} = 55{,}8\sqrt[3]{\mathbf{m}_\mathbf{T}} = 55{,}8\sqrt[3]{58 \cdot 10^4} = 4{,}653 \cdot 10^3\,\mathbf{Па \cdot с};$$

$$\theta = \frac{2\mathbf{I}}{\Delta\mathbf{P}_\mathbf{m}} = \frac{2 \cdot 4{,}653 \cdot 10^3}{7{,}97 \cdot 10^4} 0{,}11\,\mathbf{с}.$$

Взрывы пыли (пылевоздушных смесей – аэрозолей) представляют одну из основных опасностей химических производств. Взрывы пыли происходят в ограниченном пространстве – в помещениях зданий, внутри различного оборудования, в штольнях шахт. Возможны взрывы пыли в мукомольном производстве, на зерновых элеваторах (мучная пыль), при обращении с красителями, серой, сахаром, другими порошкообразными пищевыми продуктами, при производстве пластмасс, лекарственных препаратов, на установках дробления топлива (угольная пыль), в текстильном производстве.

По данным зарубежных источников, из 1120 взрывов пылевоздушных смесей на производствах 540 произошло при работах с зерном, мукой, сахаром и другими пищевыми продуктами, 80 – с металлами, 63 – с угольной пылью на установках дробления топлива, 33 — с серой, 61 – в химической и нефтеперерабатывающей промышленности.

Взрывы пыли в основном происходят по дефлаграционному механизму (взрывное горение). Переход к детонации возможен в длинных штольнях шахт, на конвейерных линиях зернохранилищ большой протяженности из-за турбулизации пыли. Возникновение облаков аэрозолей из осевшей ранее пыли (аэрогеля), их воспламенение и взрыв возбуждаются слабым взрывом какой-либо газовоздушной смеси, например взрывом метана в шахтах.

При взрыве пыли избыточное давление ΔP в объеме V возрастает до своего максимального значения ΔP_m постепенно за некоторый промежуток времени τ. Это объясняется тем, что горение (при дефлаграционном взрыве) распространяется с дозвуковой скоростью. Давление ΔP_m зависит от большого числа факторов: концентрации и размеров частиц пыли определенного типа, химической активности вещества, влажности, начального давления (в сосудах, аппаратах, трубопроводах), объема V и наличия отверстий или предохранительных (сборных) конструкций.

Избыточное давление взрыва ΔP_m, МПа, аэрозоля в помещениях зданий определяют по формуле (ГОСТ 12.1.004-85)

$$\Delta P_m = \frac{mUP_0Z}{V\rho_0 C_P T_0 K_H},$$

где U – удельная теплота сгорания вещества, Дж/кг (табл. 5.13); m – общая масса дисперсного продукта, кг; P_0 – начальное давление в объеме, МПа; V – свободный объем (помещения, емкости), м^3; ρ_0 – плотность воздуха, кг/м^3; T_0 – температура воздуха в объеме, К; C_p – теплоемкость воздуха ($1{,}01 \cdot 10^3$ Дж/(кг·К)); $K_H \approx 3$ – коэффициент, учитывающий негерметичность помещения и неадиабатичность процесса горения; $Z \approx 0{,}5$ – доля участия дисперсного продукта во взрыве.

Таблица 5.15.

Вещество	Дисперсность L, мкм	U, МДж/кг
Полистирол	20…70	39,8
Полиэтилен	250	47,1
Метилциллюлоза	850	11,8
Полиоксадиазол	–	18,0
Пигмент зеленый (краситель)	3…10	42,9
Пигмент бордо на полиэтилене	1…20	42,9
Нафталин	100	39,9
Фталивый ангидрид	74	21,0
Уротропин	75	28,1
Адипиновая кислота	850	19,7
Сера	8,5	8,2

Величина $\mathbf{m}$ может быть подсчитана по плотности вещества ρ и объему помещения $\mathbf{m} = \rho \mathbf{V}$. Тогда для давления получим оценку

$$\Delta \mathbf{P_m} = \frac{\mathbf{mUP_0Z}}{\rho_0 \mathbf{C_P T_0 K_H}},$$

причем для герметичных помещений $K_H = 1$ и в запас расчета $Z = 1$.

Максимум скорости нарастания давления $\mathbf{P_m}$, МПа/с, (в момент времени $\mathbf{t} = \tau/2$)

$$\mathbf{P_m} = \left(\frac{\mathbf{dP}}{\mathbf{dt}}\right)_\mathbf{m} = \frac{\mathbf{a_0 P_0 K_c}}{(\lambda \sqrt[3]{\mathbf{V}})},$$

$$\tau = \mathbf{k_1},\ \Delta \mathbf{P_m} / \mathbf{P_m},\ \mathbf{k_1} = 2{,}5,$$

где $\mathbf{a_0}$ – скорость звука в воздухе, м/с, при начальном (возможно, атмосферном) давлении $\mathbf{P_0}$, МПа; K_c – константа горючей пылевой системы; λ – геометрический фактор.

На практике используют аналогичную формулу

$$\mathbf{P_m} = \mathbf{K_s}\sqrt[3]{\mathbf{V}},$$

в которой K_s — коэффициент взрывоопасности пыли, находящийся в диапазоне от 0 до 30 МПа·м$^{1/3}$/с и более. Так, для угольной пыли K_s=8,5; алюминия 5,5; органических пигментов 2,9; декстрина 2,0.

Скорость $\mathbf{P_m}$ в сосуде, аппарате с газообразной средой может быть определена также по формуле

$$\mathbf{P_m} = \frac{10\dot{\mathbf{P}}_0\mathbf{P}_0}{\sqrt[3]{\dfrac{\mathbf{V}}{\mathbf{V_*}}}},$$

где $\dot{\mathbf{P}}_0$ – характерная скорость, МПа/с, для объёма $\mathbf{V_*}$= 0,01 м^3; **B** – коэффициент степени турбулентности. При $\mathbf{V} > \mathbf{V_*}$ принимают **B**=1,5…2,0, а при наличии в сосуде рёбер или использовании проточного аппарата **B**= 2…5. Константа P_0 (по В.Водянику и др.) имеет значения: для полистирола 32, полиэтилена 25,6, алюминия 36,4, древесины 13,5, ацетилцеллюлозы 38,2, метилцеллюлозы 12,1, казеина 6,4, серы 12.5. С помощью этих данных можно оценить величину коэффициента K_s в формуле (5.10)

$$\mathbf{K_s} = 10\mathbf{B}\dot{\mathbf{P}}_0\mathbf{P}_0\sqrt[3]{\mathbf{V_*}} \qquad (5.10.)$$

Например, для полистирола, принимая B =1, $\mathbf{P_m}$=32 МПа/с, $\mathbf{P}_0$=0,1 МПа, получим $\mathbf{K_s}$=10·1·32·0,1·$\sqrt[3]{0,1}$ = 6,9, для алюминиевой пыли K_s=7,8, для древесины K_s =2,9.

В табл. 5.14 приведены данные по взрывному горению аэрозолей в закрытых объёмах с максимально возможными значениями давления ΔP_m и скорости $\dot{P}_m$, нижним НКВП и верхнем ВКВП концентрационными пределами воспламенения $\overline{\rho}$ и наименьшей температурной воспламенения $\mathbf{T_{св}}$ (по ГОСТ 12.1.1.041 – 83).

Таблица 5.14

Горючий компонент	$\bar{\rho}$, г/м^3	$T_{св}$, ^{0}C	ΔP_m, кПа	$\dot{P}_m$, МПа/с
НКВП				
Пластмассы				
смола эпоксидная	20	540	647	90,2
полистирол	25	488	720	37,0
полиэтилен	12	440	560	37,0
Металлы				
титан	60	510	371	75,0
магний	25	490	500	103,5
алюминий	10	470	660	138,0
железо карбонильное	105	310	300	14,5
железо восстановительное	66	475	250	–
ферромарганец	130	240	330	–
марганец	90	240	340	–
цинк	480	460	350	–
бронзовая пудра	1000	190	300	–
сурьма	420	330	56	–
Неорганические вещества				
фосфор красный	14	305	700	0,33
сера	17	190	460	32,4
кремний	100	790	530	8,23
бор	100	400	630	–
Органические вещества				
казеин	45	–	750	–
резиновая мука	74….79	377	550	–
люминофор зеленый	103	385	800	–
Зернопродукты				
кукуруза	–	530	400	0,7
овес	–	420	740	2,9
пшеница	–	470	930	11,2
рис, ячмень		420	740	2,9
ВКПВ				
Вещества с размерами частиц до 75 мкм (В. Маршал)				
кофе быстрорастворимый	150	490	440	3,8
пробка	35	400	670	51,8
целлюлоза	45	410	810	55,2
уголь	55	610	620	15,9

Как показывает опыт, максимальные давления наблюдаются при концентрациях, превышающих стехиометрическую. При этом в горении участвует лишь небольшая часть пылевых частиц. Данные табл. 5.14 следует рассматривать как ориентировочные, что связано также с трудностями предсказания значений реальной концентрации в помещениях из-за влияния различных случайных факторов и постоянных переходов аэрогеля в аэрозоль (взвихривание пыли) и наоборот – при оседании частиц пыли.

Подсчитаем давление для аэрозоля алюминия. Принимая U=30.13 МДж/кг, $\overline{\rho}=45\cdot30^{-3}$ кг/м³, T_0=293 К, получим

$$\Delta P=(45\cdot10^{-3}\cdot30{,}13\cdot10^{6}\cdot10^{5}\cdot1)/(1{,}22\cdot1{,}01\cdot10^{3}\cdot293\cdot1)=0{,}376\cdot10^{6}.$$

При прочностных расчётах конструкций (без проёмов) под воздействием дефлаграционного взрыва аэрозоля нагрузку можно схематизировать как возрастающую линейно со средней скоростью $P_{ср}=\frac{P_m}{K_t}$ до максимума, затем остающейся постоянной $\Delta P(t)=\Delta P_m$ ($t>\tau\cong\Delta P_m/P_m$). Время нарастания давления для пылей находится в пределах $\tau\approx0{,}04...0{,}7$ с, обычно возрастая с концентрацией. При таких значениях τ конструкции соответственно с частотами ниже 25,0 и 1,5 Гц окажутся под действием квазистатических нагрузок (с коэффициентом динамичности $K_д\approx1$).

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Дайте характеристику механического действие взрыва в воздухе.
2. Каковы существенные особенности влияние ряда факторов (геометрии заряда, его расположениz и т.д.) на избыточное давление и удельный импульс?
3. Опишите механизм действия взрыва в воде.
4. Опишите механизм действия взрыва в твердой среде.
5. От чего зависит взрыв газопаровоздушных систем и пылевоздушных систем в закрытых помещениях и открытом пространстве?

ГЛАВА 6. ПРОМЫШЛЕННЫЕ ВЗРЫВЧАТЫЕ ВЕЩЕСТВА

6.1. Классификация промышленных взрывчатых веществ

Промышленные взрывчатые вещества (ВВ) отличаются по агрегатному состоянию, химическому составу, чувствительности к внешним воздействиям, кислородному балансу и др. свойствам.

По своему физическому состоянию ВВ могут быть:

1) твердыми соединениями или смесями (тротил, гексоген, аммиачная селитра + тротил и т.п.);
2) смесями жидких и твердых веществ (аммиачная селитра + жидкое горючее, жидкие нитроэфиры + аммиачная селитра и т.п.);
3) газовыми смесями (метан + воздух, ацетилен + кислород и т.п.).
4) смесями твердых или жидких веществ с газами (угольная, древесная или другая органическая пыль, брызги (пары) керосина, бензина с воздухом и т.п.).
5) жидкими веществами (нитроглицерин, нитрогликоль).
6) смесями жидких веществ (тетронитрометан + бензол, четырехокись азота + керосин и т.п.).
7) порошкообразные литые, гранулированные, водосодержащие, суспензионные, льющиеся, эмульсионные.

Практическое применение в качестве промышленных ВВ имеют первые две группы, наибольшее распространение получили взрывчатые смеси из твердых веществ. В горнодобывающей промышленности находят применение и жидкие ВВ.

Компоненты гранулированных ВВ имеют размер гранул 1 ..3 мм или чешуек того же размера. Водосодержащие ВВ имеют за счет добавки воды с загустителем слаботекущую медообразную суспензионную консистенцию, льющиеся ВВ имеют легкоподвижную консистенцию, допускающую их транспортировку по шлангам. Горячельющиеся и эмульсионные ВВ в горячем состоянии имеют легкоподвижную консистенцию и твердеют при нормальной температуре.

По характеру взрывчатых превращений ВВ делятся на бризантные (дробящие) и метательные (пороха). Среди бризантных в особую группу выделяют инициирующие ВВ, обладающие высокой

чувствительностью, которые применяют для изготовления средств инициирования (капсюлей-детонаторов, электродетонаторов, детонирующих шнуров). Для их изготовления используют следующие инициирующие ВВ: гремучую ртуть $Hg(CNO)_2$, азид свинца PbN_6, ТНРС $C_6H_2(N0_2)_30_2PbH_20$, тетрил $C6H_2(N0_2)_4NCH_3$, ТЭН $C_5H_3(ON0_2)_4$, гексоген $C_3H_6N_60_6$.

Промышленные (бризантные) ВВ предназначаются для дробления, разрушения и перемещения окружающей среды. Это наиболее многочисленный класс ВВ. Промышленные ВВ выпускаются в виде химических соединений (однокомпонентные ВВ) или чаще механических смесей (многокомпонентные ВВ). К однокомпонентным относятся следующие основные вещества: тротил $C_7H_5(NO_2)_3$, тринитрофенол (пикриновая кислота) $C_6H_2(N0_2)_3OH$, глициринтринитрат (нитроглицерин) $C_3H_5(ON0_2)_3$, нитродигликоль (нитрогликоль) $C_2H_4(ON0_2)_2$, гексоген. Эти ВВ используются также в качестве компонентов смесевых промышленных ВВ.

К метательным ВВ относятся дымные и бездымные пороха.

Взрывчатые вещества подразделяются на индивидуальные и смесевые.

Индивидуальные ВВ – химические соединения (нитроглицерин, тротил, ТЭН, гексоген и т.п.), которые содержат в своем составе все элементы, необходимые для нормального протекания химической реакции взрыва.

Смесевые ВВ состоят из двух или нескольких компонентов, каждый из которых выполняет определенную роль. В состав смесевых ВВ вводятся окислители, сенсибилизаторы, горючие добавки, флегматизаторы, стабилизаторы и пламегасители.

Окислители – вещества, содержащие избыточный кислород, идущий при взрыве на окисление горючих элементов. В качестве окислителя применяют аммиачную селитру, калиевую, натриевую, перхлораты калия и аммония и т.д.

Горючие добавки – вещества, богатые углеродом и водородом, это древесная мука, соляровое масло или пудры (порошки) металлов (алюминия, магния). Горючие добавки вводятся в состав ВВ для увеличения количества тепла, выделяемого при взрыве. Роль горючих добавок выполняют также взрывчатые компоненты (тротил, гексоген и т.д.), содержащие в своем составе недостаточное количество кислорода для полного окисления содержащихся в них горючих элементов. При этом часть углерода, выделяемого при взрыве таких ВВ в виде

окиси, в свободном состоянии или в виде горючих соединений реагирует с избыточным кислородом окислителя, повышая теплоту и общую энергию взрыва.

Сенсибилизаторы – вещества, вводимые в состав ВВ для повышения его чувствительности к начальному импульсу и передаче детонации. Это, как правило, мощные ВВ (тротил, гексоген, нитроглицерин), которые в смеси с малочувствительными ВВ (аммиачная селитра и т.п.) и с невзрывчатыми веществами (соляровое масло, древесная или хлопковая мука) обеспечивают нормальную чувствительность такого смесевого ВВ к инициированию ее капсюлем-детонатором, электродетонатором или детонирующим шнуром и одновременно повышают энергетические характеристики этого смесевого ВВ.

Роль сенсибилизатора в простейших ВВ (динамоны, игданиты, гранулиты) могут выполнять (при определенном процентном содержании) и невзрывчатые горючие добавки: соляровое масло, древесная мука, алюминиевая пудра.

Стабилизаторы вводятся в состав ВВ для повышения их химической и физической стойкости. В качестве стабилизатора используют мел и соду для поглощения остатков кислот в динамитах, древесную жмыховую и хлопковую муку для предотвращения слеживаемости в динамонах. Последние стабилизаторы применяются как горючие добавоки, повышают стабильность свойств ВВ.

Роль стабилизатора в водоустойчивых граммонитах выполняет тротил, напыленный на гранулы аммиачной селитры, а в водоустойчивых алюмосодержащих гранулитах – термоплавкий восковой состав, наносимый на поверхность гранул селитры и закрепляющий на гранулах частицы алюминия.

Флегматизаторы – легкоплавкие вещества, масла, имеющие высокую теплоемкость и высокую температуру вспышки, обволакивающие частицы чувствительного ВВ и не вступающие с ним в реакцию. Введение флегматизаторов снижает чувствительность ВВ и обеспечивает более безопасные условия его применения.

В качестве флегматизатора используют вазелин, парафин, различные масла, тальк и т.д. Так, перед изготовлением промышленных ВВ с добавками гексогена его флегматизируют добавлением 5% расплавленного парафина.

Пламегасители вводятся в состав только предохранительных ВВ для снижения температуры взрыва, чем уменьшается вероят-

ность воспламенения метана и угольной пыли в шахтах. В качестве пламегасителей применяют хлористый натрий, хлористый калий, хлористый аммоний и т.д.

Пламегасители, не участвуют в реакции при взрыве. Они отбирают часть тепла на свое нагревание и испарение, за счет чего снижается температура газов. Кроме того, они являются отрицательными катализаторами (ингибиторами), которые задерживают реакцию воспламенения метана горячими газами взрыва.

В настоящее время в качестве промышленных используют следующие ВВ.

Сухие порошкообразные и гранулированные ВВ

Аммониты – порошкообразные смеси аммиачной селитры с тротилом (реже с гексогеном и динитронафталином) и невзрывчатыми горючими добавками.

Предохранительные аммониты содержат, кроме того, пламегасители, а некоторые жидкие нитроэфиры (нитроглицерин, нитрогликоль).

Аммоналы – аммониты с добавками алюминиевой пудры. Скальный аммонит – аммонал с добавкой гексогена.

Граммониты – гранулированные аммониты, состоящие из гранулированной селитры и гранулированного или чешуйчатого тротила.

Граммоналы – гранулированные аммоналы.

Динамоны – порошкообразные смеси аммиачной селитры с невзрывчатыми горючими добавками.

Гранулотол – гранулированный тротил.

Алюмотол – гранулированный сплав тротила с алюминиевой пудрой.

Гранитол – гранулированный сплав тротила с аммиачной селитрой.

Водосодержащие ВВ

Акватолы – водосодержащие ВВ текучей (медообразной) консистенции, состоящие из гранул граммонита или граммонала и насыщенного загущенного раствора аммиачной селитры.

Акваниты и акваналы – водосодержащие ВВ пластичной консистенции, состоящие из порошкообразных аммонитов или аммоналов с добавками кальциевой или натриевой селитры, воды и пластифицирующих добавок.

Горячельющиеся ВВ (ГЛТ) – суспензионные ВВ, изготовляемые в

зарядных машинах на месте заряжания, состоящие из смеси горячего раствора аммиачной селитры, загустителей с добавками 1…20% тротила, что производится непосредственно на месте заряжания скважин. После охлаждения заряд затвердевает, приобретает гипсоподобную структуру.

Ифзаниты – водосодержащие ВВ, состоящие из смеси гранул аммиачной селитры и тротила, в которую на месте заряжания добавляется насыщенный раствор аммиачной селитры с загустителем в объеме, равном межгранульному пространству в твердой фазе.

Карботолы – горячельющиеся ВВ, состоящие из гранул тротила и эвтектического расплава карбамида и аммиачной селитры с малым содержанием воды, а также добавками алюминия.

Порэмиты – эмульсионные ВВ из смеси горячего раствора аммиачной и натриевой селитр и с добавками горючего (мазута) и эмульгатора. После обработки смеси в диспергаторе (миксере) смесь превращается в обратную эмульсию (капли раствора селитры окружены пленкой мазута) с размерами капель в несколько микрон. Активизацию эмульсии производят введением в нее стеклянных или полых микросфер или газогенерирующей добавки (нитрид натрия), которые создают в массе эмульсии газовые микрополости, повышающие чувствительность эмульсии к детонации.

В отдельную группу выделяются нитроэфировые ВВ, содержащие 4…10 % жидких нитроэфиров.

Детониты – порошкообразные смеси аммиачной селитры, тротила, алюминиевой пудры и нитроэфиров.

Предохранительные ВВ – победит, углениты, серный и нефтяной аммониты, аналогичны по составу аммонитам с добавками пламегасителей и жидких нитроэфиров.

Динамиты – многокомпонентные смеси на основе желатинированных нитроглицерина и нитрогликоля, содержат 30 % и более нитрожиров.

6.2. Физико-химические характеристики ВВ

Известны три основные формы химического превращения ВВ. Медленное химическое превращение протекает при относительно низких температурах по всему объему вещества. Этот процесс может протекать при неблагоприятных условиях хранения ВВ и недостаточной его химической стойкости. При горении и детонации химическая

реакция протекает в довольно узкой зоне – фронте химической реакции, в котором температура достигает некоторого критического значения и который перемещается по ВВ. Скорость его перемещения определяется величиной выделяющейся энергии и способом передачи ее к соседним слоям вещества. При горении энергия передается путем теплопередачи. Это сравнительно медленный процесс, поэтому и скорость горения может быть от долей сантиметра до десятков метров в секунду. При детонации жидких и порошкообразных ВВ энергия соседним слоям заряда передается детонационной волной, которая распространяется по ВВ со сверхзвуковой скоростью от 2 до 6 км/ч. При взрыве грубодисперсных, гранулированных и водосодержащих ВВ взрыв по заряду распространяется в виде взрывного горения частиц за счет струй раскаленных газов, проникающих в прилегающие к зоне реакции слои ВВ.

Состав газов, выделяющихся при взрыве, зависит от химического состава ВВ, его кислородного баланса и условий взрывания.

Кислородный баланс характеризуют выраженным в процентах отношением избытка или недостатка кислорода в составе ВВ по сравнению с количеством, необходимым для полного окисления всех горючих элементов этого ВВ, к массе ВВ. Например, NH_4NO_3 имеет положительный кислородный баланс:

$$NH_4NO_3 = N_2 + 2H_2O + 1/2O_2,$$
$$КБ = (1/2 \cdot 32)/80 = 0{,}2\ (20\ \%).$$

Кислородный баланс считается нулевым, если в составе ВВ содержится количество кислорода, необходимое для полного окисления горючих элементов. Такое соотношение компонентов называют стехиометрическим. Если в составе ВВ не хватает кислорода для полного окисления горючих элементов, то такое ВВ имеет отрицательный, а при избытке кислорода – положительный кислородный баланс (табл. 6.1).

При взрыве ВВ с нулевым кислородным балансом образуются в основном пары воды, углекислоты, свободный азот, окись алюминия и минимальное количество ядовитых газов. В этом случае выделяется максимальное количество энергии. При взрыве ВВ с недостатком кислорода образуется ядовитый оксид углерода CO.

Таблица 6.1.

Вещество	Химическая формула	Молярная масса, г/моль	Кислородный баланс, %	Теплота образования при постоянном объеме, КДж/моль
Алюминий	Al	27	-89,0	–
Аммиачная селитра	NH_4NO_3	80	+20,0	355
Гексоген	$C_3H_6N_6O_6$	222	-21,6	-88
Гремучая ртуть	$Hg(CNO)_2$	284	-11,3	-275
Калиевая селитра	KNO_3	101	+39,6	490
Калия хлорат	$KClO_3$	122,5	+39,6	390
Натриевая селитра	$NaNO_3$	85	+47,0	493
Натрия хлорат	$NaClO_3$	106,5	+45,0	350
Нитроглицерин	$C_3H_5(NO_2)_3$	122	+ 3,5	350
Нитроклетчатка (коллоидная	$C_2H_4H_{31}N_9O_{38}$	1115,3	-38,7	1760
Октоген	$C_4H_8N_8O_8$	296	-21,6	–
Пикриновая кислота	$C_6H_2(NO_2)_3OH$	229	-45,4	288
Тетранитрометан	$C(NO_2)_4$	196	+49,0	-35
Третил	$C_6H_2(NO_2)_4NCH_3$			
Тротил	$C_6H_2(NO_2)_3CH_3$	227	-74,0	73,5
ТЭН	$C_5H_8(NO_2)_4$	316	-10,1	540

Образование этого соединения идет с меньшим выделением тепла (112 кДж/г моль), чем при образовании двуоксида углерода (396 кДж/г моль). При взрыве ВВ с избытком кислорода последний образует с азотом весьма ядовитые оксиды NO, $N0_2$, N_20_3. Реакции образования оксидов азота идут с поглощением тепла (эндотермичны). Таким образом, ВВ с отрицательным и положительным кислородным балан-

сом обладают меньшей теплотой взрыва, чем ВВ с нулевым балансом.

Состав газообразных продуктов взрыва зависит не только от химического состава ВВ, но и от оболочки патронов ВВ, условий взрывания заряда (степени ограничения пространства, в котором расположен заряд, влажности ВВ) и свойств породы, влияющих на протекание вторичных химических реакций взрыва. Плохая забойка зарядов, наличие воздушных промежутков между патронами увеличивают выделение ядовитых газов. При взрывании угля $C0_2$ может переходить в CO. Взрывы серосодержащих руд приводят к образованию сернистых газов и сероводородов. Калийные руды и апатитонефелиновые связывают окислы азота, молибденовые и медные – окись углерода. Чем выше коэффициент крепости взрываемых пород, тем больше образуется оксида углерода и меньше оксидов азота.

Бумажная парафиновая оболочка паторонов участвует в реакции взрыва, понижая кислородный баланс. Поэтому установлено, что масса бумажной оболочки должна быть не более 2 г, а парафина не более 3 г на 100 г ВВ.

Для подземных работ применяют ВВ только с кислородным балансом, близким к нулевому (±3 %). Для взрывания на земной поверхности могут применяться ВВ как с положительным, так и с отрицательным кислородным балансом.

Отравляющее действие оксида углерода CO (угарный газ) основано на его способности образовывать прочные соединения при вдыхании с красными кровяными тельцами, являющимися переносчиками кислорода из легких к тканям, из-за чего человеческий организм начинает испытывать кислородное голодание. При больших концентрациях CO (<1%) быстро наступает смерть. Предельно допустимая концентрация CO в атмосфере шахт 0,0016 % по объему.

Окислы азота NO, $N0_2$, N_2O_3 при вдыхании в легкие образуют, вступая в реакцию с водой, азотную и азотистую кислоты, действие которых приводит к отеку легких и смерти. Особенную опасность окислы азота представляют из-за того, что они способны накапливаться в организме в течение 4…6 ч. Поэтому по токсическому действию они считаются в 6,5 раза более ядовитыми, чем окись углерода, и предельно допустимая концентрация в атмосфере шахт составляет 0,0002 % по объему.

Кроме этих газов при взрыве может образовываться сероводород H_2S, сернистый ангидрид SO_2, хлор, при вдыхании которого происходит острое раздражение дыхательных путей и отек легких. По

токсичности эти газы считаются в 2,5 раза более ядовитыми, чем окись углерода. Кроме того, при взрыве детонаторов в атмосфере появляются особо ядовитые пары и аэрозоли ртути или свинца, входящие в состав инициирующих ВВ, а свинец, кроме того, входит и состав электровоспламенителей и замедляющих составов ЭД.

Истинные реакции взрывчатого превращения ВВ составить практически невозможно из-за многообразия факторов, влияющих на их протекание. Поэтому принят упрощенный прием составления реакций взрыва, согласно которому все ВВ делятся на три группы:

1. ВВ с количеством кислорода, достаточным (или избыточным) для полного окисления всех горючих элементов. В этом случае весь водород превращается в воду, углерод в углекислый газ, например реакция разложения нитрогликоля (табл.6.2).

2. ВВ с количеством кислорода, достаточным для полного газообразования. При этом принимается, что кислород сначала окисляет весь водород и воду, углерод в оксид углерода, а затем оставшийся кислород образует с частью оксида углерода углекислый газ (например, реакция разложения ТЭНа) табл.6.2.

При взрыве алюмосодержащих ВВ с нулевым кислородным балансом образуется твердая окись алюминия $A1_20_3$, а при отрицательном - она образуется в результате вторичных реакций алюминия с водой и углекислым газом:

$$\mathbf{2A1 + 3H_20 = A1_20_3 + 3H_2,}$$
$$\mathbf{2A1 + 3C0_2 = A1_20_3 + 3CO.}$$

3. ВВ с количеством кислорода, недостаточным для полного газообразования. В этом случае водород полностью превращается в воду в воду, оставшийся кислород окисляет часть углерода в оксид углерода и выделяется свободный углерод, например реакция разложения тротила тринитротолуола (табл.6.2).

Таким образом, зная элементарный состав ВВ с нулевым или положительным кислородным балансом, можно легко составить реакцию его взрывчатого разложения в виде

$$\mathbf{C_aH_bO_cN_dAl_e \Rightarrow b/2H_20 + aC0_2 + e/2Al_20_3 + d/2N_2 + 1/2(c - b/2 - 2a - 3/2e)O_2.}$$

Таблица 6.2.

ВВ	Молекулярная масса	Реакция взрывчатых веществ	Кислородный баланс, %	Объем газов взрыва, л/кг	Температура взрыва, град. С	Теплота взрыва, КДж/кг
Нитроглицерин	227	$4C_3H_5(ONO_2)_3 = 10H_2O+12CO_2+6N_2+O_2$	+3,5	715	4100	6500
Нитрогликоль	152	$C_2H_4(ONO_2)_2 = 2H_2O+ +2CO_2+N_2$	0	738	4200	7100
Тротил	227	$2C_6H_2(NO_2)_3 CH_3 = 5H_2O+7CO+7C+3N_2$	-74,0	750	2950	3450
Аммиачная селитра	80	$3NH_4NO_3 = =4H_2O+2N_2+O_2$	+20,0	980	1950	1420
Динитронафталин	218	$C_{10}H_6(NO_2)_2 = =3H_2O+CO+2N_2+9C$	-129,4	750	2500	2500
Коллодионный хлопок	1053	$C_{22,5}H_{28,8}O_{36,1}N_{8.7} = =14,4H_2O+21,7CO+ +0,8C+4,35N_2$	-33,6	936	250	3400
Гексоген	222	$C_3H_6N_6O_6 = 4H_2O + +3CO + 3N_2$	-21,6	890	3800	5700
ТЭН	316	$C_5H_8(ONO_2)_4 = =4H_2O+3CO_2+2CO+ +2N_2$	-10,2	790	4000	5910

6.3 Основные компоненты конденсированных взрывчатых веществ

Промышленные ВВ состоят из нескольких компонентов, которые придают взрывчатому веществу особые физико-химические свойства. Однако каждое ВВ содержит основной компонент без которого оно не может быть взрывчатым.

Аммиачная селитра (азотнокислый аммоний) NH_4N0_3 является компонентом большинства промышленных ВВ. Один грамм селитры при разложении выделяет 0,2 г кислорода, который при взрыве используется для окисления водорода, углерода, алюминия, содержащихся в других компонентах смесевого ВВ. Дешевизна и простота ее получения, неограниченность сырьевой базы (воздух + вода), полный переход в газообразные продукты при взрыве обусловили широкое ее применение для промышленных ВВ.

Аммиачная селитра – белый кристаллический порошок с плотностью в зависимости от формы кристаллов 1,56..1,74 г/см. Насыпная плотность аммиачной селитры 0,86…1,74 г/см. Получается селитра реакцией соединения аммиака с азотной кислотой по уравнению

$$NH_3 + HN0_3 = NH_3N0_3.$$

Выпускается в виде порошка, гранул, чешуек и кристаллов.

Обычная кристаллическая аммиачная селитра обладает высокой гигроскопичностью. При изменении влажности воздуха она слеживается, превращаясь в камнеобразную массу. Поэтому сейчас изготовляют менее слеживающуюся кристаллическую и гранулированную селитру марки ЖВ с добавками железных солей жирных кислот, покрывающих кристаллы селитры мономолекулярной пленкой и снижающих тем самым ее гигроскопичность, слеживаемость и повышающих водоустойчивость.

Считалось, что чистая селитра не способна взрываться. Однако в 1921 г. в Германии произошло несколько крупных взрывов при рыхлении слежавшейся в штабеле селитры взрывным способом (гг. Кривальде, Оппау). За последние 50 лет произошло более 25 аварийных взрывов и пожаров на транспортных судах, перевозивших селитру в трюмах. Большинство взрывов произошло в результате загорания или термического разложения селитры в замкнутом простран-

ра. Пожаро- и взрывоопасность селитры резко увеличивается при наличии в селитре горючих примесей, а также при ее упаковке в горючие материалы. Поэтому при хранении и транспортировке селитры необходимо создавать условия, исключающие появление очагов разогрева.

Реакция взрывного разложения селитры

$$2NH_4N0_3 = 2N_2 + 0_2 + H_20 + Q$$

сопровождается выделением тепла **Q** и избыточного кислорода. Теплота взрыва селитры всего 1400 кДж/кг по сравнению с 3400 … 5000 кДж/кг для аммонитов.

Примеси органических веществ даже в небольших дозах значительно повышают энергию взрыва аммиачной селитры и делают ее более чувствительной. Парафин и подобные ему вещества, являющиеся флегматизаторами для ВВ, имеющих обычно отрицательный или нулевой баланс, по отношению к аммиачной селитре в небольших количествах (до 5 %) являются сенсибилизаторами, так как, участвуя в данной реакции и повышая энергию взрыва, они повышают и восприимчивость селитры к детонации при положительном и нулевом кислородном балансе смеси. Если кислородный баланс смеси становится отрицательным, то добавки флегматизируют смесь и она теряет детонационную способность.

Аммиачная селитра активно вступает в реакцию с серой, сульфидами, азотной, серной, фосфорной кислотами, а также с металлами (цинк, медь, никель, магний). Особенно опасны примеси азотной кислоты, так как это может привести к самовоспламенению селитры. Алюминий и железо не вступают в реакцию с селитрой. Добавки, способствующие нейтрализации азотной кислоты (мочевина, дифениламин), увеличивая термическую стойкость смеси аммиачной селитры с горючими веществами (древесная мука, крахмал, бумага и др.), уменьшают вероятность самовозгорания таких смесей. Изучением взрывчатых свойств селитры установлено, что критический диаметр сухой тонкоизмельченной селитры плотностью 0,8 г/см в открытых зарядах 100 мм по данным Беляева А.Ф. Критический диаметр обычной (товарной) селитры 200…250 мм. Толщина слоя селитры, по которому может устойчиво распространяться детонация, составляет 30…50 мм, а слоя из пыли селитры – всего 15…20 мм. При наличии прочной (неразрушаемой) оболочки возможна детонация сухой чис-

прочной (неразрушаемой) оболочки возможна детонация сухой чистой селитры от обычного детонатора в заряде диаметром 7 мм. Скорость детонации обычной селитры в металлической трубе диаметром 40 мм 1,95 км/с, водоустойчивой селитры – 2,6 км/с, а ее пыли – 3,4 км/с.

В чистом виде селитра не детонирует от взрыва детонатора или ДШ. Для ее детонации необходим промежуточный детонатор из прессованного тротила массой не менее 50 г. При влажности селитры 1%, величина детонатора должна быть 100…150 г.

Гранулированная или чешуйчатая селитра в мешках не взрывается от шашки тротила величиной 0,5 кг.Натриевая, калиевая и кальциевая селитра ($NaNO_3$; KNO_3; $Ca(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$) содержат более чем в 2 раза больше кислорода, чем аммиачная и имеют положительный кислородные баланс более 40 %, плотность кристаллов более 2 г/см^3. Но при взрывчатом разложении они образуют мало газов и много твердых оксидов, стоимость их выше. Смеси этих видов селитры с горючими более чувствительны к механическим воздействиям и к воспламенению. Эти виды селитры имеют ограниченное применение для приготовления водосодержащих ВВ, а их добавки повышают плотность ВВ, снижают температуру его замерзания, хорошо удерживают воду в составе ВВ, препятствуя его высыханию.

Раньше селитру иногда применяли как самостоятельное ВВ при крупных массовых взрывах. В настоящее время она используется только в смеси с горючими добавками (жидкими и твердыми) или в составе сетевых ВВ.

Вследствие низкой детонационной способности селитра по условиям хранения и транспортировки не относится к ВВ.

Динамоны – двухкомпонентные порошкообразные ВВ, не содержащие тротила, а содержащие аммонийную селитру. В качестве горючих добавок в динамоны вводятся торф, древесная мука, мох, измельченная сосновая кора, отходы хлопка и т.п. Взрывчатые свойства динамонов целиком определяются составом и технологией их изготовления. Серьезными недостатками динамонов является их расслаиваемость при зарядке и гигроскопичность. В 1953 г. производство динамонов было прекращено и возобновлено в середине 60-х годов в виде трехкомпонентных металлизированных составов (аммиачная селитра, соляровое масло, алюминиевая пудра) марок АМ-8 и АМ-10, производство которых в настоящее время прекращено из-за недостаточной эффективности.

Игданит представляет собой смесь 94 %-й гранулированной ам-

миачной селитры и 6 %-го солярового масла. Смесь изготовляется непосредственно в зарядных машинах или на стационарных пунктах.

При содержании дизельного топлива более 6% у игданита резко снижается чувствительность к детонации и даже от мощного инициатора он не взрывается. При меньшем содержании солярового масла (2…3 %) смесь наиболее чувствительна и может детонировать от электродетонатора (ЭД) или капсульного детонатора (КД). Игданит может изготовляться несколькими способами: соляровое масло заливают непосредственно в мешки с селитрой или в специальные патроны на месте взрыва, после чего производят заряжание; используют смесительно-зарядные автомашины для приготовления и зарядки игданита на стационарных пунктах приготовления, а машины применяют только для доставки игданита к месту взрыва и зарядки скважин. Практическое распространение получили последние два способа механизированного приготовления и заряжания игданита.

Игданиты безопасны в обращении, имеют низкую стоимость, удобны для механизированного заряжания. Недостатками игданитов является: частичная потеря взрывчатых свойств при длительном заряжании (более 5…6 часов) из-за стекания солярового масла в нижнюю часть заряда с гладких гранул аммиачной селитры, флегматизация сердцевины шнура марки ДША соляровым маслом, разрушение оболочки ДШ, изготовленного из маслонеустойчивого полиэтилена, из-за чего происходят отказы.

Введение в состав игданита аэросила (тонкодисперсная аморфная двуокись кремния) путем его предварительного смешивания с соляровым маслом в количестве 0,05…2 % резко повышает удерживающую способность гранул и исключает стекание горючей добавки в течение 3-5 суток. Игданит относится к ВВ с невысокими энергетическими параметрами: U = 3800 кДж/кг, объем газов 990 л/кг, $V_Д$ = 2,2 ... 2,7 км/с, КБ = + 0,12 %.

Тринитротолуол (тротил или тол $C_7H_5(NO_2)_3$) является одним из самых распространенных однокомпонентных ВВ. Тротил получают путем нитрации толуола смесями азотной и серной кислот по реакции

$$C_6H_5CH_3 + 3HNO_3 = C_7H_5(NO_2)_3 + 3H_2O.$$

Серная кислота в реакции не участвует и добавляется для поглощения воды и более активного протекания процесса.

Чистый тротил состоит из кристаллов светло- или темно-желтого цвета с температурой плавления 80^0 С. В порошкообразном виде тротил имеет насыпную плотность 0,9 г/см^3. Литой тротил имеет плотность 1,54 … 1,59 г/см^3.

Тротил практически нерастворим в воде, имеет высокую химическую стойкость. Температура вспышки тротила 310^0 С. Вспышка обычно не сопровождается взрывом. Переход горения в детонацию наблюдается только при горении тротила в замкнутом пространстве или в очень больших количествах.

Тротил имеет большой отрицательный кислородный баланс (74%), из-за чего при его взрыве выделяется мало газообразных и значительное количество твердых продуктов (сажа).

Порошкообразный и прессованный тротил взрывается от штатного детонатора или нескольких витков ДШ. Литой тротил требует более мощного промежуточного детонатора из прессованных тротиловых шашек или патронов аммонита.

Тротил токсичен, особенно в тонко измельченном состоянии, вызывает раздражение кожи и болезнь глаз, а также тротиловую интоксикацию организма. Предельно допустимая концентрация тротиловой пыли в воздухе 1 мг/м^3.

Применяется тротил в порошкообразном, прессованном, чешуйчатом, гранулированном виде, а иногда в виде кусков и литых шашек. Тротил входит в состав аммиачно-селитренных ВВ как сенсибилизатор и как активная горючая добавка, так как имеет много лишних молекул горючих (углерода). Содержание тротила в смесевых ВВ изменяется от 6 до 70 %. Для патронированных ВВ применяется порошкообразный тротил, для грубодисперсных – гранулированный и чешуйчатый. При попадании в тротил песка или других твердых примесей резко возрастает его чувствительность к механическим воздействиям. Наиболее восприимчив к инициированию порошкообразный тротил, наименее – литой. Критический диаметр сухого порошкообразного тротила – 8…10мм.

Гранулотол (гранулированный тротил) с размером гранул 3...5 мм применяется как самостоятельное ВВ для взрывания обводненных скважин и в качестве компонента в оставе граммонитов и водосодержащих ВВ. В сухом состоянии гранулотол имеет теплоту в зрыва 3450 кДж/кг, а водонаполненный – 4200 кДж/кг в пересчете на 1 кг сухого ВВ. Работоспособность водонаполненного гранулотола на баллистическом маятнике и в свинцовой бомбе (с промежуточным детонато-

ром) на 10…13 % выше работоспособности сухого тротила в тех же условиях.

Критический диаметр гранулотола в открытых зарядах 60 мм, водонаполненного 25-30 мм, а скорость детонации изменяется от 4,5 до 6,5 км/с.

Гранулотол абсолютно водоустойчив, хорошо тонет в воде, имеет хорошую сыпучесть в сухом и мокром состоянии. При хранении не слеживается и не спекается, обладает высокой стабильностью взрывчатых свойств. Его заряды могут продолжительное время находиться в воде, в том числе и проточной, без потери взрывчатых свойств. Для инициирования гранулотола необходим промежуточный мощный детонатор, так как он недостаточно чувствителен к обычным средствам инициирования.

Гранулотол рекомендуется применять в водонаполненном состоянии, так как вода, заполняя промежутки между гранулами, увеличивает плотность заряжания до 1,3…1,35 г/см, за счет чего повышается скорость детонации и улучшается эффект взрыва. Водная оболочка вокруг гранул способствует дополнительному выделению тепла q в результате смещения реакции в сторону образования углекислого газа:

$$2CO \leftrightarrow CO_2 + C + q.$$

Кроме того, вода, испаряясь, также увеличивает объем газов взрыва, но на ее испарение требуется тепло, из-за чего снижается общая энергия взрыва водонаполненного тротила.

Алюмотол представляет собой гранулированный сплав с гранулами до 5 мм серого цвета, состоящий из 85 тротила и 15 % алюминиевой пудры, с теплотой взрыва 5600 кДж/кг. Плотность гранул 1,5…1,7 г/см^3. Алюмотол, как и гранулотол, абсолютно водоустойчив, хорошо сыпуч в сухом и мокром состоянии, не слеживается, пригоден для механизированного заряжания скважин, обладает высокой стабильностью и высокими взрывчатыми свойствами. Предназначен для применения в обводненных скважинах, в том числе с проточной водой. Для его инициирования необходимы мощные промежуточные детонаторы.

Гексоген $C_3H_6N_6O_6$ (циклотриметилентринитрамин) – продукт нитрации утропина азотной кислотой, представляет собой белый кристаллический порошок с плотностью 1,8 г/см^3 и насыпной плотностью 1,1 г/см^3. Температура плавления 203^0 С, нерастворим в воде, ядовит,

имеет высокую химическую стойкость. Разложение гексогена начинается при температуре 200° С. В небольшом количестве сгорает без взрыва.

Ввиду высокой чувствительности гексогена к механическим воздействиям его применяют только во флегматизированном виде, что достигают покрытием его кристаллов 5% воска или парафина.

Гексоген – одно из наиболее мощных ВВ. Работоспособность в свинцовой бомбе 475 см^3, бризантность при заряде 25 г составляет 16 мм. При заряде 50 г свинцовый столбик разрушается. Скорость детонации 8,4 км/с при плотности 1,7 г/см^3, теплота взрыва 5450 кДж/кг.

В последнее время гексоген используют в качестве сенсибилизирующего компонента мощных промышленных ВВ (скальных аммонитов, вторично инициирующего ВВ для электродетонаторов, а также, для изготовления детонационных шнуров (ДШ) и промежуточных детонаторов инициирования малочувствительных ВВ).

Нитроглицерин $C_3H_5(ONO_2)_3$ (тринитроглицерин, глицеритринитрат) – тяжелая, маслянистая, бесцветная жидкость, плотностью 1,6 г/см^3. Технический нитроглицерин имеет желтовато-коричневый цвет.

Жидкий нитроглицерин затвердевает при температуре + 13,2^0 С, в составе ВВ он затвердевает при температуре около + 10° С. Поэтому при изготовлении ВВ его смешивают с труднозамерзающими нитроэфирами, (нитрогликолем и др.).

При растворении в 100 г нитроглицерина 2,5 г коллодионного хлопка образуется студенистообразная масса (желатин), чувствительность которой к механическим воздействиям ниже чувствительности нитроглицерина. Чувствительность нитроглицерина к механическим воздействиям и восприимчивость к детонации очень высоки. Замерзший нитроглицерин менее чувствителен к удару, чем жидкий, но в полузамерзшем состоянии он обладает наибольшей чувствительностью к механическим воздействиям и очень опасен.

Нитроглицерин – мощное ВВ с теплотой взрыва 6040 кДж/кг, имеет две скорости детонации 2 и 7,6 км/с. Нитроглицерин ядовит, при контакте с кожей человека он вызывает сильную головную боль. Через несколько дней постоянной работы с нитроглицерином у человека вырабатывается иммунитет и головные боли проходят.

Нитрогликоль $C_2H_4(ON0_2)_2$ по свойствам похож на нитроглицерин. Это прозрачная жидкость с удельным весом 1,5 г/см^3, хорошо растворяется в большинстве органических растворителей, летучесть

его примерно в 3 раза выше летучести нитроглицерина, желатинизируется более активно. Нитрогликоль затвердевает при температуре -20^0 С, образует растворы с нитроглицерином, имеющие температуру затвердевания от -17 до -23° С.

Нитрогликоль имеет невысокую химическую стойкость, чувствительность его к механическим и тепловым воздействиям ниже, чем у нитроглицерина. Теплота взрыва нитрогликоля 7120 кДж/кг, скорость детонации 7,4 км/с.

Токсическое действие нитрогликоля аналогично действию нитроглицерина, однако иммунитет у человека не вырабатывается, поэтому при работе с ним нужна особая осторожность, недопустим контакт открытых частей кожи рабочих с нитрогликолем.

Граммониты. Промышленность выпускает следующие граммониты, называвшиеся ранее зерногранулитами: 50/50, 30/70; (только для открытых работ) 79/21 и 82/18 для подземных и открытых работ. Числитель дроби в марке ВВ означает процентное содержание селитры, а знаменатель – содержание тротила.

Граммониты имеют хорошую сыпучесть, не пылят, не слеживаются, пригодны для механизированного заряжания. От аммонитов они отличаются меньшей чувствительностью к механическим воздействиям, к пламени и к начальному импульсу. Теплота взрыва 4300 кДж/кг. Скорость детонации составляет 5,6…35 км/с (5,6 км/с для состава 30/70, 3,2 км/с для 79/21). Критический диаметр составляет 40…60 мм. Объем газов 900…1070 л/кг. Кислородный баланс 49 % для состава 30/70 и +0,02 для состава 79/21.

Аммониты получают путем механического смешивания кристаллической аммиачной селитры (79…85 %) с порошкообразным тротилом (5…21 %) и другими компонентами в шаровых мельницах. Их выпускают в патронах различного диаметра или в мешках массой 40 кг, а отдельные сорта в виде прессованных патронов диаметром 45 мм.

Тротил в состав аммонитов вводят для повышения мощности и чувствительности ВВ, горючие взрывчатые добавки вводят для улучшения структуры аммонитов, снижения слеживаемости и как горючий материал для получения нулевого кислородного баланса,

Цвет аммонитов зависит от цвета добавки и обычно бывает белый, желтый и темно-серый. Все аммониты надежно взрываются от детонаторов и детонирующего шнура.

Аммониты химически стойкие ВВ. Все аммониты гигроскопич-

ны, как и аммиачная селитра, входящая в их состав.

Для защиты аммонитов от увлажнения оболочки патронов и упаковку покрывают сплавом парафина с петролатумом. Повышенной водоустойчивостью обладают аммониты на основе водоустойчивой аммиачной селитры марки ЖВ. Вследствие незначительной смачиваемости и насыпной плотности меньше 1 г/см^3 порошкообразные аммониты не тонут в воде при свободной засыпке их в обводненные скважины, а потому не рекомендуются для этих условий. Аммониты на порошкообразной селитре слеживаются. Слежавшийся аммонит, как правило, не детонирует от штатного детонатора. Детонационная способность слежавшегося аммонита в значительной мере восстанавливается его измельчением. Для уменьшения слеживаемости в состав ВВ вводят селитру с примесью красителей (фуксина).

Насыпная плотность аммонитов 0,8 …0,9 г/см^3. Патронированные аммониты имеют плотность до 1,0…1,15 г/см^3. Теплота взрыва 4300 … 5400 кДж/кг. Скорость 3,6 …4 км/с.

Увеличение плотности аммонитов до 1,3…1,5 г/см^3 достигается прессованием составов. Жесткие прессованные патроны не изменяют своей формы в процессе заряжания. Это ухудшает условия использования ВВ, так как между зарядом и стенками шпура или скважины образуется зазор, снижающий плотность заряда.

Критическая плотность большинства аммонитов 1,4…1,5 г/ см^3. Аммониты относительно безопасны в обращении. От луча огня огнепроводного шнура аммониты не загораются. На открытом воздухе аммониты сгорают без взрыва. В замкнутом пространстве или при большом количестве возможен переход горения во взрыв.

Аммонит 6 ЖВ представляет собой плохосыпучий, пылящий порошок желтого цвета, имеющий нулевой кислородный баланс, состоящий из 79 % селитры и 21 % тротила. При тщательном изготовлении и хорошей упаковке мало слеживается. Выпускается в натренированном виде и бумажных крафтцеллюлозных мешках. Не пригоден для механизированного заряжания. Многие предприятия (карьеры, объекты гидротехнического строительства и мелиорации, рудники и т.д.) по традиции заказывают аммонит 6ЖВ в качестве основного ВВ, хотя он должен быть полностью заменен более удобными и выгодными гранулитами или граммонитами.

Предназначен аммонит 6 ЖВ для взрывания пород средней и выше средней крепости сухих и влажных шпуров и скважин, а также для вторичного взрывания, в качестве патронов-боевиков для взрыва-

ния гранулированных и водосодержащих ВВ.

Скальный аммонит №1 представляет аммонит с добавкой 24 % гексогена и 5 % алюминия (табл. 6.3), выпускается в прессованном виде с плотностью 1,4…1,58 г/см, водоустойчив, пригоден для взрывания обводненных крепких пород с гидростатическим напором. Обладает повышенной чувствительностью к механическим воздействиям, выделяет меньше ядовитых газов, чем другие аммониты.

Прессованные патроны изготовляют с гнездом под детонатор диаметром 8 мм, глубиной 73 мм. На оболочке патрона имеется стрелка, показывающая на торец с гнездом.

Применяется при проходке стволов шахт, восстающих и горизонтальных выработок в особо крепких породах.

Кроме аммонитов, при взрывании в подземных условиях и иногда на земной поверхности используют аммонал водоустойчивый, аммонал окальный №3 (табл. 6.3), детонит М и динафталит.

Аммонал-200 водоустойчивый содержит 80 % селитры, 15 % тротила и 4,5 алюминиевой пудры, представляет собой однородный мелкий порошок серо-стального цвета, малосыпуч, обладает стабильными свойствами при хранении, не пригоден для механизированного заряжания. Выпускается в патронах диаметром 31…32 мм для взрывания крепких пород любой обводненности.

Аммонал скальный №3 содержит 72 % селитры, 6 % тротила, 15% гексогена и 8 % алюминиевой пудры, однородный порошок серо-стального цвета, является самым мощным из порошкообразных патронированных ВВ. Не слеживается, водоустойчив, надежно детонирует при диаметре 24…28 мм. Предназначен для взрывания крепких пород любой обводненности зарядами уменьшенного диаметра. Не пригоден для механизированного заряжания.

Детонит М – малопылящее порошкообразное ВВ серо-стального цвета. В составе содержится 78 % селитры, 10 % труднозамерзающих нитроэфиров, 10 алюминиевой пудры, 0,3 % коллодионного хлопка, по 0,2 % соды и машинного масла, не слеживается, высоко водоустойчив, характеризуется высокой детонационной способностью в зарядах малого диаметра 24…28 мм в сухом и увлажненном состоянии и стабильностью свойств при длительном хранении. Детонит М предназначен для взрывания в подземных условиях крепких пород любой обводненности. Вследствие токсичности нитроэфиров нельзя допускать контакта незащищенных частей человека с ВВ, так как при этом возникают сильные головные боли. Работа должны вестись в кожаных перчатках.

Динафталит – 200 – наполовину зерненный, малопылящий, не слеживающийся состав желто-песочного цвета. Содержит 88 % селитры, (35 марки ЖВ и 53 % кристаллической), 11 % динитронафтали-

на и 0,4 % парафина. Применяется в патронах диаметром 32 мм для взрывания в подземных условиях пород средней крепости.Пыль динитронафталина менее токсична, чем тротиловая. Имеет ограниченное применение, считается неперспективным ВВ.

Таблица 6.3

Свойства	Аммониты		Аммоналы		Детонит М	Динафталин
	6 ЖВ	Скальный № 1	№ 3	Водоустойчивый		
Теплота взрыва, КДж/кг	4300	5400	4950	4950	5800	4070
Объем газов, л/кг	895	830	810	845	832	920
Кислородный баланс, %	-0,53	-0,79	+0,78	+0,18	+0,18	+0,3
Плотность, г/см^3	1,0…1,2	1,6	1,0…1,15	0,95…1,1	1,0…1,3	1,0…1,15
Критический диметр, мм	10…13	6…7	8…10	12…14	8…10	15…16
Скорость детонации, км/с	3,6…4,8	6,0…6,5	4,0…4,5	4,0…4,5	4,9…5,3	3,5…4,6
Передача детонации между патронами при диаметре патрона 36 см	7…12	5…10	10…14	4…9	8…22	4…9

6.4. Инициирование взрыва промышленных ВВ

Инициирование взрыва происходит при подводе к ВВ импульса достаточной мощности для возбуждения детонации. Взрывчатые веще-

ства разного химического состава имеют различную чувствительность к механическим и тепловым воздействиям. Те вещества, которые являются очень чувствительными к внешним воздействиям и способны взрываться в малых количествах (с низким критическим диаметром) и горение которых мгновенно переходит в детонацию, используют в качестве первичных инициирующих ВВ. К ним относится гремучая ртуть, тринитрорезорцинат свинца, азид свинца.

Первичные инициирующие ВВ инициируют более мощные вторичные инициирующие ВВ (тетрил, гексоген, ТЭН), которые и вызывают взрыв заряда промышленного ВВ или шашки промежуточных детонаторов, от которых происходит взрыв заряда промышленного ВВ. Промежуточные детонаторы изготовляются из зарядов тротила или тротила и гексогена массой 200…800 г с отверстиями в центре для детонирующего шнура для КД и ЭД. В некоторых случаях промежуточный детонатор делается путем обвязки детонирующим шнуром нескольких патронов ВВ.

Гремучая ртуть $Hg(ONC)_2$ – кристаллический ядовитый порошок белого или серого цвета с температурой воспламенения 160^0 С; в сухом порошкообразном состоянии чрезвычайно чувствительное ВВ, взрывается при самых слабых механических воздействиях.

Это наиболее чувствительное из всех применяемых инициирующих ВВ. При содержании 10 % влаги гремучая ртуть только горит, не детонируя, при содержании 30 % влаги она даже не загорается, поэтому гремучая ртуть хранится в банках с водой. Прессованная гремучая ртуть приобретает большое инициирующее воздействие и менее чувствительна к внешним воздействиям, поэтому при изготовлении детонаторов первичные заряды гремучей ртути применяются в прессованном виде. При наличии влаги гремучая ртуть вступает в реакцию с медью, образуя весьма чувствительные фульминаты меди. В связи с этим медные детонаторы, снаряженные гремучей ртутью, необходимо предохранять от влаги. С алюминием гремучая ртуть вступает в реакцию, образуя невзрывчатые соединения, из-за чего при использовании гремучей ртути не применяют алюминиевые гильзы для детонаторов.

При взрыве гремучей ртути выделяются экологически весьма вредные соединения, поэтому ее применение нецелесообразно.

Азид свинца $Pb(N_3)_3$ – белый мелкокристаллический порошок. Азид свинца негигроскопичен, не растворяется в воде и не теряет детонационной способности при увлажнении. Под воздействием углекислого газа в присутствии влаги азид свинца переходит в углекислые

соли, в связи с чем его чувствительность снижается. С медью азид свинца образуют весьма чувствительные и опасные соединения, поэтому его запрессовывают в алюминиевые гильзы. Азид свинца более мощное, чем гремучая ртуть первичное инициирующее ВВ. Газы взрыва азида свинца менее ядовиты, чем гремучей ртути. В связи с этим промышленность начинает применять в качестве первичного инициирующего ВВ азид свинца вместо гремучей ртути. Степень уплотнения и температура азида свинца не оказывают влияния на его чувствительность. Азид свинца недостаточно чувствителен к лучу огня, поэтому его применяют совместно с более чувствительным к тепловому импульсу тринитрорезорцинатом свинца (ТНРС).

ТНРС $C_6H_2(N0_2)_3PbH_2O$ – золотисто-желтый кристаллический порошок. С металлами не взаимодействует. По чувствительности занимает промежуточное положение между азидом свинца и гремучей ртутью. По инициирующей способности ТНРС значительно слабее указанных ВВ, поэтому ТНРС применяется только как промежуточный заряд массой 0,1 г, который инициирует азид свинца, и последний взрывает заряд вторичного инициирующего ВВ.

Вторичные инициирующие ВВ предназначены для увеличения энергии начального импульса, сообщаемого зарядом первичного инициирующего ВВ, и детонирования заряда промышленного ВВ. Вторичные инициирующие ВВ менее чувствительны к внешним воздействиям, но имеют большую скорость детонации, теплоту взрыва и более высокую инициирующую способность по сравнению с первичными инициирующими ВВ.

Тетрил (тринитрофенилметилнитрамин) $C_6H_2(NO_2)4NCH_3$ – кристаллический порошок бледно-желтого цвета. При воспламенении быстро горит, причем горение может перейти во взрыв. С металлами тетрил не взаимодействует. Обладает высокими взрывчатыми характеристиками. Применяется в качестве вторичного инициирующего ВВ в подавляющем количестве выпускаемых детонаторов.

ТЭН (пентаэритриттетранитрат) $C_5H_8(ONO_2)_4$ – кристаллический порошок белого цвета. Негигроскопичен и нерастворим в воде. Воспламеняется с трудом, в небольших количествах горит спокойно. Относится к наиболее мощным и чувствительным вторичным инициирующим ВВ. Применяется в основном для изготовления детонирующего шнура и в качестве вторичного инициирующего в некоторых детонаторах. За рубежом ТЭН применяется в качестве одного из компонентов для изготовления мощных промышленных ВВ, а также для из-

готовления специальных шашек (в сплаве с тротилом) для инициирования зарядов низкочувствительных промышленных ВВ.

Для инициирования взрыва используется капсюль-детонатор, который представляет собой металлическую гильзу (медную, алюминиевую, биметаллическую) диаметром 6 … 7 мм, длиной 47 … 51мм, оборудованной зарядами первичного (гремучая ртуть, ТНРС 2, азид свинца) и вторичного (тетрил) инициирующего ВВ.

Таблица 6.4

Показатели	Гремучая ртуть	ТНРС	Тетрил	ТЭН	Гексоген
Теплота взрыва, кДж/кг	1697	1751	4517	5908	5489
Объем газов, л/кг	316	448	413	780	890
Плотность, г/см^3	4450	3030	3810	4000	3850
Температура взрыва, ^{0}С	3,5	2,9	1,0	1,0	1,05
Кислородный баланс, %	-11,8	-56,0	-47,4	-10,1	-20,1
Скорость детонации, км/с	5,4	5,2	7,3	8,2	8,3
Температура вспышки, ^{0}С	165	270	195	220	203
Чувствительность к удару (высота падения груза 2кг), мм	20	110	300	300	300

Заряд первичного инициирующего ВВ подбирается таким, чтобы возбудить взрыв (более мощного) вторичного ВВ. Заряд вторичного ВВ подобирается исходя из условий безотказного инициирования основного промышленного ВВ. Для усиления инициирующего действия донышко капсюля-детонатора имеет кумулятивное углубление.

Промышленностью выпускаются капсюли-детонаторы, которые в

зависимости от состава заряда ВВ делятся на гремучертутно-тетриловые и азидо-тетриловые.

Гремучертутно-тетриловые капсюли-детонаторы изготовляют в медных (КД-86) или биметаллических гильзах – сталь с медным покрытием (КД-8С) – и содержат 0,5 г гремучей ртути и 1 г тетрила.

Азидо-тетриловые капсюли-детонаторы изготовляют в алюминиевых гильзах и содержат 0,1 г ТНРС, 0,2 г азида свинца и 1 г тетрила или гексогена.

Капсюли-детонаторы обладают высокой чувствительностью к трению, удару, сжатию и огню, поэтому при обращении с ними необходимо соблюдать максимальную осторожность.

Огнепроводный шнур предназначен для возбуждения взрыва горящей пороховой сердцевиной капсюля-детонатора, а также воспламенения пороховых зарядов при отбойке штучного камня.

Огнепроводный шнур представляет собой слабо спрессованную из дымного пороха с пластифицирующими добавками сердцевину с центральной направляющей нитью, завернутой в нитяные оплетки с гидроизоляционной прослойкой.

Наружный диаметр огнепроводного шнура 5,5 мм. Едиными правилами безопасности регламентировано, что отрезок огнепроводного шнура 0,6 м должен сгорать за время 60 … 68 с.

Средства зажигания огнепроводного шнура. При огневом инициировании нескольких зарядов "Едиными правилами безопасности при взрывных работах" разрешается поджигать концы шнуров, идущих к зарядам, тлеющим фитилем, отрезком огнепроводного шнура с надрезами или специальными патрончиками. Спичкой разрешается зажигать шнур только при взрывании одиночного заряда.

Огневое инициирование запрещается в тех случаях, когда своевременный отход взрывников в укрытие затруднен из-за необходимости пользоваться лестницами, веревками, полками или преодоления других препятствий.

В таких условиях применяют электроогневое инициирование, при котором воспламенение отрезков ОШ производят взрывники из безопасного места подачей тока в электрозажигатель, укрепленный на конце ОШ.

Электрозажигательный патрон ЭЗ-ОШ-Б состоит из бумажной гильзы с зажигательным составом и электровоспламенителя. Предназначен для электрического зажигания пучка отрезков ОШ.

Электрическое инициирование осуществляется с помощью электродетонатора, который представляет собой капсюль-детонатор с закрепленным в нем электровоспламенителем. Электровоспламе-

нитель может непосредственно инициировать взрыв первичного вещества, а не через огневой шнур (ОШ).

Электродетонаторы различают по роду находящегося в них заряда инициирующего ВВ (гремучертутно-тетриловые и азидо-тетриловые), по времени срабатывания (мгновенного, короткозамедленного и замедленного действия), по конструктивному оформлению и по назначению (общего назначения, для сейсморазведки, обработки металлов, торпедирования нефтяных скважин и др.); по условиям применения (непредохранительные и предохранительные – для шахт, опасных по взрыву газа или пыли), по чувствительности к блуждающим токам (нормальной, пониженной и весьма низкой чувствительностью или грозоупорные).

Для взрывных работ применяются электровоспламенители с металлическими мостиками с сопротивлением 0,5 … 5 Ом. Мостики электровоспламенителей изготовляют из нихромовой (сплав 80 % никеля и 20 % хрома) проволочки диаметром 24…54 мкм, длиной до 5 мм.

На мостик накаливания нанесена однослойная или двухслойная воспламенительная головка. Состав прилегающей к мостику накаливания головки легко воспламеняется при пропускании электрического тока через мостик, а наружный слой создает достаточно мощный луч огня инициирования заряда первичного инициирующего ВВ. Для предохранения от отсыревания воспламенительные головки покрывают водонепроницаемым лаком.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Приведите примеры взрывчатых промышленных веществ

2. Опишите физико-химические характеристики взрывчатых веществ (кислородный баланс, теплота взрыва, реакция взрывчатого вещества).

3. Выделите составные элементы основных компонентов взрывчатых веществ.

4. Дайте характеристику инициирующих взрывчатых веществ.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абдурагимов, И.М. Физико-химические основы развития и тушения пожаров /И.М. Абдурагимов, В.Д. Говоров, В.Е. Макаров. –М.: ВИПТШ МВД СССР, 1980.
2. Абдурагимов, И.М., Процессы горения: учеб. пособие / И.М. Абдурагимов, А.С. Андросов, Л.К. Исаева. – М.: ВИПТШ МВД СССР, 1984.
3. Андросов, А.С. Методические указания к решению задач по курсу «Процессы горения» / А.С.Андросов. –М.: ВИПТШ МВД СССР , 1984.
4. Арефьев, К.М. Основы практической теории горения /К.М. Арефьев, М.Н. Конович [и др.].– Л.: Энергоатомиздат, 1986.
5. Жученков, Е.И. Исследование эксплуатационных свойств современных взрывчатых веществ / Е.И. Жученков [и др.].– М.: МГУ, 2003.
6. Кутузов, Б.Н. Разрушение горных пород взрывом / Б.Н. Кутузов. – М.: МГУ, 1994.
7. Кутузов, Б.Н. Технология и безопасность изготовления и применение взрывчатых веществ на горных предприятиях /Б.Н. Кутузов, Г.А. Нишпол. – М.: МГУ, 2001.
8. Мангуш, С.К. Взрывные работы при проведении подземных горных выработок /С.К. Мангуш. – М.: МГУ, 2002.
9. Покровский, Г.И. Взрыв. / Г.И. Покровский.–М.: Недра, 1979.
10. Моделирование пожаров и взрывов / под ред.Н.Н. Брушлинского , А.Д. Корольченко. – М.: Пожнаука, 2000.
11. Саломахин, Т.М. Физические основы механического взрыва и методы определения взрывных нагрузок.–М.: ВИН, 1974.
12. Смирнов, Н.Н Гетерогенное горение / Н.Н. Смирнов, И.Н. Зверев. – М.:МГУ, 1992.
13. Фикетт, У. Введение в теорию детонации / У. Фикет.–М.: Мир, 1989.
14. Эммануэль, Н.М. Цепные реакции.– / Н.М. Эммануэль, Г.Е. Зайков, В.А. Крицман. – М.: Наука,1989.
15. Эткин, М.Б. Взрывные работы в энергетическом и промышленном строительстве / М.Б. Эткин [и др.] – М.: МГУ, 2004.

Казаков Олег Григорьевич
Тотай Анатолий Васильевич
Попков Владимир Иванович
Радькова Наталья Олеговна

ОСНОВЫ ТЕОРИИ НЕУПРАВЛЯЕМОГО ГОРЕНИЯ И ВЗРЫВА

Редактор издательства Л.Н. Мажугина
Компьютерный набор Н.О. Радькова

Темплан 2005., п.18

Подписано в печать 23.09.05 Формат 60 x 80 1/16 Бумага офсетная.
Офсетная печать. Усл. печ. л. 15,04 Уч.-изд. л. 15,04 Тираж 135 Заказ 518

Издательство Брянского государственного технического университета
241035, Брянск, бульвар им.50-летия Октября, 7, тел. 54 – 90 – 49
Лаборатория оперативной полиграфии БГТУ, ул. Институтская, 16

60

05-78389

[5431732-]

2005245192