

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО РЫБОЛОВСТВУ  
Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Калининградский государственный технический университет»  
Балтийская государственная академия рыбопромыслового флота

**С.И. Клячин, канд. техн. наук, профессор**

## **ТЕОРИЯ ГОРЕНИЯ И ВЗРЫВА**

### **Часть 2**

### **Взрывы и взрывчатые вещества**

Учебное пособие  
для студентов, обучающихся по направлению подготовки  
«Техносферная безопасность»,  
профиль «Защита в чрезвычайных ситуациях»  
всех форм обучения

Калининград  
Издательство БГАРФ  
2020

**БГАРФ**

УДК 614(075)  
К52

**Клячин, С.И. Теория горения и взрыва. Часть 2. Взрывы и взрывчатые вещества: учебное пособие / С.И. Клячин. – Калининград: Изд-во БГАРФ, 2020. – 144 с.**

В учебном пособии рассмотрены процессы взрывчатых превращений с позиций физических и химических законов и явлений. Описаны условия, закономерности и особенности проявления различных взрывов. Приведена классификация и определены параметры, свойства и характеристики взрывчатых веществ. Описан механизм различных форм поражающего действия взрыва.

Учебное пособие предназначено для изучения дисциплины «Теория горения и взрыва» – обязательной дисциплины базовой части учебного плана бакалавриата по направлению подготовки 20.03.01 «Техносферная безопасность» профиля «Защита в чрезвычайных ситуациях» и раскрывает содержание второй части (второго раздела) дисциплины.

Рис. 15, табл. 20, библиогр. – 14 назв.

Печатается по решению редакционно-издательского совета Балтийской государственной академии рыбопромыслового флота.

**Рецензенты:** *Купер А.В.*, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры артиллерийского и зенитного вооружения (надводных кораблей) Филиала ВУНЦ ВМФ «Военно-морская академия» в г. Калининграде;  
*Шевченко С.Н.*, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Судовые энергетические установки» БГАРФ.

© БГАРФ ФГБОУ ВО «КГТУ», 2020

БГАРФ

## ОГЛАВЛЕНИЕ

5. ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ВЗРЫВНЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ.....	5
5.1. Определение, стадии и условия возникновения взрывов .....	5
5.2. Виды взрывов. Явления, вызывающие взрыв .....	8
5.2.1. Химические взрывы .....	10
5.2.2. Физические взрывы .....	12
5.2.3. Комбинированные взрывы .....	15
5.3. Детонация .....	18
5.3.1. Газодинамическая теория механизма детонации.....	18
5.3.2. Детонация конденсированных взрывчатых веществ.....	20
5.3.3. Детонация газовых смесей .....	24
5.2.4. Параметры детонационной волны .....	28
6. ВЗРЫВЧАТЫЕ ВЕЩЕСТВА И ВЗРЫВООПАСНЫЕ СМЕСИ .....	32
6.1. Основные сведения о взрывчатых веществах и взрывоопасных смесях.....	32
6.1.1. Определение и состав взрывчатых веществ и взрывоопасных смесей.....	32
6.1.2. Классификация конденсированных взрывчатых веществ .....	35
6.1.3. Химическая реакция и газообразные продукты взрыва.....	39
6.2. Свойства и параметры взрывчатых веществ .....	43
6.2.1. Работоспособность и энергетические параметры взрывчатых веществ.....	43
6.2.2. Чувствительность взрывчатых веществ.....	50
6.2.3. Стойкость и технологичность взрывчатых веществ.....	53
7. ПОРАЖАЮЩИЕ ФАКТОРЫ И РАЗРУШАЮЩЕЕ ДЕЙСТВИЕ ВЗРЫВА .....	57
7.1. Местное разрушающее действие продуктов детонации .....	57
7.1.1. Бризантное действие .....	57
7.1.2. Кумулятивное действие .....	60
7.2. Общее механическое действие взрыва.....	65
7.2.1. Фугасное действие. Формирование ударной волны.....	65
7.2.2. Методы оценки фугасности взрывчатых веществ.....	70

7.2.3. Распространение ударной волны в воздухе.....	73
7.2.4. Параметры ударной волны.....	76
7.2.5. Степени повреждений объектов и поражения людей от воздействия ударной волны.....	79
7.3. Тепловое действие взрыва.....	83
7.3.1. Параметры теплового излучения при формировании огненного шара.....	83
7.3.2. Степени поражения людей от воздействия теплового излучения.....	85
<b>8. ХАРАКТЕРИСТИКА ОСНОВНЫХ ПРОМЫШЛЕННЫХ И БОЕВЫХ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ И СРЕДСТВ ИНИЦИИРОВАНИЯ.....</b>	<b>87</b>
8.1. Бризантные взрывчатые вещества.....	87
8.1.1. Взрывчатые вещества на основе жидких компонентов.....	87
8.1.2. Твердые взрывчатые вещества и их смеси.....	90
8.1.3. Взрывчатые вещества на основе аммиачной селитры.....	96
8.2. Инициирование детонации взрывчатых веществ.....	105
8.2.1. Иницирующие взрывчатые вещества.....	105
8.2.2. Средства инициирования.....	110
8.3. Метательные взрывчатые вещества.....	113
8.3.1. Нитроцеллюлозные пороха.....	114
8.3.2. Смесевые пороха и ракетные топлива.....	121
8.3.3. Пиротехнические составы.....	126
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....</b>	<b>142</b>
<b>СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ.....</b>	<b>143</b>

## 5. ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ВЗРЫВНЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ

Взрыв – явление довольно широко распространённое в природе и технике. Внешнее проявление взрыва хорошо известно, как по личным наблюдениям, так и по кинофильмам и телевизионным репортажам и всегда связано с разрушениями и сопровождением сильным звуковым эффектом. Но это лишь внешняя картина. По сути взрыв – это сложное явление, включающее несколько физико-химических процессов.

### 5.1. Определение, стадии и условия возникновения взрывов

**Взрыв** – это процесс чрезвычайно быстрого перехода вещества или системы из одного состояния в другое, сопровождающийся выделением энергии, образованием сильно нагретых и сжатых газообразных продуктов, которые совершают механическую работу разрушения или перемещения окружающей среды.

При взрыве исходная потенциальная энергия вещества превращается в энергию нагретых сжатых газов, которая, в свою очередь, при их расширении переходит в энергию движения, сжатия, разогрева среды. Часть энергии остаётся в виде внутренней (тепловой) энергии расширившихся газов (рис. 5.1).

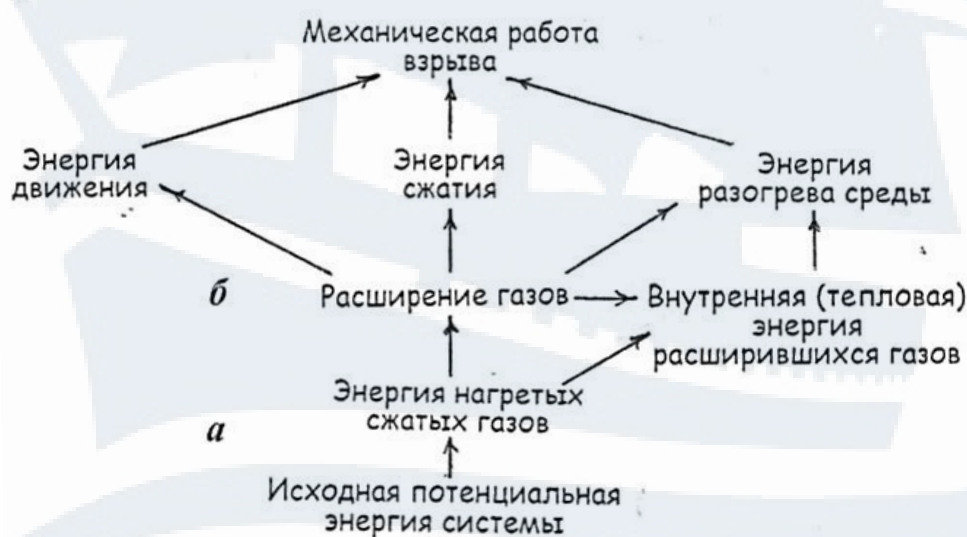


Рис. 5.1. Превращение энергии при взрыве:  
а – первая стадия взрыва; б – вторая стадия взрыва



Взрыв протекает в две стадии:

*Первая стадия* – превращение того или иного вида энергии в энергию сильно сжатых газов, например, очень быстрого протекающая реакция, при которой образуются сильно сжатые газы и пары (рис. 5.1, а).

*Вторая стадия* – мгновенное расширение сильно сжатых газов и паров, очень быстрое проявление механической работы (рис. 5.1, б).

*Первая стадия* может протекать по-разному, определяется исходным состоянием вещества или системы, определяет причину, вид и потенциальную энергию взрыва. В её основе могут лежать как химические, так и физические процессы.

*Вторая стадия* – процесс чисто физический, совершение механической работы. Итог этой стадии определяется потенциальной энергией, выделившейся в первой стадии, параметрами и особенностями окружающей среды. В основе механизма разрушения лежит прохождение в окружающей среде волны давления, которая носит характер ударной волны, распространяющейся со сверхзвуковой скоростью.

Таким образом, для возникновения взрыва необходимы *три условия*, являющиеся и его характеристиками: экзотермичность, скорость процесса и газообразование.

Процесс преобразования вещества, экзотермичность, скорость процесса и газообразования, или его перехода, или перехода системы из одного состояния в другое должен проходить с выполнением достаточного количества энергии и, прежде всего, тепла. Для химического процесса это экзотермичность реакции.

*Первым* необходимым условием, без которого взрывчатый процесс вообще невозможен, является *экзотермичность* реакции. За счёт тепловой энергии реакции происходят разогрев газообразных продуктов до температуры в несколько тысяч градусов и последующее их расширение. Чем выше температура реакции, тем более разрушительное действие оказывает взрыв.

Теплота взрыва является важнейшей характеристикой взрывчатого вещества (системы). Для твёрдых взрывчатых веществ она составляет  $750 \div 4000$  кДж/кг, для газообразных систем –  $8500 \div 15000$  кДж/кг.

Таким образом теплота является скрытой потенциальной энергией взрыва.

Скрытой энергией обладают не только взрывчатые вещества (ВВ). Ею обладают дрова, уголь, бензин и другие горючие вещества. Эта энергия может также выделяться при определённых условиях, например при горении.

Известно, что в 1 кг бензина энергии содержится в 10 раз больше, чем в 1 кг тротила. Правда, при таком сравнении допускается некоторая неточность.

Бензин или любое другое топливо не может гореть в замкнутом объеме без достаточного количества воздуха или свободного кислорода. Для сгорания 1 кг бензина требуется столько кислорода, сколько его содержится в 15,5 кг воздуха. Поэтому правильнее теплоту горения топлива рассчитывать на 1 кг его смеси с необходимым для горения количеством кислорода.

При таком расчёте разница в величинах теплоты горения бензина и теплоты взрыва ВВ стала меньше, однако и в этом случае количество выделяющейся энергии у бензина больше: у тротила – 1000 ккал/кг, у смеси 1 кг бензина с кислородом – 2300 ккал/кг.

Следовательно, величина энергии, заключённая во взрывчатых веществах, не является основной причиной огромной разрушительной силы взрыва.

Основная причина заключается не в величине энергии, хотя это тоже имеет значение, а в очень быстром её выделении.

Если сгорание 1 кг бензина в двигателе автомобиля проходит за 5-6 минут, то взрывное превращение 1 кг тротила в виде детонации длится всего лишь 1-2 стотысячные доли секунды.

*Вторым* и важнейшим условием взрыва является **скорость процесса**, которая резко отличается от скорости 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 взрыве достигается значительно более высокая объёмная концентрация или плотность энергии.

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

Взрывчатые процессы протекают столь быстро, что объём системы не успевает значительно измениться и вся выделяемая энергия сосредотачивается в исходном (занимаемом системой до взрыва) объёме. В результате возникает чрезвычайно высокая плотность энергии. Особенно большая плотность энергии характерна для конденсированных взрывчатых систем (твёрдых или жидких). Плотность энергии твёрдых веществ может превосходить плотность энергии газообразных веществ в 300 – 1000 раз.

*Третьим* условием взрыва является *газообразование*. Высокое давление, возникающее при взрыве, и обусловленный им разрушительный эффект не могут быть достигнуты 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 быстрый переход потенциальной энергии взрыва в кинетическую энергию движения газов.

Из 1 кг твёрдого взрывчатого вещества образуется около 1000 л газообразных продуктов реакции. Максимальное давление при взрыве конденсированных веществ составляет тысячи атмосфер.

При взрыве газообразных систем увеличение объёма газа, отнесённого к обычным температурам, не происходит, а иногда даже он уменьшается, например, в случае взрыва газообразной водородокислородной смеси с образованием пара.

Однако это уменьшение компенсируется высоким давлением продуктов взрыва.

Если же в экзотермической реакции взрывного превращения твёрдых тел отсутствуют газообразные продукты, то взрыв будет невозможен независимо от скорости распространения процесса.

## **5.2. Виды взрывов. Явления, вызывающие взрыв**

Явления, вызывающие взрыв имеют разную природу происхождения, кроме того, для реализации взрывных превращений необходимы определённые условия.

На рис. 5.2 представлены наиболее часто встречающиеся разновидности взрывов.

По природе происхождения *взрывы подразделяются на химические, физические и комбинированные.*



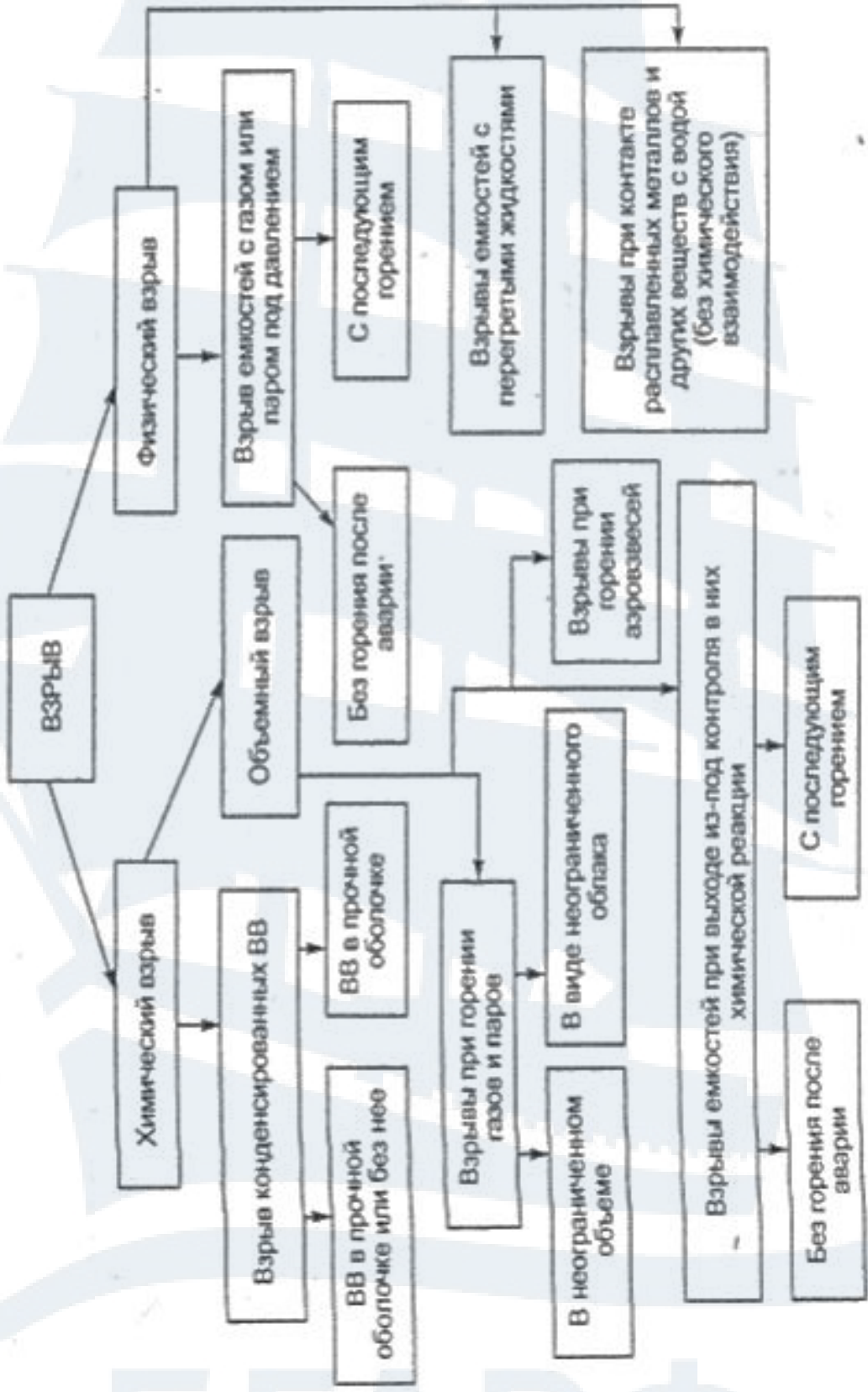


Рис. 5.2. Разновидности взрывов

### 5.2.1. Химические взрывы

В основе химического взрыва лежит химическая реакция – процесс быстрого химического превращения вещества с выделением тепловой энергии за короткий промежуток времени и в таком объёме, что образуются волны давления, распространяющиеся от источника взрыва.

Химические взрывные превращения могут происходить в результате следующих реакций:

- разложения;
- окислительно-восстановительных;
- поляризации, изомеризации и конденсации.

Энергия, выделяющаяся при взрыве, содержится в исходном веществе в скрытой форме. Чтобы понять, каким же образом происходит выделение этой энергии, вспомним, что всякое вещество состоит из молекул, а молекулы из атомов.

Превращение одного вещества в другое происходит в результате изменения строения молекул. Атомы, входящие в состав молекул, при химических процессах перестраиваются, соединяются по-новому. В результате появляются новые молекулы и вещество изменяется. Перестройка молекул сопровождается выделением или поглощением энергии.

Если выделение энергии достаточно и скорость процесса высокая, то реализуется взрывное превращение в виде детонации (более подробно процесс детонации будет рассмотрен далее).

Существует три механизма химических реакций в зоне детонации: *ударный*, *баллистический* и *смесевой*.

При ***ударном механизме*** взрывчатое вещество сначала претерпевает сжатие и разогрев, а затем химическое превращение. Причём ВВ считается гомогенным, и химическая реакция протекает во всём объёме вещества, находящегося в зоне превращения. Этот механизм характерен для газообразных и жидких ВВ.

При ***баллистическом механизме*** продукты взрыва образуются путём сгорания отдельных частиц вещества. При этом предполагается, что химическому превращению подвергается гомогенное вещество, но превращение идёт не по всему объёму, а лишь в тонком поверхностном слое отдельных сгорающих частиц. Этот тип реакции является основным при детонации твёрдых ВВ.

При прохождении фронта ударной волны в твёрдом ВВ возникают многочисленные очаги химической реакции. Газообразные продукты реакции охватывают новые частицы вещества, которые быстро сгорают в условиях высоких температур и давлений.

При *смесевом механизме* реакция, вызывающая детонацию, является результатом взаимодействия двух или нескольких веществ, находящихся в молекулярном контакте. Этот механизм характерен для гетерогенных взрывчатых систем и взрывчатых смесей. Процесс развивается, как правило, по следующей схеме (для примера возьмём аммонийную селитру):

- сначала происходит разложение ВВ с образованием окисляющих агентов (в частности монооксида азота NO) с выделением части теплоты;
- затем горючие компоненты взрывчатой смеси взаимодействуют с NO. На этой фазе реакции выделяется оставшаяся часть теплоты взрыва.

Естественно, что одним из важнейших условий увеличения скорости реакции, а соответственно, и мощности ВВ, является тщательность смешения компонентов.

Взрывчатое вещество способно при соответствующих условиях выделять значительную энергию за счет того, что его молекулы превращаются в молекулы газов. Благодаря выделившейся энергии образовавшиеся газообразные продукты оказываются нагретыми до очень высокой температуры и начинают быстро расширяться. Расширяющиеся газы могут производить механическую работу по перемещению и разрушению окружающих предметов.

По характеру взрывного процесса в пространстве все химические взрыва подразделяются на:

- точечные (сосредоточенные);
- объёмные.

**Точечными взрывами** являются, в основном, взрывы твёрдых или жидких веществ, занимающих малый объём относительно зоны воздействия. Примером может служить взрыв любого заряда конденсированного взрывчатого вещества.

**Объёмный взрыв** представляет собой взрыв газо-, паро- или пылевоздушного облака, занимающего значительный относительно зоны воздействия объём. При таком взрыве образуется

значительное облако разогретой горячей смеси, называемое огненным шаром. *Огненный шар* – это крупномасштабное диффузное пламя сгорающей массы горючего или парового облака, поднимающегося над поверхностью земли. Огненный шар распространяется в окружающей среде со значительной скоростью.

Итак, *химические взрывы* – это взрывы, связанные с внезапным изменением химического состояния вещества, сопровождающиеся крайне быстрым выделением энергии и образованием сжатых газов, способных производить механическую работу.

### **5.2.2. Физические взрывы**

В основе физических взрывов лежит быстрое изменение состояния системы, приводящее к образованию разогретых газов с высоким давлением или к росту внутреннего давления, которое превышает предельно допустимые значения.

К физическим относятся взрывы:

- сосудов и оборудования, работающих под давлением;
- за счёт энергии фазового перехода «жидкость – кристалл», а также физическая детонация;
- электрические.

**Взрывы сосудов и оборудования, работающих под давлением** могут произойти при их резкой разгерметизации и расширении газов с образованием сильных волн давления.

Возможные причины разгерметизации:

- снижение прочности стенок сосуда трубопроводов;
- заполнение емкости сосуда сверх нормы;
- дефекты, допущенные при монтаже, ремонте сосуда;
- конструктивные недостатки сосуда;
- коррозия стенок сосуда, т.е. разрушение материала, вещества вследствие физико-химического воздействия на них других веществ, находящихся в сосуде или внешней среде;
- эрозия материала сосудов, т.е. разрушение материалов стенок вследствие механического воздействия находящихся в сосуде веществ и материалов или вследствие электрических разрядов;
- внешние механические воздействия.



При таких взрывах возникающее внутренне давление в сосуде превышает предельно допустимое значение. Это приводит к разгерметизации сосуда с последующим взрывом.

В случае если хранящееся в сосуде вещество нагрето до температур, превышающих предельно допустимые значения, происходит химическое превращение этого вещества, которое так же может привести к росту внутреннего давления.

Особенно взрывоопасны сосуды с перегретой жидкостью, даже с водой. Над поверхностью жидкости всегда есть «паровая подушка». В случае нагрева жидкости она не даёт жидкости вскипать, так как внутри сосуда повышенное давление. В случае разгерметизации сосуда давление в «паровой подушке» резко уменьшается, что приводит к мгновенному вскипанию жидкости с образованием большого количества пара с высоким давлением. Такое явление получило название **«паровой взрыв»**.

В особую группу физических взрывов традиционно выделяются взрывы паровых котлов и оборудования.

Причины возникновения таких взрывов:

- внезапное уменьшение или прекращение расхода воды в паровых котлах;
- поломка приборов автоматики, контролирующих подачу пара;
- нарушение температурного режима оборудования, приводящее к перегреву паров или газов;
- снижение уровня воды (упуск) в паровых котлах.

*Упуском воды* называется такое нарушение работы котла или другого оборудования, при котором уровень воды в них снижается настолько, что часть поверхности перестаёт омываться водой и начинает перегреваться.

**Взрывы за счёт энергии фазового перехода** связаны прежде всего с процессами вскипания и испарения, происходящими настолько интенсивно, что возникающие возмущения среды формируют сильные волны давления.

Причины, вызывающие такие взрывы:

- вскипание расплавов;
- быстрая (мгновенная) перекристаллизация расплава, т.е. быстрое образование кристалла.

Например, при смешении горячей и холодной жидкостей, когда температура одной из них значительно превышает темпе-



ратуру кипения другой (например, при выливании расплавленного металла в воду), может возникать **физическая детонация** (*physiral detonation, vapour explosion*).

Механизм протекания физической детонации заключается в быстром (взрывном) испарении парожидкостной смеси, образовавшейся при смешении горячей и холодной жидкости. В результате возникает ударная волна с избыточным давлением в жидкой фазе, достигающим тысячи атмосфер.

Физическая детонация может происходить также при попадании холодных сред на нагретые до высоких температур поверхности.

Исследования механизмов таких взрывов показали, что их не удаётся объяснить с позиции «вскипания» жидкости с последующим образованием метастабильного состояния. Энергия таких взрывов определяется энергией скрытого перехода в системе «жидкость – кристалл».

*Примеры.* Наиболее тяжёлый по своим последствиям физический взрыв произошёл в 1993 г. на Днепровском металлургическом комбинате. В результате попадания в доменную печь с обрушившейся шихтой большого количества воды (от 1 до 3 т) произошло быстрое испарение и повышение давления в объёме печи, что привело к её частичному разрушению с выбросом горячих газов. При взрыве пострадали 29 человек, из них 18 погибли.

На Новолипецком металлургическом комбинате 7 июня 1991 г. из-за попадания воды в конвертор из прогоревшего резервуара (торкретфурмы) произошёл взрыв с выбросом из конвертора перегретого пара и продуктов расплава. В результате этого взрыва пострадали семь человек, были повреждены элементы котла-утилизатора и газоотводящего тракта, разрушена подкрановая балка и другие элементы конструкций.

**Электрические взрывы** – это мощные искровые разряды в газах (например, молния) и взрывы металлических проводников (ЭВП) при пропускании через них токов большой плотности.

При газовых разрядах разность электрических потенциалов выравнивается за малые промежутки времени, так что плотность выделяемой при этом энергии соизмерима с параметрами ядерных взрывов.

Взрыв металлических проводников (проволочек) обусловлен быстрым испарением металла и переходом его в пламенное

состояние с последующим расширением плазмы и преобразованием тепловой энергии в потенциальную. Чрезвычайно быстрый нагрев проводников до температуры  $10^4$  К способствует их существенному перегреву выше точки кипения металла, при этом наблюдается быстрое расширение паров металла с образованием ударных волн.

Таким образом, ЭВП – это резкое изменение физического состояния металла в результате интенсивного выделения в нём энергии, приводящее к нарушению металлической электропроводности и сопровождающееся образованием ударной волны и электромагнитного излучения.

### 5.2.3. Комбинированные взрывы

Комбинированные взрывы сопровождаются выделением энергии и образованием сжатых газов в результате последовательного протекания физического и химического процессов (или сначала химического процесса, затем физического), работа которых полностью или частично суммируется.

Комбинированные взрывы по природе механизма возникновения энергии подразделяют следующим образом:

- явления BLEVE;
- ядерные взрывы;
- термоядерные взрывы.

**BLEVE** (*Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion*) – взрыв расширяющихся паров вскипающей горючей жидкости.

Сущность этого явления заключается в следующем. При наличии источника нагрева происходит перегрев горючей жидкости или сжиженного горючего газа. Резкое падение давления в сосуде вызывает вскипание находящейся в нем жидкости и образование воздушной ударной волны. Ударная волна вызывает разрушения оборудования, выброс газо- или паровоздушного облака. Это процесс физический, уже рассмотренный ранее и получивший название «парового взрыва». При наличии источника зажигания (например, в условиях пожара) происходит сгорание образовавшегося облака с образованием огненного шара. Выделяющаяся тепловая энергия подпитывает и усиливает волну давле-

ния. Этот процесс химический, получил название «теплового взрыва».

BLEVE – термин, который используется для описания целой совокупности явлений, сопровождающих внезапное разрушение сосуда (баллона, резервуара) с перегретой горючей жидкостью со сжиженным горючим газом при наличии источника воспламенения. Например, причиной серьезных аварий на объектах СУГ (сжиженных углеводородных газов) являются именно взрывные явления типа BLEVE с образованием огненных шаров.

Для образования такого взрыва необходимы следующие два условия:

1. Жидкость, хранящаяся в герметичном сосуде под давлением, к моменту вскипания (за счет сброса давления) должна быть «термодинамически перегретой» выше некоторого характерного предела относительно состояния насыщения при атмосферном давлении.

2. В результате аварийной разгерметизации или разрушения корпуса сосуда должно произойти резкое падение давления над поверхностью раздела жидкой и паровой фаз.

Нарушение целостности сосуда может происходить из-за:

- переполнения сосуда с последующим его нагревом, а значит и увеличением объёма жидкости;
- внешних механических воздействий осколков от разрушения других сосудов, применения оружия, переворачивания и пробоя цистерн во время транспортирования и т. п.;
- внешних тепловых воздействий, таких как локальный перегрев корпуса и связанное с этим резкое снижение его механической прочности

В тех случаях, когда при сбросе давления не достигается граница перегрева, мгновенного вскипания жидкости в объеме не происходит. За счет возникшей неравномерности, т.е. временного термодинамического перегрева, происходит превращение части внутренней энергии в теплоту, которая далее реализуется испарением части жидкости по обычному механизму поверхностного кипения. Это приводит к равномерному понижению температуры по всей массе жидкости.

При «провале» за границу предельного перегрева произойдет «паровой взрыв», давление в сосуде может возрасти в сотни раз, вследствие чего сосуд будет разорван. За счет резкого сброса

давления часть жидкости превратится в пар, а оставшаяся часть уже «охлажденной» жидкости будет практически полностью захвачена резко расширяющимся паром и вынесена с ним в окружающее пространство в виде аэрозоля. В результате образуется аэрозольное облако расширяющихся паров, которое с большой вероятностью воспламенится и будет сгорать с высокой интенсивностью и мощным излучением тепла в окружающее пространство. Воспламенение может быть вызвано как внешним источником, так и за счет взаимодействия разрушающихся элементов в виде удара или трения.

За счет исходного эффекта расширения при разрушении сосуда высокого давления, а также за счет расширения продуктов сгорания образуется ударная волна, способная вызвать разрушения в прилегающей к сосуду зоне.

Дополнительным фактором опасности при возникновении эффекта BLEVE являются осколки от разорвавшегося корпуса, увеличивающие зону потенциальной угрозы вокруг резервуаров.

При быстром сгорании облака, как уже отмечалось, происходит мощное излучение теплоты в окружающее пространство, способное вызвать возгорание горючих материалов и термическое поражение людей на значительных расстояниях от места аварии.

**Ядерные взрывы** связаны с более фундаментальными превращениями веществ. При ядерном взрыве происходит превращение атомных ядер исходного вещества в ядра других элементов, которое сопровождается освобождением энергии связи элементарных частиц (протонов и нейтронов), входящих в состав атомного ядра.

Ядерный взрыв основан на способности определенных изотопов тяжелых элементов урана или плутония к делению, при котором ядра исходного вещества распадаются, образуя ядра более легких элементов. При делении всех ядер, содержащихся в 50 г урана или плутония, освобождается такое же количество энергии, как и при детонации 1000 т тринитротолуола.

**Термоядерные взрывы** имеют в своей основе другой тип ядерной реакции – реакцию синтеза ядер некоторых лёгких элементов, сопровождающуюся выделением большого количества энергии.



Силы отталкивания одноименных электрических зарядов (все ядра имеют положительный электрический заряд) препятствуют протеканию реакции синтеза, поэтому для эффективного ядерного превращения такого типа ядра должны обладать высокой энергией. Такие условия могут быть созданы нагреванием веществ до очень высокой температуры. Процесс синтеза, протекающий при высокой температуре – **термоядерная реакция**. При синтезе ядер дейтерия (изотопа водорода) освобождается почти в три раза больше энергии, чем при делении такой же массы урана. Необходимая для синтеза температура достигается при ядерном взрыве урана или плутония.

Таким образом, если поместить в одном и том же устройстве делящееся вещество и изотопы водорода, то может быть осуществлена реакция синтеза, результатом которой будет взрыв огромной силы – **термоядерный взрыв**.

### 5.3. Детонация

Явление детонации открыли Бертелло и Вьей, и независимо от них – Малляр и Ле-Шателье в 1881 г. Изучая распространение пламени в трубах, они нашли, что в известных условиях некоторые горючие смеси способны к распространению пламени со скоростью от 1000 до 3500 м/с, т.е. в несколько раз больше скорости звука при обычных температуре и давлении. Это явление получило название *детонации* (от средневекового латинского *detonatio* – взрыв; латинского *detono* – гремлю).

#### 5.3.1. Газодинамическая теория механизма детонации

Общепризнанной в настоящее время является газодинамическая теория детонации. В основе ее лежит представление об ударных волнах сжатия.

**Ударная волна** – это особенная волна давления, скорость движения которой превышает скорость звука, а на переднем фронте волны сжатия давление возрастает скачкообразно. Соответственно газодинамические процессы, происходящие при прохождении такой волны, подчиняются законам ударного сжатия.

Источники ударных волн – сильные («конечные») возмущения среды, одним из которых является взрывное превращение.



Ударная волна, распространяющаяся в среде горючего газа или по заряду взрывчатого вещества, имеет особый характер. Потери её энергии компенсируются за счет теплоты, выделяющейся при химической реакции, протекающей в зоне, охваченной волной, благодаря чему она не затухает, а наоборот «набирает силу».

Если скорость химической реакции высокая и поступление энергии преодолевает естественное затухание волны, то реализуется взрывное превращение. В противном случае будет происходить горение (дефлаграция).

В свою очередь взрывное превращение представляет собой процесс не обязательно установившийся, который при своём распространении либо затухает, либо приобретает особый стационарный характер в виде детонации.

**Детонация** – это режим взрывчатого превращения при котором по взрывоопасной горючей смеси или взрывчатому веществу распространяется ударная волна, инициирующая химические реакции горения, в свою очередь поддерживающие её движение за счёт выделившегося тепла.

Детонация – наиболее совершенная форма взрыва, протекающая с постоянной и максимально возможной при заданных условиях скоростью, является частным случаем, особой стационарной формой взрыва.

Комплекс, состоящий из ударной волны и зоны экзотермической реакции за ней, распространяющихся по взрывоопасной системе (веществу) со сверхзвуковой скоростью, называется **детонационной волной**.

Детонационная волна обладает более сложной структурой, чем ударная волна, распространяющаяся в инертной среде. Движение ударной волны есть движение скачка уплотнения и перемещение самой среды. При перемещении ударной волны по инертной среде энергия ударной волны рассеивается и она затухает. Движение детонационной волны связано с движением ударной волны, зоны химической реакции и конечных продуктов химической реакции.

Согласно такой теории, которая объясняет постоянную «подпитку» ударной волны энергией химической реакции, детонационная волна должна была бы непрерывно ускоряться, поскольку скорость реакции велика, если бы не волна разряжения, следующая за волной сжатия. Волна разряжения возникает из-за

потока газов позади фронта детонационной волны. Выше некоторой определённой скорости распространения она становится быстрее, чем волна сжатия, догоняет и замедляет последнюю. Поэтому ускорения нет, наблюдается постоянство скорости детонационной волны.

### ***5.3.2. Детонация конденсированных взрывчатых веществ***

Не смотря на то, что открыто явление детонации при изучении горения газов, механизм образования детонационной волны более наглядно представляется на примере взрыва конденсированных ВВ.

Согласно существующим воззрениям, все ВВ, как бы сильно они ни отличались одно от другого своим химическим составом и физическими свойствами, взрываются, по существу, одинаково.

Взрыв возникает в результате резкого сжатия небольшой части взрывчатого вещества. Резкое сжатие может быть следствием удара быстро движущегося предмета, сильного электрического разряда или взрыва другого ВВ. Такое воздействие называется ***инициирующим импульсом***. При этом во взрывчатом веществе образуется волна сжатия в виде ударной волны.

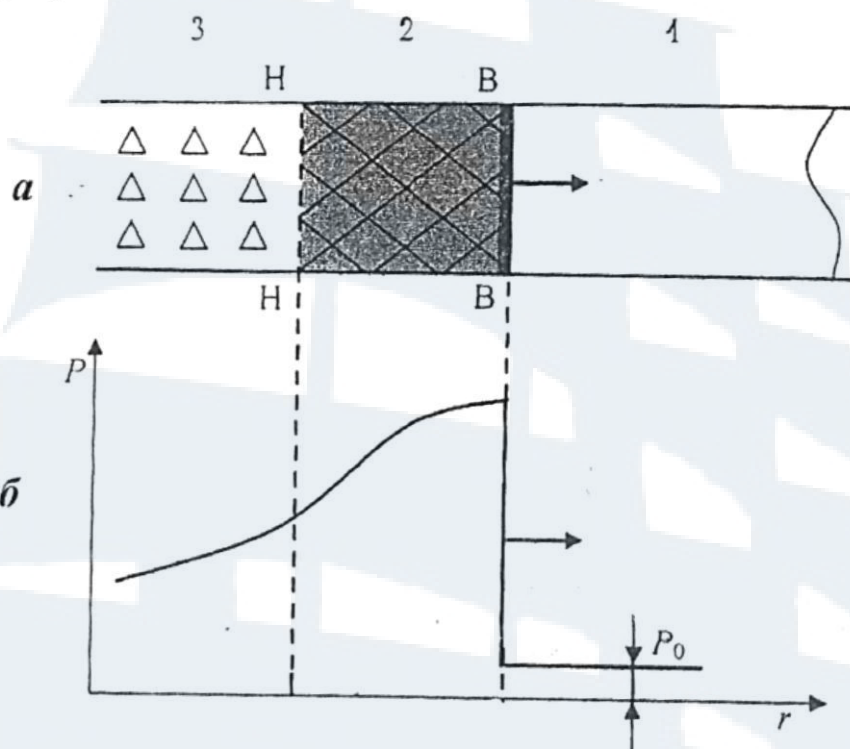
При быстром и сильном сжатии ВВ нагревается, в результате происходит химическая реакция, сопровождающаяся выделением большого количества энергии и образованием газообразных продуктов.

Образующиеся газообразные продукты производят резкий удар по соседним слоям ВВ. Эти слои, в свою очередь, сжимаются, в них также образуется ударная волна и происходит интенсивная химическая реакция.

Если энергия инициирующего импульса достаточна, то формируется детонационная волна, распространяющаяся по всей массе взрывчатого вещества со скоростью, равной нескольким километрам в секунду.

Детонационная волна имеет впереди резко очерченный фронт, на котором происходит сильное повышение давления и температуры. Непосредственно за фронтом волны происходит «превращение» ВВ в газообразные продукты и выделение энергии. Продукты взрыва не удаляются из зоны реакции, а движутся в направлении распространения процесса за ударной волной.

Схема, характеризующая процесс детонации конденсированных ВВ, и примерный характер распределения давления за фронтом детонационной волны представлена на рис. 5.3.



*Рис. 5.3. Детонационная волна:  
 а – структура детонационной волны;  
 б – распределение давления ( $P$ ) в детонационной волне;  
 1 – исходное вещество; 2 – детонационная волна  
 (ударная волна и зона химической реакции за ней);  
 3 – зона продуктов сгорания;  
 → – направление движения детонационной волны*

Химическая реакция при детонации протекает в узкой зоне, как и при обычном горении.

Исходное вещество отделено от зоны химической реакции фронтом ударной волны В–В. Фронт ударной волны движется со скоростью большей, чем скорость звука в исходном веществе. Слева за фронтом находится зона химической реакции, она отделена от поверхности продуктов сгорания поверхностью Н–Н.

При давлении во фронте ударной волны больше некоторой величины, в результате сжатия происходит разогрев вещества до температуры воспламенения. Вследствие подъёма температуры в сжатом веществе начинается интенсивная химическая реакция,

что приводит к дальнейшему увеличению температуры и давления. Энергия, которая выделилась в результате химической реакции, поддерживает постоянство детонационного процесса в целом.

**Отличие детонации от горения.** Детонация представляет собой одну из форм взрывного превращения взрывчатых веществ. Другой его формой является горение. Для горения также характерно большое количество выделяемого тепла, газообразных продуктов и большая скорость процесса. Более того, горение некоторых твердых веществ (порохов, ракетных топлив) может вызвать явления с внешними признаками взрыва, например выстрел. И, тем не менее, горение принципиально отличается от взрыва. Это отличие заключается в первую очередь в механизме распространения взрывного превращения.

Как уже было сказано, детонация обусловлена прохождением по заряду взрывчатого вещества ударной волны, возбуждающей в каждом последующем слое интенсивную химическую реакцию, сопровождающуюся выделением тепла.

Распространение же процесса горения по взрывчатому веществу обусловлено передачей тепла от одного слоя к другому за счет теплопроводности, диффузии и излучения газообразных продуктов горения.

Принципиальное отличие в механизме распространения взрыва и горения предопределяет различные скорости этих процессов. Скорость горения всегда меньше скорости распространения звука в данном веществе, а скорость детонационной волны превосходит скорость звука в заряде взрывчатого вещества.

Отличием в механизме распространения взрыва и горения объясняется и различное их воздействие на внешнюю среду. Продукты горения осуществляют метание тел в сторону наименьшего сопротивления, взрыв же дополнительно вызывает дробление преград, соприкасающихся с зарядом или находящихся на некотором расстоянии от места взрыва.

При оценке взрывоопасности ВВ всегда возникает вопрос: возможен ли переход горения в детонацию?

Условия такого перехода определяются двумя факторами: чувствительностью к тепловому импульсу и условиями горения.

Есть особые ВВ, чувствительные к инициирующим импульсам (они так и называются инициирующими ВВ), которые в виду



«неустойчивой» химической формулы легко детонируют от луча пламени и даже нагрева.

Большинство ВВ малочувствительны к нагреву, однако могут детонировать при горении (нагреве) в условиях больших давлений, когда скорость горения возрастает многократно. Такие условия создаются при пожарах, когда горят (сильно нагреваются) заряды ВВ в оболочке, например боеприпасы. Сценарий таких взрывов следующей: детонирует первый заряд, а для остальных инициирующим импульсом является ударная волна разрывающихся зарядов.

Таким образом, рассмотрев механизм и условия возникновения, можно сформировать основные свойства и особенности детонации конденсированных ВВ:

1. Благодаря выделению энергии в процессе химической реакции и постоянному ее восполнению, скорость распространения ударной волны во взрывчатом веществе может оставаться постоянной. Такая форма взрывчатого превращения называется **детонацией ВВ**, а волна – **детонационной**.

Детонация представляет собой наиболее совершенную форму взрыва, когда процесс протекает с постоянной и максимально возможной для данного ВВ скоростью.

**Скорость детонации** определяется как скорость распространения ударной волны по заряду ВВ и является одной из наиболее важных характеристик ВВ.

Она зависит от природы ВВ, его плотности, содержания примесей и не зависит от внешних условий. Для большинства известных ВВ она определена экспериментально и представлена в справочной литературе.

2. Главным условием возбуждения детонации ВВ является воздействие достаточного по мощности инициирующего импульса, обеспечивающего сильное сжатия «первого» слоя ВВ. Самым эффективным является воздействие ударной волны, что реализуется в средствах инициирования, которые получили название детонаторов.

3. Переход горения в детонацию для большинства ВВ реализуется только при больших давлениях, например в условиях пожара при нагреве (горении) в закрытых пространствах (в оболочке).



### **5.3.3. Детонация газовых смесей**

При дефлаграционном горении возникают волны низкого давления, не обладающие ударным действием. Взрыв объемных горючих паро-, газо- и пылевоздушных смесей при концентрации горючего в области воспламенения может приводить к образованию не только медленных дефлаграционных волн горения, но и ударных волн, возникающих под влиянием факторов, ускоряющих горение.

При скорости распространения пламени до 50 м/с образование ударных волн не наблюдается. Формирование ударных волн при высокой скорости распространения пламени происходит вследствие быстрого расширения газа под влиянием тепла, выделяющегося при горении, и повышения давления в области горения, а также высокоскоростного обтекания пламенем встречающихся на его пути препятствий.

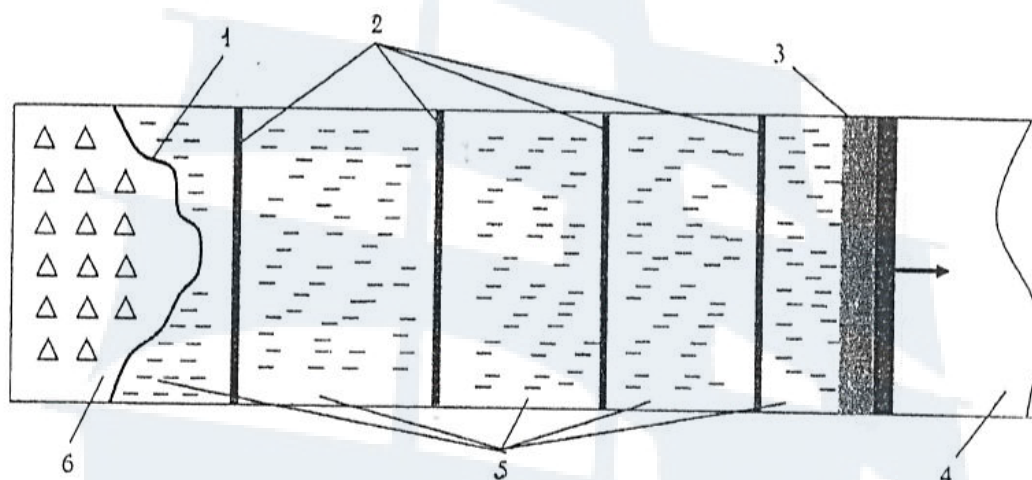
Более подробно механизм перехода горения в детонацию рассмотрим на примере горения газовых смесей в трубах.

Горение предварительно перемешанных смесей представляет собой ускоряющееся автотурбулентное горение. Вследствие того, что при горении в трубах пламя перемещается с ускорением, продукты горения тоже расширяются с некоторым ускорением. Такое расширение продуктов горения сопровождается распространением ударных волн по исходной горючей смеси (рис. 5.4).

Ударные волны, распространяясь по горючей смеси, сжимают ее. Результатом сжатия являются ее разогрев и повышение температуры. В связи с этим последовательно распространяющиеся ударные волны двигаются по смеси с все более высокой температурой. Ударные волны распространяются тем быстрее, чем выше температура среды.

Отсюда следует, что последующие ударные волны двигаются со скоростью большей, чем предыдущие, и, соответственно, догоняют друг друга. На некотором расстоянии перед фронтом пламени ударные волны соединяются в одну мощную ударную волну. Возникновение такой ударной волны приводит к сильному сжатию и разогреву исходной горючей смеси. Когда температура в ударной волне становится достаточно высокой, в зоне сжатия

начинается быстрая химическая реакция, возникает новый устойчивый режим распространения химической реакции – детонация.



*Рис. 5.4. Схема возникновения детонации газовой смеси:  
1 – фронт пламени; 2 – волны сжатия (ударные волны);  
3 – место слияния волн сжатия и возникновения детонационной волны;  
4 – исходная горючая смесь; 5 – зоны разогрева горючей смеси  
ударными волнами; 6 – продукты горения;  
→ – направление распространения горения и детонации*

Рассмотренный механизм предусматривает, что детонация газовых смесей возникает на некотором расстоянии от источника зажигания, который называется **преддетонационным участком**.

Таким образом, условия формирования детонации газовых смесей и длина преддетонационного участка определяются двумя группами факторов:

1. Внутренние факторы:

– состав компонентов должен обеспечивать высокую скорость распространения пламени даже при обычном горении и быть «чувствительным» к увеличению скорости под воздействием внешних факторов. К таким газам относятся прежде всего газы группы А;

– концентрация газа должна быть как можно ближе к стехиометрической.

2. Внешние факторы:

– факторы, способствующие турбулизации пламени, увеличению поверхности горения;

– факторы, способствующие увеличению давления в зоне горения, прежде всего замкнутый объём, форма канала и т. п.

Рассмотрим влияние этих факторов на процесс ускорения пламени и возникновение детонационной волны при поджигании горючей смеси с одного конца трубы постоянного сечения, концы которой могут быть открытыми или закрытыми.

Переход горения в детонацию происходит через ускорение пламени, скорость которого проходит через промежуточные значения порядка сотен метров в секунду. Каков механизм движения пламени с такой скоростью, слишком большой для распространения за счёт теплопроводности и слишком малый, чтобы предположить воспламенение ударной волной? Каковы причины ускорения пламени?

С механической точки зрения возникшее пламя действует подобно движущемуся поршню, приводя в движение находящийся перед ним газ за счёт расширившихся нагретых продуктов горения (скорость увеличивается в 5-10 раз). При расширении нагретые продукты горения приводят в движение исходную горючую смесь, вызывая её сжатие.

Такое движение не охватывает сразу весь газ, возмущение распространяется при малой амплитуде со скоростью звука. С течением времени растёт зона, занятая сжатым, но не реагировавшим газом, и пламя теперь распространяется не по неподвижной исходной смеси, а по смеси, движущейся и сжатой, состояние которой само зависит от скорости распространения пламени. По мере увеличения скорости пламени уменьшается различие скорости ударной волны и скорости распространения реакции горения. При скорости детонации они совпадают – реакция стационарна, не отставая, следует за сжатием в ударной волне.

Увеличение скорости горения связано, в том числе, и с возникновением неравномерного распределения скорости движения газа по сечению трубы. По мере движения газа, заключённого в трубе с неподвижными стенками, прилегающие к стенке слои газа тормозятся и, соответственно, ускоряется движение газа в центре трубы. В струе с переменной по сечению скоростью фронт пламени изгибается, увеличивается его поверхность и соответственно количество сгорающего вещества, так как химическая реакция горения протекает только во фронте пламени.

Таким образом, изменение профиля скорости вызывает увеличение скорости горения, которое приводит к увеличению скорости движения газа и т. д.

По мере ускорения пламени растёт амплитуда ударной волны, а температура сжатия (при сжатии горючая смесь нагревается) достигает температуры самовоспламенения смеси. Следствием самовоспламенения горючей смеси является распространение детонации.

Расстояние, на котором совершается переход горения в детонацию, примерно совпадает с той длиной, на которой, происходит выработка профиля скорости.

Инициирование детонации возможно как от точечного источника (взрыв заряда взрывчатого вещества, лазерный источник, взрыв электропроводящей проволоочки и др.), так и вследствие турбулизации пламени (безударное инициирование цепного механизма самовоспламенения). Необходимая для возбуждения детонации объемная мощность энерговыделения является константой для заданных смесей горючего и окислителя.

Многие факторы, способствующие турбулизации пламени (наличие на пути пламени крупноразмерных препятствий, увеличивающихся поверхность пламени), приводят к взрыву парогазовых смесей.

Таким образом, рассмотрев механизм и условия возникновения, можно сформировать наиболее важные свойства и особенности детонации газовых смесей:

1. Возникновению детонации газовых смесей предшествует преддетонационный участок – участок ускоряющегося процесса горения. Величина преддетонационного участка является одной из характеристик, определяющих склонность перехода горения в детонацию конкретной газовой смеси.

2. После установления стационарного режима детонационная волна распространяется с постоянной скоростью, которая не зависит от диаметра трубы, если последний больше некоторого малого предельного значения.

3. Скорость распространения детонации практически не зависит от начального движения и температуры газовой смеси и от условий сжигания.

Скорость детонации зависит от химической природы и процентного состава горючий газовой смеси, поэтому скорость распространения детонационной волны есть константа газовой смеси.



4. Пределы концентрации реагентов, при которых возможно распространение детонации (пределы детонации) уже, чем область воспламенения при дефлаграционном горении.

### 5.3.4. Параметры детонационной волны

Учитывая, что в основе теории детонации лежит гипотеза о распространении детонации по законам ударного сжатия, запишем основные газодинамические зависимости для ударной волны применительно к детонации.

Согласно основам гидродинамической теории ударного сжатия, уравнение сохранения энергии для ударной волны описывается выражением:

$$E - E_0 = \frac{1}{2}(p + p_0)(V_0 - V), \quad (5.1)$$

где  $p_0, V_0, E_0$  – давление, удельный объём и внутренняя энергия среды до прохождения фронта волны;  $p, V, E$  – значения этих параметров после прохождения фронта волны.

При распространении ударной волны в какой-либо газообразной среде, и в частности в воздухе, для неё также справедливо уравнение состояния идеального газа

$$pV = nRT, \quad (5.2)$$

где  $n$  – число грамм-молей в единице массы или объёма газа.

Учтём, что для идеального газа имеет место равенство

$$\Delta E = c_V \Delta T,$$

где  $c_V$  – удельная теплоёмкость идеального газа при постоянном объёме, которая определяется по формуле

$$c_V = \frac{nR}{k-1}, \quad (5.3)$$

где  $k$  – отношение теплоёмкостей  $c_p/c_V$ .

Исходя из выражения (5.2) и (5.3) формула (5.1) может быть преобразована следующим образом:

$$E - E_0 = c_V(T - T_0) = \frac{1}{2}(p + p_0)(V_0 - V). \quad (5.4)$$

Учитывая, что для удельной теплоемкости справедливо выражение (5.3), формулу можно представить в виде:

$$\frac{nR}{k-1}(T - T_0) = \frac{1}{2}(p + p_0)(V_0 - V), \quad (5.5)$$



или же с использованием уравнения идеального газа (5.2) выражение (5.5) приобретает вид

$$\frac{1}{k-1}(pV - p_0V_0) = \frac{1}{2}(p + p_0)(V_0 - V). \quad (5.6)$$

При прохождении ударной волны частицы среды начинают двигаться вслед за фронтом ударной волны, скорость их движения тем больше, чем больше скорость фронта волны. Скорость движения фронта волны тем больше, чем больше величина скачка давления, плотности и других параметров среды. Исходя из этих представлений и применяя к движению волны законы сохранения массы, импульса и энергии, теория ударных волн дает следующие уравнения, которые связывают между собой параметры волны:

$$u_\phi = V_0 \sqrt{\frac{p-p_0}{V_0-V}}; \quad (5.7)$$

$$u = (V_0 - V) \sqrt{\frac{p-p_0}{V_0-V}}, \quad (5.8)$$

где  $u_\phi$  – скорость ударной волны;  $u$  – скорость потока среды вслед за фронтом волны.

Уравнение сохранения энергии (5.1) для ударной волны будет справедливо и для детонационной волны с учётом теплоты взрыва  $Q_{\text{взр}}$  и будет иметь вид

$$E - E_0 = \frac{1}{2}(p + p_0)(V_0 - V) + Q_{\text{взр}}. \quad (5.9)$$

С учётом выражений (5.4) и (5.6) формула приобретает вид

$$\frac{1}{k-1}(pV - p_0V_0) = \frac{1}{2}(p + p_0)(V_0 - V) + Q_{\text{взр}}. \quad (5.10)$$

Чтобы вычислить параметры детонационной волны, необходимо знать состав продуктов взрыва, теплоту взрыва  $Q_{\text{взр}}$  и величину  $k = C_p/C_v$ .

Для упрощения выражений проведём математические преобразования уравнения (5.7) с учётом уравнений (5.2) и (5.10). Отсюда имеем выражение для определения скорости детонационной волны

$$D = V_0 \sqrt{\frac{p-p_0}{V_0-V}} = V_0 \sqrt{k \frac{p}{V}} = \frac{V_0}{V} \sqrt{kpV} = \frac{V_0}{V} \sqrt{knRT}. \quad (5.11)$$

Так как это уравнение написано для единицы массы газа, то величина  $n=1/M$ , где  $M$  – средняя молекулярная масса газообразных продуктов взрыва, и поэтому выражение примет вид:

$$D = \frac{V_0}{V} \sqrt{\frac{kRT}{M}} = \frac{V_0}{V} \sqrt{\frac{kgRT}{V}} \quad (5.12)$$

или

$$D = \frac{V_0}{V} \sqrt{kpV} \sqrt{\frac{T}{M}} . \quad (5.13)$$

**Скорость детонации газов** на практике вычисляется следующим образом.

Задают какую-либо предполагаемую температуру в детонационной волне и подсчитывают для этой температуры  $k$ , затем по уравнениям (5.10) и (5.11) вычисляют  $p$  и  $V$ . Далее по уравнению (5.2) проверяют правильность выбранной температуры  $T$ , подставив в это уравнение вместо  $n$  величину  $1/M$ . Если вычисленная по этому уравнению температура хорошо совпадает с заданной, то найденные значения  $k$ ,  $V$ , и  $T$  подставляют в форму (5.13) и вычисляют скорость детонации.

Скорость детонации можно также вычислить, если принять теплоёмкость газообразных продуктов взрыва постоянной и в приведённых выше уравнениях пренебречь начальным давлением  $p_0$  и величиной  $(p_0 \cdot V_0)/(k - 1)$ , так как  $p_0$  незначительно по сравнению с  $p$ . Тогда значение  $D$  можно получить из выражения

$$D = \sqrt{2(k^2 - 1)Q_{\text{взр}}} . \quad (5.14)$$

Для вычисления скорости детонации по этой формуле нужно знать только величину отношения теплоёмкостей  $k = \bar{c}_p/\bar{c}_v$  и величину  $Q_{\text{взр}}$ . Эти вычисления будут менее точные, чем по формуле (5.13).

Для вычисления других параметров детонационной волны могут быть получены следующие формулы:

$$u = \sqrt{\frac{2 \cdot (k-1)}{k+1}} \cdot Q_{\text{взр}} ; \quad (5.15)$$

$$p = 2 \cdot (k - 1) \rho_0 Q_{\text{взр}} ; \quad (5.16)$$

$$V = \frac{k}{k+1} \cdot V_0 , \quad (5.17)$$

где  $\rho_0 = 1/V_0$  – начальная плотность вещества.

**Скорость детонации конденсированных ВВ.** Применение газодинамической теории детонации для конденсированных ВВ имеет определённые трудности. Уравнения, выражающие законы сохранения массы, импульса и энергии, применимы и в данном случае. Но этих уравнений недостаточно для решения задачи. Основная проблема состоит в том, что неизвестно уравнение состояния продуктов детонации при тех высоких плотностях газов, которые создаются при детонации конденсированных ВВ.

Ландау и Станюкович, исходя из опытных данных по зависимости  $D$  от плотности заряда и из теоретических соображений, проведя сложный термодинамический анализ с применением основных уравнений газодинамической теории детонации, показали, что в качестве уравнения, связывающего между собой давление и объём газов в детонационной волне при плотностях больше  $1,3 \text{ г/см}^3$ , можно принять уравнение следующего вида:

$$pV^k = B \quad \text{или} \quad p = B\rho^k, \quad (5.18)$$

где  $\rho$  – плотность продуктов взрыва, равная  $1/V$ ;  $B$  – постоянная;  $k = 3$  для большинства практически применяемых ВВ.

Уравнение для  $k = 3$  может быть использовано в качестве уравнения состояния продуктов детонации в детонационной волне при плотностях заряда больше  $1,3 \text{ г/см}^3$ . Это уравнение будет тем точнее, чем больше плотность заряда.

В этом уравнении, в отличие от обычного уравнения состояния газа, отсутствует температура, так как при высоких плотностях продуктов взрыва, какие имеют место в детонационной волне при детонации конденсированных ВВ, давление обусловлено не тепловым движением молекул, как при обычных плотностях газов, а главным образом упругими силами, возникающими при деформации молекул при столь близком соприкосновении их между собой.

Уравнение (5.18) может быть применено для вычисления скорости детонации  $D$ , если известно значение  $B$ . Эта величина находится опытным путём по зависимости скорости детонации  $D$  от плотности заряда. Для обычных ВВ величину  $B$  можно принять равной  $4,5 \cdot 10^3 \text{ м/с}$ .

## 6. ВЗРЫВЧАТЫЕ ВЕЩЕСТВА И ВЗРЫВООПАСНЫЕ СМЕСИ

### 6.1. Основные сведения о взрывчатых веществах и взрывоопасных смесях

#### 6.1.1. Определение и состав взрывчатых веществ и взрывоопасных смесей

**Взрывчатые вещества (ВВ)** – это вещества, склонные к взрывчатым превращениям из-за неустойчивости химических соединений в формуле.

Принципиально взрывчатые вещества отличаются от взрывоопасных смесей тем, что в их составе содержатся в достаточном количестве определённые функциональные группы, способные инициировать взрывчатые химические превращения в отсутствие кислорода воздуха. Для взрывчатого процесса превращения **взрывоопасных смесей** обязательно присутствие кислорода воздуха или другого окислителя.

В принципе взрывоопасной может быть любая смесь горючего с окислителем.

Необходимым условием получения взрывоопасной смеси из горючего и окислителя является их тщательное смешивание. Однако, как бы тщательно ни были перемешаны составные части горючей смеси, невозможно добиться такой равномерности состава, при которой с каждой молекулой горючего соседствовала бы молекула окислителя. Поэтому в механических смесях скорость химической реакции при взрывном превращении никогда не достигает максимального значения. Такого недостатка не имеют взрывчатые химические соединения, в молекулу которых входят атомы горючего (углерода, водорода) и атомы окислителя (кислорода или других окисляющих элементов).

Взрывчатые вещества и взрывоопасные смеси различаются по химическому составу, агрегатному состоянию, чувствительности к внешним воздействиям и другим свойствам.

По своему физическому состоянию они могут быть:

– твёрдыми соединениями и смесями (тротил, гексоген, аммиачная селитра + тротил и т. п.);



- смесями жидких и твёрдых веществ (аммиачная селитра + жидкое горючее, жидкие нитроэферы+ аммиачная селитра и т.п.);
- газовыми смесями (метан + воздух, ацетилен + кислород и т.п.);
- смесями твёрдых или жидких веществ с газами (угольная, древесная, или другая органическая пыль, брызги (пары) керосина, бензин + воздух и т.п.);
- жидкими веществами (нитроглицерин, нитроглицоль);
- смесями жидких веществ (тетранитрометан + бензол, тетраоксид азота + керосин и т.п.);
- порошкообразными, литыми, гранулированными, водосодержащими, суспензионными, льющимися, эмульсионными.

Практическое применение в качестве промышленных ВВ имеют первые две группы, в военном деле широкое распространение получили взрывчатые смеси из твёрдых веществ. В горнодобывающей промышленности применяют и жидкие ВВ.

Гранулированные ВВ состоят из гранул размером 1-3 мм или чешуек того же размера. Водосодержащие ВВ имеют слаботекучую медообразную суспензионную консистенцию за счёт воды и загустителя. Льющемся ВВ имеют легкоподвижную консистенцию, что позволяет транспортировать их по шлангам. Горячелющющиеся и эмульсионные ВВ в горячем состоянии имеют легкоподвижную консистенцию, но твердеют при комнатной температуре.

Рассматривая химическую формулу ВВ, следует отметить, что существуют функциональные группы химических соединений, ответственные за склонность к взрывчатому превращению, например:

- $\text{NO}_2$  и  $\text{NO}_3$  в органических веществах;
- $\text{N}=\text{N}=\text{N}$ – в органических и неорганических азидах;
- $\text{OClO}_2$  и  $\text{OClO}_3$ – в хлоратах и перхлоратах;
- $\text{O}-\text{O}$ – и  $\text{O}-\text{O}-\text{O}$ – в пероксидах и озонидах;
- $\text{C}\equiv\text{C}$ – в ацетилене и ацетиленоидах металлов и др.

**Взрывчатые вещества.** Наиболее широко представлены веществами, содержащими нитрогруппу, и прежде всего нитросоединениями ароматического ряда. Они легко получаются при нитровании органических соединений и нашли широкое применение в технике и военном деле.

Основными представителями этого класса ВВ являются тринитробензол  $C_6H_3(NO_2)_3$ , тринитротолуол или тротил  $C_6H_2(NO_2)_3CH_3$ , тринитрохлорбензол  $C_6H_2(NO_2)_3Cl$ , тринитроанилин  $C_6H_5(NO_2)_3NH_2$ , гексанитродифениламин или гексил  $[C_6H_2(NO_2)_3]_2NH$ , циклотриметилтринитратамин или гексоген  $(CH_2)_3N_3(NO_2)_3$ .

Мононитросоединения невзрывчаты. Динитросоединения взрываются очень слабо. Они употребляются только в смесях с окислителями (селитрой, бертолетовой солью и др.). Широкое применение нашли также эфиры азотной кислоты – тринитроглицерин  $C_3H_5(ONO_2)_3$ , соли азотной кислоты – аммиачная селитра  $NH_4NO_3$ .

Переокиси и озониды образуются при некоторых технологических процессах (перекись этила, перекись ацетила и др.). Они крайне взрывчаты и очень чувствительны к механическим воздействиям. В чистом виде не применяются в качестве ВВ.

Окислы хлора  $Cl_2O$ ,  $ClO_2$  вследствие крайней неустойчивости и высокой взрывоопасности в чистом виде не используются в качестве ВВ. Наиболее устойчивым является хлорный ангидрид  $Cl_2O_7$ , взрывается при нагревании и от удара. Соединения азота с галогенами – хлористый азот  $NCl_3$ , йодистый азот  $NHJ_2$  – крайне взрывчаты и чувствительны к механическому воздействию. Сернистый азот  $N_4S_4$  взрывается при  $207\text{ }^\circ\text{C}$ , при небольшом сотрясении даёт сильный взрыв.

Ацетилен под давлением и в жидком состоянии крайне взрывоопасен. Металлические производные ацетилена – ацетилениды меди, серебра, ртути – очень нестойки и легко взрываются. Особенно высокими взрывчатыми свойствами отличается ацетиленид серебра. Азотистоводородная кислота и её соли (азиды) обладают взрывчатыми свойствами с высокой чувствительностью.

Азотистоводородная кислота не применяется в чистом виде, так как обладает высокой чувствительностью к внешним воздействиям и чрезвычайно взрывоопасна. Азид свинца  $PbN_6$  широко применяется в качестве инициирующего вещества, которое в незначительном количестве способно при своём взрыве вызывать взрыв большой массы другого взрывчатого вещества. Гремучая кислота  $H-O-N\equiv C$  и её соли фульминаты, особенно гремучая ртуть  $Hg(CNO)_2$ , применяются в качестве инициирующих веществ. Они легко детонируют от удара и при нагревании до  $140\text{ }^\circ\text{C}$ .

**Взрывоопасные смеси** состоят из горючих веществ, способных образовывать взрывоопасные смеси с воздухом. Это горючие газы, пары горючих жидкостей, распылённые горючие жидкости (в виде капель), горючие пыли.

По степени чувствительности к возбуждению взрывных процессов они разделены на четыре класса:

1 КЛАСС. Особо чувствительные вещества (размер детонационной ячейки менее 2 см). К этому классу относятся такие вещества, как  $H_2$ ,  $C_2H_2$ ,  $C_2H_4O$ ,  $C_3H_6O$ .

2 КЛАСС. Чувствительные вещества (размер детонационной ячейки лежит в пределах от 2 до 10 см). Типичными представителями этого класса являются  $C_3H_8$ ,  $C_4H_{10}$ ,  $C_2H_6$ ,  $C_3H_6$ ,  $C_4H_8$ .

3 КЛАСС. Среднечувствительные вещества (размер детонационной ячейки в пределах от 12 до 40 см). Типичными представителями этого класса являются гексан  $C_6H_{12}$ , октан, изооктан, пары и распылы бензина, LNG (сжиженный природный газ путём охлаждения до минус 160 °С, преимущественно метан  $CH_4$ ).

4 КЛАСС. Слабочувствительные вещества (размер детонационной ячейки больше 40 см). Типичными представителями этого класса являются аммиак, декан, распылы дизтоплива, керосина, бензола.

Детонационная ячейка – характерный размер ромбовидной структуры, оставляемой детонационной волной на закопчённой пластине.

### **6.1.2. Классификация конденсированных взрывчатых веществ**

**Конденсированное взрывчатое вещество** – это индивидуальное вещество (органическое или неорганическое химическое соединение) или смесь веществ (горючего, окислителя, других компонентов), находящееся в условиях применения в твердом или жидком (сжиженном) состоянии.

Взрывчатые вещества, относящиеся по своей химической структуре к определённому классу соединений, обладают некоторыми общими свойствами.

Однако в пределах одного класса химических соединений различия в свойствах ВВ могут быть значительными, так как ВВ во многом определяются физическими свойствами и структурой вещества. Поэтому классифицировать ВВ по их принадлежности

к определённым классам химических соединений довольно трудно. Их классифицируют обычно в зависимости от областей применения.

Наиболее приемлемой считается практическая классификация конденсированных взрывчатых веществ по назначению, согласно которой они разделены на три группы, характерной особенностью для каждой из них является режим взрывчатого преобразования – горение или детонация, и условия его возбуждения.

В соответствии с этой классификацией ВВ делятся на основные группы: инициирующие, бризантные и метательные.

### **1 ГРУППА. Иницирующие взрывчатые вещества (ИВВ).**

Применяются в качестве инициаторов взрывных процессов для возбуждения детонации других ВВ (например, бризантных), имеют большую скорость горения даже при малых давлениях и кроме того характеризуются резким увеличением скорости горения с ростом давления.

Другое название этой группы ВВ в предложенной классификации – *первичные ВВ*.

Эти ВВ не обязательно мощные, но очень чувствительные к внешним воздействиям и чрезвычайно опасные в обращении.

Характерные особенности ИВВ заключаются в следующем:

– способны детонировать от слабого начального импульса (трения, удара, электрической искры, луча огня);

– имеют короткий период нарастания скорости взрывчатого распада до максимальных значений, чем объясняется легкость перехода от возникновения горения к детонации.

Этими свойствами ИВВ объясняется характерная способность легко детонировать при воспламенении, так как большая скорость горения обуславливает значительный подъём давления над поверхностью горящего ИВВ. В свою очередь рост давления увеличивает скорость горения до значений порядка скорости детонации.

Наиболее распространённые ИВВ: соли тяжёлых металлов гремучей (циановой) кислоты, например, гремучая ртуть (фульминат ртути)  $\text{Hg}(\text{ONC})_2$ ; соли тяжёлых металлов азотистоводородной кислоты, например, азид свинца  $\text{Pb}(\text{N}_3)_2$ ; органические производные азотистоводородной кислоты – циануртриазид  $\text{C}_3\text{N}_3(\text{N}_3)_3$ ; ацетилениды некоторых тяжёлых металлов и др.



Иницирующая способность этих ВВ зависит от ряда факторов, таких, например, как плотность, степень чистоты ИВВ, чувствительность к удару (или иницирующему импульсу), размеры кристаллов (дисперсности), условия эксплуатации и т.п.

ИВВ не используются в открытом виде, только в составе средств иницирования других ВВ. Ввиду высокой чувствительности они даже в служебном обращении чрезвычайно опасны.

**2 ГРУППА. Бризантные ВВ.** Предназначаются для дробления, разрушения и перемещения окружающей среды. Это наиболее многочисленный вид ВВ. Они выпускаются в виде химических соединений (однокомпонентные или индивидуальные ВВ) или чаще механических смесей или сплавов (многокомпонентные или смесевые ВВ).

Название бризантных взрывчатых веществ происходит от французского слова *brisant* – разбивающий, дробящий. Таким названием они обязаны характеру разрушающего действия при взрыве, а именно дроблению близко расположенных предметов.

В данную группу входят:

– взрывчатые вещества нормальной мощности (тротил, алюмотол, пикриновая кислота, пикраты, пластичные взрывчатые вещества и др.);

– взрывчатые вещества повышенной мощности (тетрил, гексоген, октоген, ТЭН, нитроглицерин, динамиты и др.);

– взрывчатые вещества пониженной мощности (аммиачная селитра, детониты, динамоны (игданиты, гранулиты), аммониты (зерногранулиты, аммоналы, акваниты) и др.

Детонация является основным видом взрывчатого превращения таких взрывчатых веществ. По сравнению с иницирующими бризантные ВВ обладают значительно меньшей чувствительностью к иницирующим импульсам, и в условиях практического применения вызвать их детонацию с помощью простых импульсов не удаётся. Детонация бризантных ВВ возбуждается обычно с помощью специальных средств иницирования.

Исходя из этого бризантные ВВ ещё называются **вторичными ВВ**.

**3 ГРУППА. Метательные ВВ** – это пороха и ракетные топлива. Основной вид их взрывчатого превращения – горение. А основное назначение – создание газообразных продуктов, явля-

ющихся рабочим телом для совершения работы толкающей или тяговой.

**Порохами** принято называть многокомпонентные твёрдые вещества, которые содержат в своём составе горючее и окислитель и обладают способностью гореть по определённому закону с выделением тепла и газообразных продуктов.

Существует обширная группа веществ, подходящих под это определение. Прежде всего, к ним относятся вещества, применяемые как химический источник энергии для метательных целей в стрелковом оружии, ствольной и реактивной артиллерии. Именно этой группе веществ пороха обязаны своим исторически сложившимся названием. С начала изобретения и примерно до середины XVI в. пороха применялись в виде порошка. От слова порошок, видимо, и произошло название.

Всю обширную группу веществ, объединяемую под общим названием «пороха», можно разделить по их физико-химической природе на нитроцеллюлозные пороха и пороха – механические смеси.

**Нитроцеллюлозные пороха** – все пороха, основным компонентом которых являются высокомолекулярные взрывчатые вещества – нитраты целлюлозы, которые получают нитрованием целлюлозы.

**Пороха – механические смеси** – это взрывчатые системы, представляющие собой механическую смесь трёх основных компонентов: окислителя, горючего и связующего вещества. В готовом порохе частицы компонентов химически не связаны друг с другом, а равномерно распределены по массе пороха и находятся в тесном контакте.

С учётом природы компонентов, назначения составом и специфики их производства пороха – механические смеси можно разделить на группы: *дымные пороха, смесевые твёрдые ракетные топлива, пиротехнические составы.*

В современной ракетной технике в зависимости от назначения и типа ракет применяют как **смесевые топлива**, так и **баллистические нитроцеллюлозные пороха.**

**Пиротехнические составы** представляют собой механические смеси различных компонентов, способные к закономерному горению, как за счёт собственного кислорода, так и за счёт кислорода воздуха. Они предназначены для получения специального

пиротехнического эффекта: светового, звукового, дымового, цветового и т. п.

Пиротехнические составы широко используются в военном деле, в народном хозяйстве, при проведении торжеств (фейерверки, салюты). Основными компонентами пиротехнических составов являются горючее, окислитель и цементатор. При выборе компонентов и их количественного содержания руководствуются необходимостью получения требуемого пиротехнического эффекта.

Все метательные ВВ, включая и пиротехнические составы, при определённых условиях способны детонировать и поэтому их справедливо относят к взрывчатым веществам.

### ***6.1.3. Химическая реакция и газообразные продукты взрыва***

Для составления уравнения химической реакции необходимо знать химическую формулу исходного вещества и полный состав продуктов после реакции.

Продукты взрывчатого превращения могут быть определены методом газового анализа или рассчитаны теоретически.

Точно определить состав продуктов взрыва методом газового анализа довольно трудно, так как газовому анализу подвергаются уже охлажденные продукты взрыва, а состав охлажденных продуктов в силу ряда обстоятельств может отличаться от первоначального состава, соответствующего максимальным температуре и давлению взрыва.

Поэтому чаще всего прибегают к теоретическим расчетам состава продуктов взрыва.

При этом исходят из следующих соображений. Подавляющее большинство ВВ представляет собой органические вещества, состоящие из атомов углерода, водорода, кислорода и азота. Состав продуктов взрыва определяется главным образом соотношением горючих составных частиц (углерода, водорода) и кислорода.

Поэтому для анализа химических реакций детонации ВВ вводится понятие кислородного баланса.

***Кислородный баланс (КБ)*** характеризуют выраженным в процентах отношением избытка или недостатка кислорода в составе ВВ по сравнению с тем количеством, которое необходимо

для полного окисления всех горючих элементов этого ВВ, к его массе.

Кислородный баланс считается нулевым, если ВВ содержит кислорода достаточно для полного окисления его 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.

Например, аммиачная селитра с химической реакцией



имеет положительный кислородный баланс:

$$\text{КБ} = (32 \cdot 1/2) / 80 = 0,2 \text{ (20 \%)}.$$

В табл. 6.1 представлены значения КБ для некоторых ВВ.

Таблица 6.1

#### Характеристика взрывчатых превращений некоторых веществ

Взрывчатое вещество (ВВ)	Молекулярная масса	Химическая реакция	КБ, %
Аммиачная селитра	80	$2\text{NH}_4\text{NO}_3 = 4\text{H}_2\text{O} + 2\text{N}_2 + \text{O}_2$	+20
Нитроглицерин	227	$4\text{C}_3\text{H}_5(\text{ONO}_2) = 10\text{H}_2\text{O} + 12\text{CO}_2 + 6\text{N}_2 + \text{O}_2$	+3,5
Нитроглицоль	152	$\text{C}_2\text{H}_4(\text{ONO}_2)_2 = 2\text{H}_2\text{O} + 2\text{CO}_2 + \text{N}_2$	0
ТЭН	316	$\text{C}_5\text{H}_8(\text{ONO}_2)_4 = 2\text{CO} + 4\text{H}_2\text{O} + 3\text{CO} + 2\text{N}_2$	-10,2
Гексоген	222	$\text{C}_3\text{H}_6\text{N}_6\text{O}_6 = 4\text{H}_2\text{O} + \text{C} + 2\text{CO} + 3\text{N}_2$	-21,6
Тротил	227	$2\text{C}_6\text{H}_2(\text{NO}_2)_3\text{CH}_3 = 5\text{H}_2\text{O} + 7\text{CO}_2 + 7\text{C} + 3\text{N}_2$	-74
Динитронафталин	218	$\text{C}_{10}\text{H}_6(\text{NO}_2)_2 = 3\text{H}_2\text{O} + \text{CO} + 2\text{N}_2 + 9\text{C}$	-129,4

При взрыве ВВ с нулевым кислородным балансом образуются в основном продукты полного сгорания: пары воды, углекислоты, свободный азот, оксид алюминия и минимальное количество ядовитых газов. В этом случае выделяется максимальное количество энергии.



Примером такой реакции может служить взрывное превращение нитрогликоля (табл. 6.1).

При взрыве ВВ с отрицательным кислородным балансом руководствуются правилом, согласно которому кислород, входящий в молекулу взрывчатого вещества, сначала окисляет весь углерод до окиси углерода, а затем оставшаяся часть кислорода распределяется поровну между водородом и образовавшейся окисью углерода, в результате чего образуются вода и углекислый газ.

Таким образом, при взрыве ВВ с недостатком кислорода образуется ядовитый монооксид углерода СО (угарный газ). Образование этого соединения происходит с меньшим выделением тепла (112 кДж/г·моль), чем при образовании диоксида углерода (396 кДж/г·моль). При значительном отрицательном кислородном балансе возможно образование свободного углерода, что проявляется в виде чёрного дыма и сажи.

Примеры таких химических реакций взрывчатых превращений представлены в нижней части табл. 6.1. Именно реакции с отрицательным КБ характерны для большинства широко применяемых бризантных ВВ.

При взрыве ВВ с положительным кислородным балансом, т.е. с избытком кислорода, образуются соединения азота с этим кислородом – весьма ядовитые оксиды NO, NO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Реакции образования оксидов азота идут с поглощением тепла (эндотермичны). Примеры таких химических реакций взрывчатых превращений представлены в верхней части табл. 6.1.

Таким образом, ВВ с отрицательным и положительным кислородным балансом 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, котором расположен заряд ВВ) и свойств взрывающей породы, которые влияют на протекание вторичных химических реакций взрыва.

Плохая забойка зарядов, наличие воздушных промежутков между патронами увеличивают выделение ядовитых газов. При взрывании угля СО<sub>2</sub> может переходить в СО. Взрывы серосодержащих руд приводят к образованию сернистых газов и сероводородов. Калийные и апатитонепелиновые руды связывают оксиды

азота, молибденовые и медные – оксид углерода. Чем выше крепость взрывааемых пород, тем больше образуется оксида углерода и меньше оксидов азота.

Бумажная парафиновая оболочка патронов участвует в реакции взрыва, понижая кислородный баланс. Поэтому масса бумажной оболочки должна быть не более 2 г, а парафина – не более 3 г на 100 г массы ВВ.

Для подземных работ применяют ВВ только с кислородным балансом, близким к нулевому ( $\pm 3\%$ ). Для взрывания на земной поверхности могут применяться ВВ как с положительным, так и с отрицательным кислородным балансом.

Отравляющее действие оксида углерода СО (угарного газа) основано на его способности образовывать при вдыхании прочные соединения с красными кровяными тельцами, являющимися переносчиками кислорода из легких к тканям, из-за чего человеческий организм испытывает кислородное голодание. При больших концентрациях СО ( $>1\%$ ) быстро наступает смерть. Предельно допустимой концентрацией СО в воздухе для шахт является 0,0016 % по объему.

Оксиды азота NO, NO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O<sub>3</sub> при вдыхании в легкие образуют, вступая в реакцию с водой, азотную и азотистую кислоты, действие которых приводит к отеку легких и смерти. Особую опасность представляет способность оксидов азота накапливаться в организме в течение 4-6 часов. По токсическому действию они считаются в 6,5 раза более ядовитыми, чем оксид углерода. Поэтому предельно допустимая концентрация для шахт составляет 0,0002 % по объему.

Кроме этих газов при взрыве могут образовываться сероводород H<sub>2</sub>S, сернистый ангидрид SO<sub>2</sub>, хлор, при вдыхании которых происходят острое раздражение дыхательных путей, отек легких. По токсичности эти газы считаются в 2,5 раза более ядовитыми, чем оксид 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 в состав электровоспламенителей и замедляющих составов электродетонаторов.

Ядовитые газы, образующиеся при взрыве, обладают различной токсичностью. Если токсичность (или коэффициент токсичности) оксида углерода принять за единицу, то коэффициент

токсичности оксидов азота будет равен 6,5, а серосодержащих газов – 2,5, т.е. по токсичности 1 л оксида азота эквивалентен 6,5 л CO, а серосодержащих газов – 2,5 л CO. С учётом коэффициента токсичности определяют общий удельный объём ядовитых газов в пересчёте на «условный оксид углерода».

При взрыве на открытом воздухе присутствие вредных газов в продуктах взрыва существенного значения не имеет, хотя, например, нельзя входить в воронку (выемку), образованную взрывом в грунте, сразу же после взрыва, так как не выветрившиеся ядовитые газы при вдыхании могут вызвать отравление. При взрывах большого количества ВВ (сотни и тысячи тонн) количество вредных газов становится уже весьма существенным, и газовое облако может быть отнесено ветром на значительное расстояние с сохранением его отравляющей способности.

## **6.2. Свойства и параметры взрывчатых веществ**

### ***6.2.1. Работоспособность и энергетические параметры взрывчатых веществ***

***Работоспособность*** взрывчатого вещества определяется величиной механической работы, которая может быть совершена при взрыве 1 кг ВВ.

При взрыве всегда совершается механическая работа. Человек научился использовать эту работу в своих интересах, направленность её может быть весьма разнообразной в зависимости от целей, для достижения которых производится взрыв.

В военном деле работа взрыва направлена на поражение живой силы противника, разрушение и повреждение боевой техники, военно-промышленных объектов и т.д. В народном хозяйстве с помощью работы взрыва производят вскрытия месторождений, отколы и дробление пород полезных ископаемых в шахтах, рудниках, на карьерах и др. При ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций с помощью работы взрыва выполняют такие задачи, как: разрушение ледяных заторов на реках; обрушение строительных конструкций, не подлежащих дальнейшей эксплуатации и угрожающих обвалом; создание минерализованных полос для локализации ландшафтных пожаров и др.



Механическая работа взрыва совершается за счёт потенциальной химической энергии, которой обладает любое взрывчатое вещество. Потенциальная химическая энергия переходит в механическую работу не напрямую, а через тепловую (внутреннюю) энергию газообразных продуктов детонации.

Формы механической работы взрыва условно разделяют на *общее (фугасное) действие* и *местное (бризантное)*.

*Форма общего действия* проявляется на значительном расстоянии от заряда и определяется полным количеством выделившейся при взрыве энергии.

*Форма бризантного действия* проявляется в непосредственной близости к поверхности заряда и определяющим для неё является плотность энергии на фронте детонационной волны.

Более подробно фугасное и бризантное действие будет рассмотрено в следующей главе.

Энергетическим источником для совершения работы во всех случаях является тот запас потенциальной химической энергии, который несёт в себе взрывчатое вещество, то есть работа совершается за счёт энергии, сосредоточенной во взрывчатом веществе и выделяющейся при его взрывчатом превращении.

Косвенными параметрами, определяющими полную работоспособность взрывчатого вещества, являются его следующие *взрывчато-энергетические параметры*.

**1. Теплота взрыва** – количество тепла, выделяемое при взрывчатом превращении 1 кг взрывчатого вещества.

Из физики известно, что энергия и тепло, выделяемые в процессе реакции, находятся в прямой зависимости между собой, поэтому количество выделяемой при взрыве теплоты является весьма важной энергетической характеристикой взрывчатого вещества, определяющей его работоспособность. Чем больше выделено теплоты, тем выше температура нагрева продуктов взрыва, тем больше давление, а следовательно, и воздействие продуктов взрыва на окружающую среду.

Теплота взрыва является константой для взрывчатых веществ ввиду того, что зависит исключительно от их химического состава. Она вычисляется теоретически или определяется экспериментально в специальных толстостенных калориметрических бомбах по количеству тепла, поглощённого массой бомбы при



взрыве внутри её определённого количества взрывчатого вещества.

Для теоретического расчёта теплоты взрыва обычно пользуются законом Гесса, согласно которому суммарный тепловой эффект некоторой последовательности химических реакций не зависит от пути превращения исходных веществ в конечные продукты, а определяется только начальным и конечным состоянием системы.

Для применяемых ВВ теплота взрыва составляет 300 - 2000 ккал/кг. Теплота взрыва тротила 4100 - 4600 кДж (в среднем 4200 кДж/кг или около 1000 ккал/кг).

**2. Температура взрыва** – максимальная температура, до которой нагреваются газообразные продукты взрыва за счёт теплоты, выделяющейся при взрыве.

Температуру взрыва рассчитывают теоретически либо определяют экспериментально, используя оптические цветовые методы и др.

Предполагается, что взрывчатое превращение происходит при постоянном объёме, и выделяющаяся при взрыве теплота целиком расходуется на нагревание продуктов взрыва. Поэтому теплота и температура взрыва связаны соотношением

$$Q_{\text{взр}} = \bar{c}_V \cdot t_{\text{взр}},$$

где  $Q_{\text{взр}}$  – теплота взрыва;  $\bar{c}_V$  – средняя теплоёмкость продуктов взрыва в интервале от 0 °С до  $t_{\text{взр}}$ .

Средняя теплоёмкость продуктов взрыва имеет сложную зависимость от температуры. Эмпирическая зависимость этих величин, найденная Кастом в интервале температур от 0 °С до  $t$  имеет вид:

- для двух атомных газов  $\bar{c}_V = 4,8 + 0,00045t$  ;
- для  $\text{CO}_2$   $\bar{c}_V = 9 + 0,00058t$  ;
- для воды  $\bar{c}_V = 4 + 0,00214t$  ;
- для четырёхатомных газов  $\bar{c}_V = 10,0 + 0,00045t$  ;
- для пятиатомных газов  $\bar{c}_V = 12 + 0,00045t$ .

Средние теплоёмкости продуктов взрыва в конкретном интервале температур определены Нернстом и Волем, и для удобства расчётов приводятся их численные значения, называемые теплоёмкостями по Нернсту и Волю.

Температура взрыва зависит от химического состава взрывчатого вещества, параметров заряда (размеры, плотность, влажность) и условий взрывания (наличие оболочки, способ и т.д.). Она выше у тех взрывчатых веществ, у которых больше теплота взрыва и меньше теплоёмкость продуктов взрыва.

Для применяемых ВВ температура взрыва составляет несколько тысяч градусов. Для тротила – 3000-3300 К.

**3. Удельный объём газообразования** – объём газообразных продуктов, образующийся при взрыве 1 кг ВВ.

Газообразные продукты детонации являются непосредственными передатчиками энергии взрыва окружающей среде, то есть своего рода рабочим телом, совершающим механическую работу. Следовательно, объём продуктов взрыва является характеристикой, существенно влияющей на работоспособность взрывчатого вещества. Чем больше объём расширяющихся продуктов взрыва, тем больше их общее воздействие на окружающую среду.

Объём газообразных продуктов взрыва определяется либо опытным путём в калориметрических бомбах, либо аналитически по закону Авогадро, в соответствии с которым объём одного моля любого газа при нормальных условиях равен 22,4 л.

Этот параметр зависит от химического состава ВВ и условий взрыва.

При взрыве 1 кг наиболее распространённых ВВ выделяется 300...1000 л газов, тротила – 730 л.

**4. Давление взрыва** – максимальное давление газообразных продуктов детонации.

Взрыв конденсированных взрывчатых веществ, как отмечалось, отличается от взрыва парогазовых смесей тем, что их взрывное превращение происходит без участия кислорода воздуха. Углерод, водород и другие химические элементы, входящие в молекулу взрывчатого вещества, окисляются за счёт кислорода, находящегося в составе молекулы, т.е. имеет место внутримолекулярная перегруппировка. В результате этой перегруппировки образуются новые, в основном газообразные вещества и выделяется тепло.

В отличие от горения парогазовых смесей, для которых отношение количества молей продуктов сгорания к количеству молей горючей смеси находится в пределах 0,5-1,3, для конденсированных взрывчатых веществ это отношение находится в пределах 7-10.

В связи с этим давление при взрыве конденсированных ВВ намного выше, чем при взрыве горючих парогазовых смесей. Давление взрыва бризантных ВВ может составлять десятки тысяч атмосфер.

Например, при взрыве 1 кг тротила выделяется газ, который при нормальных условиях занимает объём  $0,73 \text{ м}^3$  (730 л). При взрыве тротила продукты взрыва разогреваются до температуры около 3300 К. На момент взрыва газ вместо  $0,73 \text{ м}^3$  занимает объём  $6,25 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3$ , который равен объёму 1 кг тротила. Следовательно, исходя из уравнения состояния идеальных газов, с учётом вышеприведённых данных, расчётное максимальное давление взрыва тротила будет равно:

$$P_{\text{взр}} = \frac{P_0 \cdot T_{\text{пв}} \cdot V_{\text{пв}}}{T_0 \cdot V_{\text{тнт}}} = \frac{101325 \cdot 3300 \cdot 0,73}{237 \cdot 6,25 \cdot 10^{-4}} = 14,3 \cdot 10^8 \text{ Па} \approx 14300 \text{ атм},$$

где  $V_{\text{пв}}$  – объём, занимаемый газообразными продуктами, образующимися при взрыве тротила,  $\text{м}^3$ ;

$V_{\text{тнт}}$  – объём, занимаемый 1 кг тротила,  $\text{м}^3$ ;

$P_0$  – нормальное атмосферное давление, 101325 Па;

$T_0$  – нормальная температура, 273 К;

$T_{\text{пв}}$  – температура продуктов взрыва, К.

**5. Скорость детонации** – скорость распространения детонационной волны по ВВ. Для наиболее широко применяемых бризантных ВВ она составляет несколько км/с, достигая значений более 9 км/с. Для тротила она составляет около 7 км/с.

У конденсированных взрывчатых веществ существует стационарная (постоянная) скорость детонации, которая не зависит от инициирующего импульса и внешних условий, она определяется только характеристиками взрывчатого вещества и энергией, выделяющейся при химической реакции.

Основными факторами, оказывающими влияние на скорость детонации конденсированных взрывчатых веществ, являются:

*1. Химическое строение и химический состав взрывчатого вещества.* Состав и строение взрывчатого вещества влияют на теплоту взрыва и состав газообразных продуктов детонации. Чем больше теплота взрыва, объём газообразных продуктов и легче средний молекулярный вес продуктов взрыва, тем выше скорость детонации.

2. *Плотность взрывчатого вещества.* Повышение плотности взрывчатого вещества приводит к увеличению давления, концентрации продуктов детонации, плотности энерговыделения и соответственно повышению скорости детонации.

Например, снижение плотности тротила в пределах от 1,6 до 1,0 г/см<sup>3</sup> ведёт примерно к прямопропорциональному снижению скорости детонации.

3. *Примеси.* Инертные примеси в целом снижают скорость детонации. Однако небольшие количества добавок горючих металлов, повышающих тепловой эффект, увеличивают теплоту взрыва и скорость детонации соответственно.

4. *Диаметр заряда взрывчатого вещества.* Существуют два предельных понятия: критический и предельный диаметры.

**Критический диаметр детонации** – наименьший диаметр цилиндрического заряда взрывчатого вещества, при котором возможно распространение детонации.

При диаметре заряда менее критического детонация либо не возникает, либо, возникнув, затухает. Минимальная скорость детонации, соответствующая критическому диаметру, называется критической скоростью.

Для бризантных индивидуальных взрывчатых химических соединений критический диаметр детонации обычно составляет несколько миллиметров, для инициирующих – сотые доли миллиметра, для гранулированных промышленных взрывчатых веществ – до 150 мм.

С увеличением диаметра заряда до некоторого предельного значения скорость детонации возрастает до стационарной (постоянной) величины, характерной для данного состава и состояния взрывчатого вещества.

**Предельный диаметр детонации** – наибольший диаметр цилиндрического заряда взрывчатого вещества, обеспечивающий максимальную скорость его детонации, при дальнейшем увеличении которого скорость детонации не изменяется.

Скорость детонации, соответствующая предельному диаметру, называется предельной или оптимальной.

Величины критического и предельного диаметров детонации не постоянны и зависят от наличия оболочки заряда и ее прочностных характеристик, а также от физического состояния взрывчатого вещества.



**6. Тротиловый эквивалент ( $M_{\text{ТНТ}}$ )** – масса условного заряда тротила, при детонации которого выделяется количество энергии и производится разрушения, эквивалентные взрыву оцениваемой взрывоопасной системы. Тротиловый эквивалент используется как универсальный показатель для сравнения разрушительной способности ВВ, а также и других различных взрывов.

**Удельное значение тротилового эквивалента** – это отношение удельной энергии (теплоты) взрыва взрывоопасной системы к удельной теплоте взрыва тротила (в среднем 4200 кДж/кг или 1000 ккал/кг).

Удельное значение тротилового эквивалента рассчитывается как

$$m_{\text{ТНТ}} = E_{\text{взр}}/Q_{\text{ТНТ}}, \quad (6.1)$$

где  $m_{\text{ТНТ}}$  – удельное значение тротилового эквивалента;

$E_{\text{взр}}$  – удельная энергия (теплота) взрыва взрывоопасной системы;

$Q_{\text{ТНТ}}$  – удельная теплота взрыва тротила (тринитротолуола).

При определении тротилового эквивалента для конденсированных взрывчатых веществ принимается

$$E_{\text{взр}} = Q_{\text{взр}},$$

где  $Q_{\text{взр}}$  – удельная теплота взрыва конденсированного взрывчатого вещества.

При определении тротилового эквивалента для парогазовой среды принимается

$$E_{\text{взр}} = Q_{\text{н}},$$

где  $Q_{\text{н}}$  – низшая теплота сгорания горючего пара (газа).

Используя удельное значение тротилового эквивалента, можно энергию того или иного взрыва выразить через количество условно взорвавшегося тротила, воспользовавшись формулой для конденсированных взрывчатых веществ:

$$M_{\text{ТНТ}} = Q_{\text{взр}} \cdot m_{\text{взр}}/Q_{\text{ТНТ}}, \quad (6.2)$$

а для парогазовых смесей:

$$M_{\text{ТНТ}} = Q_{\text{н}} \cdot m_{\text{взр}} \cdot \gamma/Q_{\text{ТНТ}}, \quad (6.3)$$

где  $M_{\text{ТНТ}}$  – тротиловый эквивалент (масса условно взорвавшегося тротила);

$m_{\text{взр}}$  – масса взорвавшегося горючего или взрывчатого вещества;

$Q_{\text{взр}}$  – удельная теплота взрыва конденсированного взрывчатого вещества;

$Q_{\text{н}}$  – низшая теплота сгорания горючего пара (газа);

$Q_{\text{ТНТ}}$  – удельная теплота взрыва тротила (тринитротолуола).

$\gamma$  – коэффициент, учитывающий долю потенциальной энергии взрывоопасной системы, перешедшей в механическую энергию взрыва, определяемый по специальной методике.

### 6.2.2. Чувствительность взрывчатых веществ

**Чувствительность ВВ** – это способность реагировать на внешние воздействия возникновением взрывчатого превращения. Чувствительность характеризуется минимальной величиной начального импульса, необходимого для взрывного превращения. Очевидно, чем меньше по величине воздействие, тем чувствительнее ВВ.

Чувствительность зависит от природы ВВ. В основном она определяется степенью прочности химических связей. Чем прочнее связи, тем меньше чувствительность, тем большее воздействие необходимо оказать на вещество, чтобы заставить его взрываться или гореть.

Агрегатное состояние ВВ оказывает влияние на его чувствительность. Как правило, в жидком состоянии ВВ более чувствительны.

С повышением температуры чувствительность ВВ возрастает, так как при нагревании увеличивается число активных молекул и соответствующим образом уменьшается количество энергии, необходимой для возбуждения взрывного превращения.

Заметное влияние на чувствительность оказывают примеси, они могут увеличивать или уменьшать её.

Если твёрдость примеси больше твёрдости ВВ, то чувствительность возрастёт.

Примеси, повышающие чувствительность ВВ, называются **сенсibiliзаторами**. К числу сенсibiliзаторов относятся металлические опилки, толчёное стекло, песок и т.д.

Примеси, понижающие чувствительность ВВ, называются **флегматизаторами**. Флегматизаторы представляют собой легкоплавкие вещества или маслообразные жидкости. Флегматизатор во взрывчатом веществе равномерно распределён по всей

массе. Лучшей флегматизирующей способностью обладают вещества с большой вязкостью, теплоёмкостью и высокой температурой вспышки.

Процесс введения флегматизатора во взрывчатое вещество называется флегматизацией. Флегматизация широко распространена в производстве современных ВВ. Гексоген, обладающий сравнительно большой чувствительностью к удару, флегматизируют сплавом парафина с церезином и в таком виде применяют для снаряжения боеприпасов.

Взрывчатые вещества неодинаково реагируют на различные виды начальных импульсов. Это означает, что во взрывчатом веществе взрывное превращение можно вызвать малым воздействием одного какого-либо начального импульса, а с помощью другого – взрывное превращение не удаётся получить вовсе или удаётся с большим трудом.

Для практического использования ВВ очень важно знать их чувствительность к различным видам начальных импульсов. Существуют стандартные методы определения чувствительности ВВ к каждому виду начального импульса в отдельности.

**Чувствительность ВВ тепловому импульсу** чаще всего характеризуется температурой вспышки.

**Температуру вспышки** – наименьшая температура, до которой необходимо нагреть ВВ, чтобы вызвать химическое превращение со скоростью, достаточной для получения звукового эффекта и пламени.

Температура вспышки некоторых ВВ приводится в табл. 6.2.

Таблица 6.2

### Температура вспышки некоторых ВВ

Взрывчатое вещество	Температура вспышки °С
Гремучая ртуть	175–180
Нитроцеллюлозный порох	180–200
Тетрил	195–220
Тэн	215
Гексоген	230
Тротил	290–295
Дымный порох	290–310
Азид свинца	330–340

**Чувствительность ВВ к удару** определяется с помощью приборов, называемых копрами. На ВВ, помещенное между двумя металлическими поверхностями, сбрасывают с определенной высоты груз фиксированной массы. При этом механическая энергия удара переходит в тепловую, возникают местные разогревы, так называемые «горячие точки», являющиеся очагами взрыва.

Чувствительность бризантных ВВ обычно характеризуется процентом взрывов, полученных из определённого количества испытаний при сбрасывании груза в 10 кг с высоты 25 см.

Данные о чувствительности к удару некоторых бризантных ВВ приводятся в табл. 6.3.

Таблица 6.3

### Чувствительности к удару некоторых ВВ

Взрывчатое вещество	Взрывы из 100 испытаний, %
Тротил	4–8
Тетрил	50–60
Гексоген	70–80
ТЭН	100

Чувствительность инициирующих ВВ к удару имеет *нижний* и *верхний пределы*.

**Верхний предел чувствительности** – это минимальная высота, при падении груза с которой обеспечивается 100 % взрывов. Верхний предел характеризует безотказность действия инициирующих ВВ и изделий из них.

**Нижний предел чувствительности** – это максимальная высота при падении груза с которой не получается ни одного взрыва. Нижний предел имеет значение для оценки безопасности ВВ при производстве, хранении зарядов и их применении.

Пределы чувствительности некоторых инициирующих ВВ к удару приводятся в табл. 6.4.

Таблица 6.4

### Пределы чувствительности некоторых инициирующих ВВ

Взрывчатое вещество	Масса груза, кг	Пределы, см	
		<i>верхний</i>	<i>нижний</i>
Гремучая ртуть	0,69	8,5	5,5
Тетразен	0,69	12,5	7,0
Азид свинца	0,98	23,0	7,0
ТНРС	1,43	25,0	14,0



**Чувствительность ВВ к взрывному импульсу** (восприимчивость к детонации) характеризуется предельной величиной инициирующего заряда, т.е. величиной минимального количества инициирующего ВВ, необходимого для возбуждения взрыва.

В табл. 6.5 приведена чувствительность к инициированию тротила и тетрила.

Таблица 6.5

### **Чувствительность некоторых ВВ к инициированию**

Взрывчатое вещество	Предельные инициирующие заряды, г	
	<i>зрелая ртуть</i>	<i>азид свинца</i>
Тротил	0,36	0,09
Тетрил	0,29	0,025

Чувствительность взрывчатых веществ к начальным импульсам является одной из важнейших характеристик, она определяет возможность и область практического использования данного вещества. Слишком большая чувствительность взрывчатого вещества делает его весьма опасным и неудобным в обращении. Например, йодистый азот настолько чувствителен, что взрывается от простого прикосновения к нему ногтем. С другой стороны, слишком малая чувствительность взрывчатого вещества затрудняет возбуждение в нем взрывчатого превращения простыми средствами, что также ограничивает область его применения, примером такого взрывчатого вещества является аммиачная селитра.

### **6.2.3. Стойкость и технологичность взрывчатых веществ**

Взрывчатые вещества способны не только взрываться от действия начальных импульсов, но и самопроизвольно разлагаться и претерпевать различные физико-химические превращения в процессе длительного хранения. Поэтому при определении срока служебной пригодности ВВ обязательно нужно учитывать такое свойство, как стойкость (стабильность). С учетом этого свойства определяется возможность их применения и безопасного обращения с ними после истечения определенных сроков хранения.

Стойкостью называется способность взрывчатых веществ сохранять в практических условиях хранения и применения по-

стоянство своих физико-химических и взрывчатых характеристик.

*Различают химическую и физическую стойкость ВВ.*

**Физическая стойкость ВВ.** Изменение характеристик взрывчатых веществ может произойти в результате физических процессов, таких как расслаивание, пыление, экссудация, слеживаемость, впитывание влаги, растворимость в жидкости, разложение или затвердевание под воздействием температуры и др.

**Расслаивание** – способность смесевых взрывчатых веществ самопроизвольно или в процессе пересыпания распасться на составные компоненты.

Происходит это вследствие того, что смесевые взрывчатые вещества состоят из компонентов, сильно различающихся по удельному весу и величине частиц. Расслаиваемость приводит к изменению взрывчатых характеристики смеси.

**Пыление** – способность сыпучих взрывчатых веществ при операциях с ними выделять в атмосферу мелкодисперсные частицы.

Гранулированные или порошкообразные взрывчатые вещества при хранении и применении могут из-за уноса наиболее мелких частиц изменять состав и соответственно взрывчатые характеристики. Наиболее пылящими являются порошкообразные взрывчатые вещества, менее гранулированные. Для уменьшения способности к пылению в состав порошкообразных и гранулированных взрывчатых веществ вводят добавки жидких компонентов (масла, воды), связывающих пылевидные частицы с крупными.

**Экссудация** – способность взрывчатых веществ при хранении выделять из своего состава жидкие компоненты (экссудаты).

К таким взрывчатым веществам относятся вещества со значительным содержанием эфиров (динамиты), а также гранулиты, содержащие жидкие нефтепродукты. Экссудация нитроэфиров из динамитов повышает их чувствительность к внешним воздействиям и, как следствие, опасность в обращении с ними. Экссудация жидких нефтепродуктов из гранулитов нарушает однородность состава и является причиной изменения взрывчатых характеристик, кроме того, увеличивается пожароопасность в местах хранения.

**Слѣживаемость** – способность сыпучих взрывчатых веществ терять при хранении сыпучесть и превращаться в прочную сплошную (камнеобразную) массу.

Слежавшиеся взрывчатые вещества неудобны в обращении и, как правило, хуже взрываются, чем неслежавшиеся.

**Гигроскопичность** – способность взрывчатых веществ при определённых внешних условиях поглощать влагу из воздуха.

Некоторые взрывчатые вещества способны поглощать влагу атмосферного воздуха и при определенной степени увлажнения, измеряемой обычно процентным содержанием влаги, сначала понижают чувствительность к восприятию детонации от начального импульса, а при дальнейшем увлажнении вообще теряют способность к взрыву.

**Водоустойчивость** – способность взрывчатых веществ при непосредственном контакте с водой сохранять неизменными свои взрывчатые характеристики.

Взрывчатые характеристики ВВ при соприкосновении с водой могут изменяться либо вследствие флегматизирующего действия воды, либо в результате частичного или полного растворения в воде отдельных компонентов взрывчатого вещества.

**Термостойкость** – способность взрывчатых веществ при повышенных (пониженных) температурах окружающей среды сохранять неизменными свои взрывчатые характеристики.

Физическая стойкость некоторых взрывчатых веществ зависит от температуры окружающей среды, при которой происходит или замерзание жидких компонентов (у нитроглицериновых взрывчатых веществ), или затвердевание веществ (у пластичных взрывчатых веществ), или изменение структуры кристаллов (у аммиачной селитры), при этом изменяются взрывчатые характеристики вещества.

**Химическая стойкость** – способность ВВ сохранять в процессе длительного хранения неизменными химический состав и химические свойства, а значит и способность к взрывчатым превращениям. Она зависит от природы ВВ, наличия в них примесей других веществ, условий хранения.

Теория химической стойкости взрывчатых веществ основана на учении о медленном химическом разложении взрывчатых веществ, т. е. на термическом распаде. Медленное химическое

разложение взрывчатых веществ, в отличие от горения и детонации, протекает не в узком фронте реакции, а одновременно во всей массе вещества, находящегося при температуре, практически равной температуре окружающей среды. Для обычных взрывчатых веществ скорость такого разложения при нормальной температуре неумовимо мала, но быстро растет с повышением температуры.

Во многих случаях термического разложения взрывчатых веществ продукты реакции (азотная кислота, окислы азота и др.) действуют как катализаторы и резко ускоряют распад. Такое ускорение реакции соответствует автокатализу, то есть ускорению химической реакции одним из её продуктов.

Примеси, особенно кислотного характера, вызывают во взрывчатом веществе дополнительные химические реакции, которые сопровождаются выделением тепла, что ускоряет процесс естественного саморазложения и разогрев массы взрывчатого вещества до температуры воспламенения, т. е. способствует самовоспламенению взрывчатого вещества.

Наиболее химически стойкими являются нитросоединения, инициирующие и аммиачно-селитренные взрывчатые вещества. Если эти вещества не загрязнены некоторыми примесями кислотного или щелочного характера, то они не изменяют своих свойств в течение очень длительного времени, измеряемого десятилетиями. Наименьшей химической стойкостью обладают нитроглицериновые взрывчатые вещества, сохраняющие свои свойства лишь в течение нескольких месяцев.

**Технологичность ВВ** – удобство снаряжения зарядов.

Наиболее важными физическими свойствами, определяющими технологичность, являются плавкость, прессуемость, возможность механической обработки.



## 7. ПОРАЖАЮЩИЕ ФАКТОРЫ И РАЗРУШАЮЩЕЕ ДЕЙСТВИЕ ВЗРЫВА

### 7.1. Местное разрушающее действие продуктов детонации

#### 7.1.1. Бризантное действие

**Бризантность** (от немецкого *brisant* и от французского *brisance* (*briser*) – «ломать», «разбивать», «дробить») – мера местной (локальной) работоспособности взрывчатого вещества, проявляется в непосредственной близости к поверхности заряда в виде дробящего воздействия на среду, в которой происходит взрыв.

**Бризантное действие** взрыва проявляется в форме дробления, измельчения или пробивания среды, соприкасающейся с зарядом ВВ.

Применительно к практике, такое действие взрыва может проявляться в различных формах, например: разрушение капитальных конструкций, пробивание преград (в том числе бронированных), дробление негабаритных кусков породы, осколочное действие боеприпасов, эффекты кумуляции, упрочнение и резка металлов взрывом и др. Бризантность является одной из важных характеристик взрывчатых веществ, на основании которой проводится их сравнительная оценка и выбор для конкретных целей.

Бризантное действие обусловлено динамическим ударом продуктов детонации, находящихся под очень высоким давлением (20000-500000 атм.), и наблюдается лишь в непосредственной близости от заряда ВВ, в зоне пикового (максимального) давления взрыва.

Следовательно, бризантность взрывчатого вещества не определяется полностью теми же параметрами, что и общая работоспособность, которая возрастает с увеличением удельной теплоты взрывчатого превращения и удельного объёма газообразных продуктов взрыва. Для оценки бризантности определяющими факторами являются другие параметры – начальная плотность заряда, скорость и давление детонации.

С увеличением скорости детонации усиливается дробление корпуса снаряда. Скорость детонации, как известно, зависит от теплоты взрыва и плотности ВВ. Поэтому, когда требуется получить наибольшее бризантное действие, применяют ВВ с большой

скоростью детонации и теплотой взрыва, а снаряжение производят с плотностью заряда ВВ близкой к предельной.

При взрыве разрывного заряда под действием расширяющихся газообразных продуктов детонации корпус снаряда и соприкасающаяся твердая среда дробятся на осколки, которые разлетаются в разные стороны, поражая на своем пути людей и уязвимые части окружающей инфраструктуры. Поэтому на бризантном действии основано применение ВВ в осколочных снарядах, бомбах, гранатах, минах и некоторых других боеприпасах.

Но наиболее значимо бризантное действие проявляется при разрушении твердых скальных пород в горном деле, разрушений бетонных и каменных стен и перекрытий в строительстве, пробивании и разрушении бетонных преград и бронированных корпусов в военном деле.

Для обеспечения эффективности такого действия заряд ВВ должен быть заложен в непосредственном контакте с преградой или в непосредственной близости от нее. В военном деле это предполагает точное попадание в цель боеприпаса.

При взрыве заряда на поверхности преграды под действием динамического удара в толще её возникает и распространяется ударная волна, вызывающая последовательное сжатие отдельных слоев этой преграды.

Сильно сжатые, ничем не удерживаемые слои твердой породы на противоположной стороне преграды при расширении (которое наступает после сжатия) откалываются от основной массы преграды и с большой скоростью отбрасываются в сторону, производя дополнительные разрушения. Откол внутренней поверхности без сквозного пробивания преграды получил название *откольного действия*.

Бризантность взрывчатого вещества определяется теоретически и может быть измерена в лабораторных условиях с помощью специальных установок. Теоретические расчётные формулы являются приближёнными и могут использоваться только для грубых оценок, поэтому рассмотрим некоторые практические методы определения бризантной работы взрыва.

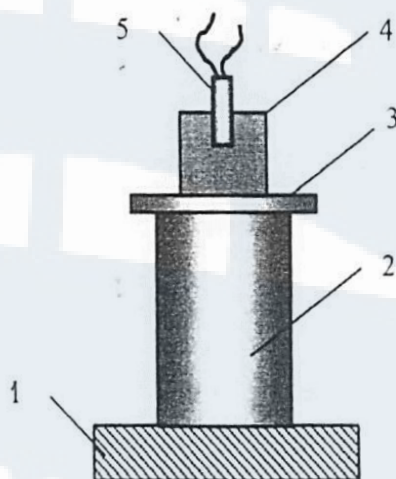
Для экспериментальной оценки бризантности взрывчатых веществ в практике используют следующие методы:

– метод оценки бризантности по обжатию свинцовых цилиндров (проба Гесса);

- метод оценки бризантности по импульсу взрыва на баллистическом маятнике;
- песочная проба (*sand test*);
- метод оценки бризантности по дроблению оболочки заряда.

**Метод оценки бризантности по обжатию свинцовых цилиндров (проба Гесса)**, предложенный австрийским военным инженером Филиппом Гессом в 1879 г., является наиболее простым и распространённым в настоящее время. Данный метод используется как стандартный по ГОСТ 5984-99.

Испытание проводят следующим образом: на стальную плиту устанавливается свинцовый цилиндр, сверху укладывается стальная пластинка и заряд, заполненный 50 г порошкообразного взрывчатого вещества, запрессованного до плотности  $1 \text{ г/см}^3$ , с детонатором (рис. 7.1).



*Рис. 7.1. Проба Гесса:*

*1 – стальная плита; 2 – свинцовый столбик; 3 – стальная пластинка;  
4 – заряд взрывчатого вещества; 5 – детонатор*

После инициирования заряда взрывчатого вещества давление взрыва, передаваемое через стальную пластинку, обжимает свинцовый цилиндр, придавая ему грибообразную форму (рис. 7.2). Разница между начальной и конечной высотами цилиндра, измеренная в миллиметрах, и характеризует бризантность взрывчатого вещества.



*Рис. 7.2. Свинцовый цилиндр до и после взрыва*

Проба Гесса позволяет расположить взрывчатые вещества по их возрастающей бризантной способности в относительный ряд:

- аммонит № 6 ЖВ – 14-17 мм;
- тротил – 16-17 мм;
- тетрил – 21 мм;
- аммонит скальный № 1 прессованный – 22 мм;
- гексоген (50 г) – оценивается в 24 мм (разбивает цилиндр).

**Метод оценки бризантности по дроблению оболочки заряда** используется при подборе заряда ВВ при снаряжении военных боеприпасов. Заряд взрывчатого вещества в оболочке (например, в корпусе боеприпаса) подрывают в песчаной яме. После подрыва собирают осколки и сортируют их по весу. Чем интенсивнее дробление и чем больше суммарный вес мелких осколков, тем более бризантным является заряд взрывчатого вещества. Нужно отметить, что степень дробления существенно зависит от материала оболочки, поэтому испытания необходимо проводить с оболочками строго постоянных свойств.

### **7.1.2. Кумулятивное действие**

Действие взрыва можно усилить в определенном направлении, например в сторону разрушаемого объекта. Такое направленное действие взрыва основано на явлении, получившем название **кумуляции** (от латинского слова *cumulatio* – увеличивать, суммировать, накапливать). Явление кумуляции впервые наблюдалось в 1864 г. русским военным инженером М.М. Боресковым, установившим, что заряды, имеющие на поверхности выемку,



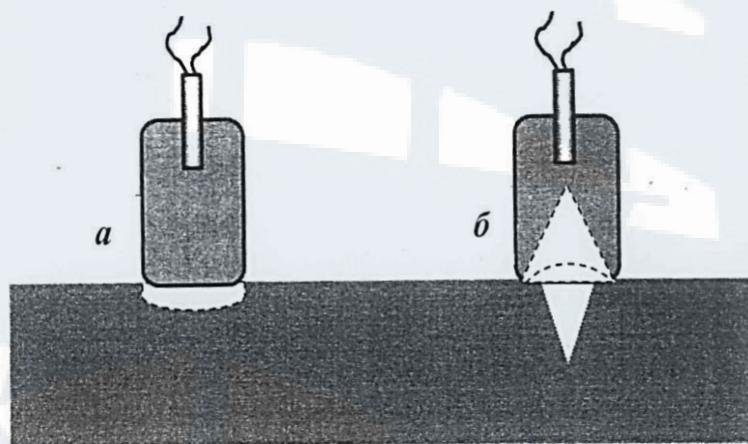
обеспечивают в направлении последней повышенный разрушительный эффект.

В развитие теории кумуляции большой вклад внесли и другие ученые.

**Кумулятивный эффект** (эффект Манро, англ. *Munroe effect*) – усиление действия взрыва путём его концентрации в заданном направлении, достигаемое применением заряда с выемкой, противоположной местонахождению детонатора и обращённой в сторону поражаемого объекта.

На практике кумулятивный эффект применяется в разных областях: в исследовательских целях (возможность достижения больших скоростей вещества – до нескольких десятков километров в секунду), в военном деле (поражение бронированной техники и фортификационных сооружений), в промышленных целях (резка металлов) и т. д.

Сущность кумулятивного эффекта можно проиллюстрировать на примере действия двух цилиндрических зарядов взрывчатого вещества, расположенных на металлической плите (рис. 7.3).



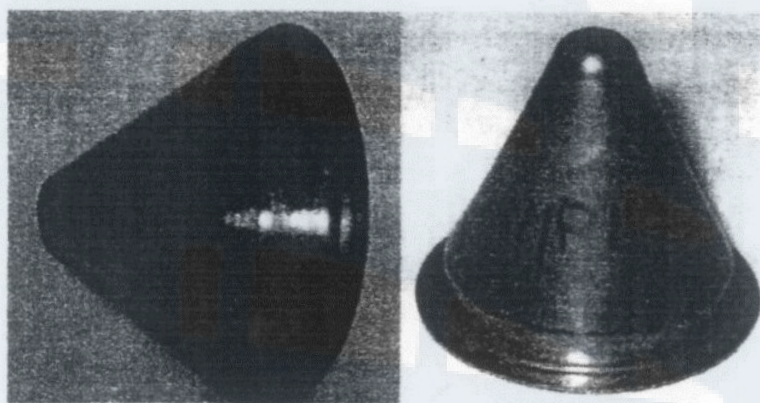
*Рис. 7.3. Взрыв обычного и кумулятивного зарядов:  
а – сплошной цилиндрический заряд; б – цилиндрический заряд  
с выемкой конической формы (масса заряда меньше)*

При подрыве сплошного цилиндрического заряда в подстилающей металлической поверхности образуется небольшое углубление (рис. 7.3, а). В данном случае распространение продуктов детонации происходит преимущественно по сфере и энергия взрыва рассеивается в окружающее пространство, лишь небольшая её часть расходуется на образование углубления.

При подрыве цилиндрического заряда с выемкой конической формы (рис. 7.3, б) имеет место направленное движение сходящегося потока продуктов детонации, что приводит к существенному усилению пробивного действия взрыва в заданном направлении, в итоге в подстилающей металлической поверхности образуется значительное углубление.

При увеличении заряда сквозное пробивание плиты наблюдается при массе заряда с выемкой значительно меньшей, чем без выемки.

Для повышения пробивного действия кумулятивного заряда выемка, обычно конической формы, покрывается металлической облицовкой (рис. 7.4), толщина которой может варьироваться от долей до нескольких миллиметров (от 0,5 до 3 мм).

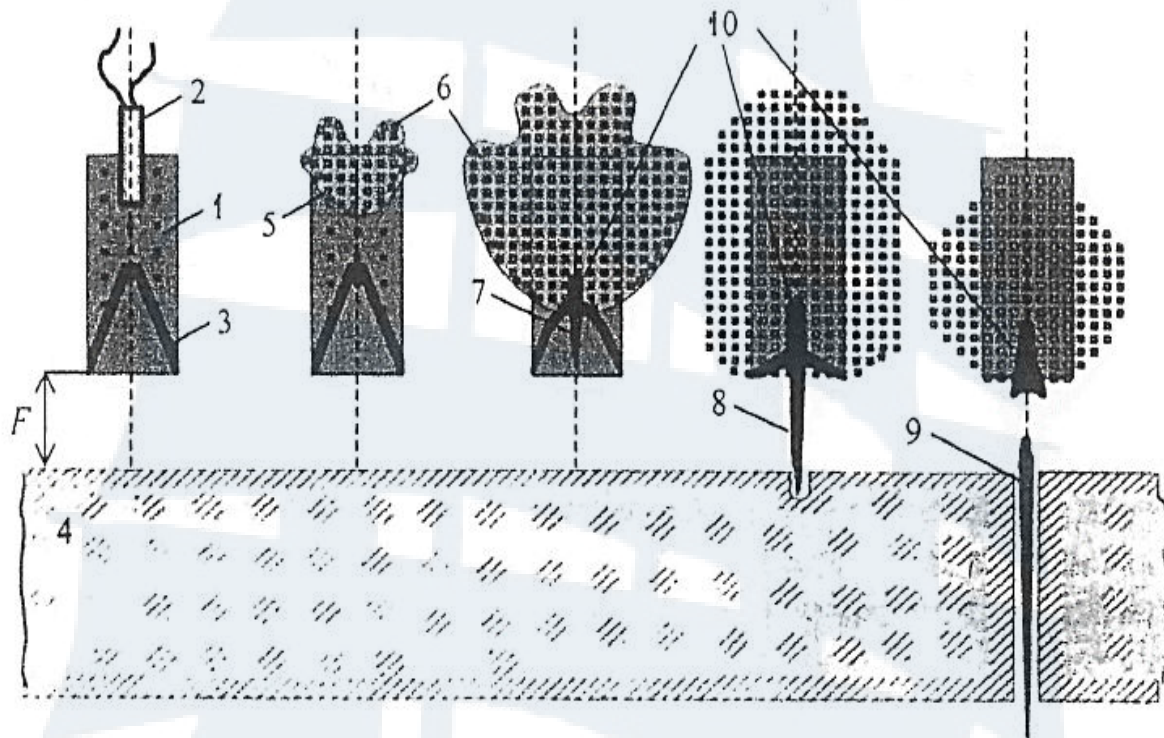


*Рис. 7.4. Металлическая облицовка для кумулятивных зарядов*

Детонационная волна такого заряда перемещается параллельно оси заряда и обжимает металлическую облицовку, образуя металлическую струю, перемещающуюся в направлении от заряда к преграде. Пробивное действие струи зависит от скорости детонации взрывчатого вещества, геометрической формы выемки, толщины облицовки и природы металла облицовки (для изготовления облицовки используют металлы с высокой плотностью, такие как свинец, медь, сталь, вольфрам, уран и т. д.).

Использование кумулятивного заряда с выемкой без металлической облицовки снижает кумулятивный эффект, так как вместо металлической струи действует струя газообразных продуктов взрыва.

**Механизм действия кумулятивного заряда с облицовкой.** После взрыва детонатора, находящегося на противоположной по отношению к выемке стороне заряда, возникает детонационная волна, которая перемещается вдоль оси заряда (рис. 7.5).



*Рис.7.5. Механизм действия кумулятивного заряда с облицовкой: 1 – заряд с выемкой; 2 – детонатор; 3 – металлическая облицовка; 4 – металлическая плита; 5 – фронт детонационной волны; 6 – продукты взрыва; 7 – формирование кумулятивной струи; 8 – растягивание кумулятивной струи; 9 – пробитие плиты струёй; 10 – ударное ядро (пест); F – фокусное расстояние*

Под действием детонационной волны и продуктов взрыва облицовка начинает двигаться к центру, как бы обжимаясь и смыкаясь. Давление на фронте детонационной волны, составляющее для большинства взрывчатых веществ 5000-27000 МПа, и давление продуктов детонации, достигающее порядка 1000-1500 МПа, значительно превосходят предел текучести металла, поэтому движение металлической облицовки под их действием подобно течению жидкости, однако обусловлено не плавлением, а пластической деформацией. После смыкания металл облицовки образует два элемента, роль которых существенно различна:

– ударное ядро – большой по массе (порядка 70-90 % массы облицовки) медленнодвигающийся «пест»;



– кумулятивную струю – меньшую по массе (порядка 10-30 % массы облицовки) тонкую (порядка толщины облицовки) гиперзвуковую металлическую струю, перемещающуюся вдоль оси симметрии заряда, скорость которой зависит от скорости детонации взрывчатого вещества и геометрии воронки.

Сверху от точки смыкания из наружных слоёв облицовки образуется ударное ядро (пест) диаметром в четверть калибра и длиной в один калибр (калибр равен первоначальному диаметру выемки), который разгоняется до скорости 2,5 км/с. Пробивное действие ударного ядра значительно ниже, чем у кумулятивной струи, но зато сохраняется на расстоянии до 1000 калибров.

Снизу от точки смыкания из наружных слоёв облицовки образуется кумулятивная струя – струя металла, движущегося с большой скоростью (до 8-12 км/с), именно эта струя, несмотря на то, что её масса не велика, обеспечивает пробитие преград значительной толщины.

Поскольку при встрече кумулятивной струи с бронёй развиваются очень высокие давления, на один-два порядка превосходящие предел прочности металлов, то струя взаимодействует с преградой в соответствии с законами гидродинамики, то есть при соударении они ведут себя как жидкости. Прочность брони в её традиционном понимании в этом случае практически не играет роли, а на первое место выходят показатели плотности и толщины материала бронирования.

Кумулятивная струя, ударяясь о броню, создает высокие напряжения, при которых металл сжимается и течет подобно жидкости. В металле мгновенно образуется узкое отверстие, через которое струя проникает в защищаемое броней пространство.

Важно подчеркнуть, что наибольший кумулятивный эффект достигается на так называемом «фокусном расстоянии»  $F$ , на котором кумулятивная струя максимально растянута, но ещё не разорвана на отдельные фрагменты. Наибольшая концентрация кумулятивной струи наблюдается на расстоянии приблизительно равным диаметру выемки кумулятивного заряда. Для выдерживания этой дистанции используют различные типы наконечников, подставок соответствующей длины.

Практическая глубина проникновения кумулятивной струи в монолитную броню у существующих боеприпасов варьирует-



ся в диапазоне от 1,5 до 4 калибров (один калибр соответствует первоначальному диаметру выемки).

Согласно Г.И. Покровскому толщина пробития брони в миллиметрах вычисляется по эмпирической зависимости:

$$L = 20 \cdot \sqrt[3]{M_{\text{ТНТ}}}, \quad (7.1)$$

где  $L$  – толщина пробития брони, мм;  $M_{\text{ТНТ}}$  – масса взрывчатого вещества в тротиловом эквиваленте, г.

## 7.2. Общее механическое действие взрыва

### 7.2.1. Фугасное действие. Формирование ударной волны

**Фугасность** – мера общей работоспособности взрывчатого вещества, проявляющейся на некотором расстоянии от поверхности заряда в виде совершения механической работы в окружающей среде продуктами взрыва в процессе их расширения.

Наряду с термином «фугасность» используют термин «работоспособность взрывчатого вещества» – это полная удельная работа взрыва (на один килограмм взрывчатого вещества).

**Фугасное действие** проявляется в форме отталкивания, перемещения, разбрасывания окружающей среды, разрушения, деформирования объектов и их элементов, причем на значительном расстоянии от эпицентра взрыва.

Фугасное действие обусловлено двумя поражающими факторами:

- 1) расширением газообразных продуктов детонации;
- 2) прохождением ударной волны в окружающей среде.

Образующиеся при взрыве газообразные продукты, нагретые до высокой температуры и сжатые до больших давлений, расширяясь, оказывают динамическое воздействие на предметы, встречающиеся на их пути. Кроме того, под воздействием продуктов взрыва происходит резкое сжатие окружающего воздуха и образуется воздушная ударная волна, продолжающая разрушительное действие на значительном расстоянии.

Таким образом, фугасное действие определяется количеством и параметрами образующихся при взрыве газов. Чем больше образуется газов, тем большую работу способен выполнить взрыв.

Для оценки характера и зоны распространения фугасного действия необходимо рассмотреть процесс формирования облака газообразных продуктов детонации и механизм образования ударной волны.

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 приближенно принять

$$r_0 = 0,053m^{\frac{1}{3}},$$

где  $m$  – масса заряда;  $r_0$  – радиус заряда, приведенного к сферической форме.

Величина  $r_0$  является очень распространенной мерой длины при описании действия взрыва не только в воздухе, но и в самых разнообразных средах. Удобство применения этой формулы состоит в возможности свести к единой картине взрывы зарядов всех размеров.

Далее процесс взаимодействия продуктов детонации и окружающей среды рассмотрим на примере взрыва в воздухе, разобьем на *несколько этапов* и проиллюстрируем рис. 7.6 и 7.7.

### 1 ЭТАП. Формирование газообразных продуктов детонации

Пусть сферический заряд радиусом  $r_0$  детонирует мгновенно. Образовавшиеся после детонации продукты взрыва в начальный момент будут занимать объём заряда и находиться в покое (рис. 7.6, а).

Примыкающий к заряду воздух в этот момент также находится в покое, но под давлением и при температуре, значительно меньших, чем давление и температура газообразных продуктов взрыва.

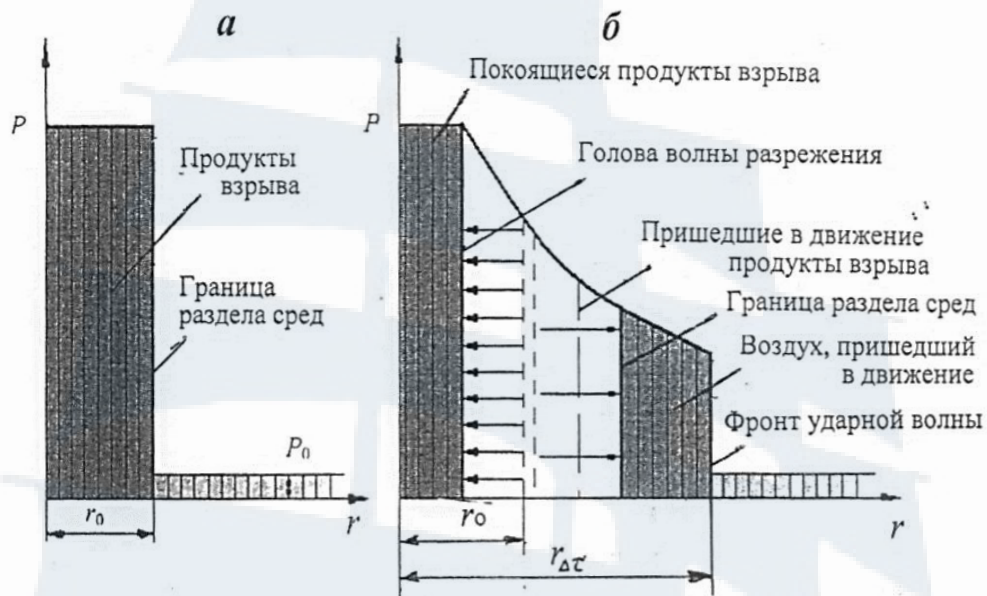


Рис. 7.6. Стадии образования воздушной ударной волны:  
 а – начальное состояние; б – состояние по прошествии времени  $\Delta t$ ;  
 $r_0$  – проведённый радиус заряда взрывчатого вещества;  $r$  – расстояние;  
 $P_0$  – нормальное атмосферное давление;  $P$  – давление в продуктах взрыва

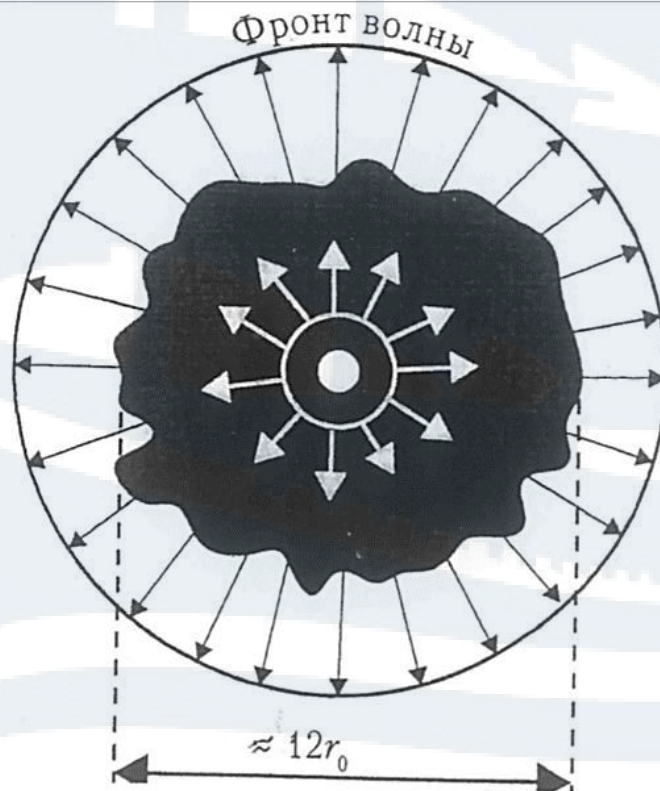


Рис. 7.7. Схема образования воздушной ударной волны в воздухе

## 2 ЭТАП. *Расширение газообразных продуктов*

В следующий момент времени поверхность, отделяющая продукты взрыва от окружающего их воздуха, под действием избыточного давления начнёт перемещаться по направлению внешней среды, при этом придут в движение продукты взрыва и примыкающие к ним частицы воздуха (рис. 7.6, б). Первыми вступят в движение слой продуктов взрыва и слой воздуха, непосредственно примыкающие к указанной поверхности их раздела, затем в движение последовательно будут вовлекаться всё более глубокие слои продуктов взрыва и более далёкие слои воздуха, вытесняемого расширяющимися продуктами взрыва.

Такое интенсивное движение сильно сжатых и нагретых газов согласно законам газовой динамики является источником сильных («конечных») возмущений и однозначно вызовет возникновение ударной волны, которая приведёт в движение и окружающую среду (воздух).

Вблизи заряда взрывчатого вещества фронт разлета продуктов взрыва совмещается с фронтом ударной волны, так как их движение в этой зоне происходит с одинаковой скоростью. Плотность продуктов взрыва в 20 раз превышает плотность воздуха во фронте ударной волны, поэтому динамическое воздействие продуктов взрыва на окружающие предметы вблизи центра взрыва значительно превосходит действие ударной волны.

Именно в этой области реализуется сильное местное механическое разрушающее действие взрыва – *бризантное действие*.

При расширении взрывных газов они встречают и оттесняют воздух, окружающий заряд. Если воздух имеет давление, близкое к нормальному (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 (рис. 7.7), имеющем радиус, равный:

$$r = (11-12) r_0.$$

Этот радиус имеет существенное значение при рассмотрении действий взрыва в воздухе. Дело в том, что, пройдя расстоя-



ние, равное  $r$ , масса взрывных газов вытесняет во все стороны равную себе массу воздуха. Этого оказывается достаточно, чтобы затормозить расширение взрывных газов и разрушить их направленные струи. Именно на расстоянии, близком к  $r$ , взрывные газы формируются в сферическое облако, дальнейшее расширение которого протекает медленно. При  $r \leq 12r_0$  механическое воздействие на окружающую среду существенно отличается от механизма воздействия при  $r > 12 r_0$ .

### 3 ЭТАП. Распространение ударной волны

Возмущённая область, ограниченная извне фронтом воздушной ударной волны, с течением времени расширяется, при этом меняются не только параметры на её внешней границе (на фронте), но и внутри этой области.

Скорость воздушной ударной волны уменьшается медленнее скорости движения продуктов взрыва. На расстоянии 7-14 радиусов заряда от центра взрыва происходит отрыв ударной волны от продуктов взрыва. На удалении 14-20 радиусов заряда продукты взрыва и ударная волна оказывают приблизительно равные по силе воздействия, а на расстоянии более 20 радиусов заряда разрушительный эффект оказывает только ударная волна.

Ударная волна, встречая на своем пути преграду, отражается от нее, образуя отраженную волну, и давление на преграду за счет наложения волн увеличивается почти вдвое. За фронтом ударной волны движется увлеченный ею воздух, который, набегая на преграду, создает скоростной напор и еще больше увеличивает воздействие на преграду.

По мере распространения воздушной ударной волны все её параметры быстро убывают. Происходит это в связи с тем, что по мере удаления ударной волны от точки взрыва увеличивается площадь её поверхности и, следовательно, возрастает масса вовлечённого в движение воздуха. Кроме того, происходит обратимое сжатие воздуха в ударной волне, сопровождающееся превращением его кинетической энергии в тепловую. Свободно бегущая ударная волна, оставляя за собой нагретый воздух, в итоге полностью теряет свою энергию и на больших расстояниях от точки взрыва превращается в обычную звуковую волну.

Если взрыв очень сильный, то воздушные волны могут охватить весь земной шар, что наблюдалось при взрыве Тунгус-

ского метеорита в 1908 г., при взрыве вулкана Кракатау в 1883 г., а также при ядерных взрывах.

### 7.2.2. Методы оценки фугасности взрывчатых веществ

Оценка фугасности взрывчатого вещества основана на определении удельного импульса фазы сжатия, которая формируется при разлёте и расширении газообразных продуктов взрыва. Именно в этой фазе совершается львиная доля разрушительной механической работы. Графическая иллюстрация формирования импульса сжатия представлена на рис. 7.8.

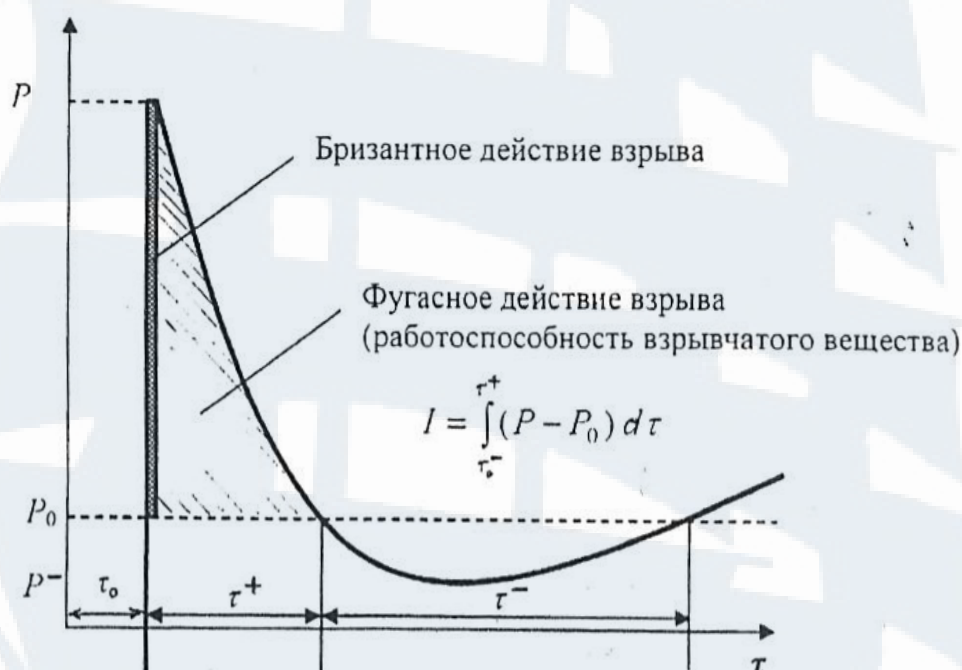


Рис. 7.8. Изменение давления при разлёте продуктов взрыва:  $I$  – импульс фазы сжатия;  $\tau^+$  – продолжительность фазы сжатия;  $\tau^-$  – продолжительность фазы разрежения;  $P_0$  – давление окружающей среды;  $P$  – максимальное давление продуктов взрыва

В лабораторных условиях импульс фазы сжатия для заряда исследуемого взрывчатого вещества определяют опытным путём или с помощью теоретических расчётов.

При измерении импульса фазы сжатия используются специальные приборы – импульсомеры различной конструкции (маятниковые, поршневые и т. д.). При измерении избыточного давления используются датчики давления с высоким временным разрешением, в частности пьезоэлектрические датчики.

Для экспериментальной оценки фугасности взрывчатых веществ на практике используют следующие методы оценки работоспособности:

- в свинцовой бомбе;
- с помощью баллистической мортиры;
- с помощью баллистического маятника;
- по воронке выброса;
- по воздушной ударной волне.

Первые три метода могут быть реализованы только в специальных лабораторных условиях. Они описаны в ГОСТ 4546-81.

Большую наглядность и практический интерес с точки зрения изучения фугасного действия в масштабе зоны ЧС представляют последние два метода.

### **Метод оценки работоспособности по воронке выброса**

При взрыве сосредоточенного заряда взрывчатого вещества, расположенного в грунте на некоторой глубине, образуется воронка конической формы радиусом  $r_{\text{в}}$  и глубиной  $h$  (рис. 7.9).

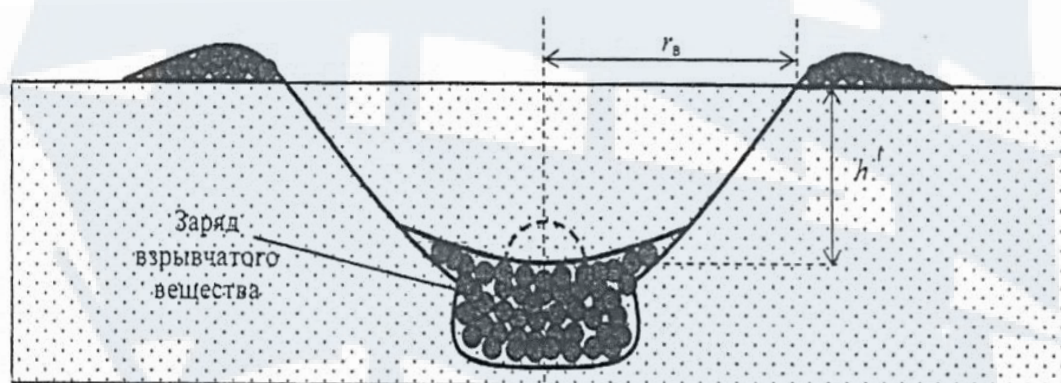


Рис. 7.9. Воронка выброса после взрыва

Как показали результаты многочисленных экспериментов, объём образовавшейся воронки  $V$  пропорционален работоспособности заряда взрывчатого вещества  $A_{\text{ф}}$ :

$$A_{\text{ф}} = V = \frac{1}{3} \cdot \pi \cdot r_{\text{в}}^2 \cdot h. \quad (7.2)$$

На этом принципе основан метод оценки относительной работоспособности взрывчатого вещества по воронке выброса. В однородном грунте на фиксированной для данной серии опытов глубине, зависящей от потенциальной энергии взрыва, подрывают заряды исследуемого и эталонного взрывчатых веществ.

При этом заряд исследуемого взрывчатого вещества имеет фиксированную массу  $m_{\text{взр}}$ , а масса эталонного заряда  $m_э$  варьируется до тех пор, пока объёмы воронок, образуемых при взрыве эталонного и исследуемого зарядов, не будут одинаковыми.

Показателем относительной работоспособности является отношение массы эквивалентного заряда  $m_э$  к массе заряда испытуемого взрывчатого вещества  $m_{\text{взр}}$ , при взрыве которых образуются одинаковые воронки (7.3):

$$\bar{A}_\phi = m_э / m_{\text{взр}} . \quad (7.3)$$

При известном значении работоспособности эталонного взрывчатого вещества  $A_{\phiэ}$  можно определить величину  $A_\phi$  для исследуемого взрывчатого вещества по формуле (7.3). В качестве эталонного вещества обычно используется тротил или аммонит № 6ЖВ.

Данный метод ценен тем, что может быть применён для зарядов большой массы и значительных размеров в условиях их практического использования, что не всегда возможно при других методах оценки.

### ***Метод оценки работоспособности по воздушной ударной волне***

Данный метод основан на измерении избыточного давления на фронте воздушной волны (или импульса фазы сжатия) для заряда массой  $m_{\text{взр}}$  на расстоянии  $r$  от центра взрыва и определении эквивалентного заряда стандартного взрывчатого вещества (тротила или аммонита № 6ЖВ) массой  $m_э$ , создающего такие же нагрузки на таком же расстоянии.

Избыточное давление на фронте воздушной ударной волны (или импульс фазы сжатия) для заряда исследуемого взрывчатого вещества определяют опытным путём или с помощью теоретических расчётов.

Теоретически величину избыточного давления также можно рассчитать по измеренной скорости воздушной ударной волны:

$$\Delta p_\phi = \frac{2 \cdot \rho}{k+1} \left( u_\phi^2 - c_0^2 \right) , \quad (7.4)$$

где  $\Delta p_\phi$  – избыточное давление на фронте воздушной ударной волны;  $\rho$  – плотность воздуха на фронте воздушной ударной волны;  $k$  – показатель адиабаты (для воздуха  $k = 1,4$ );  $u_\phi$  – скорость воздушной ударной волны;  $c_0$  – скорость звука в воздухе.



Массу эквивалентного заряда стандартного взрывчатого вещества, создающего такое же избыточное давление на таком же расстоянии, определяют с помощью установленной однозначной зависимости между величиной избыточного давления и приведённым радиусом взрыва, используя закон подобия при взрывах.

### ***Закон подобия при взрывах***

Определение параметров ударной волны от случайного взрыва основывается на использовании соотношения, связывающего параметры взрывов разной мощности. Таким соотношением является *закон подобия кубического корня*. Согласно этому значению параметров ударной волны для взрыва некоторой мощности можно пересчитать для взрывов других мощностей, пользуясь выражением закона подобия:

$$\frac{r_2}{r_1} = \sqrt[3]{\frac{M_{\text{ТНТ}2}}{M_{\text{ТНТ}1}}}, \quad (7.5)$$

где  $r_1, r_2$  – расстояния от центров двух взрывов до некоторых точек 1 и 2, в которых параметры ударных волн этих взрывов равны между собой;  $M_{\text{ТНТ}1}, M_{\text{ТНТ}2}$  – массы 1 и 2 зарядов взрывчатых веществ в тротиловом эквиваленте.

Выражение (7.4) можно представить в виде

$$\frac{r_1}{\sqrt[3]{M_{\text{ТНТ}1}}} = \frac{r_2}{\sqrt[3]{M_{\text{ТНТ}2}}} = \frac{r}{\sqrt[3]{M_{\text{ТНТ}}}} = \bar{r}. \quad (7.6)$$

Величина  $\bar{r}$  называется приведённым радиусом взрыва и используется в расчётных соотношениях для определения параметров ударной волны.

### ***7.2.3. Распространение ударной волны в воздухе***

Ударная волна представляет собой область резкого и сильного сжатия среды, распространяющейся во все стороны от центра взрыва со сверхзвуковой скоростью.

Ударные волны возникают при взрывах практически в любых средах и передают действие взрыва на значительное расстояние.

Воздушные ударные волны напоминают детонационные волны. Однако между ними есть принципиальное различие: детонационная волна освобождает энергию, скрытую во взрывча-

том веществе, и сама себя движет. Поэтому для каждого взрывчатого вещества скорость волны детонации имеет вполне определенное и постоянное (если детонация осуществляется полностью) значение.

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 сила ударной волны непрерывно падает, и на значительном расстоянии ударная волна перерастает в обычную звуковую волну.

Схема изменения давления во времени при прохождении ударной и для сравнения звуковой волн показана на рис. 7.10.

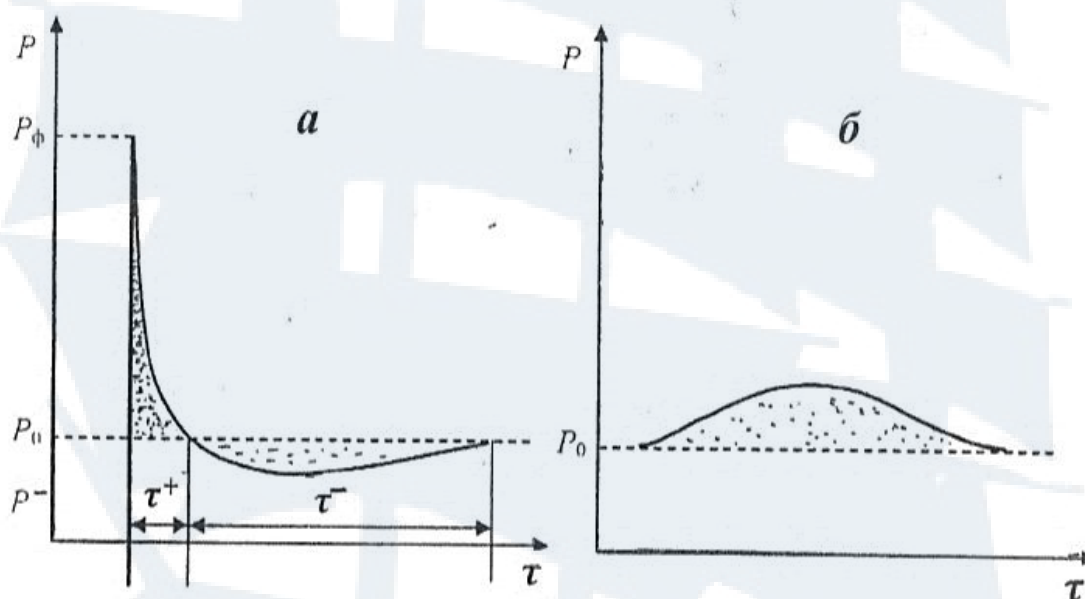


Рис. 7.10. Характер изменения давления при движении волн:  
 а – ударная волна; б – звуковая волна;  
 $P_\phi$  – давление на фронте ударной волны;  $P_0$  – атмосферное давление;  
 $\tau^+$  – продолжительность фазы сжатия;  
 $\tau^-$  – продолжительность фазы разрежения

Ударные волны отличаются от обычных звуковых волн тем, что давление, плотность и температура на фронте волны повышаются скачком, практически мгновенно (рис. 7.10, а), а не плавно и непрерывно, как имеет место в звуковой волне (рис. 7.10, б).

В момент прихода ударной волны в определенную точку пространства давление в прилегающей к ней области скачком увеличивается от  $p_0$  (в невозмущенной среде) до  $p_\phi$  (во фронте ударной волны). За фронтом давление быстро падает и через время  $\tau^+$  (время действия фазы сжатия), после прихода волны в точку, оказывается меньше  $p_0$  – фаза сжатия сменяется фазой разрежения.

В момент прихода ударной волны в некоторую точку среда, прилегающая к этой точке, начинает двигаться со скоростью  $u$  в направлении распространения этой волны. В фазе сжатия среда движется в сторону перемещения ударной волны, в фазе разрежения – в обратном направлении, но с несколько меньшей скоростью.

Фронт ударной волны распространяется со сверхзвуковой скоростью, а ее хвостовая часть движется со скоростью, близкой к скорости звука  $c_0$  в невозмущенной среде, поэтому по мере движения ударная волна растягивается во времени. Давление во фронте ударной волны  $p_\phi$ , скорость перемещения фронта  $u_\phi$  и скорость потока среды  $u$  не являются постоянными. При удалении ударной волны от очага взрыва она уменьшается, и на больших расстояниях  $u_\phi$  приближается к  $c_0$ , а  $u$  – к нулю, т. е. ударная волна вырождается в акустическую (упругую) волну.

На практике действие ударной волны определяется фазой сжатия. Действие фазы разрежения обычно несущественно, поэтому не учитывается, за исключением некоторых частных эффектов.

Таким образом, распространение ударной волны характеризуется следующими особенностями:

- скорость распространения ударных волн всегда больше скорости звука в невозмущенной исходной среде;
- во фронте ударной волны параметры состояния и движения среды изменяются скачком;
- ударные волны сопровождаются перемещением среды в направлении распространения фронта возмущения;
- скорость ударной волны зависит от её интенсивности, что не наблюдается для звуковых волн;
- ударная волна не имеет периодического характера, а распространяется в виде одиночного скачка уплотнения;

– если есть ударная волна, то есть и волна разрежения, они направлены в противоположные стороны, поэтому ударная волна в инертной среде всегда затухающая.

Исходя из рассмотренного характера распространения ударной волны, следует учитывать коварность этого поражающего фактора взрыва для стороннего наблюдателя. Ударная волна, распространяясь со скоростью большей, чем звук в невозмущённой исходной среде, опережает всякий звуковой сигнал о ней. Поэтому если при взрыве возникла ударная волна, то никакой шум не предупредит нас о её приближении. О взрыве можно узнать только в тот момент, когда ударная волна обрушится на нас. Лишь вспышка света, сопровождающая взрыв, может предупредить нас о возникающей угрозе.

#### **7.2.4. Параметры ударной волны**

Основными параметрами ударной волны, определяющими её разрушительное действие, являются:

- избыточное давление во фронте ударной волны;
- скоростной напор ударной волны, действующий на поверхность объекта;
- время действия ударной волны;
- импульс волны.

Основной расчёт всех параметров является определение избыточного давления во фронте ударной волны:

$$\Delta p_{\text{ф}} = p_{\text{ф}} - p_0,$$

где  $p_{\text{ф}}$  – давление во фронте ударной волны;  $p_0$  – давление в невозмущённой среде (атмосферное давление).

Основной особенностью ударных волн взрыва, как это было впервые установлено М. Л. Садовским, Л. И. Седовым, Д. Тейлором, является то, что избыточное давление на фронте волны подчиняется закону подобия (7.6). Это значит, что давление полностью определяется отношением расстояния от места взрыва  $r$  к радиусу заряда  $r_0$ , удельной энергией взрыва для данного взрывчатого вещества и давлением окружающего воздуха  $p_0$ .

Основной теории расчёта избыточного давления является допущение, что отношение дополнительной энергии, имеющейся в воздухе вследствие сжатия его избыточным давлением, к первоначальной энергии воздуха находится в зависимости от отноше-



ния энергии, выделенной при взрыве, ко всей первоначальной энергии, содержащейся до взрыва в объеме, который в данный момент захвачен ударной волной. Энергия, полученная единицей объема воздуха от избыточного давления  $\Delta p_{\phi}$  ударной волны, пропорциональна давлению  $\Delta p_{\phi}$ . Энергия же, содержащаяся первоначально в единице объема воздуха, пропорциональна  $p_0$  – давлению невозмущенного воздуха.

После многочисленных экспериментов было подобрано такое выражение для определения  $\Delta p_{\phi}$ , которое максимально удовлетворяет опытным наблюдениям и расчетам для большинства конденсированных ВВ. Это выражение известно под названием *формулы Садовского*, впервые установившего её коэффициенты:

$$\Delta p_{\phi} = a_1 \frac{m^{1/3}}{r^1} + a_2 \frac{m^{2/3}}{r^2} + a_3 \frac{m}{r^3}, \quad (7.7)$$

где  $r$  – расстояние от эпицентра взрыва;  $m$  – масса тротила или тротильный эквивалент массы;  $a_1, a_2, a_3$  – коэффициенты, учитывающие особенности взрыва.

Для воздушной ударной волны коэффициенты приведены в табл. 7.1

Таблица 7.1

### Коэффициенты для формулы Садовского

Вид взрыва	$a_1$	$a_2$	$a_3$
Воздушный взрыв (сфера)	76	246	650
Наземный взрыв (полусфера)	95	390	1300

После того, как изложенная методика расчёта избыточного давления во фронте ударной волны стала общепринятой, другие исследователи получили формулы подобные (7.7) и для взрывного горения парогазовоздушных смесей в открытом пространстве. Для разных условий горения были получены свои коэффициенты, а вместо массы ВВ в тротильном эквиваленте в формулу подставляется приведённая масса газа или пара  $m_{пр}$ . Она рассчитывается по специальной методике с учётом удельной теплоты

горения (взрыва) и введением коэффициента участия горючих газов и паров в горении.

Следует отметить, что расчёт избыточного давления при взрыве внутри помещения не поддаётся какому-либо теоретическому обоснованию, так как влияние оказывают слишком много различных факторов.

Для прогнозных расчётов тяжести поражения внутри помещения используются специальные методики с применением множества коэффициентов для различных условий взрыва, полученные по экспериментальным данным.

Поражающее действие ударной волны характеризуется также *скоростным напором*. Скоростной напор образуется в результате торможения о какую-либо преграду движущихся масс воздуха в ударной волне. Напор вызывает опрокидывание и отбрасывание различных объектов на значительные расстояния.

Воздушный скоростной напор определяется по известной формуле

$$q_B = \frac{\rho u^2}{2},$$

где  $\rho$  и  $u$  – плотность и скорость воздуха за фронтом ударной волны.

Эти параметры воздуха так же, как и скорость фронта ударной волны  $u_\phi$ , могут быть определены по формулам, характеризующим процесс ударного сжатия, если известен основной параметр – избыточное давление во фронте ударной волны  $\Delta p_\phi$ .

Используя формулы (7.4) а также (5.7 – 5.9), получим:

$$u_\phi = c_0 \sqrt{1 + \frac{k+1}{2k} \cdot \frac{\Delta p_\phi}{p_0}}; \quad (7.8)$$

$$u = \frac{c_0}{k} \cdot \frac{\rho_0}{\sqrt{1 + \frac{k+1}{2k} \cdot \frac{\Delta p_\phi}{p_0}}}; \quad (7.9)$$

$$\rho = \frac{\rho_0 \cdot \left(1 + \frac{k+1}{2k}\right)}{1 - \frac{k-1}{2k} \cdot \frac{\Delta p_\phi}{p_0}}, \quad (7.10)$$

где  $c_0$ ,  $\rho_0$  – скорость звука и плотность воздуха в невозмущенной атмосфере;  $k$  – показатель адиабаты воздуха.

Полученные формулы для определения параметров воздушной ударной волны справедливы лишь для избыточных давлений, не превосходящих 10 атм. Дело в том, что при больших давлениях (и температурах) имеют место явления диссоциации (распада) молекул и ионизации атомов воздуха (эндотермический процесс образования ионов из нейтральных атомов). Происходящее при этом увеличение числа элементарных частиц приводит к изменению уравнения состояния воздуха. Одним из способов учёта физико-химических превращений в газе является введение эффективного показателя адиабаты  $k_{эф}$ . Для сильных воздушных ударных волн ( $\Delta p_{ф} \gg 100$  атм) можно считать, что  $k_{эф}=1,1-1,2$ .

Так, например, при  $\Delta p_{ф} = 1000$  атм плотность воздуха за фронтом воздушной ударной волны достигает почти  $20 \text{ кг/м}^3$ , что более чем в 16 раз больше начальной плотности  $\rho_0$ . Если же не учитывать изменение  $k$ , то максимальная плотность воздуха на фронте воздушной ударной волны не будет превосходить значение  $\rho_0$  в шесть раз.

В табл. 7.2 приведены данные, полученные с помощью формул (7.8 – 7.10), при различных значениях  $k_{эф}$ .

Таблица 7.2

### Параметры воздушных ударных волн

$\Delta p_{ф}$ , атм	$u_{ф}$ , м/с	$u$ , м/с	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$c_0$ , м/с	$k_{эф}$
0,01	340	2,4	1,234	340	1,4
0,1	354	23,4	1,311	344	1,4
1,00	464	179	1,991	377	1,4
10,0	1053	788	4,828	567	1,39
100	3237	2564	9,816	1146	1,26
1000	10443	7948	19,754	2408	1,13

#### 7.2.5. Степени повреждений объектов и поражения людей от воздействия ударной волны

Величина избыточного давления в газообразных продуктах взрыва и ударных волнах во многом определяет разрушающее и поражающее действие взрыва.

Значительное избыточное давление ударной волны приводит при взрыве к сильным повреждениям.

В табл. 7.3 содержатся данные, указывающие на характер возможных повреждений.

Таблица 7.3

## Повреждения при взрыве от ударной волны

$\Delta p_{\text{ф}}$ , кПа	Характер повреждений
0,2	Разрушение стекол в окнах при больших площадях остекления
0,5	Громкий звук (>140 дБ), повреждения стекол; 5 % разрушение стекол
2,1	Повреждение обшивки домов; разрушение до 10 % оконных стекол
2,8	Незначительные повреждения конструкций
4,0	90 % разрушение остекления, повреждение оконных рам
5,0	Незначительные повреждения конструкций зданий
7,2	Частичное разрушение домов до состояния, при котором проживание в них невозможно
8,5	Разрушение гофрированного асбеста. Гофрированные стальные или алюминиевые панели ослабляются в креплении и подвергаются изгибу. Деревянные панели разрушаются
9,2	Стальные конструкции зданий искривляются
14,2	Частичное разрушение стен и кровли домов
21,4	Разрушаются не укрепленные стены из бетона и шлаковых блоков
16,4	Нижний предел серьезных повреждений конструкций
17,8	50 % разрушение конструкций
21,4	Тяжелое оборудование в промышленных зданиях подвергается небольшим повреждениям. Стальные конструкции изгибаются
28,5	Разрушение бескаркасных сооружений, склепанных из стальных панелей. Разрушение временных хранилищ
28,5	Отрыв легких покрытий промышленных зданий
35,6	Растрескивание деревянных столбов (телеграфных и пр.). Повреждаются высокие гидравлические прессы (весом 1,8 т)
49	Почти полное разрушение домов
50	Перевертывание тяжелогруженных ж/д вагонов
57	Кирпичные стены толщиной 200-300 мм, не укрепленные, теряют прочность в результате сдвига или изгиба
64	Тяжелые грузовые железнодорожные вагоны полностью разрушаются
70	Разрушение более 75 % внутренней кирпичной кладки зданий
71	Возможно общее разрушение зданий. Тяжелые (>3 т) машины и станки передвигаются и сильно повреждаются. Очень тяжелые (>5 т) машины и станки сохраняются
2000	Разрушения с образованием кратера



Сила ударной волны очень велика и приводит к значительным разрушениям. Если избыточное давление относительно невелико, то, прежде всего, будут разрушаться наименее прочные элементы, например, окна и двери. В случае же воздействия огромных давлений на однородную по прочности конструкцию здания, разрушение всех стен и подъем крыши произойдут одновременно.

На степень разрушения влияют особенности конструкции сооружений, а также рельеф местности.

Ударная волна с  $\Delta p_{\phi} = 19$  кПа вызывает значительные разрушения городских построек, а при  $\Delta p_{\phi} = 98$  кПа наступает полное разрушение зданий и гибель животных организмов.

Механические разрушения, производимые взрывом, по интенсивности делят на группы:

- малые или слабые (10 – 20 кПа) – приподнимается черепица на крыше и разбиваются обыкновенные оконные стёкла;
- умеренные или средние (20 – 30 кПа) – разрушаются деревянные постройки и толстые оконные стёкла;
- сильные (30 – 50 кПа) – разрушаются каменные сооружения.

Зону, в которой происходят слабые разрушения, называют зоной слабых разрушений, средние разрушения – зоной средних разрушений и сильные разрушения – зоной сильных разрушений.

Считается, что при достижении  $\Delta p_{\phi}$  более 50 кПа может быть зона полных разрушений.

При взрыве тротилового заряда массой 100 кг зона сильных разрушений имеет радиус 50 м, зона средних разрушений – 100 м и слабых – 200 м.

Кроме механических разрушений ударная волна может вызвать взрыв (детонацию) другого взрывчатого вещества, находящегося на значительном удалении от очага взрыва. Чем большую массу имеет ВВ и чем оно мощнее, тем на большее расстояние передаётся взрыв. От заряда массой 100 т передача взрыва возможна на расстояние до 100 м.

Возможность передачи взрыва на расстояние учитывают при строительстве заводов по производству взрывчатых веществ и боеприпасов и складов для их хранения. Чтобы предотвратить катастрофические разрушения, отдельные цеха и хранилища располагают на безопасном удалении друг от друга. Иногда их окружают земляными валами, ограничивающими распространение

ние взрыва. Если завод или склад построен без учёта этих требований, то случайный взрыв в одном из зданий может распространиться на другие, приведя к полному уничтожению завода или склада.

Воздействие воздушной ударной волны на незащищённых людей характеризуется лёгкими, средними, тяжёлыми и крайне тяжёлыми травмами (табл. 7.4).

Таблица 7.4

### Воздействие воздушной ударной волны на человека

$\Delta p_{\text{в}},$ кПа (атм)	Степень поражения
10 (0,1) и менее	Безопасно для незащищённого человека
10–20 (0,1–0,2)	Неприятные субъективные ощущения (головокружение, звон в ушах)
20–40 (0,2–0,4)	Лёгкие травмы (лёгкая степень контузии, кратковременные нарушения функций организма, возможны вывихи и ушибы)
40–60 (0,4–0,6)	Травмы средней тяжести (возможны вывихи конечностей и повреждения костей, контузии головного мозга, повреждение органов слуха, кровотечение из носоглотки и ушей)
60–100 (0,6–1)	Тяжёлые травмы (контузия всего организма, переломы костей, вывихи конечностей, повреждение внутренних органов, сопровождающиеся мелкоочечными кровоизлияниями, баротравмы и т. д.)
свыше 100	Крайне тяжёлые травмы, обычно не совместимые с жизнью (дополнительно к вышеизложенному отмечаются ещё и разрывы внутренних органов, сотрясение головного мозга с длительной потерей сознания, внутренние кровотечения и др.)
500–600	Расчленение тела, обширные разрушения мягких и кожных тканей

Безопасное расстояние по действию воздушной ударной волны наружного заряда можно рассчитать по формуле

$$r_{\text{безоп}} = 15 \cdot \sqrt[3]{M_{\text{ТНТ}}}, \quad (7.11)$$

где  $r_{\text{безоп}}$  – безопасное расстояние по действию воздушной ударной волны на человека, м;  $M_{\text{ТНТ}}$  – масса заряда взрывчатого вещества в тротиловом эквиваленте, кг.

Согласно правилам безопасности при взрывных работах, данная формула используется только при необходимости максимального приближения персонала к месту взрыва. В остальных случаях полученное по формуле (7.11) расстояние следует увеличивать в 2-3 раза.

### **7.3. Тепловое действие взрыва**

#### ***7.3.1. Параметры теплового излучения при формировании огненного шара***

Тепловое излучение при взрыве оказывает сильное поражающее действие. Взрывы ракетных топлив или химических продуктов, разрывы сосудов с последующим взрывом облака горючих паров в ограниченном или открытом объеме, горение жидкостей в открытых резервуарах, детонация бризантных ВВ и ядерные взрывы – все эти явления могут привести к образованию ***огненного шара***.

При взрыве газовых емкостей с последующим горением выходящих в атмосферу продуктов образующийся огненный шар увеличивает разрушающее действие взрыва на оборудование и предметы. Наличие большой массы жидкости в момент взрыва и характер её распространения вне емкости определяют продолжительность горения и размер образовавшегося огненного шара.

Наиболее опасные взрывы чаще всего происходят на железнодорожном транспорте. Примером являются аварии с железнодорожными цистернами. Огненный шар, образовавшийся от одной из потерпевших аварию железнодорожных цистерн в США вместимостью  $88 \text{ м}^3$ , охватил участок поверхности земли радиусом 60 м и воспламенил горючие материалы в радиусе 350 м.

Огненный шар, возникший 21 июня 1970 г. в американском штате Иллинойс в результате взрыва автоцистерны, вмещавшей  $120 \text{ м}^3$  сжиженного газа, при разливе горючего в количестве 68 т имел диаметр 180 м.

Основными параметрами огненного шара, которые закладываются в методики расчета поражающего действия, являются его

размер (радиус  $r_s$  или диаметр  $d_s$ ), время существования  $\tau_s$  и температура  $T$ .

Температура в зоне горения огненного шара определяется в основном типом вещества. Ракетные топлива при горении создают температуру около 2500 К, тогда как при взрывах ВВ температура может доходить до 5000 К, а горючие углеводородные газы создают температуру около 1350 К.

Для определения диаметра ( $d_s$ , м) и времени существования огненного шара ( $\tau_s$ , с) рекомендуются следующие эмпирические формулы:

$$d_s = 3,86m^{0,320}, \quad \tau_s = 0,299m^{0,320}, \quad (7.12)$$

где  $m$  – масса углеводородного горючего, кг.

Формулы (7.12) рекомендуются к использованию для больших масс горючего и если при их горении температура до 3600 К.

Тепловая излучательная мощность огненного шара, образованного горящими парами углеводородов, определяется из зависимости

$$N_{и} = 12,4 \cdot 10^9 \cdot m^{2/3} \cdot 0,3 = 3,72 \cdot 10^9 \cdot m^{2/3}, \text{ Вт}, \quad (7.13)$$

где 0,3 – доля энергии теплового излучения в общем энерговыделении.

Основным параметром излучения, который закладывается в методику оценки степени поражения, является величина интенсивности энергии у облучаемой поверхности – *интенсивность излучения*  $J$ , которая на расстоянии  $r$  определяется формуле:

$$J_r = N_{и}/4\pi r^2, \quad (7.14)$$

или с учетом формулы (7.13) для углеводородов:

$$J_r = \frac{3,72 \cdot 10^9 \cdot m^{2/3}}{4 \cdot 3,14 \cdot r^2} = 2,96 \cdot 10^8 \cdot m^{2/3} \cdot r^{-2}, \text{ Вт/м}^2. \quad (7.15)$$

Интенсивность излучения, умноженная на время его действия, определяют удельную теплоту излучения  $q_r$ .

Тепловое излучение ослабляется атмосферой, причем не одинаково в разных местах в течение суток и даже часа. Эффект ослабления предлагается учитывать умножением на коэффициент  $\lambda$ , который определяется по следующей формуле:

$$\lambda = 0,96 - 0,121gr_s. \quad (7.16)$$

Формула (7.16) учитывает ослабление теплового излучения с расстоянием при относительной влажности воздуха 50 %. С повышением влажности эффект ослабления увеличивается.



### 7.3.2. Степени поражения людей от воздействия теплового излучения

Существует пороговый уровень интенсивности излучения, ниже которого, независимо от длительности воздействия, поражение равно нулю. Таким безопасным пределом является интенсивность излучения  $5 \text{ МДж}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ . С увеличением интенсивности теплоизлучения возможное время пребывания человека в зоне излучения уменьшается.

На рис. 7.11 приведена ( $J_r - \tau_s$ ) – диаграмма, разделяющая области терпимой и нестерпимой боли (критерий, близкий к понятию ожога второй степени). Две линии на графике обусловлены разбросом данных вследствие индивидуальных различий.

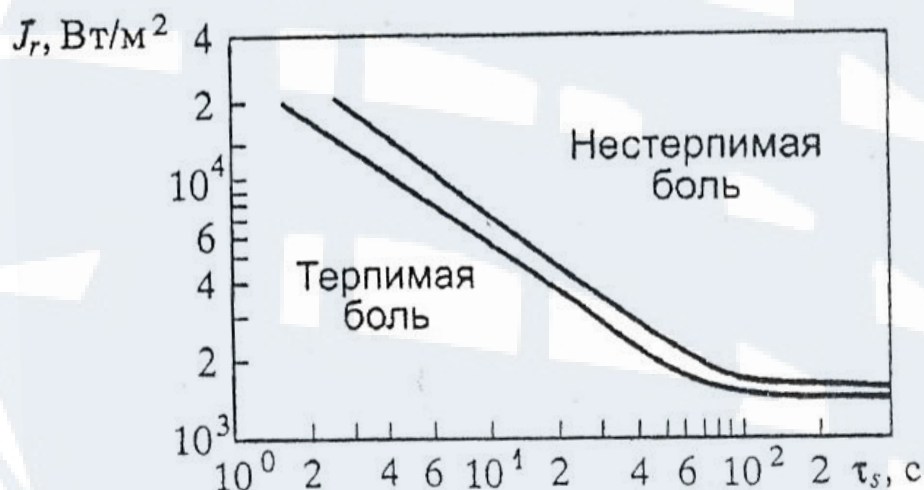


Рис. 7.11. Болевой порог при лучистом ожоге незащищённой кожи

Для малых экспозиций, меньших  $10^{-4}$  с, поражение глаз наблюдается уже при  $q_r = 1700 \text{ Дж}/\text{м}^2$ . Кожный покров человека способен выдерживать (без появления болевых ощущений) интенсивность излучения  $J_r = 2,1 \cdot 10^4 \text{ Вт}/\text{м}^2$  в течение 2 с, то есть  $q_r = 4,2 \cdot 10^4 \text{ Дж}/\text{м}^2$ . Не действует отрицательно на кожный покров температура до  $42 \text{ }^\circ\text{C}$ . Боль начинает ощущаться при температуре кожи  $44 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Для сравнения можно привести данные, что соприкосновение в течение 10 с с водой, имеющей температуру  $60 \text{ }^\circ\text{C}$ , приводит к частичной утрате кожного покрова, а при температуре  $70 \text{ }^\circ\text{C}$  в течение 10 с вызывает полную потерю кожного покрова.

Вероятность поражение человека определяется индексом дозы облучения (табл. 7.5):

а) смертельного –

$$\text{индекс дозы} = (J_r)^{4/3} \cdot \tau_s, \text{ Дж/м}^2; \quad (7.17)$$

б) ожогом третьей степени –

$$\text{индекс дозы} = (J_r)^{1,15} \cdot \tau_s = 5,5 \cdot 10^5, \text{ Дж/м}^2, \quad (7.18)$$

где  $\tau_s$  – время существования огненного шара, с.

Таблица 7.5

### Вероятность смертельного поражения в зависимости от индекса дозы облучения

Вероятность получения смертельного поражения	Индекс дозы = $(J_r)^{4/3} \cdot \tau_s$ , Дж/м <sup>2</sup>
0,01	$1,00 \cdot 10^7$
0,50	$2,30 \cdot 10^7$
0,99	$6,50 \cdot 10^7$

Применительно к тепловым импульсам от огненных шаров с длительностью 10-20 с (характерно для огненных шаров, образованных углеводородами) человек, успевший полностью отвернуться, получит ожоги более низкой интенсивности, но распределенные по большей площади тела.

**Пример.** Огненный шар, образовавшийся в результате сгорания около 10 т пропана при аварии 9 марта 1972 г. в Линчберге (США), имел радиус, примерно равный 60 м. На расстоянии 90 м привел к гибели одного человека, на расстоянии 140 м вызвал тяжелые ожоги у трех очевидцев случившегося. Один смертельный случай зарегистрирован на расстоянии 130 м, на этом же расстоянии были поражены еще два человека, но не смертельно.

Итак, огненный шар, образовавшийся в результате взрывов и сгорания горючих газов, паровоздушных смесей имеет сильное поражающее воздействие на человека и техносферу.

## 8. ХАРАКТЕРИСТИКА ОСНОВНЫХ ПРОМЫШЛЕННЫХ И БОЕВЫХ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ И СРЕДСТВ ИНИЦИИРОВАНИЯ

### 8.1. Бризантные взрывчатые вещества

#### 8.1.1. Взрывчатые вещества на основе жидких компонентов

**Нитроглицерин** (тринитроглиперин, глицеринтринитрат)  $C_3H_5(ONO_2)_3$  – тяжелая, маслянистая, бесцветная жидкость, плотностью  $1,6 \text{ г/см}^3$ . Технический нитроглицерин имеет желтовато-коричневый цвет. Получается обработкой глицерина азотной и серной кислотами.

Затвердевает нитроглицерин при температуре  $+13,2 \text{ }^\circ\text{C}$ , в составе ВВ затвердевает при температуре около  $+10 \text{ }^\circ\text{C}$ . 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 является мощным ВВ с теплотой взрыва  $6040 \text{ кДж/кг}$ , имеет две скорости детонации – 2 и  $7,6 \text{ км/с}$ .

Вещество ядовито, при контакте с кожей человека вызывает сильную головную боль. Однако через несколько дней постоянной работы с нитроглицерином у человека вырабатывается иммунитет и головные боли проходят.

В чистом виде нитроглицерин не применяется. Используется при изготовлении нитроцеллюлозных порохов в качестве растворителя и для изготовления динамита.

**Нитрогликоль** (этиленгликольдинитрат)  $C_2H_4(ONO_2)_2$  – сложный эфир двухатомного спирта этиленгликоля и азотной кислоты, представляет собой малогигроскопичную прозрачную маслянистую жидкость с плотностью  $1,5 \text{ г/см}^3$ , по своим свой-

ствам похож на нитроглицерин, растворяется в большинстве органических растворителей, летучесть его примерно в 3 раза выше летучести нитроглицерина, желатинизируется более активно. Нитрогликоль затвердевает при температуре  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ . В сочетании с нитроглицерином образует раствор с температурой затвердевания от  $-17$  до  $-23\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Вещество имеет невысокую химическую стойкость, чувствительность к механическим и тепловым воздействиям ниже, чем у нитроглицерина. Теплота взрыва составляет  $7120\text{ кДж/кг}$ , скорость детонации –  $7,4\text{ км/с}$ .

Очень ценным свойством нитрогликоля, которое широко используется в производстве динамитов и нитроглицериновых взрывчатых веществ, является более низкая по сравнению с нитроглицерином температура затвердевания ( $-21,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) и способность образовывать с нитроглицерином растворы, имеющие сравнительно низкую температуру затвердевания.

Токсическое действие аналогично действию нитроглицерина, однако иммунитет у человек не вырабатывается. Поэтому при работе с ним нужна особая осторожность, с нитрогликолем недопустим даже контакт открытых частей кожи.

**Нитродигликоль** (диэтиленгликольдинитрат)  $\text{C}_4\text{H}_8\text{O}(\text{ONO}_2)_2$  – вязкая бесцветная жидкость с плотностью  $1,39\text{ г/см}^3$  и температурой затвердевания стабильной формы ( $+2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) и лабильной формы ( $-10,9\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Растворим в ацетоне, бензоле, эфире, плохо растворим в спиртах и воде. Взрывчатые характеристики и чувствительность к внешним воздействиям у нитродигликоля ниже, чем у нитроглицерина и нитрогликоля.

Нитродигликоль используют в качестве компонента нитроглицериновых взрывчатых веществ.

**Динамиты** – это бризантные взрывчатые смеси на основе нитроглицерина с поглотителем (абсорбент, например, кизельгур или нитроцеллюлоза) и другими добавками.

Дополнительно в динамит могут входить такие компоненты, как: нитрогликоль; нитродигликоль; калиевая  $\text{KNO}_3$ , натриевая  $\text{NaNO}_3$ , аммиачная  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  селитры; тротил; древесная мука; нитроцеллюлоза и т. д. Вся масса обычно спрессовывается в цилиндрическую форму и помещается в бумажную или пластиковую упаковку.



Основным компонентом динамитов является нитроглицерин, к которому для понижения температуры затвердевания добавляется нитроглицерин или нитродиглицерин (получаемая смесь называется нитросмесью).

По составу дополнительных ингредиентов динамиты разделяют на смешанные и желатин-динамиты, а по доле нитроглицерина на высоко- (более 40 %) и низкопроцентные (до 40 %).

В состав смешанных динамитов кроме нитросмеси входит порошкообразный пористый поглотитель. Например, в *гурдинамите* 75 % нитроглицерина и 25 % кизельгура (дианомита). В низкопроцентных динамитах в качестве поглотителя могут быть диэтиленгликольдинитрат, алюминиевая пудра или аммиачная селитра.

Основу желатин-динамитов составляют желатинированные нитроэфиры, получаемые при добавлении в основное вещество до 10 % нитроцеллюлозы (коллоксилина). Среди желатин-динамитов выделяется так называемый *гремучий студень* – нитроглицерин с добавкой 7-10 % коллоксилина, дающий теплоту взрыва 6500 кДж/кг и скорость детонации до 8000 м/с. В состав желатин-динамитов помимо нитроэфира и нитроцеллюлозы могут входить натриевая и калиевая селитры, горючие добавки (древесная мука и др.) и стабилизаторы (сода и др.). В составе широко известного *советского* динамита 62 % нитросмеси, 3,5 % нитроцеллюлозы, 32 % нитрата натрия и 2,5 % древесной муки.

В табл. 8.1 приведены обобщенные из разных источников значения основных параметров, рассмотренных ВВ.

Таблица 8.1

### Параметры некоторых ВВ на основе жидких компонентов

Параметр	Нитро-глицерин	Нитро-глицерин	Нитро-диглицерин	Динамит 62 %
t° самовоспламенения, °С	270	217		
t° плавления, °С	13-13,5	-(20-23)		
t° вспышки, °С	180-200	215	210-215	205
t° взрыва, °С	4110	3900-4000		4040
Теплота взрыва, кДж/кг	6500	6800	4100	5070
Объем газов, л/кг	6530	737	919	
Кислородный баланс, %	+3,5	0	-40,8	
Скорость детонации, км/с	1,1-8,2	1,5-8,3	1,8-6,8	6
Бризантность по Гессу, мм	15-26	19-30	6,5	16

### 8.1.2. Твердые взрывчатые вещества и их смеси

**Тротил** (тринитротолуол, ТНТ, тол)  $C_6H_2(NO_2)_3CH_3$  или  $C_7H_5(NO_2)_3$ . Является одним из самых распространенных однокомпонентных ВВ.

Тротил получают путем нитрации толуола смесями азотной и серной кислот:



Серная кислота в реакции не участвует и добавляется для поглощения воды более активного протекания процесса и увеличения выхода продукта.

Чистый тротил состоит из кристаллов цвета от светло- до темно-желтого с температурой плавления  $80\text{ }^\circ\text{C}$ . В порошкообразном виде тротил имеет насыпную плотность  $0,9\text{ г/см}^3$ . Литой тротил имеет плотность  $1,54\text{--}1,6\text{ г/см}^3$ .

Тротил практически нерастворим в воде, имеет высокую химическую стойкость. Температура вспышки составляет  $300\text{ }^\circ\text{C}$ . Вспышка обычно не сопровождается взрывом.

Он с трудом зажигается от спички, зажечь его труднее, чем бумагу или керосин. Воспламенившись на воздухе, горит спокойно сильно коптящим пламенем. Небольшое количество горящего тротила можно потушить водой. Переход горения в детонацию наблюдается только при горении тротила в очень больших количествах или в замкнутом объеме, например в корпусе боеприпаса.

Взрывчато-энергетические характеристики тротила достаточно высокие: теплота взрыва –  $4200\text{ кДж/кг}$  или  $1000\text{ ккал/кг}$ , скорость детонации –  $7000\text{ м/сек}$ .

Это вещество имеет большой отрицательный кислородный баланс ( $74\%$ ), из-за чего при его взрыве выделяется значительное количество твердых продуктов (сажа).

Тротил токсичен, особенно в тонко измельченном состоянии, вызывает раздражение кожи и болезнь глаз, а также интоксикацию организма. Предельно допустимая концентрация тротиловой пыли в воздухе равна  $1\text{ мг/м}^3$ .

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.

При попадании в тротил песка или других твердых примесей его чувствительность механическим воздействиям резко возрастает. Наиболее восприимчив к инициированию порошкообразный тротил, наименее – литой.

Удачное сочетание достаточно высоких взрывчато-энергетических характеристик с хорошей химической стойкостью, малой чувствительностью, сравнительно низкой температурой затвердевания явилось причиной длительного применения тротила в качестве основного бризантного взрывчатого вещества.

В военном деле тротил применяют для снаряжения боеприпасов практически всех типов, а также для изготовления подрывных средств – промежуточных детонаторов.

В строительстве и горном деле применяется тротил в порошкообразном, прессованном, чешуйчатом, гранулированном виде, а иногда в виде кусков и литых шашек. Для патронированных ВВ применяется порошкообразный тротил, для грубодисперсных – гранулированный чешуйчатый.

В состав аммиачно-селитренных ВВ он входит в качестве сенсбилизатора и активной горючей добавки, так как имеет много лишних горючих молекул (углерода).

**Гранулотол** (гранулированный тротил) с размером гранул 3-5 мм применяется как самостоятельное ВВ для взрывания обводненных скважин и в качестве компонента в составе граммонитов и водосодержащих ВВ. В сухом состоянии имеет теплоту взрыва 3450 кДж/кг, а в водонаполненном – 4200 кДж/кг в пересчете на 1 кг сухого ВВ. Работоспособность водонаполненного гранулотола на баллистическом маятнике (с промежуточным детонатором) на 10-13 % выше работоспособности сухого тротила в тех же условиях.

Скорость детонации гранулотола в открытых зарядах изменяется от 4,5 (сухой) до 6,5 км/с (мокрый).

Гранулотол абсолютно водостойчив: заряды могут длительное время находиться в воде, в том числе и проточной, без потери взрывчатых свойств, он быстро тонет в воде, имеет хорошую сыпучесть в сухом и мокром состоянии. При хранении не слеживается и не спекается, обладает высокой стабильностью взрывчатых свойств. Для инициирования взрыва гранулотола необходим промежуточный мощный детонатор, так как он недостаточно чувствителен к обычным средствам инициирования.

Применять гранулотол рекомендуется в водонаполненном состоянии, так как вода, заполняющая промежутки между гранулами, увеличивает плотность до  $1,3-1,35 \text{ г/см}^3$ , за счет чего повышается скорость детонации и улучшается эффект взрыва. Испаряясь, вода увеличивает объем образующихся при взрыве газов. Однако на ее испарение требуется тепло, что снижает общую энергию взрыва водонаполненного тротила.

**Алюмотол** представляет собой сплав серого цвета в форме гранул до 5 мм, состоящий из 85 % тротила и 15 % алюминиевой пудры. Плотность гранул –  $1,5-1,7 \text{ г/см}^3$ , теплота взрыва – 5600 кДж/кг.

Алюмотол, как и гранулотол, абсолютно водоустойчив, обладает хорошей сыпучестью в сухом и мокром состоянии, не слеживается, пригоден для механизированной закладки в скважины, отличается высокой стабильностью и хорошими взрывчатыми свойствами.

Предназначен для применения в обводненных скважинах, в том числе с проточной водой. Для его инициирования необходимы мощные промежуточные детонаторы.

Смесь тротила с алюминиевой пудрой в военном деле получила название ТА, в США она известна под названием *тритонал*.

**Гексоген** (циклотриметилентринитрамин)  $\text{C}_3\text{H}_6\text{O}_6\text{N}_6$  или  $(\text{CH}_2)_3\text{N}_3(\text{NO}_2)_3$  – продукт нитрации уротропина азотной кислотой, представляет собой белый кристаллический порошок с плотностью  $1,8 \text{ г/см}^3$  и насыпной плотностью  $1,1 \text{ г/см}^3$ . Температура плавления  $205 \text{ }^\circ\text{C}$ . Нерастворим в воде, ядовит, имеет высокую химическую стойкость. Разложение гексогена начинается при температуре  $200 \text{ }^\circ\text{C}$ . В небольшом количестве сгорает без взрыва.

Гексоген является одним из наиболее мощных ВВ. Скорость детонации составляет  $8,5 \text{ км/с}$ , теплота взрыва – 5450 кДж/кг.

Гексоген обладает высокой восприимчивостью к детонации, повышенной чувствительностью к удару и трению.

Плохая прессуемость и повышенная чувствительность гексогена ограничивают его использование в чистом виде, поэтому применяют его только с небольшим содержанием флегматизатора, который снижает чувствительность к внешним воздействиям и улучшает прессуемость, но инертная добавка уменьшает его мощность.



В качестве флегматизатора применяется воск, парафин, сплав парафина с церезином. Флегматизированный гексоген для отличия окрашивают добавлением красителя в оранжевый или розовый цвет.

Смесь флегматизированного гексогена с алюминиевой пудрой широко используется для снаряжения бронебойных и кумулятивных снарядов, а также крупных боеприпасов фугасного действия (авиабомб, морских торпед и мин).

Гексоген используют так же в качестве сенсibiliзирующего компонента мощных промышленных ВВ: скальных аммонитов, вторичного инициирующего ВВ для электродетонаторов, при изготовлении детонационных шнуров (ДШ) и промежуточных детонаторов для инициирования малочувствительных ВВ.

Для снаряжения современных зарядов широко применяются смеси и сплавы на основе рассмотренных бризантных взрывчатых веществ. Это объясняется тем, что, комбинируя соотношение компонентов, можно подобрать ВВ с необходимыми для практического использования свойствами.

Отдельные ВВ при достаточно высоких взрывчато-энергетических характеристиках обладают неудовлетворительными технологическими качествами, например, плавятся с разложением, из-за чего невозможно или весьма трудно изготовить разрывной заряд, особенно если выбор способа его изготовления ограничен. Например, гексоген и тэн при плавлении разлагаются. Применяя сплав или смесь гексогена и тэна с другими взрывчатыми веществами, плавящимися без разложения, в частности с тротилом, можно изготавливать из них разрывные заряды методом заливки.

Применение смеси или сплава ВВ может определяться необходимостью получить заряд с большей восприимчивостью к детонации или меньшей чувствительностью к сотрясению при выстреле, чем у индивидуального взрывчатого вещества.

С помощью смесей и сплавов можно достичь требуемой мощности взрывчатого вещества. Они позволяют регулировать бризантное и фугасное действия взрыва.

**Сплав тротила с гексогеном (ТГ)** получил широкое распространение в военном деле ещё со времён Второй мировой войны.

Соотношение компонентов в сплаве может быть различным: от 20 до 80 % гексогена и соответственно от 80 до 20 % тротила. По своим взрывчатым свойствам и энергетическим характеристикам сплав ТГ занимает промежуточное положение между тротилом и гексогеном, приближаясь к тому из компонентов, количество которого в сплаве больше. Сплав ТГ по мощности превосходит тротил, менее чувствителен по сравнению с гексогеном и обладает высокой восприимчивостью к детонации. Однако чувствительность его все же высока и это позволяет применять его только в тех боеприпасах, которые испытывают сравнительно малые ускорения, для снижения чувствительности сплава в него вводится флегматизатор.

Мощность сплавов ТГ может быть увеличена добавлением в их состав алюминиевой пудры. Сплавы ТГА (*триален, торпекс*) широко применяются для снаряжения большинства крупнокалиберных боеприпасов (боевых частей ракет, морских торпед, мин, артиллерийских снарядов). Другое «военное» название этого ВВ – морская смесь (МС). В США сплавы ТГА обозначаются буквами НВХ.

**Октоген** (циклотетраметилентетранитрамин)  $(\text{CH}_2\text{NNO}_2)_4$  – кристаллическое порошкообразное вещество белого цвета (иногда бесцветное) с плотностью монокристалла  $1,96 \text{ г/см}^3$ .

Октоген получают действием концентрированной азотной кислоты на уротропин в растворе уксусной кислоты, уксусного ангидрида и нитрата аммония.

Октоген и гексоген по химическому строению и свойствам сходны, поэтому октоген считается аналогом гексогена. За рубежом он широко применяется для снаряжения боеприпасов.

По сравнению с гексогеном он имеет некоторые преимущества: большую плотность ( $1,84 \text{ г/см}^3$ ) и скорость детонации (9100 м/сек). Октоген более стоек к нагреванию.

В США нашел применение сплав тротила с октогеном, называемый *октолом*.

В табл. 8.2 приведены обобщенные из разных источников значения основных параметров рассмотренных индивидуальных твердых ВВ, являющихся основными компонентами большинства применяемых смесей и сплавов, названия и состав которых представлены в табл. 8.3.

Таблица 8.2

### Параметры некоторых твердых бризантных ВВ

Параметр	Тротил	Гексоген	Октоген
Температура плавления, °С	80	200	280
Температура вспышки, °С	290-295	220-230	290-330
Температура взрыва, °С	2800-3050	3380-3850	
Теплота взрыва, кДж/кг	4100-4600	4700-5450	5670-5760
Объем газов, л/кг	730	890-910	780-790
Кислородный баланс, %	-74	-21,6	-21,6
Скорость детонации, км/с	6,7-7	6,1-8,9	8,3-9,1
Бризантность по Гессу, мм	16-17	>24	>24

Таблица 8.3

### Названия и состав некоторых смесей бризантных ВВ

Название	Состав
ТГА-16	Тротил – 60 %, гексоген – 24 %, Al – 16 %
<i>Torpex-1</i>	Тротил – 37 %, гексоген – 45 %, Al – 18 %
<i>Torpex-2</i>	Тротил – 40 %, гексоген – 42 %, Al – 18 %
Морская смесь МС	Тротил – 19 %, гексоген – 57 %, Al – 17 %, церезин – 7 %
МС-2	Тротил – 21 %, гексоген – 47 %, Al – 27 %, церезин – 5 %
ТГАФ-5М	Тротил – 19 %, гексоген – 59 %, Al – 17 %, церезин – 5 %
Октол 75/25	Тротил – 25 %, октоген – 75 %
НТА-3	Тротил – 29 %, октоген – 49 %, Al – 22 %
НТА-4	Тротил – 30 %, октоген – 38 %, Al – 32 %
ТОКАФ	Тротил – 18 %, октоген – 60 %, Al – 17 %, церезин – 5 %
Тетритол	Тротил – 30 %, тетрил – 70 %
ГТТ	Тротил – 12,5 %, гексоген – 75 %, тетрил – 12,5 %
Пентолит	Тротил – 50 %, ТЭН – 50 %
ТД-80	Тротил – 80 %, динитронафталин – 20 %
<i>Hexamite</i>	Тротил – 60 %, гексил – 24 %, Al – 16 %
Баронал	Тротил – 35 %, нитрат бария – 50 %, Al – 15 %

**Пластичные взрывчатые вещества (пластиты)** – это однородные тестообразные вещества кремового или коричневого цвета (реже – ярко-оранжевого), состоящие примерно из 80 % по-

рошкообразного гексогена (также может использоваться октоген, ТЭН и др.) с алюминием и 12-20 % пластификатора.

В качестве пластификатора применяются бутилкаучук, полиизобутилен, минеральное масло и т. п.

В табл. 8.4 приведены составы некоторых пластичных взрывчатых веществ с полимерным связующим.

Таблица 8.4

### Пластичные взрывчатые вещества с полимерным связующим

Наименование	Взрывчатый компонент	Связующий полимер
ППВ-5А	85 % гексоген	5 % полиизобутилен 10 % минеральное масло
ППВ-7	71,5 % гексоген 17 % алюминий	11,5 % полиизобутилен
Гексопласт ГП-87К	82,5 % гексоген	17,5 % бутилкаучук

По внешнему виду напоминают пластилин или воск, маслянисты на ощупь, пластичны в температурном режиме от  $-30$  до  $+50$  °С. Так же, как и тротил, малочувствительны к внешним воздействиям – их можно мять, резать, ронять, подвергать ударам. Лёгкая деформируемость позволяет использовать пластичные взрывчатые вещества для изготовления зарядов требуемой формы. Пластичные взрывчатые вещества не обладают липкими свойствами, поэтому при производстве подрывных работ для надёжного крепления к объекту заряды из них необходимо применять в тканевых или иных оболочках.

Горение пластичных взрывчатых веществ в количестве до 50 кг протекает энергично без перехода в детонацию. Детонируют они от капсюля-детонатора, погруженного в массу заряда на глубину не менее 10 мм.

#### 8.1.3. Взрывчатые вещества на основе аммиачной селитры

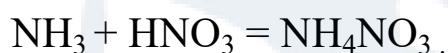
**Аммиачная селитра** (азотнокислый аммоний)  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  является компонентом большинства промышленных ВВ. При взрыве 1 кг этого вещества выделяется 0,2 кг кислорода, который используется для окисления водорода, углерода, алюминия, содержащихся в других компонентах смесового ВВ. Дешевизна и про-



стота получения аммиачной селитры, неограниченность сырьевой базы, полный переход в газообразные продукты при взрыве обусловили ее широкое применение для промышленных ВВ. Выпускается в виде порошка, гранул, чешуек и кристаллов.

Аммиачная селитра представляет собой белый кристаллический порошок с плотностью (в зависимости от формы кристаллов) 1,56-1,74 г/см<sup>3</sup>. Насыпная плотность аммиачной селитры составляет 0,86-1,74 г/см<sup>3</sup>.

Получается селитра в результате реакции соединения аммиака с азотной кислотой:

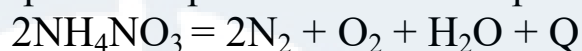


Обычная кристаллическая аммиачная селитра обладает высокой гигроскопичностью. При изменении влажности воздуха она слеживается, превращаясь в камнеобразную массу. Поэтому сейчас изготавливают менее слеживающуюся кристаллическую и гранулированную селитру марки ЖВ с добавками железных солей жирных кислот, которые покрывают кристаллы селитры мономолекулярной пленкой, снижающей ее гигроскопичность и слеживаемость и повышающей водоустойчивость.

Из-за низкой детонационной способности селитра по условиям хранения и транспортировки не относится к ВВ.

Пожаровзрывоопасность селитры резко увеличивается при наличии горючих примесей, а также при ее упаковке в горючие материалы. Потому при ее хранении и транспортировке необходимо создавать условия, исключаящие очаги разогрева.

Реакция взрывного разложения селитры



сопровождается выделением тепла Q и избыточного кислорода. Теплота взрыва селитры составляет всего 1400 кДж/кг в отличие от аммонитов, для которых она равна 3400–5000 кДж/кг.

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, имеющие обычно отрицательный или нулевой баланс, для аммиачной селитры даже в небольших количествах (до 5 %) являются сенсбилизаторами, так как участвуя в реакции и повышая энергию взрыва, они повышают и восприимчивость селитры к детонации при положительном и нулевом кислородном балансе смеси.

Аммиачная селитра активно вступает в реакцию с серой, сульфидами, азотной, серной, фосфорной кислотами, а также с металлами: цинком, медью, никелем, магнием. 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. Скорость детонации обычной селитры в металлической трубе диаметром 40 мм равна 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 детонационного шнура. 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 массой менее 0,5 кг.

Натриевая  $\text{NaNO}_3$ , калиевая  $\text{KNO}_3$  и кальциевая  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$  селитры содержат более чем в 2 раза больше кислорода, чем аммиачная, имеют положительный кислородный баланс более 40 % и плотность кристаллов – более 2 г/см<sup>3</sup>. Но при взрывообразном разложении они образуют мало газов и много твердых оксидов, стоимость их выше. Смесей этих видов селитр с горючими веществами более чувствительные к механическим воздействиям и воспламенению. Эти виды селитры имеют ограниченное применение и используются для приготовления водосодержащих ВВ, а в качестве добавок – для повышения плотности ВВ, снижения температуры его замерзания, удерживания воды в составе ВВ, т. е. предохранения от высыхания.

Раньше селитру применяли как самостоятельное ВВ при крупных взрывах. В настоящее время она используется только в смеси с горючими добавками или с бризантными ВВ.

**Динамоны** – порошкообразные смеси аммиачной селитры с невзрывчатыми горючими добавками.

В качестве горючих добавок вводятся минеральные масла, топлива, 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 являются их расслаиваемость при зарядке и гигроскопичность, а достоинствами – доступность и простота изготовления.

Среди динамонов наибольшее распространение получили *гранулиты* и *игданиты*.

**Гранулиты** – гранулированные взрывчатые смеси аммиачной селитры и жидкого горючего, опудренные древесной мукой или порошком алюминия (заводского изготовления).

**Игданиты** – взрывчатые смеси, состоящие из 5-7 % дизельного топлива или солярового масла и гранулированной или чешуйчатой аммиачной селитры (изготавливаются на месте проведения взрывных работ).

Игданиты безопасны в обращении, имеют низкую стоимость, удобны для механизированного заряжания. Недостатками игданитов являются: частичная потеря взрывчатых свойств при длительном заряжании (более 5-6 ч) из-за стекания солярового масла в нижнюю часть заряда с гладких гранул аммиачной селитры; флегматизация сердцевины шнура марки ДША соляровым маслом; разрушение оболочки ДШ из маслонеустойчивого полиэтилена – из-за этого происходят отказы.

Введение в состав игданита аэросила (тонкодисперсного аморфного диоксида кремния) путем его предварительного смешивания с соляровым маслом в количестве 0,05-2 % общей массы резко повышает удерживающую способность гранул и исключает стекание горючей добавки в течение 3-5 суток.

Игданит относится к ВВ с невысокими энергетическими параметрами:  $Q = 3800$  кДж/кг;  $D = 2,2-2,7$  км/с и довольно высоким газообразованием – 990 л/кг.

В табл. 8.5 приведены обобщенные из разных источников значения основных параметров рассмотренных видов ВВ пониженной мощности на основе аммиачной селитры.

Таблица 8.5

### Параметры аммиачной селитры и динамонов

Параметр	Аммиачная селитра	Динамоны
Температура плавления, °С	170	–
Температура взрыва, °С	1230	1940-2750
Теплота взрыва, кДж/кг	1500	3015-3720
Объем газов, л/кг	976	900-950

Параметр	Аммиачная селитра	Динамоны
Кислородный баланс, %	+20	–
Скорость детонации, км/с	1,5-3	2,5-4,5
Бризантность по Гессу, мм	–	12-14
Фугасность, мл	180	320-350

Среди промышленных ВВ очень широкое распространение получили смеси аммонийной селитры с другими бризантными ВВ и различными добавками. В военном деле они рассматриваются как вспомогательные (запасные) и называются суррогатными ВВ.

**Аммониты** – взрывчатые смеси аммиачной селитры с твердыми бризантными ВВ (чаще с тротилом, реже с гексогеном, динитронафталином) и горючими невзрывчатыми компонентами.

Порошкообразные бризантные ВВ в состав аммонитов вводят для повышения мощности и чувствительности, горючие добавки – для улучшения структуры, снижения слеживаемости и получения кислородного баланса близкого к нулевому.

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 вещества, гигроскопичны, как и аммиачная селитра, входящая в их состав.

Критической плотностью большинства аммонитов является  $1,4-1,5 \text{ г/см}^3$ . Аммониты относительно безопасны в обращении: от зажженного кончика огнепроводного шнура аммониты не загораются. На открытом воздухе аммониты сгорают без взрыва, но в замкнутом пространстве или при большом количестве возможен переход горения во взрыв.

Аммониты представляют самый большой класс промышленных ВВ и имеют много названий, которые зависят от состава компонентов. Первая часть названия определяется видом селитры, а вторая – добавляемыми ВВ и горючими невзрывчатыми компонентами.

**Аммотолы** – содержат бризантное ВВ – тротил (тол).

**Аммоналы** – взрывчатые смеси аммиачной селитры с добавлением алюминиевой пудры, которая значительно повышает теплоту и температуру взрыва.



**Акваниты** – взрывчатые смеси, пластифицированные водным гелем.

**Граммониты** – грубодисперсные смеси на основе гранулированной аммиачной селитры.

Рассмотрим некоторые группы аммонитов и конкретные смеси более подробно.

**Граммониты (граммотолы).** Промышленностью выпускаются марки: 50/50, 30/70 – только для открытых работ; 79/21 и 82/18 – для подземных и открытых работ. Числитель в марке ВВ означает процентное содержание селитры, знаменатель – содержание тротила.

Граммотолы имеют хорошую сыпучесть, не пылят не слеживаются, пригодны для механизированного заряжания. От обычных аммонитов отличаются меньшей чувствительностью к механическим воздействиям, воздействию пламени и начального импульса.

Теплота взрыва составляет 4300 кДж/кг, скорость детонации равна 5,6 км/с – для марки 30/70; 3,2 км/с – для 79/21. Объем взрывных газов составляет 900-1070 л/кг. Кислородный баланс равен – 49 % для марки 30/70 и +0,02 % для марки 79/21.

**Аммотолы.** Изготавливаются путем механического смешивания кристаллической аммиачной селитры (79-85 %) с порошкообразным тротилом (5-21%) и другими компонентами в шаровых мельницах. Их выпускают в виде патронов различного диаметра или в мешках массой 40 кг, а отдельные сорта – в виде прессованных патронов диаметром 45 мм.

Для защиты оболочки патронов от увлажнения упаковку покрывают сплавом парафина с петролатумом. Повышенной водостойкостью обладают аммотолы на основе водостойчивой аммиачной селитры марки ЖВ. Из-за незначительной смешиваемости и насыпной плотности меньше 1 г/см<sup>3</sup> порошкообразные аммотолы не тонут в воде при свободной засыпке в обводненные скважины, поэтому не рекомендуется использовать их в таких условиях. Аммотолы на основе порошкообразной селитры быстро слеживаются. Слежавшийся аммотол, как правило, не детонирует от штатного детонатора. Детонационная способность слежавшейся смеси в значительной мере восстанавливается после ее измельчения. Для уменьшения смешиваемости в состав ВВ вводят селитру с примесью красителей (фуксина).

Насыпная плотность аммотолов составляет 0,8-0,9 г/см<sup>3</sup>, патронированные заряды имеют плотность до 1,0-1,15 г/см<sup>3</sup>. Теплота взрыва равна 4300-5400 кДж/кг, скорость детонации – 3,6-4 км/с.

Увеличивают плотность аммотолов до 1,3-1,5 г/см<sup>3</sup> за счет прессования. В процессе заряжания жесткие прессованные патроны не меняют своей формы, а это усложняет их использование, так как между зарядом и стенками шнура или скважины образуется зазор, снижающий плотность зарядки.

**Аммонит 6ЖВ** представляет собой плохосыпучий, пылящий порошок желтого цвета с нулевым кислородным балансом, состоящий из 79 % селитры и 21 % тротила. При высоком качестве и хорошей упаковке мало слеживается. Выпускается в патронированном виде и бумажных крафтцеллюлозных мешках. Не пригоден для механизированного заряжания.

Предназначен аммонит 6ЖВ для взрывания пород средней и выше средней крепости сухих и влажных шурфов и скважин, а также для вторичного взрывания, в качестве патронов-боевиков (инициаторов) для взрывания гранулированных и водосодержащих ВВ.

Многие предприятия (карьеры, объекты гидротехнического строительства и мелиорации, рудники и т. д.) по традиции заказывают аммонит 6ЖВ в качестве основного ВВ, хотя его можно заменить более удобными и выгодными гранулитами или граммонитами.

**Аммонал-260 водоустойчивый** содержит 80 % селитры, 15 % тротила, 4,5 % алюминиевой пудры. Представляет собой однородный мелкий порошок серо-стального цвета, малосыпуч, сохраняет свои свойства при длительном хранении, не пригоден для механизированного заряжания. Выпускается в патронах диаметром 31-32 мм, применяется для взрывания крепких пород любой обводненности.

**Аммонит скальный № 1** представляет собой аммонит с добавкой 24 % гексогена и 5 % алюминия. Выпускается в прессованном виде с плотностью 1,4-1,58 г/см<sup>3</sup>, водоустойчив, пригоден для взрывания обводненных крепких пород с гидростатическим напором. Обладает повышенной чувствительностью к механическим воздействиям, выделяет ядовитых газов меньше, чем другие аммониты.

Прессованные патроны изготавливают с гнездом под детонатор диаметром 8 мм, глубиной 73 мм. На оболочке патрона имеется стрелка, указывающая на торец с гнездом.

Применяется при проходке стволов шахт и горизонтальных выработок в особо крепких породах.

**Аммонал скальный № 3** содержит 72 % селитры, 5 % тротила, 15 % гексогена и 8 % алюминиевой пудры. Это однородный порошок серо-стального цвета. Является самым мощным из порошкообразных аммонитов. Не слеживается, водостойчив, надежно детонирует при диаметре 24-28 мм. Предназначен для взрывания крепких пород любой обводнённости зарядами малого диаметра. Не пригоден для механизированного заряжания.

**Динафталит-200** представляет собой наполовину зерновой, малопылящий, не слеживающийся состав желто-песочного цвета. Содержит 88 % селитры (35 % – марки ЖВ и 53 % – кристаллической), 11 % динитронафталина 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.

Во время Великой Отечественной войны подобное ВВ, применявшееся для наполнения мин, получило название *шнейдерит*.

**Детониты** – взрывчатые смеси селитры (74-78 %), алюминиевого порошка (5-11 %), тротила (5-10 %) и дополнительно жидкого бризантного ВВ (смесь нитроэфиров, главным образом нитроглицерина и нитрогликоля – 5-20 %). Труднозамерзающие нитроэфиры выступают в качестве сенсibilизатора.

**Детонит М** представляет собой малопылящее порошкообразное ВВ серо-стального цвета, состоящее из 78 % селитры, 10 % труднозамерзающих нитроэфиров, 10 % алюминиевой пудры, 0,3 % коллоидного хлопка, по 0,2 % соды и машинного масла. Не слеживается, обладает хорошей водостойчивостью, высокой детонационной способностью в зарядах малого диаметра 24-28 мм в сухом и увлажнённом состояниях, сохраняет стабильными свойства при длительном хранении.

Детонит М предназначен для взрывания в подземных условиях крепких пород любой обводнённости. Вследствие токсичности нитроэфиров нельзя допускать контакта незащищенных

частей тела человека с ВВ, так как при этом возникают головные боли. Работы должны вестись в кожаных перчатках.

В табл. 8.6 представлены сравнительные параметры некоторых рассмотренных ВВ, а в табл. 8.7 приведены названия и состав наиболее известных промышленных ВВ.

Таблица 8.6

**Параметры промышленных ВВ на основе аммонийной селитры**

Параметры	Аммониты		Аммоналы		Детонит М	Динафталит
	6 ЖВ	№ 1	№ 3	260		
Теплота взрыва, кДж/кг	4300	5400	4950	4950	5800	4070
Объём газов, л/кг	895	830	810	745	832	920
Плотность, г/см <sup>3</sup>	1,0–1,2	1,6	1,0–1,15	0,95–1,1	1,0–1,3	1,0–1,15
Критический диаметр, 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

Таблица 8.7

**Названия и состав промышленных ВВ на основе аммонийной селитры**

Название	Состав
Динамон-1	АС – 88 %, бурый уголь – 12 %
Астролит G	АС – 49 %, гидразин – 48 %, вода – 3 %
«Русский Беллит»	АС – 83 %, динитробензол – 17 %
Динитронафталит-200	АС – 88 %, динитронафталин – 11 %, парафин
Детонит М	АС – 78 %, нитроэфиры – 10 %, Al – 10 %, ...
Аммоксил	АС – 82 %, ксилит – 18 %
«Громобой»	АС – 72 %, пикрат аммония – 28 %
Аммонит АП-4ЖВ	АС – 68 %, тротил – 17 %, NaCl или KCl – 15 %
Зерногранулит 70/30	АС – 70 %, тротил – 30 %
Зерногранулит 50/50	АС – 50 %, тротил – 50 %
Амматол 80/20	АС – 80 %, тротил – 20 %
Аммонит № 2	АС – 88 %, тротил – 12 %



Название	Состав
Аммонит № 6ЖВ	АС – 79 %, тротил – 21 %
Аммонал ВА-4 (260)	АС – 80,5 %, тротил – 15 %, АІ – 4,5 %
Аммонал М-10	АС – 76 %, тротил – 14 %, АІ – 10 %
<i>Minol 2</i>	АС – 40 %, тротил – 40 %, АІ – 20 %
Граммонал А-8	АС – 80 %, тротил – 12 %, АІ – 8 %
Аммонит скальный № 1	АС – 66 %, тротил – 5 %, гексоген – 24 %, АІ – 5 %
Аммонал скальный № 3	АС – 72 %, тротил – 5 %, гексоген – 15 %, АІ – 8 %

## 8.2. Иницирование детонации взрывчатых веществ

### 8.2.1. Иницирующие взрывчатые вещества

Иницирование взрыва происходит при подводе к ВВ импульса достаточной мощности для возбуждения детонации. Взрывчатые вещества разного химического состава имеют различную чувствительность к механическим и тепловым воздействиям. Те взрывчатые 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, используются как *первичные иницирующие ВВ*.

Высокая чувствительность иницирующих взрывчатых веществ к тепловым и механическим воздействиям определяет жёсткие требования безопасности при их практическом использовании. Например, возможен взрыв во время изготовления зажигательных трубок, в результате трения огнепроводного шнура о гильзу капсюля-детонатора, опудренного иницирующими веществами.

К первичным иницирующим взрывчатым веществам предъявляют следующие основные требования:

- иницирующая способность их должна обеспечивать надёжный взрыв бризантного взрывчатого вещества, применяемого для снаряжения детонаторов;
- они должны быть достаточно безопасны в обращении;
- должны быть химически и физически стойкими;
- должны иметь хорошую сыпучесть и прессуемость.

Все инициирующие взрывчатые вещества в силу своей чрезвычайной восприимчивости к тепловым и механическим воздействиям перевозятся только в виде готовых снаряженных изделий – средств инициирования.

В данную группу входят следующие взрывчатые вещества:

1. Гремучая ртуть – ртутная соль гремучей кислоты (фульминат ртути).
2. Азид свинца – свинцовая соль азотисто-водородной кислоты ( $\text{HNO}_2$ ).
3. Тринитрорезорцинат свинца (ТНРС) – стифнат свинца.

В табл. 8.8 приведены обобщенные из разных источников значения основных параметров первичных инициирующих ВВ.

Таблица 8.8

### Параметры первичных инициирующих взрывчатых веществ

Параметр	Гремучая ртуть	Азид свинца	ТНРС
Температура вспышки, °С	180	330	275
Температура взрыва, °С	4300-4800	4100-4300	2800-3030
Теплота взрыва, кДж/кг	1800	1600	1750
Объем газов, л/кг	315	310	450
Кислородный баланс, %	-11,3	-21,6	-56
Скорость детонации, км/с	5,5	5,3	5,2
Чувствительность к удару, мм	20	30-40	110

**1. Гремучая ртуть**  $\text{Hg}(\text{CNO})_2$  – белый или серый мелкокристаллический порошок с плотностью монокристалла –  $4,31-4,42 \text{ г/см}^3$ , кристаллы гремучей ртути обладают шелковистым блеском.

Сухая гремучая ртуть безотказно детонирует от луча огня, удара, накола, трения, поэтому её применяют для снаряжения капсулей-воспламенителей и капсулей-детонаторов. Гремучая ртуть, флегматизированная парафином, применяется для снаряжения детонирующего шнура.

Гремучая ртуть химически достаточно устойчива до температуры  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ . С повышением температуры начинается её разложение, причём, чем выше температура, тем быстрее идёт разложение. Довольно быстрое разложение, но без взрыва, происходит при  $90-95 \text{ }^\circ\text{C}$ . При этом гремучая ртуть постепенно теряет свои

взрывчатые свойства и превращается в трудновоспламеняющийся порошок коричневого цвета. При пониженных температурах значительно удлиняется переход дефлаграционного горения гремучей ртути в детонацию.

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 иницирующее воздействие и становится менее чувствительной к внешним воздействиям, поэтому для детонаторов первичные заряды гремучей ртути используются в прессованном виде. При наличии влаги гремучая ртуть вступает в реакцию с медью, образуя весьма чувствительные фульминаты меди. В связи с этим медные детонаторы, начиненные гремучей ртутью, необходимо предохранять от влаги. С алюминием гремучая ртуть вступает в реакцию, образуя невзрывчатые соединения, поэтому для детонаторов нельзя использовать алюминиевые гильзы, начиненные гремучей ртутью.

Гремучая ртуть, как и большинство соединений, содержащих ртуть, ядовита. Пыль гремучей ртути вызывает раздражение слизистых оболочек носа, глаз и гортани. Соприкосновение с влажной гремучей ртутью вызывает раздражение кожи и кожные заболевания.

**2. Азид свинца  $Pb(N_3)_2$**  – мелкокристаллический порошок белого цвета, имеющий две основных кристаллических формы с плотностью монокристалла 4,71 и 4,93 г/см<sup>3</sup>.

Он обладает меньшей чувствительностью к внешним воздействиям, чем гремучая ртуть, однако его иницирующая способность в 10 раз больше. Высокая иницирующая способность азид свинца даёт возможность сократить размеры капсулей, снаряжаемых этим взрывчатым веществом. Несмотря на наличие у азид свинца ряда недостатков, его шире применяют, чем гремучую ртуть.

К основным недостаткам азид свинца относятся чувствительность к действию солнечного света (разложение), возможность самопроизвольных взрывов в процессе изготовления, сравнительно недостаточная чувствительность к лучу огня.

Азид свинца негигроскопичный, не растворяется в воде и не теряет детонационной способности при увлажнении. Под воздействием углекислого газа в присутствии влаги вещество переходит

в углекислые соли, в связи с чем его чувствительность снижается. С медью азид свинца образует весьма чувствительные и опасные соединения, именно поэтому его запрессовывают в алюминиевые гильзы. Степень уплотнения и температура азид свинца не оказывают влияния на его чувствительность.

Азид свинца токсичен, как и все соединения свинца. Но газы, образующиеся при взрыве, менее ядовиты, чем у гремучей ртути. Поэтому в качестве первичного инициирующего ВВ вместо гремучей ртути в промышленности применяют именно азид свинца.

**3. Тринитрорезорцинат свинца (ТНРС)  $C_6H(NO_2)_3O_2Pb$**  – мелкокристаллический сильно электризующийся порошок золотисто-жёлтого цвета (темнеющий на воздухе) с плотностью монокристалла 3,01-3,08 г/см<sup>3</sup>.

Насыпная плотность ТНРС равна 1-1,6 г/см<sup>3</sup>. Плотность запрессованного ВВ составляет 2,9 г/см<sup>3</sup>.

Иницирующая способность ТНРС ниже, чем гремучей ртути и азид свинца. В связи с этим он не применяется в качестве самостоятельного инициирующего взрывчатого вещества, а лишь вместе с азидом свинца в качестве вспомогательного заряда. В этом случае ТНРС служит для передачи энергии воспламенения азиду свинца.

ТНРС негигроскопичен, не растворяется в воде и не взаимодействует с металлами, следовательно, его можно снаряжать в любые оболочки.

По чувствительности к пламени ТНРС занимает среднее положение между гремучей ртутью и азидом свинца. Помимо этого ТНРС весьма чувствителен к электрическим разрядам. При воспламенении даёт мощный луч огня, сгорает весьма энергично с высокой температурой пламени.

По чувствительности к трению также занимает среднее положение между азидом свинца и гремучей ртутью. Чувствительность к удару ниже, чем у азид свинца.

**Вторичные инициирующие ВВ** предназначены для увеличения энергии начального импульса, вызываемого зарядом первичного инициирующего ВВ, и детонирования основного заряда ВВ. Вторичные инициирующие ВВ менее чувствительны к внешним воздействиям, но имеют большую скорость детонации, теп-



лоту взрыва и более высокую инициирующую способность по сравнению с первичными инициирующими ВВ.

В качестве вторичных инициирующих применяются бризантные ВВ повышенной мощности, которые более чувствительны к инициирующим импульсам, чем обычные бризантные ВВ нормальной мощности, рассмотренные ранее.

К такой группе ВВ прежде всего относятся:

1. Тетрил (тринитрофенилметилнитромин).
2. ТЭН (пентаэритриттетранитрат).

В качестве вторичного ИВВ используется и гексоген.

В табл. 8.9 приведены обобщенные из разных источников значения основных параметров вторичных инициирующих взрывчатых веществ.

Таблица 8.9

### Параметры вторичных инициирующих взрывчатых веществ

Параметр	Тетрил	ТЭН
Температура плавления, °С	130	140
Температура вспышки, °С	195	210
Температура взрыва, °С	3800	4000
Теплота взрыва, кДж/кг	4500	5600
Объем газов, л/кг	765	780
Кислородный баланс, %	-47,4	-10,1
Скорость детонации, км/с	7,5	8,2
Бризантность по Гессу, мм	21	>24
Фугасность, мл	365	>500
Критический диаметр детонации, мм	2,5-7	1-3

**1. Тетрил**  $C_6H_2(NO_2)_4NCH_3$  – кристаллическое вещество белого цвета (технический продукт из-за примесей светло-жёлтого или жёлтого цвета) с плотностью монокристалла  $1,725 \text{ г/см}^3$ .

Насыпная плотность тетрила около  $1 \text{ г/см}^3$ , а плотность, достигаемая прессованием, составляет  $1,63-1,71 \text{ г/см}^3$ . Так как уже при температуре плавления тетрил заметно разлагается, то в литом виде его не применяют.

Тетрил относится к категории взрывчатых веществ, весьма чувствительных к тепловому и механическому воздействию. Горение сравнительно небольшого количества тетрила обычно завершается переходом в детонацию.

Получают тетрил нитрованием (обработкой азотной кислотой) диметиланилина  $C_6H_5N(CH_3)_2$ .

Тетрил токсичен, при систематическом контакте вызывает аллергию и экзему на коже.

Обладает хорошими взрывчатыми характеристиками. В качестве вторичного инициирующего ВВ применяется почти во всех выпускаемых детонаторах.

**2. ТЭН**  $C(CH_2ONO_2)_4$  – кристаллическое порошкообразное вещество белого цвета (иногда бесцветное) с плотностью монокристалла  $1,77 \text{ г/см}^3$ , прессуется до плотности  $1,6-1,7 \text{ г/см}^3$ .

Получают ТЭН нитрованием пентаэритрита  $C_5H_{12}O_4$  пятикратным количеством 93-99 % азотной кислоты, свободной от окислов азота.

ТЭН нерастворим в воде, трудно растворим в спирте и эфире, но хорошо растворим в ацетоне и диметилформамиде. В химическое взаимодействие с металлами не вступает.

Воспламеняется при зажигании довольно трудно и в небольших количествах сгорает спокойно. Однако при повышенном давлении горение ТЭНа может перейти в детонацию. При нагревании разлагается с сильным самоускорением, часто переходящем в детонацию. Чувствителен к электрической искре, способен наэлектризовываться.

По чувствительности к механическим воздействиям ТЭН является наиболее чувствительным из всех бризантных взрывчатых веществ и относится к наиболее мощным и чувствительным вторичным инициирующим ВВ.

Применяется в основном для изготовления детонирующих шнуров и в качестве вторичного инициирующего ВВ в некоторых детонаторах. За рубежом ТЭН применяют в качестве одного из компонентов при изготовлении мощных боевых и промышленных ВВ, а также для изготовления специальных шашек (в сплаве с тротилом) для инициирования зарядов низкочувствительных промышленных ВВ.

### **8.2.2. Средства инициирования**

Совокупность средств инициирования, обеспечивающих взрывное превращение вещества, составляет **огневую цепь (ОЦ)**.

Огневая цепь, обеспечивающая детонацию ВВ, называется **детонационной цепью (ДЦ)**.

Все средства инициирования разделяются на **средства воспламенения**, дающие на выходе луч пламени или раскаленный металлический проводок, и **средства детонации**, дающие на выходе детонационный импульс в виде ударной (детонационной) волны.

**1. Средства воспламенения.** Простейшим средством воспламенения является **огнепроводный шнур (ОШ)**. Он предназначен для возбуждения работы детонационной цепи горящей пороховой сердцевинкой. Представляет собой слабо спрессованный из дымного пороха с пластифицирующими добавками стержень с проходящей внутри направляющей нитью, завернутый в нитяные оплетки с гидроизоляционной прослойкой.

Наружный диаметр (ОШ) составляет 5,5 мм. По правилам безопасности отрезок огнепроводного шнура длиной 0,6 м должен сгорать за 60-68 с.

**Средства зажигания огнепроводного шнура.** При огневом инициировании нескольких зарядов поджигать концы шнуров, идущих к зарядам, разрешается тлеющим фитилем, отрезком огнепроводного шнура с надрезами или специальными патрончиками. Спичкой зажигать шнур разрешается 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 существуют другие препятствия.

В таких условиях применяют электроогневое инициирование, при котором воспламенение отрезков ОШ производится взрывниками из безопасного места за счет подачи тока в электрозажигатель, укрепленный на конце ОШ.

**Электрозажигательный патрон ЭЗ-ОШ-Б** представляет собой бумажную гильзу с зажигательной начинкой и электровоспламенителем. Предназначен для электрического зажигания пучка отрезков ОШ.

**Электровоспламенитель (ЭВ)** является началом огневой или детонационной цепи в случае электрического инициирования подрыва.

Для взрывных работ применяются электровоспламенители с металлическими мостиками с сопротивлением 0,5-5 Ом, изготавливаемые из нихромовой проволоки (сплав – 80 % никеля и

20 % хрома) диаметром 24-54 мкм, длиной до 5 мм. На мостик накаливания нанесена одно- или двухслойная воспламенительная головка. Состав прилегающей к мостику накаливания головки легко воспламеняется при пропускании электрического тока через мостик и создает достаточно мощный луч огня инициирования заряда первичного инициирующего ВВ. Для предохранения от отсыревания воспламенительные головки покрывают водонепроницаемым лаком.

**2. Средства детонации.** Самым мощным средством детонации является промежуточный (дополнительный) *детонатор*, который обеспечивает подрыв даже самого малочувствительного бризантного ВВ.

Промежуточные детонаторы изготавливаются в виде патронов с начинкой из тротила или смеси из тротила и гексогена массой 200-800 г с отверстиями в центре для детонирующего шнура или других первичных средств инициирования. В некоторых случаях промежуточный детонатор делается путем обвязки детонирующим шнуром нескольких патронов ВВ.

Для инициирования детонации основного заряда ВВ или промежуточного детонатора (в случае его наличия) используется *капсюль-детонатор*, представляющий собой металлическую гильзу (медную, алюминиевую, биметаллическую) диаметром 6-7 мм, длиной около 50 мм, начиненную зарядами первичного (гремучая ртуть, ТНРС, азид свинца) и вторичного (тетрил) инициирующего ВВ.

Заряд первичного инициирующего ВВ вызывает взрыв более мощного вторичного ВВ, а он в свою очередь инициирует подрыв промежуточного детонатора или сразу основного заряда ВВ. Для усиления инициирующего действия в доньшке капсюля-детонатора делается кумулятивное углубление.

Промышленностью выпускаются капсюли-детонаторы с гремучертутно-тетриловым и азидо-тетриловым зарядами ВВ.

*Гремучертутно-тетриловые капсюли-детонаторы* представляют собой медные или биметаллические (сталь с медным покрытием) гильзы, содержащие 0,5 г гремучей ртути и 1 г тетрила.

*Азидо-тетриловые капсюли-детонаторы* – алюминиевые гильзы, содержащие 0,1 г ТНРС, 0,2 г азид свинца и 1 г тетрила или гексогена.



В военных боеприпасах, сигналом для подрыва которых служит контакт с целью (снаряды, бомбы, торпеды, ракеты), применяются капсули-детонаторы накольного действия (НКД). В случае необходимости временной задержки подрыва (гранаты) добавляется пороховой замедлитель (ПЗ).

Капсули-детонаторы обладают высокой чувствительностью к трению, удару, сжатию и огню, поэтому при обращении с ними необходимо соблюдать максимальную осторожность.

Электрическое инициирование детонации осуществляется с помощью *электродетонатора (ЭД)*, который представляет собой капсуль-детонатор с закрепленным в нем электровоспламенителем. В этом случае электровоспламенитель непосредственно инициирует взрыв первичного вещества без применения огневого шнура.

Различают электродетонаторы по виду находящегося в них заряда инициирующего ВВ (гремучертутно-тетриловые, азидотетриловые); по времени срабатывания (мгновенное, короткозамедленное и замедленное); по конструктивному оформлению и назначению (общего назначения, для сейсморазведки, обработки металлов, торпедирования нефтяных скважин и др.); по условиям применения (непредохранительные и предохранительные – для шахт и в условиях, грозящих взрывом газа или пыли); по чувствительности к блуждающим токам (нормальной, пониженной и весьма низкой, грозоупорные).

В военных боеприпасах с управляемым подрывом (некоторые виды ракет, радиоуправляемые мины и др.) в основу детонационной цепи закладываются именно электродетонаторы, а для надежности подрыва добавляются тетриловые или тротиловые дополнительные детонаторы (ДД).

### **8.3. Метательные взрывчатые вещества**

*Метательными* называются такие взрывчатые вещества, в результате горения которых газы и пламя используются не для разрушения, а для совершения толкающей работы, зажигательно-го или иного специального действия. Основной вид их взрывчатого превращения – горение. В условиях замкнутого пространства и большого давления ускоряющийся процесс горения может перейти в детонацию.

По физико-химическим свойствам все эти вещества являются **порохами** – многокомпонентными твёрдыми взрывчатыми композициями, способными к закономерному горению параллельными слоями без доступа кислорода извне с выделением большого количества тепловой энергии и газообразных продуктов.

Исходя из области применения, пороха должны отвечать следующим требованиям:

- обладать способностью устойчиво и закономерно (параллельными слоями) гореть в том числе и без доступа кислорода;
- обладать достаточной мощностью (работоспособностью), обеспечивающей вышибное, метательное, воспламеняющее и др. действия, в зависимости от предназначения;
- иметь пределы чувствительности к механическим и тепловым инициирующим импульсам, обеспечивающие безотказность действия в условиях использования и безопасность в обращении;
- обладать механической прочностью пороховых элементов;
- обладать стабильностью, т. е. способностью в условиях хранения длительное время не изменять свои физико-химические, а следовательно, и баллистические свойства;
- отвечать однообразию качества;
- обеспечивать при стрельбе как можно меньшую пламенность и дымность;
- оказывать как можно меньшее коррозионное и эрозийное действие на элементы стволов и корпусов.

Как уже было отмечено, в зависимости от физико-химической природы, различают нитроцеллюлозные и смесевые пороха.

### **8.3.1. Нитроцеллюлозные пороха**

В настоящее время для стрельбы из различного рода оружия применяются, как правило, нитроцеллюлозные пороха. Это обстоятельство объясняется, прежде всего, тем, что при сгорании нитроцеллюлозных порохов практически не выделяется дыма, а также тем, что их удельная энергия примерно в 3 раза превосходит удельную энергию смесевых порохов. Помимо этого нитроцеллюлозные пороха очень прочны и эластичны, при горении они не рассыпаются и сгорают более или менее последовательно па-

параллельными слоями, тогда как смесевые пороха при горении могут рассыпаться, а их закономерное горение, т. е. горение параллельными слоями, наблюдается лишь для пороховых элементов очень большой плотности.

Основой всех нитроцеллюлозных порохов являются нитраты целлюлозы (нитроклетчатка).

**Нитратами целлюлозы** называются твёрдые вещества волокнистого строения, получаемые в результате нитрации (или нитрования) целлюлозы – химического взаимодействия целлюлозы со смесью азотной и серной кислот.

**Целлюлоза (клетчатка)** является веществом, из которого состоят стенки клеток растений. Стенки растительных клеток, помимо целлюлозы, содержат сопровождающие её (инкрустирующие) вещества, благодаря которым растительные клетки приобретают достаточную механическую прочность.

Целлюлоза по химической классификации относится к классу углеводов, имеющих общую химическую формулу  $C_x(H_2O)_y$ , т. е. на  $x$  атомов углерода приходится  $y$  молекул воды. В зависимости от вида растений, из которых целлюлоза получена, она имеет разные значения  $x$  и  $y$ , названия и несколько отличается по физической структуре и размерам волокна.

Для производства нитроцеллюлозных порохов применяют три вида целлюлоз:

1. **Хлопковая целлюлоза**, получаемая из хлопчатника. По длине волокна различают три сорта хлопкового материала:

– *вата* – волокна, имеющие длину 20-40 мм, ширину 15-20 мкм и внутренний диаметр 4-5 мкм, в промышленности идёт главным образом на производство текстиля;

– *линтер* – волокна, имеющие длину 12-13 мм, остающиеся на чашечках хлопчатника после съёма длинных волокон, применяется в химической промышленности для производства нитратов целлюлозы, ацетатных лаков, пластмасс и т. д.;

– *делинт* – короткие волокна хлопка длиной 3-5 мм, которые в процессе роста хлопчатника обволакивают семена снаружи, этот сорт хлопкового материала также находит применение в производстве нитратов целлюлозы, лаков и пластмасс.

2. **Древесная целлюлоза**, получаемая, главным образом, из хвойных пород деревьев путём химической очистки древесины от примесей. Волокна имеют длину 3-4 мм, ширину 30-35 мкм,

внутренний диаметр около 20 мкм. Основными веществами, входящими в состав древесной целлюлозы, являются: *целлюлоза; лигнин; гемицеллюлозы.*

*Лигнин* – это органическое полимерное соединение, содержащееся в клеточных оболочках сосудистых растений, вызывающее их одревеснение. Древесина лиственных пород содержит 20-30 % лигнина, хвойных – до 50 %. В хлопковой целлюлозе лигнин практически не обнаруживается.

*Гемицеллюлозы* – это вещества, близкие по строению к целлюлозе и принадлежащие к классу углеводов, которые являются ключевыми компонентами клеточных мембран всех растений. В хлопковой целлюлозе гемицеллюлозы, как и лигнин, отсутствуют.

*Льняная целлюлоза*, получаемая из льна. Волокна льна имеют длину 16-30 мм, ширину 7-20 мкм.

*Лен* – это волокно, имеющее структуру трубочки, к примеру, структура хлопка представляет собой коробочку. Льняная целлюлоза предпочтительнее для производства нитратов целлюлозы, так как имеет морфологию, отличную от хлопковой, за счёт чего она лучше впитывает нитраты глицерина, что увеличивает мощность получаемого продукта.

В сравнении с хлопковым волокном лен, кроме целлюлозы, содержит до 30 % сопутствующих трудноудаляемых веществ: лигнина до 7 %, гемицеллюлоз до 11 %, пектиновых веществ до 4,5 %, восков и жиров до 4 % и т. д. Для того чтобы целлюлозу пустить на производство нитратов целлюлозы, её необходимо очистить. Это достигается путём варки целлюлозы с растворами едкого натрия NaOH или сернистой кислоты H<sub>2</sub>SO<sub>3</sub> при повышенном давлении. В результате этого основная масса примесей переходит в раствор и удаляется.

Очищенную таким образом целлюлозу обрабатывают кислотами средней концентрации для образования сложных эфиров. Так, при действии азотной кислоты на целлюлозу получают азотнокислые эфиры или нитраты целлюлозы.

Этот процесс является обратимым, вследствие образования реакционной воды, разбавляющей кислоту. Для того чтобы реакция шла вправо до конца, необходимо удалить воду и увеличить концентрацию азотной кислоты.



Для удаления воды применяют различные водоотнимающие или водосвязывающие средства, чаще всего серную кислоту. Поэтому обработка целлюлозы (нитрация) проводится смесью азотной и серной кислот. Как показала практика, в безводной начальной кислотной смеси серная кислота будет отнимать воду от азотной кислоты и разрушать её, поэтому в смесь всегда вводят, кроме кислот, ещё некоторое количество воды – 8-20 %.

**Нитраты целлюлозы** – это высокомолекулярные ВВ с общей химической формулой  $[C_6H_7O_2(OH)_{3m}(ONO_2)_m]_n$ , где  $m$  – степень замещения;  $n$  – степень полимеризации.

Нитраты целлюлозы представляют собой волокнистую рыхлую массу белого цвета и в зависимости от содержания в них азота делятся на *пироксилины* (содержание азота 12,2-13,5 %) и *коллоксилины* (содержание азота 10,7-12,2 %). Чем больше содержание азота, тем выше взрывчатые свойства.

Нитраты целлюлозы весьма гигроскопичны. При содержании влаги менее 3 % их называют сухими, при содержании влаги более 3 % – влажными. Сухие нитраты целлюлозы очень опасны – взрываются от удара и трения. При содержании влаги более 25 % – малочувствительны и безопасны в обращении и хранении.

**Нитроцеллюлозные пороха** представляют собой нитраты целлюлозы, пластифицированные тем или иным низкомолекулярным органическим растворителем.

Основанием для условного разделения таких порохов на подгруппы являются свойства растворителя (точнее его летучесть), применяемого для преобразования нитратов целлюлозы в желатиноподобное состояние с образованием коллоидного раствора (высокодисперсной двухфазной системы, состоящей из дисперсионной среды и дисперсной фазы). При охлаждении такого раствора получается пластическая пороховая масса, легко поддающаяся прессованию в шашки, используемые в дальнейшем в качестве элементов порохового заряда.

В зависимости от характеристик (летучести) растворителя – пластификатора, *нитроцеллюлозные пороха* делятся на следующие подгруппы (английская классификация):

**1. Пироксилиновые пороха.** Это нитроцеллюлозные пороха, изготавливаемые с применением летучего растворителя (спиртоэфирной смеси), в значительной мере удаляемого из пороховой массы в последующих фазах производства.

Эти пороха готовятся из нитроцеллюлозы с содержанием азота более 12,2 % – пироксилинов. Процесс производства таких порохов отличается большой трудоемкостью и длительностью. Начинается он с обезвоживания пироксилина, так как вода препятствует взаимодействию пироксилина с растворителем. По предложению Д.И. Менделеева с 1890 г. пироксилин обезвоживают спиртом, делается это в настоящее время в центрифугах. Далее технологический процесс предусматривает растворение (пластификацию) пироксилина, прессование полученной пороховой массы и резку для придания пороховым элементам определённой формы и размеров, удаление растворителя.

Пироксилиновые пороха достаточно твёрдые и имеют серовато-зелёный цвет. По форме пороховых элементов пироксилиновые пороха изготавливаются в виде пластинок, лент, колец, трубок, зёрен (без канала, с одним каналом, с семью каналами, с четырнадцатью и большим числом каналов).

Основными недостатками пироксилиновых порохов являются: невысокая энергия газообразных продуктов сгорания (относительно, например, баллиститных порохов), технологическая сложность получения зарядов большого диаметра для ракетных двигателей.

**2. Баллиститные пороха.** Это нитроцеллюлозные пороха, изготавливаемые с применением неудаляемых (труднолетучих или нелетучих) растворителей. Так как основу баллиститных порохов составляют нитроцеллюлоза и неудаляемый пластификатор, их иногда называют *двухосновными*.

При изготовлении баллиститов основным исходным компонентом являются низкоазотные нитраты целлюлозы (коллоксилины) с содержанием азота менее 12,2 %. В качестве труднолетучих растворителей – пластификаторов применяют жидкие бризантные ВВ – нитраты спиртов: нитроглицерин (*нитроглицериновые пороха*) и нитродигликоль (*дигликолевые пороха*).

Пороха на нелетучем растворителе могут быть получены специальной обработкой низкоазотных нитратов целлюлозы твёрдым пластификатором (тринитротолуолом, динитротолуолом, реже гексогеном, октогеном и даже ТЭНОм) при повышенной температуре. Смесь нитратов целлюлозы и пластификатора желатинизируется при нагревании и прессуется под большим

давлением. Ввиду трудности изготовления и повышенной взрывоопасности эти пороха не получили широкого применения.

Также в баллиститные пороха могут вводить мелкодисперсный металл (сплав алюминия с магнием) для повышения температуры и энергии продуктов сгорания, такие пороха называют металлизированными и применяют в качестве ракетных топлив.

Технологический процесс производства баллиститных порохов менее продолжителен и более экономичен, чем пироксилиновых. Он предусматривает смешение компонентов в тёплой воде в целях их равномерного распределения, отжимку воды и многократное вальцевание (придание плоскому листу материала радиусной формы). При этом удаляется вода и происходит пластификация нитрата целлюлозы, которая приобретает вид роговидного полотна. Далее порох выпрессовывают через матрицы или прокатывают в тонкие листы и режут.

Баллиститные пороха по сравнению с пироксилиновыми более мягкие и гибкие, с коричневым оттенком, изготавливаются в виде: трубок, шашек, пластин, колец, лент.

Положительным свойством баллиститных порохов является возможность значительно изменять их энергетические характеристики изменением вида и количества растворителей – пластификаторов и введения в состав различных добавок. Так, теплота сгорания (калорийность) может изменяться в пределах от 2750 до 6800 кДж/кг. По этому параметру баллиститные пороха делят на *высококалорийные* (100-1500 ккал/кг), *среднекалорийные* (650-1000 ккал/кг) и *низкокалорийные* (650-800 ккал/кг).

По сравнению с пироксилиновыми баллиститные пороха отличаются меньшей гигроскопичностью, большей быстротой изготовления, возможностью получения крупных зарядов (до 0,8 м в диаметре), высокой механической прочностью и гибкостью за счёт использования неудаляемого пластификатора.

Недостатком баллиститных порохов по сравнению с пироксилиновыми является большая опасность в производстве, обусловленная наличием в их составе бризантного взрывчатого вещества – нитроглицерина или нитродигликоля, очень чувствительных к внешним воздействиям, а также невозможность получить заряды диаметром больше 0,8 м в отличие от смесевых порохов на основе синтетических полимеров.



По применению баллистические пороха делят на *ракетные* (для зарядов к ракетным двигателям и газогенераторам), *артиллерийские* (для метательных зарядов к артиллерийским орудиям) и *миномётные* (для метательных зарядов к миномётам).

**3. Кордитные пороха.** Это нитроцеллюлозные пороха на смешанном растворителе, изготавливаемые с применением как летучего растворителя (спиртоэфирная смесь, ацетон), так и неудаляемого труднолетучего пластификатора (обычно нитроглицерин).

Такое сочетание растворителей применяется с целью использования высокоазотных нитратов целлюлозы (пироксилинов), которые плохо пластифицируются нитроглицерином, в связи с чем для облегчения пластификации применяют дополнительные растворители (ацетон, спиртоэфирную смесь и др.), которые по возможности полностью удаляются из состава готового пороха.

Преимущество кордитов – большая мощность, однако они вызывают повышенный разгар стволов из-за более высокой температуры продуктов сгорания.

По внешнему виду исходный кордитный порошок похож на волос, по форме пороховых элементов изготавливается в виде пластинок, лент, колец, шнуров, сфер, трубок. Не допускается изготавливать шашки с большой толщиной горящего свода.

**4. Вискозные пороха.** Это нитроцеллюлозные пороха без растворителя. Они представляют собой пронитрованную и стабилизированную, предварительно уплотнённую целлюлозу.

Такие пороха были разработаны и применялись в зарядах к стрелковому оружию и малокалиберным миномётам в годы Великой Отечественной войны. Их разработка позволила привлечь к производству порохов оборудование текстильных предприятий.

Стоит отметить, что в состав нитроцеллюлозных порохов наряду с нитратами целлюлозы и растворителями-пластификаторами, входят также: стабилизаторы горения (дифениламин, производные мочевины – централиты) для связывания выделяющихся окислов азота; флегматизаторы (камфора); графит, роль которого сводится к устранению электризации порохов и слипания зёрен; затемнители (графитовый порошок), для предупреждения проникновения излучения факела пламени внутрь порохового эле-



мента: упрочнители; ингибиторы; катализаторы; пламегасители; технологические добавки.

Нитроцеллюлозные пороха в обращении безопасны. Однако при засорении песком и другими твёрдыми примесями они становятся весьма чувствительными к механическим воздействиям.

Все нитроцеллюлозные пороха, особенно мелкозернистые, легко загораются при воздействии на них пламени или искр.

Нитроцеллюлозные пороха способны к детонации. Детонационная способность порохов зависит от их состава, пористости, размера пороховых элементов, графитовки их поверхности (наличия графита на поверхности), а также от условий взрывания. Пироксилиновые пороха легче детонируют, чем нитроглицериновые. Во всех случаях на детонационную способность положительно влияют пористость и уменьшение размеров пороховых элементов. Ленточные и пластинчатые пороха детонируют легче, чем трубчатые. Скорость детонации нитроцеллюлозных порохов колеблется от 3500 до 8000 м/с.

В табл. 8.10 приведены обобщенные из разных источников значения параметров основных типов порохов.

*Таблица 8.10*

#### **Некоторые параметры основных типов порохов**

<b>Пороха</b>	<b>Q, кДж/кг</b>	<b>V, л/кг</b>	<b>T, К</b>
Пироксилиновый	3000	900	2000
Баллиститный	2750-6800	до 1000	1700-4000
Кордитный	3500	990	3500
Дымный	3000	280	2400
Твердое смесевое ракетное топливо	до 5000	860	1500-3500

#### **8.3.2. Смесевые пороха и ракетные топлива**

**Смесевые пороха и ракетные топлива** – это взрывчатые композиции, представляющие собой механическую смесь трёх основных компонентнов: окислителя, горючего и связующего вещества. В готовом порохе частицы компонентнов химически не связаны друг с другом, а равномерно распределены по массе пороха и находятся в тесном контакте.

В состав смесевых порохов входят: кристаллический окислитель (нитраты и перхлораты), горючее (уголь) и полимерное

связующее горючее вещество (сера, синтетические каучуки, смолы). Кроме того, смесевые пороха могут содержать дополнительное высокоэнергетическое горючее, например, порошкообразный алюминий, катализаторы горения, пластификаторы, отвердители и др.

Веществ, богатых кислородом, в природе много. К таким веществам относятся селитры:  $\text{KNO}_3$ ,  $\text{NaNO}_3$ ,  $\text{NH}_4\text{NO}_3$ ,  $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$ ; бертолетова соль  $\text{KClO}_3$ ; перхлораты  $\text{KClO}_4$ ,  $\text{NH}_4\text{ClO}_4$  и т. д. Однако не все из окислителей пригодны для производства порохов. Одни из них, такие как  $\text{NaNO}_3$  и  $\text{NH}_4\text{NO}_3$ , слишком гигроскопичны, другие, как  $\text{KClO}_3$  и  $\text{KClO}_4$ , слишком чувствительны к удару и трению. Поэтому практическое использование нашли следующие классы смесевых порохов:

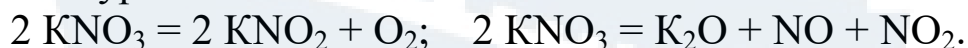
– *калийный порох* (окислитель – калийная селитра  $\text{KNO}_3$ , горючее – древесный уголь С, горюче-связующее вещество – сера S) – это *дымный порох*, нашедший самое широкое применение;

– *аммонийный порох* (окислитель – селитра  $\text{NH}_4\text{NO}_3$ );

– *перхлоратный порох* (окислитель – перхлорат, например перхлорат аммония  $\text{NH}_4\text{ClO}_4$ ).

С учётом природы компонентов, состава, назначения и специфики производства пороха – механические смеси можно разделить на три группы: *дымные пороха*; *смесевые твёрдые ракетные топлива*; *пиротехнические составы*.

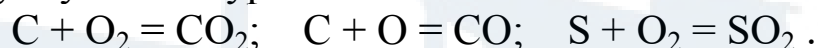
**1. Дымные пороха.** В качестве окислителя применяется исключительно калиевая селитра, в большей степени удовлетворяющая всем требованиям, предъявляемым к окислителям в составе пороха (малая гигроскопичность и невысокая чувствительность к внешним воздействиям). Калиевая селитра содержит большое количество кислорода и при нагревании легко его отдаёт, она распадается по уравнениям:



В качестве горючего вещества для изготовления смесевых порохов употребляется древесный уголь (преимущественно ольховый или крушинный) с содержанием 72-80 % углерода. Уголь из смолистых пород деревьев применять нежелательно, так как пороха, приготовленные с использованием такого угля, трудно воспламеняются.

Сера, с одной стороны, является пластификатором, связывающим селитру с углём, а с другой – горючим веществом, облегчающим воспламенение пороха, так как сера воспламеняется при более низкой температуре, чем уголь. К тому же продукты соединения серы  $K_2S$  и  $K_2S_3$  обладают каталитическими свойствами, ускоряя процесс горения. Сера встречается в кристаллической и аморфной формах. Для изготовления смесевых порохов применяется сера только кристаллической формы с температурой плавления  $114,5\text{ }^\circ\text{C}$ .

Выделяющийся при распаде калиевой селитры кислород окисляет серу и уголь по уравнениям:



Оптимальный состав дымного пороха, установленный в конце XVIII в. на основе работ М.В. Ломоносова, не претерпел существенных изменений до настоящего времени. Он содержит селитры 75 %, серы 15 %, угля 10 %

Дымные пороха по назначению классифицируются на *военный, охотничий, шнуровой, для взрывных работ, пороховую мякоть*. Перечисленные разновидности отличаются друг от друга только размерами зёрен и процентным содержанием компонентов.

К *военным порохам* относятся крупнозернистые, ружейные и минные пороха. Но внешнему виду крупнозернистые и ружейные пороха представляют собой полированные зёрна серо-чёрного цвета, не имеющие на поверхности налёта выкристаллизовавшейся селитры и желтоватых крапин серы. Минный порох имеет зёрна с металлическим отливом, покрытые графитом.

*Охотничий порох* в зависимости от массы зерна может быть отборным (1,55-1,7 г) и обыкновенным (1,617-1,672 г).

*Шнуровой порох* применяется для изготовления огнепроводных шнуров. Он имеет состав: 78 % калиевой селитры, 10 % серы и 12 % угля.

*Порох для взрывных работ* используют для отделения блоков штучного камня скальных пород от массива методом шнуровых зарядов. Содержит меньше серы (0-10 %).

*Пороховая мякоть* – порошок серо-чёрного цвета, не запрессованный в пороховые зёрна.

Значения основных характеристик для наиболее употребительных разновидностей дымного пороха следующие: количество тепла при сгорании (калорийность) около 3000 кДж/кг; объём га-

зообразных продуктов около 280 л/кг; температура горения 2130-2270 °С; скорость горения дымного пороха в огнепроводном шнуре 1 см/с. С уменьшением содержания селитры в порохе и увеличением содержания серы и угля количество тепла уменьшается, а объём газообразных продуктов растёт.

Химическая стойкость дымного пороха не вызывает никаких опасений, в случае хранения в сухом помещении порох сохраняет свои качества долгие годы.

Наличие в дымном порохе угля придаёт ему цвет от синечёрного до серо-чёрного с металлическим блеском. Интенсивный чёрный цвет указывает на присутствие в порохе большого количества влаги.

Плотность дымного пороха составляет 1,5-1,93 г/см<sup>3</sup>. Гравиметрическая плотность (весовое количество пороха, свободно насыпанного в единице объёма) составляет 0,8-1,0 кг/л.

Хороший порох сравнительно трудно раздавливается между пальцами, не пачкает рук и при насыпании его на бумагу даже с высоты 1 м совершенно не оставляет пыли. Насыпанный на лист бумаги порох при зажжении должен быстро вспыхнуть и образовать вертикальный столб дыма, при этом бумага не должна загораться и на ней не должно оставаться следов копоти (обугливания).

По чувствительности к лучу огня или искре дымный порох относится к числу опасных в обращении взрывчатых веществ. Дымный порох имеет температуру вспышки около 300 °С и легко воспламеняется под действием пламени или искры. Удар молнии всегда вызывает взрыв дымного пороха. В атмосфере водорода дымный порох не взрывается, а только накаливается, в азоте горит с трудом, в углекислоте горит хорошо. Содержание влаги в порохе должно быть в пределах 0,7-1,0 %. Увеличение количества влаги оказывает значительное влияние на воспламеняемость дымного пороха. При содержании влаги свыше 2 % порох трудно воспламеняется, а при 15 % влаги он совсем теряет способность к воспламенению.

По чувствительности к удару дымный порох относится к числу относительно безопасных в обращении взрывчатых веществ. Он менее чувствителен к механическим воздействиям, чем инициирующие взрывчатые вещества, но более чувствителен, чем некоторые бризантные. Удар пули при скорости более 500 м/с почти



всегда вызывает взрыв пороха. При трении между поверхностями железа или камня дымный порох вспыхивает.

Смесевые пороха способны к детонации. Детонационная способность зависит от их состава, степени измельчения компонентов пороховой массы, размера спрессованных пороховых элементов, а также от условий взрывания и т. д. При инициировании капсюлем-детонатором – взрывается.

Высокая чувствительность дымного пороха к лучу пламени и хорошее зажигающее действие делают его незаменимым в военном и охотничьем оружии и различных областях промышленного применения, например: для снаряжения различных дистанционных трубок; для изготовления столбиков, служащих для передачи огня вышибному заряду; в качестве вышибного заряда; для изготовления замедлителей и усилителей луча пламени в трубках и взрывателях; для изготовления пороховых лепёшек в капсюльных втулках; для изготовления воспламенителей зарядов из нитроцеллюлозных порохов и пиротехнических изделий; для изготовления огнепроводных шнуров и даже для некоторых видов горных взрывных работ (например, при добыче камня).

**2. Смесевые ракетные топлива.** По составу компонентов значительно отличаются от дымного пороха. Функции горючего и связующего, как правило, выполняет одно вещество, называемое горюче-связующим веществом. От природы горюче-связующего вещества зависят физическая структура, механическая прочность и технологические качества топлива. В качестве горюче-связующих веществ применяются полимерные материалы: асфальтоуглеводородные смолы, формальдегидная смола, каучуки и др. Их содержание в готовом продукте может быть от 15 до 25 %.

В качестве окислителя наиболее широкое применение получил перхлорат аммония. Его содержание колеблется от 60 до 80 %. Реже применяются перхлорат калия, нитрат аммония. Перечисленные вещества сравнительно дешёвы и доступны и в то же время имеют высокую плотность и удовлетворительные энергетические характеристики.

В целях увеличения энергетических характеристик смесевых топлив (см. табл. 8.8) в их состав часто вводят металлическое горючее, главным образом алюминий, в виде мелкодисперсного

порошка. Количество алюминия в смесевом топливе может составлять 5-20 %.

Для регулирования скорости горения смесевых топлив в их состав вводят специальные добавки в количестве 0,5-5 %.

Важной особенностью, имеющей большое практическое значение, является то, что заряды из смесевых топлив могут быть получены методом отливки, причем состав может заливаться непосредственно в камеру сгорания двигателя. Это позволяет изготавливать шашки практически любых размеров и форм.

По внешнему виду смесевое топливо представляет собой плотную твердую серую массу с металлическим отливом, при разломе просматриваются (поблескивают) частички алюминия.

Основным эксплуатационным недостатком таких топлив является возможность растрескивания твердотопливных зарядов при неправильном хранении и ударных нагрузках. Это увеличивает поверхность горения и приводит к разбросу скоростных показателей ракеты и даже к детонации заряда.

### **8.3.3. Пиротехнические составы**

**Пиротехнический составы** – смеси компонентов, обладающие способностью к самостоятельному горению или горению с участием окружающей среды, выделяющие в процессе горения газообразные и конденсированные продукты, тепловую, световую и механическую энергии и создающие различные оптические, электрические, барические и иные специальные эффекты.

**Пиротехническое изделия** – изделия, предназначенные для получения требуемого эффекта с помощью горения (взрыва) пиротехнического состава.

Пиротехнические составы и изделия должны обладать следующими качествами:

- максимальным специальным эффектом при минимальном расходе состава;
- определённой скоростью и равномерностью горения;
- химической и физической стойкостью при длительном хранении;
- достаточной механической прочностью спрессованных изделий;

- возможно малой чувствительностью к механическим импульсам (за исключением составов фрикционного действия);
- отсутствием чрезмерной чувствительности к тепловым воздействиям (невоспламеняемость от искры, отсутствие самовоспламенения при небольшом подъёме температуры и т. п.);
- минимальными взрывчатыми свойствами, если для этого они не предназначены;
- отсутствием токсического действия компонентов состава на человеческий организм;
- отсутствием в продуктах реакции горения сильнодействующих отравляющих веществ.

Как уже отмечалось, пиротехнические составы относятся к особой группе смесевых порохов. Однако их состав гораздо богаче. Вне зависимости от назначения в любом пиротехническом составе присутствует целый ряд компонентов, процентный состав которых может изменяться в широких пределах. К числу таких компонентов относятся:

1. Окислители.
2. Горючие.
3. Связующие (цементаторы) – органические полимеры, обеспечивающие механическую прочность составов и спрессованных из них изделий.
4. Вещества, сгорание которых сопровождается специальным эффектом.
5. Катализаторы (ускорители) или ингибиторы (замедлители) горения.
6. Флегматизаторы – добавки, уменьшающие чувствительность составов к инициирующему воздействию.
7. Сенсibiliзаторы – добавки, повышающие чувствительность составов к инициирующему воздействию.
8. Вещества технологического назначения (жирующие добавки, растворители для связующих и др.).

В некоторых случаях один и тот же компонент может выполнять несколько различных функций (связующее может выполнять функцию горючего или замедлителя горения, а некоторые окислители и горючие вещества придают окраску пламени).

Таким образом, смесь горючего, окислителя и связующего являются основой всякого пиротехнического состава. Рассмотрим

подробнее, какие вещества используются в качестве этих основных компонентов.

**Окислители** в пиротехническом составе должны быть твёрдыми веществами с температурой плавления не ниже 50-60 °С.

В качестве окислителей в пиротехнических составах используются как кислородсодержащие соединения, так и вещества, не содержащие кислород. Однако наибольшее распространение получили кислородсодержащие соединения.

Наиболее распространёнными группами окислителей, которые используются с любыми горючими, являются следующие соли и окислы:

- нитраты  $\text{NaNO}_3$ ,  $\text{KNO}_3$ ,  $\text{Sr}(\text{NO}_3)_2$ ,  $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$ ,  $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ ;
- перхлораты  $\text{KClO}_4$ ,  $\text{NaClO}_4$ ;
- хлораты  $\text{KClO}_3$ ,  $\text{NaClO}_3$ ,  $\text{Na}(\text{ClO}_3)_2$ ;
- сульфаты  $\text{BaSO}_4$ ,  $\text{CaSO}_4$ ;
- перманганат калия  $\text{KMnO}_4$ ;
- пероксиды  $\text{BaO}_2$ ,  $\text{SrO}_2$ ;
- диоксиды  $\text{MnO}_2$ ,  $\text{SiO}_2$ ;
- оксиды свинца  $\text{PbO}_2$ , свинцовый сурик  $\text{Pb}_3\text{O}_4$ ;
- оксиды железа  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , магнитный железняк  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  и др.

Реже в качестве окислителей используются способные к внутримолекулярному горению взрывчатые вещества:

- соли аммония (перхлорат аммония  $\text{NH}_4\text{ClO}_4$  и реже нитрат аммония  $\text{NH}_4\text{NO}_3$ );
- тротил, гексоген.

Примерами окислителей, не содержащих кислород, являются хлор- и фторсодержащие соединения, например четырёххлористый углерод  $\text{CCl}_4$  и фтористый свинец  $\text{PbF}_2$ .

**Горючие.** Из применяемых в пиротехнических составах горючих можно выделить две основные группы: неорганические горючие и органические горючие.

Неорганические горючие:

- высококалорийные металлы (магний, алюминий и их сплавы, цирконий и его сплавы, титан);
- металлы средней калорийности (цинк, железо, марганец, вольфрам, сурьма);
- неметаллы (фосфор, углерод в виде сажи или древесного угля, сера, бор);



– неорганические соединения (гидриды  $V_{10}H_{14}$  и др., сульфиды фосфора  $P_4S_3$  и сурьмы  $Sb_2S_4$ , карбиды, силициды, фосфиды металлов).

Органические горючие:

– индивидуальные углеводороды (бензол, толуол и т. п.);  
– смеси углеводородов алифатического и карбоциклического ряда (бензин, керосин, нефть, мазут, скипидар, парафин и др.);  
– углеводы (крахмал, сахар, древесные опилки и т. п.);  
– органические вещества других классов (стеарин, уротропин, дициандиамид, тиомочевина и др.).

**Связующие вещества.** Связующими в пиротехнике называют вещества, придающие механическую прочность пиротехническим составам и спрессованным из них изделиям.

Достигнуть высокой прочности пиротехнических составов только за счёт давления при прессовании не всегда представляется возможным или целесообразным. Для увеличения прочности изделий в составы вводят связующие вещества, иногда называемые цементаторами.

В качестве основных связующих используются:

– искусственные смолы (идитол, бакелит, эпоксидные и др.);  
– смолы естественного происхождения и продукты их переработки (канифоль, резинаты);  
– высыхающие масла (олифа);  
– клей декстрин.

*Идитол*  $C_{12}H_{13}O_2$  представляет собой смолу, получаемую путём конденсации избытка фенола с формальдегидом в присутствии кислого катализатора (например,  $HCl$ ).

*Бакелит* – искусственная смола  $C_{12}H_{11}O_2$ , получаемая путём конденсации фенола с избытком формальдегида в присутствии щелочного катализатора (например, аммиака).

*Канифоль* или *гартиус*  $C_{12}H_{30}O_2$  – смола хвойных деревьев. Основной составной частью канифоли являются абиетиновые и пимаровые смоляные кислоты.

*Резинаты* – продукты взаимодействия канифоли с гидратами окисей или солями соответствующих металлов. Так, применяемый в пиротехнике резинат кальция  $Ca(C_{20}H_{26}O_2)_2$  получается сплавлением канифоли с гашеной известью.

*Олифа*  $C_{12}H_{26}O_2$  – продукт полимеризации и частичной оксидации льняного (или конопляного) масла. В некоторых случаях в качестве связующего вещества в пиротехнических составах применяют раствор канифоли в олифе.

*Декстрин* – растительный клей  $(C_6H_{10}O_5)_n$ , получается при нагревании крахмала в присутствии разбавленных кислот.

Возможно также применение асфальтов и битумов. В некоторых случаях применяются растворы нитроклетчатки и каучука.

Из неорганических связующих цементирующих веществ в пиротехнике иногда применяют гипс  $CaSO_4(H_2O)_2$  и элементарную серу S.

Количество связующего в пиротехническом составе, как правило, не более 10-12 %, при увеличении содержания связующего в составе более 10-12 % прочность изделия повышается незначительно.

Все органические связующие выполняют в пиротехническом составе одновременно и роль горючего, а следовательно, требуют для своего сгорания соответствующего расхода окислителя.

Пиротехнические составы можно классифицировать по характеру протекающих при их горении процессов как *пламенные, тепловые, дымовые и звуковые*.

По назначению и условиям применения пиротехнические составы и изделия подразделяются на две группы:

- *технического и специального назначения;*
- *бытового назначения* (бенгальские свечи, салюты, хлопушки и т. д.).

Пиротехнические составы технического и специального назначения в зависимости от изделий, в которых они используются, можно разделить на следующие подгруппы:

1. Осветительные.
2. Фотоосветительные (фотосмеси).
3. Трассирующие.
4. Инфракрасного излучения.
5. Воспламенительные.
6. Зажигательные.
7. Сигнальные.
8. Маскирующие.
9. Малогазовые (для замедлителей).
10. Газогенерирующие.
11. Имитационные.

**1. Осветительные пиротехнические составы,** снаряжённые в ракеты, авиабомбы, артиллерийские снаряды, pistolетные патроны и т. п., широко применяются во всех видах современного ночного боя, а также для освещения больших участков местности, позиций и различных объектов.

Для осветительных изделий специальный эффект определяется максимальной силой света, равномерным световым излучением и достаточно продолжительным временем горения.

Осветительные составы содержат: окислитель  $\text{NaNO}_3$  или  $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$ , горючее (до 25-65 % порошков магния, алюминия, их смесей или сплавов) и органическое связующее, выполняющее также функцию замедлителя горения (смолы, стеарин, олифа, шеллак и др.). Применение в качестве окислителя  $\text{NaNO}_3$  считается более целесообразным в плане большей светоотдачи, чем  $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$ , однако  $\text{NaNO}_3$  более гигроскопичен и даёт пламя с жёлтым оттенком. Осветительные составы содержат также технологические добавки (например, масла, предотвращающие пыление мелкодисперсного металла при производстве), катализаторы отверждения связующих, добавки, защищающие порошкообразный металл от коррозии и одновременно замедляющие горение (стеариновая кислота, стеараты) и др.

При горении осветительных составов образуется яркое белое или жёлто-белое пламя. Теплота сгорания осветительных составов 6,3-8,4 МДж/кг. Температура горения 2500-3000 °С. Скорость горения запрессованных составов составляет 0,5-2 мм/с для крупных изделий и до 10 мм/с для мелких.

В ночных условиях уровень освещённости бывает настолько низким, что даже при использовании приборов ночного видения не удаётся чётко различать объекты наблюдения. В этих условиях применяют специальные пиротехнические составы, дающие при сгорании повышенное количество инфракрасного излучения и пониженное видимого.

**2. Фотоосветительные пиротехнические составы,** снаряжённые в авиабомбы, используют для осуществления ночной аэрофотосъёмки.

Для фотоавиабомб специальный эффект определяется максимальной силой света и быстротой сгорания состава.

Фотоосветительные составы представляют смесь окислителя (перхлорат калия, нитрат бария) и металлического горючего.

Данные смеси весьма чувствительны к механическим и тепловым воздействиям и требуют аккуратного обращения. При поджигании сгорают почти мгновенно, в большом количестве могут детонировать. Максимальный световой поток достигается обычно через 0,15-0,4 с после воспламенения.

В целях повышения безопасности вместо таких пиротехнических смесей может применяться заряд чешуйчатого порошка алюминия или алюминиево-магниевого сплава. Порошок распыляется и воспламеняется специальным пиротехническим зарядом.

**3. Трассирующие пиротехнические составы** оставляют при сгорании видимый след траектории полёта пуль, снарядов и других быстро движущихся объектов, служат для визуального установления направления и дальности их полёта, а также для целеуказания и оптического наведения оружия. Предназначены они для снаряжения приспособлений (трассёров), прикрепляемых к боеприпасам.

Трассёр – это шашка из пиротехнического состава (состав запрессовывается непосредственно в корпус снаряда или в отдельную металлическую оболочку).

Для трассирующих изделий специальный эффект определяется хорошей видимостью траектории полёта снаряда на требуемое расстояние (достаточной силой света и продолжительным временем горения состава), а также минимальной потерей в весе состава после его сгорания.

Трассирующие составы горят цветным (красным, жёлтым, белым, синим, зелёным) пламенем. При этом могут быть использованы комбинированные составы с изменением яркости пламени от удаления. По содержанию компонентов близки к сигнальным и осветительным составам, но при сгорании образуют больше шлаков. Скорость их горения составляет несколько мм/с.

В момент выстрела на трассёр действуют огромные ударные нагрузки и ускорения, а также горячие пороховые газы. Поэтому спрессованные трассирующие составы, кроме всего прочего, должны иметь прочность, значительно большую, чем все другие виды пиротехнических составов. В связи с этим они прессуются под значительно большими давлениями, 3-9 т/см<sup>2</sup>.

**4. Пиротехнические составы инфракрасного излучения**  
Для противодействия ракетам с инфракрасными (тепловыми) головками наведения используются специальные изделия (тепло-



вые ловушки), генерирующие интенсивный поток инфракрасного излучения за счёт сгорания пиротехнического состава. Такие составы запрессовывают в корпус мишеней-ловушек, которые отстреливают с самолётов, вертолётов, танков и др. техники.

Обычно подобные составы (MTV) представляют собой композиции из порошкообразного магния, политетрафторэтилена  $(C_2F_4)_n$  и витона-А (фторкаучук) в качестве связующего.

Современные головки ракет с инфракрасным наведением комплектуются средствами подавления помех, способными отличать излучение классических MTV-составов от излучения выхлопной струи реактивного двигателя. Для противодействия этим средствам созданы спектрально сбалансированные составы, спектр излучения которых подобен спектру излучения выхлопной струи.

**5. Воспламенительные пиротехнические составы** используются в средствах воспламенения для создания первоначального иницирующего импульса.

Специальный эффект определяется высокой температурой и достаточной продолжительностью горения (вспышки).

Применяемые вещества уже рассмотрены при изучении средств иницирования подрыва ВВ.

**6. Зажигательные пиротехнические составы** используются для снаряжения зажигательных боеприпасов (авиационных бомб, сбрасываемых или забрасываемых емкостей, артиллерийских снарядов, пуль) и огнемётов.

Для зажигательных изделий специальный эффект определяется высокой температурой и достаточной продолжительностью горения состава, количеством и свойствами шлаков, образующихся в процессе горения, а также созданием устойчивого очага возгорания (пожара).

*Зажигательные составы делят на 2 группы:* составы, содержащие окислитель, и составы, горящие с кислородом воздуха.

**1 ГРУППА.** Составы, содержащие окислитель ( $KNO_3$ ,  $Ba(NO_3)_2$ ,  $KClO_4$ ) и металлическое горючее, главным образом сплав алюминия и магния 50/50 %. Плотность таких смесей более  $3 \text{ г/см}^3$ , теплота сгорания 6-8 МДж./кг, температура горения до  $3000 \text{ }^\circ\text{C}$ .

В эту группу входят также *термиты* – порошкообразные смеси стехиометрических количеств оксидов железа и марганца с

порошкообразным металлом (магний, алюминий, различные сплавы). Температура горения до 2000-2800 °С. Продуктами сгорания являются преимущественно металлы и шлаки в жидком состоянии. Температура воспламенения более 800 °С. Поэтому воспламенение термитов производят с помощью специальных воспламенительных и переходных составов. Зажигательные смеси выпускаются, как правило, порошкообразными и в шашках. Прессованный термит воспламеняется значительно хуже, чем насыпной.

В чистом виде для военных целей термиты практически не применяются, вместо них используют термитно-зажигательные составы – комбинированные смеси на основе термита и солей-окислителей, обеспечивающих более низкую температуру воспламенения термитной смеси и способствующие созданию пламени при горении.

**2 ГРУППА.** Составы, сгорающие за счёт кислорода воздуха (белый фосфор и его сплавы с сульфидами фосфора, сплавы натрия и магния, различные напалмы и т. п.). Температура горения – 800-1500 °С. Плотность 0,8-2,0 г/см<sup>3</sup>.

*Напалм* – вязкая, липкая легковоспламеняющаяся масса розового или коричневого цвета, состоящая на 89-93 % из жидкого горючего (бензин, керосин, газойль) и органического загустителя – 7-11 % (алюминиевые соли нафтенной, пальмитиновой, олеиновой кислот).

Классический загуститель М1 для напалма – это смесь алюминиевых солей нафтенной, олеиновой и жирных кислот, получаемых омылением кокосового масла в соотношении 1:1:2. Более эффективные загустители – полистирол и полиметилметакрилат, в современных смесях используют полибутадиен.

Напалмы имеют консистенцию от вязкой жидкости до состояния текучего студня. Скорость горения подобных смесей обычно значительно меньше чем составов с окислителем. Напалмы хорошо прилипают к поражаемым объектам, в том числе к вертикальным поверхностям, горят медленнее бензина. Температура горения 900-1200 °С (состоящего из 25 % бензина, 25 % бензола и 50 % полистирола – 1600 °С, отличается повышенной прилипаемостью даже к влажным поверхностям). Напалм довольно гигроскопичен, при хранении на влажном воздухе может рассла-

иваться. Во избежание расслоения содержит водопоглощающие добавки (например, СаО).

Как правило, напалмы представляют собой смеси небольшого количества лёгких и большего количества тяжёлых углеводородных фракций. Лёгкие фракции обеспечивают хорошую воспламеняемость полученных смесей, тогда как тяжёлые могут быть более эффективно доставлены к цели и дольше горят.

Существуют особые разновидности напалмов, такие как:

– *пирогели*, получаемые добавлением к напалму порошкообразного магнезия, карбида магнезия, угля, асфальта, небольшого количества неорганических окислителей (нитрат натрия). Их горение протекает энергичнее, а температура достигает 1700 °С;

– *супернапалмы* – с добавкой щелочных металлов (фосфора или этилата алюминия). Они легко воспламеняются и даже самовоспламеняются на воздухе или при контакте с водой.

**7. Сигнальные пиротехнические составы** образуют при горении цветное пламя или дым.

Для сигнальных огневых изделий, употребляемых в ночное время, специальный эффект определяется цветом, яркостью пламени и временем горения состава.

Для сигнальных дымовых изделий, употребляемых в дневное время, специальный эффект обуславливается цветом и количеством дыма, выделяющегося при сгорании состава.

Изделия, содержащие сигнальные пиротехнические составы, служат для связи между подразделениями, передачи команд и целеуказания. Они просты и надёжны в обращении и позволяют осуществлять массовость одновременного восприятия сигналов.

Наиболее употребительной системой подачи сигналов является трёхцветная с применением красного, жёлтого (при необходимости заменяется белым) и зелёного огней, реже используют пятицветную систему с добавлением белого и синего цветов, однако различимость цветов на больших расстояниях в этом случае становится недостаточно надёжной.

Различают огневые и дымовые сигнальные составы.

*Огневые сигнальные составы* содержат горючее (порошкообразный металл или органическое вещество), окислитель (нитраты стронция, бария, натрия, перхлораты калия, аммония и др.), связующее (фенольные, эпоксидные, полиэфирные смолы, асфальт, каучуки) и интенсификатор свечения (хлороорганические



вещества, гексахлорбензол, ПВХ – полихлорвинил в виде бесцветной прозрачной пластмассы).

Излучение пиротехнических составов бывает атомарным и молекулярным. Среди сильных атомарных излучателей в какой-либо части спектра можно отметить натрий (жёлтый), литий (красный), таллий (зелёный), индий (синий). Однако излучения таллия и индия не используются из-за дефицитности соединений этих металлов и высокой токсичности, а соединения лития очень гигроскопичны. Поэтому на практике красным излучателем, как правило, является монохлорид стронция, зелёного – монохлорид бария. В зависимости от температуры и состава продуктов горения соли меди могут излучать как зелёный, так и синий цвет.

*Высокотемпературные дымовые составы* для получения цветных сигнальных дымов содержат, как правило, органические красители (антрахиноновые, азиновые, антроновые, ксантеновые и др.), способные возгоняться при нагревании. Во избежание значительного разложения красителя такие составы должны иметь пониженную температуру горения, поэтому в качестве горючего используют углеводы (сахар, лактоза, крахмал и др.), реже дициандиамида или тиомочевину, а в качестве окислителя – хлорат калия. Для получения требуемых оттенков цвета используют смесь различных красителей.

*Низкотемпературные дымовые составы* с температурой горения порядка 500 °С содержат в качестве окислителя гуанидиннитрат и нитроцеллюлозу. Чтобы не допустить воспламенения паров красителя, приводящее к исчезновению цвета, используют специальную конструкцию шашки, а в состав вводят охладители и пламегасители (бикарбонат натрия, мел). Основные цвета сигнальных дымов – красный, зелёный, жёлтый, оранжевый и фиолетовый. При необходимости могут быть созданы рецептуры и других цветов, однако они не очень надёжно распознаются на расстоянии и поэтому широкого применения не имеют.

Скорость горения обычных сигнальных составов составляет 3-6 мм/с.

**8. Маскирующие пиротехнические составы** образуют при горении устойчивые дымы или туманы (аэрозоли).

Для изделий маскирующего аэрозоля (дыма) специальный эффект заключается в быстром создании непроницаемой для



средств визуальной разведки устойчивой в воздухе аэрозольной (дымовой) завесы.

Температура горения таких составов 400-1000 °С. Теплота сгорания 1,6-4,1 МДж/кг.

Дымообразующие вещества в составах, предназначенных для получения маскирующих дымов, могут содержаться в готовом виде (дым возникает в результате их возгонки) или образовываться при горении.

**Составы первого типа** содержат окислитель (обычно  $\text{KClO}_3$ ), горючее (древесный уголь, крахмал и др.) и дымообразователь (хлорид аммония, нафталин, антрацен и фенантрен). Нафталин и антрацен часто выполняют в составах функции не только дымообразователя, но и горючего, частично возгоняясь, а частично сгорая.

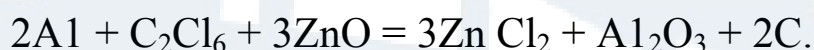
Кислородный баланс описанных выше дымовых смесей резко отрицателен, а газовая фаза, образующаяся при горении, содержит значительное количество СО и легковоспламеняющихся паров нафталина или антрацена. Такие составы помещают в оболочку (дымовые шашки – металлические цилиндры с днищем, крышкой и вставленного в него сетчатого металлического цилиндра, в который закладывают смесь), снабжённую выходными или выхлопными отверстиями, которая предохраняет состав от проникновения в него кислорода воздуха, для предотвращения вспышек при горении. Несмотря на принимаемые меры предосторожности, дымовые составы дают иногда вспышки при сгорании, равномерность горения при этом нарушается, у отверстий шашки появляется пламя, количество дыма резко уменьшается и он приобретает сероватый оттенок. Поэтому для предотвращения появления пламени в состав также вводят различные пламегасители (углеводы, карбонат натрия, мел, парафин и т. п.) в количестве до 10-15 %. Шлак должен быть пористым, чтобы не препятствовать прохождению дыма. Для этого некоторые дымовые составы подвергают грануляции.

Находят применение и жидкие дымообразующие вещества (тетрахлориды титана, сурьмы, кремния, хлорсульфоновая кислота и т. д.) – они более эффективны, чем большинство обычных пиротехнических дымообразующих смесей, однако неудобны в использовании.

Для учебных или сигнальных целей используют нетоксичные и некорродирующие (не способные поражать живую ткань) составы белого дыма на основе органических кислот – до 75 % (адипиновой, себаценовой, салициловой и др.). В медленногорящих составах используют органическое связующее (различные смолы, идитол). Из-за пониженной эффективности они не могут быть в полной мере использованы для создания дымовых завес в боевых условиях.

**Дымовые составы второго типа**, в которых дымообразующее вещество получается при горении (металлохлоридные смеси или смеси НС) обычно в качестве окислителя содержат хлорорганическое соединение (гексахлорэтан, гексахлорбензол, дехлоран  $C_{10}Cl_{12}$ ). Другим компонентом является металлическое горючее (цинк, алюминий, силицид кальция), для замедления горения вводят дополнительный дымообразователь (оксид цинка или нашатырь). Смеси, содержащие в своём составе одновременно гексахлорэтан и цинк, чувствительны к влаге и во влажном состоянии такая смесь склонна к саморазогреву и даже к самовоспламенению.

Горение наиболее известного состава можно выразить уравнением



Выделяющийся в процессе горения хлорид цинка возгоняется, образуя дым. Дым имеет серый цвет из-за наличия частиц сажи. Для полного сгорания углерода (чтобы получить белый дым) вводят окислители (перхлораты аммония, калия).

Металлохлоридные смеси более эффективны, чем смеси с готовым дымообразователем, так как хлориды цинка, алюминия способны поглощать влагу из воздуха и частично гидролизироваться, что многократно увеличивает общее количество дыма.

Продукты сгорания металлохлоридных смесей токсичны, обладают выраженным раздражающим действием, в продуктах сгорания присутствуют хлороорганические вещества, в том числе фосген, поэтому рекомендуется использование индивидуальных средств защиты. Образование фосгена характерно, прежде всего, для составов, не содержащих или содержащих мало металлического горючего.

Также различают составы, хорошо маскирующие не только в видимой, но и инфракрасной области спектра (смеси чёрного

дыма). В таких смесях развиваются более высокие температуры, чем в обычных маскирующих, при этом происходит не возгонка, а неполное сгорание углеродосодержащих компонентов (например нафталина или антрацена) с образованием большого количества сажи.

**9. Малогазовые пиротехнические составы** используются для снаряжения различных замедлителей, дистанционных трубок, взрывателей и др.

Для малогазовых пиротехнических составов специальный эффект определяется скоростью и устойчивостью, а также заданной температурой горения.

По сравнению с другими пиротехническими составами, малогазовые обеспечивают меньшую зависимость скорости горения от давления и внешней температуры за счёт того, что при горении таких составов выделяется очень мало газообразных продуктов сгорания. Такие составы способны устойчиво гореть в условиях разреженной атмосферы.

В качестве горючих такие составы обычно содержат сравнительно малоактивные металлы и их сплавы: цирконий, ниобий, марганец, хром, вольфрам, бор, кремний, сурьма, висмут. Окислителями в малогазовых составах служат хроматы бария и свинца, реже – оксиды свинца и меди, хлораты и перхлораты.

Компоненты малогазовых составов должны быть мелкодисперсными. Дисперсностью компонентов можно существенно регулировать скорость горения. С ростом плотности от насыпной до максимальной скорость горения обычных пиротехнических составов может уменьшаться в несколько раз (для малогазовых смесей – в меньшей степени).

Важным параметром малогазовых смесей является критический диаметр, при котором состав ещё способен устойчиво гореть. Этот параметр имеет большие значения для смесей со средним и большим временем горения, когда имеет место значительная теплоотдача к стенкам корпуса в единицу времени. Для смесей на основе перманганата калия и сурьмы он составляет 2,5 мм, тогда как для состава 20 % ферросилиция, 30 %  $PbCrO_4$  и 50 % –  $KClO_4$  более 5 мм.

**10. Газогенерирующие пиротехнические составы** создают газы в большом объёме, под высоким давлением в короткий промежуток времени.

Для газогенерирующих изделий специальный эффект определяется максимальной скоростью сгорания состава и большим объёмом газообразных продуктов горения.

Используются в огнетушителях, пиротехнических патронах, в системах катапультирования и т. п.

**11. Имитационные пиротехнические составы** служат для создания звуковых, визуальных и других эффектов (имитация разрывов боеприпасов, свист, имитирующий падение авиабомбы или приближение снаряда и т. д.).

Для имитационных изделий специальный эффект определяется точным подражанием действию боевых средств при условии полной безопасности применения на учениях.

Изделия, содержащие имитационные составы весьма разнообразны, и могут применяться как для введения противника в заблуждение, так и для обучения подразделений на учениях.

Для имитации разрыва боеприпасов применяют изделия, начинённые зёрнёным дымным порохом. Широко используют смеси из перхлората калия и алюминия, например в соотношении 70/30 %. Такой состав в неуплотнённом виде при воздействии на него обычного теплового импульса сгорает почти мгновенно с сильным звуковым эффектом и световой вспышкой, образуя при этом белый дым. Используется, например, для светозумовых гранат. Для снаряжения разрывных снарядов с белым дымом также может быть использован состав: цинковая пыль – 40 %, калия перхлорат – 20 %, калия нитрат – 20 %, алюминий – 20 %.

Эффект свиста при горении некоторых составов объясняется большой скоростью сгорания последних. Обычно для этих целей используют смеси хлората или перхлората калия с фенольными производными (галловая кислота, резорцин, флуороглуцин, пикрат калия и т. д.). Частота звуковых колебаний, получаемая при горении таких составов, тем меньше, чем больше длина картонной трубки, в которую запрессован состав.

**Взрывоопасные свойства пиротехнических составов**  
Большинство пиротехнических составов предназначено для равномерного дефлаграционного горения и, в связи с этим, желательно, чтобы они обладали минимальными взрывчатыми свойствами или не имели их вообще. Однако некоторые смеси при определённых условиях способны к детонации.



Как показали экспериментальные исследования, взрывчатое разложение легко возбуждается и надёжно распространяется только в хлоратных составах, содержащих в себе не менее 60 % хлоратов, и в смесях с окислителем  $\text{NH}_4\text{ClO}_4$  а также в составах, содержащих в себе добавки взрывчатых веществ.

Для возбуждения взрывчатого разложения в осветительных составах, содержащих в качестве окислителя  $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$ , а в качестве основного горючего – алюминиевый порошок или пудру, требуется весьма значительный начальный импульс. Легче возникает процесс взрывчатого разложения в осветительных составах, содержащих магний. Взрывчатое разложение многих фотосмесей (например, смеси  $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2 + \text{Mg}$ , а также некоторых смесей других окислителей с магнием), если они взяты в сколь угодно значительных количествах, происходит весьма легко от воздействия не только взрывного, но и обычного огневого импульса на основе дымного пороха.

Все вышесказанное относительно смесей с магнием можно почти полностью отнести и к смесям хлоратов или перхлоратов с тонкоизмельчённым алюминием (алюминиевой пудрой). Подобные смеси следует считать одними из наиболее опасных пиротехнических составов, что определяет повышенные требования безопасности при обращении с ними.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Добросовестное изучение учебного материала, изложенного в настоящем учебном пособии, и практическое освоение дисциплины позволят сформировать у обучающихся необходимые теоретические знания, практические умения и навыки по ситуационной оценке взрывопожароопасной обстановки и расчету основных параметров взрывных превращений в различных видах и формах их проявления.

Знания, полученные при изучении предложенного учебного материала, будут способствовать успешному освоению других пожарно-технических дисциплин, таких как «Физико-химические основы развития и тушения пожаров», «Взрывопожарозащита».

В дальнейшем материал учебного пособия может быть использован выпускниками – бакалаврами по направлению подготовки «Техносферная безопасность» профиля «Защита в чрезвычайных ситуациях» и других направлений и профилей, а также руководителями производственных подразделений и специалистами при освоении и преподавании соответствующих тем пожарно-технического минимума.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баринов А.В., Раднер С.С., Репринцев В.А., Треушков И.В., Пасечник Ю.В. Теория горения и взрыва: Учебник. – Химки: АГЗ МЧС России, 2019. – 396 с.
2. Андросов А.С., Бегишев И.Р., Салеев Е.П. Теория горения и взрыва: Учебник. – М.: Академия ГПС МЧС России, 2015. – 256 с.
3. Тотай А.В., Казаков О.Г. Теория горения и взрыва: Учебник и практикум для прикладного бакалавриата. – М.: Издательство Юрайт, 2016. – 295 с. – Серия: Бакалавр. Прикладной курс.
4. Девисиллов В.А., Дроздова Т.И., Скушников А.И. Теория горения и взрыва: Учебник. – М.: ИНФРА-М, 2017. – 262 с. – (Высшее образование: Бакалавриат).
5. Девисиллов В.А., Дроздова Т.И., Тимофеева С.С. Теория горения и взрыва. Практикум: Учебное пособие.– М.: ИНФРА-М, 2015. – 384 с. – (Высшее образование).
6. Пиротехника. Справочник по взрывчатым веществам, порохам и пиротехническим составам. Издание 6. – М.: Химия, 2012. – 310 с.
7. ГОСТ 4545-88. Вещества взрывчатые бризантные. Методы определения чувствительности к удару. – М.: Издательство стандартов, 1988. – 19 с.
8. ГОСТ Р 22.207-94. Вещества взрывчатые инициирующие. Метод определения температуры вспышки. – М.: Издательство стандартов, 1985. – 7 с.
9. ГОСТ 4546-81. Вещества взрывчатые. Методы определения фугасности. – М.: ИПК издательство стандартов, 1998. – 20 с.
10. ГОСТ 5984-99. Вещества взрывчатые. Методы определения бризантности. – М.: ИПК издательство стандартов, 2002. – 41 с.
11. ГОСТ Р 22.0.08-96. Безопасность в ЧС. Техногенные ЧС. Взрывы. Термины и определения. – М.: СТАНДАРТИНФОРМ, 2009. – 3 с.
12. ГОСТ Р 51271-99. Изделия пиротехнические. Методы испытания. – М.: СТАНДАРТИНФОРМ, 2011. – 109 с.
13. ГОСТ Р 42.2.01-2014. Гражданская оборона. Оценка состояния потенциально опасных объектов, объектов обороны и безопасности в условиях воздействия поражающих факторов

обычных средств поражения. Методы расчета. – М.: СТАНДАРТИНФОРМ, 2015. – 36 с.

14. Правила безопасности при взрывных работах. Утверждены приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 16.12.2013 № 605.







978210002218

**Сергей Иванович Клячин**

## **ТЕОРИЯ ГОРЕНИЯ И ВЗРЫВА**

### **Часть 2**

## **Взрывы и взрывчатые вещества**

Учебное пособие  
для студентов, обучающихся по направлению подготовки  
«Техносферная безопасность»,  
профиль «Защита в чрезвычайных ситуациях»  
всех форм обучения

---

*Ведущий редактор М.Б. Априянци  
Младший редактор Г.В. Деркач*

*Компьютерное редактирование  
О.В. Савина*

*Подписано в печать 23.06.2020 г.  
Усл. печ. л. 9,1. Уч.-изд. л. 8,5.*

*Лицензия № 021350 от 28.06.99.*

*Печать офсетная.*

*Формат 60x90/16.*

*Заказ № 1574. Тираж 100 экз.*

Доступ к архиву публикации и условия доступа к нему:  
<http://lib.bgarf.ru/>

**БГАРФ ФГБОУ ВО «КГТУ»**

*Издательство БГАРФ,  
член Издательско-полиграфической ассоциации высших учебных заведений  
236029, Калининград, ул. Молодежная, 6.*

**БГАРФ**