

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**  
**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования**  
**«Донецкий национальный технический университет»**

**КАФЕДРА «СТРОИТЕЛЬСТВО ЗДАНИЙ, ПОДЗЕМНЫХ**  
**СООРУЖЕНИЙ И ГЕОМЕХАНИКА»**

**Конспект лекций по дисциплине**  
**«Теория детонации и химия взрывчатых веществ»**

для обучающихся по специальности  
21.05.04 «Горное дело»  
всех форм обучения

**РАССМОТРЕНО**  
на заседании кафедры строительства зданий,  
подземных сооружений и геомеханики  
Протокол № 1 от 31.08.2023 г.

Донецк  
2023

Составитель:

Калякин Станислав Александрович – профессор кафедры строительства зданий, подземных сооружений и геомеханики, дт.н., проф.

Конспект лекций по дисциплине «Теория детонации и химия взрывчатых веществ» [Электронный ресурс]: для обучающихся по специальности 21.05.04 «Горное дело» всех форм обучения/ ГОУВПО «ДОННТУ», Каф. строительства зданий, подземных сооружений и геомеханики; сост. С. А. Калякин. – Электрон. дан.. – Донецк: ДОННТУ, 2023. – 114 с. – Систем. требования: Acrobat Reader.

Приведено содержание всех лекций по дисциплине «Теория детонации и химия взрывчатых веществ», перечень рекомендуемой литературы. Конспект лекций может быть полезен студентам всех форм обучения, изучающим предмет заочно или по индивидуальному графику со свободным посещением аудиторных занятий, а также преподавателям, занятым по данной дисциплине.

## Оглавление

|   |    |
|---|----|
| Тема 1. Химические и термохимические процессы при взрыве ВВ. ....                         | 5  |
| История развития ВВ .....   | 5  |
| Основные понятия и определения .....  | 6  |
| Промышленные ВВ, их классификация и область применения.....                               | 8  |
| Средства инициирования (СИ) и воспламенения .....   | 20 |
| Капсюли-детонаторы .....  | 20 |
| Огнепроводный шнур .....  | 21 |
| Техническая характеристика огнепроводных шнуров .....                                     | 21 |
| Современные средства инициирования .....  | 25 |
| Взрывчатое превращение вещества и состав продуктов взрыва.....                            | 32 |
| Реакция взрыва, состав и расчет параметров продуктов взрыва.....                          | 36 |
| Тема 2. Взрывчатые характеристики ВВ. ....  | 39 |
| Определение энергетических характеристик взрывчатых веществ и взрыва .....                | 39 |
| Определение объёма газов, выделяющихся при взрыве ВВ.....                                 | 39 |
| Определение теплоты взрыва.....   | 41 |
| Определение температуры взрыва. ....  | 43 |
| Определение давления взрыва. ....   | 45 |
| Тема 3. Составы, производство и испытания промышленных ВВ.....                            | 48 |
| Классификация ВВ по химическому составу. Технологии изготовления<br>промышленных ВВ ..... | 48 |
| Оценка эффективности и качества промышленных ВВ .....                                     | 53 |
| Тема 4. Основные закономерности детонации.....  | 60 |
| Явление взрыва и классификация взрывных процессов .....                                   | 60 |
| Общая характеристика механизмов горения и детонации.....                                  | 63 |
| Понятие о волнах сжатия и разрежения. ....  | 64 |
| механизм возникновения ударной волны .....  | 64 |
| Физическая сущность детонации промышленных ВВ.....  | 69 |
| Схема протекания детонации заряда ВВ .....  | 69 |
| Работа и баланс энергии взрыва .....  | 70 |
| Формы работы взрыва и методы их определения.....  | 71 |

|   |     |
|---|-----|
| Тема 5. Детонационный процесс в газовых смесях.....           | 74  |
| Общие представления о детонационных волнах .....              | 74  |
| Гидродинамическая теория детонации .....                      | 77  |
| Расчет параметров детонационной волны для газовых смесей..... | 85  |
| Тема 6. Детонационный процесс в конденсированных ВВ. ....     | 88  |
| Теория детонации конденсированных ВВ.....                     | 88  |
| Критические условия распространения детонации .....           | 91  |
| Возбуждение детонации .....                                   | 97  |
| . Чувствительность ВВ.....                                    | 100 |
| Чувствительность ВВ к механическим воздействиям.....          | 102 |
| Действие взрывного импульса на взрывчатые вещества .....      | 103 |
| Особенности детонации смесевых взрывчатых веществ .....       | 104 |
| Список рекомендованной литературы .....                       | 114 |

## Тема 1. Химические и термохимические процессы при взрыве ВВ.

### *История развития ВВ*

Самое древнее ВВ – черный порох был известен с древних времен в Китае, где его использовали для фейерверков.

В военных целях черный порох был использован арабами в XI веке. В XVI веке черный порох стали применять в Западной Европе и в России.

В 1552 г. русские при осаде Казани взорвали заряд черного пороха -48 бочек, предусмотрев все требования безопасности, войска были отведены на безопасное расстояние.

С 1627 г. начинается применение ВВ в горнодобывающей промышленности на шахтах Венгрии, затем в Германии, Англии и в других странах.

В 1831 г. англичанин У. Бикфорд изобрел огнепроводный шнур.

В середине XIX в. С развитием химической промышленности появляются новые ВВ. В 1832 г. француз Браконно получил пироксилин.

Опыты по инициированию зарядов черного пороха электрической искрой начались в 1751 г. (Франклин, США), но промышленные испытания этого способа были проведены в английских угольных шахтах лишь в 1835—1840 гг. В России известный изобретатель и инженер Шиллинг в 1812 г. успешно провел испытания электрозапала своей конструкции.

В середине XIX в. с развитием химической промышленности стали появляться новые взрывчатые вещества. В 1832 г. по Франции Браконно получил впервые нитроклетчатку (пироксилин) действием азотной кислоты на клетчатку. В 1846 г. Шенбайн, а в 1847 г. и Беттгер вновь получили нитроклетчатку (нитроцеллюлозу – бездымный порох), действуя на хлопок смесью азотной и серной кислот, в подробно изучили условия ее образования и взрывчатые свойства.

Однако промышленное производство нитроцеллюлозы стало возможным лишь в 1869 г., когда научились получать стойкий продукт, пригодный для длительного хранения. С 1879 г. нитроцеллюлозу стали широко применять как взрывчатое вещество (ВВ) в виде спрессованных шашек из чистого пироксилина или его смеси с нитратом бария (топит).

В 1846 г. Собrero (Италия) синтезировал нитроглицерин, который обладал высокими взрывчатыми свойствами. Но, несмотря на это, он долгое время не находил применения из-за своей высокой чувствительности к удару. На возможность практического использования нитроглицерина указал знаменитый русский химик Н. Н. Зинин, который в 1854—1855 гг. во время Крымской войны совместно с военным инженером В. В. Петрушевским изготовил большое количество нитроглицерина и снаряжал им гранаты.

В 1862 г. Н. Н. Зинина посетил шведский инженер Альфред Нобель. Познакомившись с работами Зинина и убедившись в перспективности применения нитроглицерина как взрывчатого вещества, он после возвращения в Швецию в 1863 г. построил завод по производству нитроглицерина.

Первое время нитроглицерин применяли для горных работ в чистом виде, но в 1867 г. Нобель предложил применять нитроглицерин в виде динамита, состоящего из 75% нитроглицерина и 25% кизельгура (инфузорная земля). Динамит был более удобен и менее опасен в обращении. С этого времени начинается строительство заводов по производству нитроглицерина в большинстве стран Европы.

В 1885 г. была получена взрывчатая желатина, состоящая из 92% нитроглицерина и 8% нитроцеллюлозы. Этот состав получил название «гремучий студень» и стал применяться в качестве ВВ.

В 1873 г. Шпренгель установил, что пикриновая кислота (тринитрофенол) способна взрываться от капсюля детонатора. До этого, открытая еще в 1771 г. Вульфом, пикриновая кислота широко использовалась в качестве желтого красителя для шерсти и шелка; о взрывчатости пикриновой кислоты в то время ничего не было известно.

С 1886 г. пикриновую кислоту стали широко применять для снаряжения артиллерийских снарядов; во Франции это ВВ называлось «мелинит\*», в Англии — «лиддит», в Японии — шимоза», в Германии — С/88.

Пикриновая кислота, обладая высокими взрывчатыми характеристиками являясь веществом менее опасным в обращении, чем известные до этого дымный порох, нитроглицерин и пироксилин, быстро нашла широкое применение (например, к концу первой мировой войны в России вырабатывалось ежегодно около 10 ООП т пикриновой кислоты).

Однако пикриновая кислота взаимодействует с металлами и образует высокочувствительные к механическому воздействию соли (пикраты), что привело к снижению объема ее производства и вскоре, пикриновая кислота почти полностью была вытеснена тротилом. Тротил был впервые получен в 1863 г., а в 1891 г. его стали выпускать во многих странах, и уже в первую мировую войну он по объему производства занял первое место среди других ВВ.

В 1877 г. был впервые получен тетрил. Взрывчатые свойства тетрила были изучены в 1885—1886 гг., в результате чего была установлена непригодность его для снаряжения снарядов ввиду высокой чувствительности тетрила к механическим воздействиям. Однако тетрил обладал хорошей восприимчивостью к детонации, поэтому с 1906 г. его стали применять в детонаторах.

В 1897 г. был открыт гексоген, а в 1920 г. установлено, что это соединение является ВВ. Высокие взрывчатые свойства, химическая стойкость и сравнительно простая технология производства привели к тому, что гексоген стали производить в больших количествах во многих странах мира.

В 1891 г. был синтезирован тэн, представляющий собой азотнокислый эфир многоатомного спирта пентаэритрита. Из нитроэфиров это наиболее стойкое взрывчатое вещество. Тэн является одним из мощных ВВ, для производства которого имеется практически неограниченная сырьевая база. Однако в настоящее время стоимость тэна еще высока и поэтому его применяют главным образом при производстве электродетонаторов, промежуточных детонаторов и детонирующего шнура.

Гремучая ртуть — одно из самых старых в самых распространенных инициирующих ВВ. Первое письменное указание, о приготовлении гремучей ртути относится к 1690 г. Однако позднее соли гремучей кислоты были забыты и только в 1799 г. гремучая ртуть была, вторично, открыта Говардом. Долгое время промышленные капсули-детонаторы снаряжали исключительно гремучей ртутью и лишь недавно ее частично стали заменять азидом свинца.

Азид свинца известен с 1891 г., а применять его в качестве самостоятельного инициирующего ВВ начали с 1907 г.

Высокая инициирующая способность азид свинца дает возможность сократить размеры капсулей-детонаторов. Несмотря на некоторые недостатки, азид свинца все больше и больше вытесняет гремучую ртуть.

Применение во взрывчатых веществах аммиачной селитры было впервые запатентовано в Швеции в 1867 г. Олсоном и Норбином., это предложение было реализовано только во время первой мировой войны, когда воюющие страны испытывали острый недостаток в бризантных ВВ. Кроме того, применение аммиачной селитры в больших масштабах стало возможным лишь после разработки и освоения промышленных методов получения аммиака и азотной кислоты из воздуха.

В настоящее время аммиачная селитра является основным компонентом промышленных ВВ и ее ежегодный расход для этих целей составляет в развитых странах сотни тысяч тонн.

Наибольшее распространение в горнодобывающей промышленности нашей страны получили аммиачно-селитренные ВВ (аммониты, гранулиты, зерногранулиты) и нитроглицериновые ВВ (детониты, углениты), водонаполненные и эмульсионные.

### ***Основные понятия и определения***

Отбойка и дробление скальных пород при их разработке производится с помощью зарядов ВВ, размещаемых в шпурах, скважинах или камерах.

ШПУР – искусственное цилиндрическое углубление в горной породе  $\varnothing$  до 75 мм и глубиной до 5 м.

СКВАЖИНА – ИЦУ в горной породе.  $\varnothing > 75$  мм при любой глубине и глубиной  $> 5$  м при любом диаметре.

**КАМЕРА** – выработка кубической или удлиненной формы, пройденная в массиве горных пород для размещения сосредоточенных зарядов ВВ большого веса (десятки и тысячи тонн).

**БУРЕНИЕ** – процесс образования в массиве горных пород шпуров и скважин с помощью буровых машин: перфораторов, сверл, буровых станков.

**БУРОВЫЕ РАБОТЫ** – совокупность технологических операций по установке буровой машины на ось скважины, бурение ее на полную глубину, подъем бурового става и переезд на точку расположения будущей скважины.

**БЕЗОПАСНЫЕ РАССТОЯНИЯ** – при взрывных работах определяются по специальным методикам для людей и оборудования. За пределами этих расстояний при выполнении взрыва в соответствии с проектом (паспортом) исключается травмирование людей и повреждение оборудования.

**БУРОВЗРЫВНЫЕ РАБОТЫ** – совокупность технологических операций, выполняемых при буровых и взрывных работах.

**ВЗРЫВНЫЕ РАБОТЫ** – совокупность технологических операций по подготовке и производству взрыва: составление проекта, доставке ВМ на заряжаемый блок, зарядание и забойка шпуров, скважин и ли камер с установкой в них детонаторов, монтаж взрывной сети (цепи) и ее инициирование.

**ВЗРЫВНИК** – рабочий определенного возраста, стажа работы на горном предприятии, образования, допущенный медиками к обращению с ВВ, получивший «Единую книжку взрывника», дающей ему право на самостоятельное получение ВМ и ведение взрывных работ.

**ВЗРЫВЧАТОЕ ВЕЩЕСТВО (ВВ)** – химическое соединение или механические смеси, способные под воздействием внешнего импульса (нагревания, удара) взрываться, т.е. чрезвычайно быстро превращаться в другие соединения с выделением тепла и газообразных продуктов.

**ВЗРЫВАНИЕ** – процесс детонирования зарядов ВВ в заданной последовательности способами, обеспечивающими безопасность этих работ.

**ЗАРЯД ВВ** – определенное количество ВВ подготовленное к взрыву, с введенным в него инициатором. Величина (масса) заряда указывается в килограммах или тоннах.

**ЗАБОЙКА** – процесс заполнения свободной зарядной полости (шпура, скважины или камеры) инертным забоечным материалом, препятствующим при взрыве преждевременному вылету из нее газов взрыва, продуктов детонации и улучшающим за счет этого эффективность работы взрыва. Забойкой называют также инертный материал для производства забойки (песок, глина, мелкая порода и т.д.).

**ЗАРЯЖАНИЕ** – процесс размещения заряда в зарядной камере (шпуре, скважине или камере).

**ДЕТОНАЦИЯ** – распространение взрыва по ВВ с постоянной для данного ВВ и диаметра заряда сверхзвуковой скоростью, обусловленное прохождением по заряду ВВ детонационной волны.

**ДЕТОНАЦИОННАЯ ВОЛНА** – ударная волна сжатая, распространяющаяся по заряду ВВ со сверхзвуковой скоростью и обеспечивающая возникновение за фронтом волны химической реакции.

**ДЕТОНАЦИЯ ЗАРЯДА ВВ** – возбуждается в результате его инициирования с помощью капсуля – детонатора (КД), электро - детонатора (ЭД), детонирующего шнура (ДШ) или капсуля-детонатора неэлектрической системы инициирования (СИНВ).

**КАПСЮЛЬ-ДЕТОНАТОР (КД)** – небольшой заряд инициирующих ВВ, размещенный в металлической или картонной гильзе и предназначенной для инициирования зарядов промышленных ВВ. Для взрыва КД в гильзу вставляют огнепроводной шнур (ОШ), искрами которого при горении вызывается взрыв первичного и вторичного инициирующих ВВ, размещенных в КД.

**ОГНЕПРОВОДНОЙ ШНУР (ОШ)** – шнур с сердцевиной из прессованного дымного пороха, окруженный наружной и внутренней оплетками покрытыми влагоизоляционным составом.

**ЭЛЕКТРОДЕТОНАТОР (ЭД)** – совокупность КД с закрепленными в нем электровоспламенителем. В ЭД ЭД между инициирующим ВВ и электровоспламенителем размещен замедлитель, сгорающий за строго фиксированное время.

**ДЕТонирующий шнур (ДШ)** – шнур с сердцевиной из высокобризантного ВВ. ДШ взрывается от КД или ЭД.

**ПАТРОН-БОЕВИК** – заряд из одного или нескольких патронов мощных ВВ с КД, ЭД или ДШ, размещаемый в верхней или нижней части основного заряда.

Массив горной породы при взрыве разрушается на отдельные, разделяемые по крупности на габаритные куски, которые сразу можно грузить и транспортировать для последующей переработки и негабаритные куски, требующие дополнительной обработки.

При взрыве одиночного заряда в массиве породы образуется углубление, называемое – воронкой взрыва.

Трудность взрывания массива определяется его: трещиновидностью и крепостью (коэффициентом крепости) и оценивается взрываемостью и дробимостью.

**ТРЕЩИНОВАТОСТЬ** - совокупность трещин в массивах горных пород. Трещины могут быть различного происхождения.

**КРЕПОСТЬ ГОРНЫХ ПОРОД** - способность пород сопротивляться разрушению от действий внешних усилий, например: бурению, взрыванию, резанию.

**КОЭФФИЦИЕНТ КРЕПОСТИ** – величина, характеризующая крепость горных пород. КК  $\int$  равен частному от деления предела прочности породы одноосному сжатию на  $100 \text{ кгс/см}^2$

$$\int = \frac{P_{\text{пр}}}{100 \text{ кгс/см}^2};$$

**БУРИМОСТЬ** – сопротивляемость горных пород разрушению при бурении, характеризуемое чистой скоростью бурения при стандартных условиях проведения опыта.

**ВЗРЫВАЕМОСТЬ** - сопротивляемость горных пород разрушению действием взрыва, характеризуемое расходом ВВ на разрушение единицы объема породы до кусков, определенной крупности при стандартных условиях взрывания.

### ***Промышленные ВВ, их классификация и область применения***

Многообразие методов и условий взрывных работ при проведении горноразведочных выработок обуславливает необходимость иметь широкий ассортимент ВВ с различиями их по составу, физическим и взрывчатым их свойствам. Большинство промышленных ВВ представляет собой механические смеси различных компонентов.

**Взрывчатые вещества** – химические соединения или смеси, способные к быстрой химической реакции, сопровождающейся выделением большого количества тепла и образованием газов.

К взрывчатым материалам промышленного назначения относятся взрывчатые и пиротехнические вещества и составы, а также взрывчатые изделия с ними, в том числе средства инициирования, снаряжённые прострелочные и взрывные аппараты. При этом:

*к взрывчатым веществам (ВВ)* относятся химические вещества или смеси веществ, способные под влиянием внешних воздействий к быстрому самораспространяющемуся химическому превращению с выделением большого количества тепло- и газообразных продуктов;

*к пиротехническим веществам* относятся индивидуальные вещества или смеси веществ, предназначенные для производства внешних эффектов (световых, тепловых, звуковых или реактивных) в результате недетонирующих экзотермических реакций;

*к взрывчатым изделиям* относятся изделия, содержащие одно или несколько взрывчатых или пиротехнических составов.

**Бризантные ВВ**, предназначенные для взрывных работ в народном хозяйстве, называются *промышленными*.

*Промышленные ВВ* классифицируются по различным признакам:

- по химическому составу;
- по условиям применения;
- по эксплуатационным свойствам.

*Выпускаются ВВ* в патронах, пакетах, мешках и ящиках. Для отличия соответствующих ВВ цвета оболочек патронов и диагональных полос на ящиках, мешках и пакетах приняты разными.



На всех патронах, пачках, мешках, ящиках ставится штамп завода-изготовителя с указанием индекса завода, наименование ВВ, номер партии, массы патрона, мешка, ящика, даты изготовления (месяц, год) в соответствии с существующим ГОСТом. Каждая партия ВВ сопровождается кратким руководством по применению, гарантийному сроку хранения, порядку испытаний, правилам обращения.

По условиям применения ВВ подразделяются на восемь классов (табл. 1).

*Непредохранительными ВВ* называют промышленные ВВ, используемые в условиях, когда в месте ведения взрывных работ исключено образование взрывоопасной среды.

*Предохранительными* – промышленные ВВ, обладающие пониженной способностью к воспламенению взрывоопасных сред, применяемых в опасных по газу и пыли шахтах.

К классу I относятся неподхранительные ВВ, предназначенные для взрывания только на земной поверхности. К классу II относятся неподхранительные ВВ для взрывания на земной поверхности и в подземных выработках, в которых либо отсутствует выделение горючих газов и пыли, либо применяется инертизация призабойного пространства, исключающая образование взрывоопасной среды при взрывных работах. Классы III, IV, V, VI, и VII составляют предохранительные ВВ. И последняя группа ВВ специального класса (С) включает в себя взрывчатые вещества, предназначенные для специальных взрывных работ. Сюда относятся ВВ для импульсной обработки металлов, инициирования зарядов, контурного взрывания, сейсморазведочных работ, прострелочно-взрывных работ в скважинах, для взрывания сульфидных руд, в серных, нефтяных шахтах и других специальных работ.

Патроны, пачки, ящики или мешки с ВВ имеют отличительные признаки в виде оболочек или полос разных цветов. Так у ВВ I класса цвет отличительной полосы белый, у ВВ класса II – красный, у класса III – синий, а у ВВ классов IV, V, VI и VII – жёлтый. ВВ специального класса для взрывных работ на земной поверхности, также как и ВВ I класса, имеют белый цвет отличительной полосы, для взрывания в подземных выработках цвет полосы одинаков с ВВ класса II, т.е. красный. Для прострелочно-взрывных работ в скважинах ВВ специального класса имеют цвет отличительной полосы чёрный, а ВВ для взрывных работ в серных и нефтяных шахтах имеют цвет отличительной полосы зелёный.

**Таблица 1. Классификация промышленных ВВ по условиям применения**

| Класс ВВ                      | Условия применения  | Цвет оболочки патрона (полосы) |
|-------------------------------|---|--------------------------------|
| <i>Непредохранительные ВВ</i> |   |                                |
| I                             | Для взрывания только на земной поверхности  | Белый                          |
| II                            | Для взрывания на земной поверхности и в подземных выработках, в которых отсутствуют выделение горючих газов и образование взрывчатой угольной пыли  | Красный                        |
| <i>Предохранительные ВВ</i>   |   |                                |
| III                           | Для взрывания только по породе в подземных выработках, в которых выделяется метан, но отсутствует взрывчатая угольная пыль  | Синий                          |
| IV                            | Для взрывания по углю и породе в подземных выработках, проводимых по пласту, опасному по взрыву пыли, в которых есть выделение метана, кроме выработок с повышенным выделением горючих газов; для сотрясательного взрывания в забоях подземных выработок угольных шахт  | Жёлтый                         |
| V                             | Для взрывания по углю и породе в подземных выработках с повышенным выделением горючих газов, проводимых по пласту, опасному по взрыву пыли (особо опасных)  | – // –                         |
| VI                            | Для взрывания по углю и породе в выработках с повышенным выделением горючих газов, проводимых в условиях, когда возможен контакт боковой поверхности шпурового заряда с газовоздушной смесью, находящейся в пересекающих шпур трещинах горного массива либо в выработке; для взрывания в угольных и смешанных забоях восстающих (с углом более 10°) выработок, в которых выделяется горючий газ, при длине выработок более 20 м и проведении без предварительно пробуренных скважин, обеспечивающих проветривание за счёт общешахтной депрессии | – // –                         |
| VII                           | Для ведения специальных взрывных работ: взрывного перебивания   | – // –                         |

| Класс ВВ        | Условия применения   | Цвет оболочки патрона (полосы) |
|-----------------|--|--------------------------------|
|                 | деревянных стоек при посадке кровли, при ликвидации зависаний горной массы в углеспускных выработках, для дробления негабаритов в забоях подземных выработок и др. |                                |
| Специальный (С) | Для взрывных работ в шахтах опасных по взрыву серной пыли, водорода и тяжёлых углеводородов  | Зелёный                        |

По химическому составу ВВ разделяют на:

- 1) нитросоединения и их сплавы (тротил, алюмотол, гексоген, тэн, тетрил);
- 2) нитроэфирсодержащие (динамиты, детониты, победиты, углениты);
- 3) аммиачно-селитренные (аммониты, аммоналы, граммониты, граммоналы, гранулиты, игданиты, динафталиты);
- 4) пороха (дымные, пироксилиновые, нитроглицериновые).

По структурным особенностям ВВ выпускаются: дисперсные – порошкообразные, чешуированные или гранулированные; прессованные; литые; водосодержащие – текущие, пластичные или отвердевшие; пластичные; полупластичные; непластичные.

По плотности различают: высокоплотные ( $\rho_0 \geq 1,4 \text{ г/см}^3$ ), насыпной плотности ( $\rho_0 = 0,8 \div 1,0 \text{ г/см}^3$ ), и с низкой плотностью ( $\leq \rho_0 0,5 - 0,6 \text{ г/см}^3$ ) ВВ.

**Взрывчатые вещества (ВВ)**, химические соединения или смеси веществ, способные к быстрой химической реакции, сопровождающейся выделением большого количества тепла и образованием газов. Эта реакция, возникнув в какой-либо точке в результате нагревания, удара, трения, взрыва другого ВВ или иного внешнего воздействия, распространяется по заряду за счёт передачи энергии от слоя к слою с помощью процессов тепло- и массопереноса (горение) либо ударной волны (детонация). Скорость горения различных ВВ колеблется от долей мм/сек до десятков и сотен м/сек, скорость детонации может превышать 9 км/сек.

Взрывчатыми могут быть конденсированные (твёрдые и жидкие) вещества, газы, а также взвеси частиц твёрдых или жидких веществ в газах. Во взрывной технике применяются конденсированные и водонаполненные ВВ, преимущество которых заключается в значительной концентрации энергии в единице объёма. В сочетании с большой скоростью процесса это позволяет получать при взрыве огромные мощности. Так, по заряду из 1 кг гексогена, объём которого 0,6 л, а теплота взрыва 5,4 МДж (1300 ккал), детонация может пройти за 10 мксек ( $10^{-5}$  сек), что соответствует мощности 500 млн. кВт (в десятки раз больше, чем мощность самой крупной электростанции). Реакция при детонации идёт так быстро, что газообразные продукты с температурой несколько тысяч градусов оказываются сжатыми в объёме, близком к исходному объёму заряда, до давлений в десятки Гн/м<sup>2</sup> (сотни тысяч кгс/см<sup>2</sup>). Резко расширяясь, сжатый газ наносит по окружающей среде удар огромной силы. Происходит взрыв.

Материалы, находящиеся вблизи от заряда, подвергаются дроблению и сильнейшей пластической деформации (*местное, или бризантное, действие взрыва*); вдали от заряда разрушения менее интенсивны, но зона, в которой они происходят, гораздо больше (*общее, или фугасное, действие взрыва*). Давление Р, развивающееся при детонации и определяющее бризантность ВВ, зависит от плотности заряда и скорости детонации. *Фугасность, или работоспособность*, ВВ определяется теплотой, а также объёмом газообразных продуктов взрыва. Обычно работоспособность выражают в относительных единицах, используя в качестве стандартного ВВ тротил, гремучий студень или аммонит № 6, либо в единицах энергии.

*Фугасное действие* – это работа взрыва по перемещению элементов среды. Так, если взрыв произошел на открытой поверхности, то фугасное действие будет минимальным, взрыв практически не произведет работы, то есть работа будет бесполезной (такой же, что от двигателя, работающего вхолостую), будет взрывная волна, которая быстро погаснет. Если же взрыв происходит в чем-то, например, в стенах здания, то фугасное действие может быть значительным,

работа взрыва через взрывную волну может привести к разрушению (не дроблению!) стен, и обрушению здания или его части. Максимальную опасность взрыв несет именно происходя в чем-то. Именно поэтому заряды гранат облачают в корпус, причем, чем он будет массивней (до некоторого предела, разумеется), тем фугасное действие будет сильнее (такие припасы называют осколочно-фугасными). Бризантное и фугасное действие легко показать на примере: если взять кирпич и ударить по нему кувалдой, то этот кирпич сначала расколется (бризантное действие), а обломки отлетят на некоторое расстояние (фугасное действие). Вот реальный пример: если мы положим заряд под бетонную плиту, то после взрыва мы обнаружим нашу плиту на некотором расстоянии от места взрыва и с дырой или выбоиной в этой плите: это и есть соответственно фугасное и бризантное действие.

**Кумуляция** (от латинского *sumulatio* – увеличивать, суммировать, накапливать) в физике взрыва – явление, проявляющееся в резком увеличении в заданном направлении местного разрушающего действия детонирующего заряда взрывчатого вещества при придании ему определенной формы, так называемый *кумулятивный эффект*. Иногда термин “кумулятивное действие” применяется к эффектам, производимым комбинацией нескольких зарядов.

Повышенное разрушающее действие возникает в результате концентрации энергии в ограниченном пространстве поля взрыва при столкновении потоков газообразных продуктов взрыва, выброшенных с поверхности детонирующего заряда (газовая кумуляция), или потоков металла, образованных элементами тонкой металлической оболочки заряда. Необходимое для этого первоначальное направление движения потоков задается путем создания в теле заряда углубления – кумулятивной выемки, а сам заряд называют кумулятивным.

*Кумулятивный эффект* (рис.2, 3) заключается в придании направленности взрыву за счет того, что передняя часть заряда ВВ выполняется в форме воронки (рис.3 а, б). Воронка способствует тому, что *взрывная волна и поток частиц идут не параллельно, а фокусируются в одной точке*. В этой точке – *фокусе*, мощность взрыва максимальна и очень высока (относительно массы и количества заряда). Поэтому кумулятивные припасы имеют “вытянутый” вид, хотя сам заряд составляет примерно треть от длины боевой части припаса, и сделано это для того и с таким расчетом, чтобы снаряд остановился и разорвался на определенном расстоянии от брони или любого другого препятствия. В настоящее время нет брони, способной выдержать кумулятивный взрыв, поэтому всякими методами броню защищают, например, накидывают на нее разный хлам – ящики, проволоку и т.д. (т.к. подрыв заряда раньше времени сводит на “нет” всю эффективность кумуляции).

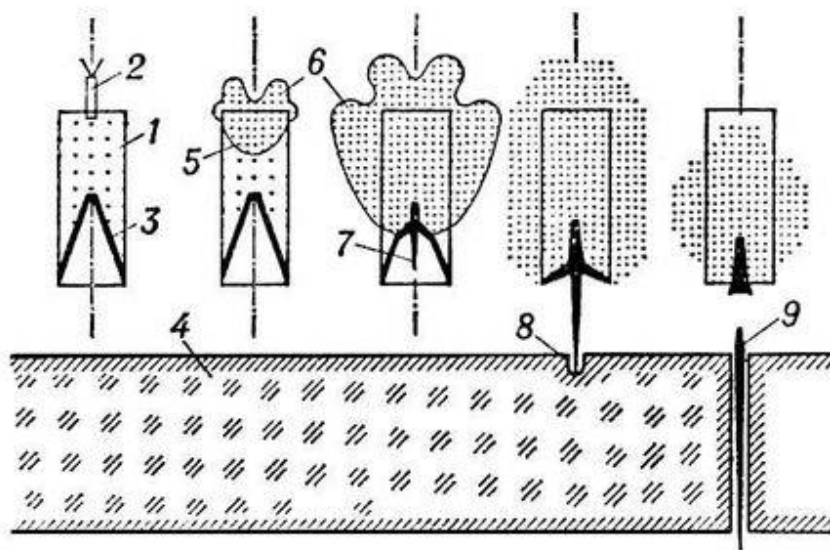


Рисунок.1 Этапы взрыва кумулятивного заряда: 1 – заряд; 2 – детонатор; 3 – облицовка; 4 – пробиваемая преграда; 5 – фронт детонационной волны; 6 – продукты детонации; 7 – начало формирования кумулятивной струи; 8 – струя пробивает преграду; 9 – струя оторвалась и пробила преграду

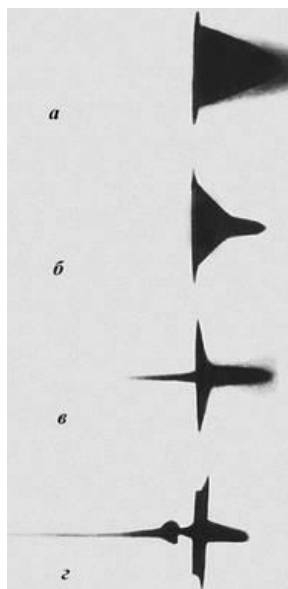


Рисунок 2. Последовательные стадии разрушения металлической оболочки и формирования кумулятивной струи (получены методом импульсной рентгенографии):

а – коническая оболочка перед разрушением; б — начало разрушения – детонационная волна достигла вершины конуса; в – образование струи (через 4,8 мксек после окончания детонации); г – металлическая струя через 22,5 мксек после окончания детонации заряда

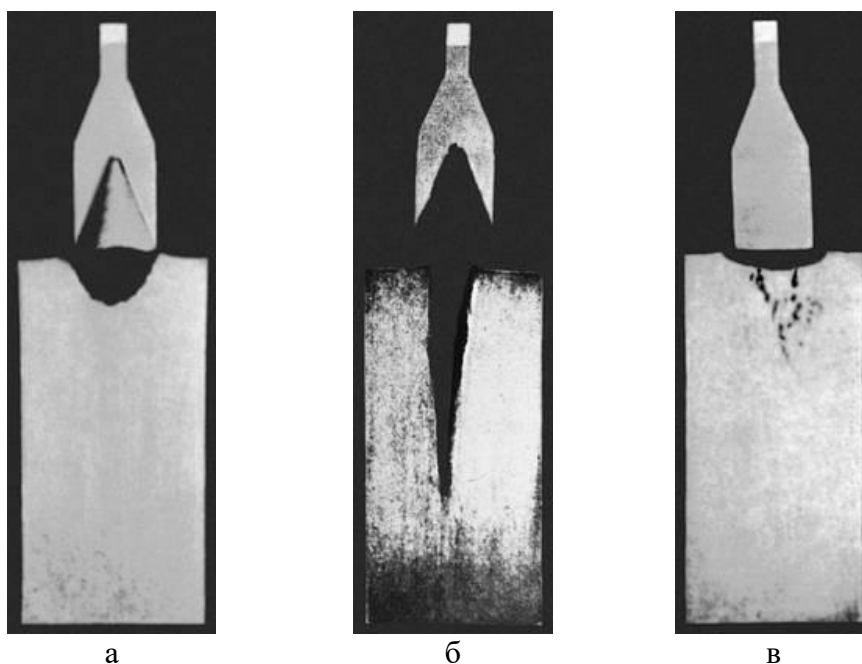


Рисунок 3. Фотография разрушения, произведённого в стальной мишени действием заряда с кумулятивной выемкой: а – без металлической облицовки; б – с металлической облицовкой; в – действием сплошного заряда

Помимо способности производить ту или иную работу, области применения ВВ определяются их химической и физической стойкостью (т.е. способностью сохранять свои свойства в процессе снаряжения, транспортировки и хранения) и чувствительностью к внешним воздействиям, характеризуемой минимальным количеством энергии, необходимым для возбуждения взрыва. Важной характеристикой ВВ является также их детонационная способность, мерой которой служит критический диаметр детонации, т. е. наименьший диаметр цилиндрического заряда, при котором детонация ещё распространяется, несмотря на разброс вещества из зоны реакции. Детонационная способность ВВ тем больше, чем меньше критический диаметр. Основным источником энергии взрыва является окисление. Окислителем обычно служит кислород, который входит в состав ВВ и обеспечивает возможность их горения и взрыва без доступа воздуха. Чем больше кислорода в ВВ, тем выше их кислородный баланс. Если кислорода достаточно для превращения всего углерода ВВ в  $\text{CO}_2$ , а водорода – в  $\text{H}_2\text{O}$ , кислородный баланс ВВ равен нулю. У ВВ с недостатком кислорода он отрицателен, с избытком – положителен. Способностью к взрыву обладают и некоторые вещества, не содержащие кислорода, – азиды, ацетилен, ацетилениды,

диазосоединения, гидроазин, йодистый и хлористый азот, смеси горючих веществ с галогенами, "замороженные" радикалы свободные, соединения инертных газов и др. Большинство из них, так же как многие кислородсодержащие соединения (перекиси, озониды, органические соли хлорной и хлорноватой кислот, нитриты, нитрозосоединения др.), относятся к взрывоопасным веществам, но вследствие слишком высокой чувствительности, малой химической стойкости, токсичности, дороговизны и т.п. как ВВ не применяются. Некоторые взрывчатые смеси горючих веществ с окислителями (хроматами, бихроматами, перекисями, окислами, нитратами, хлоратами и т.п.) используются как пиротехнические составы. *Чувствительность к механическим воздействиям* заставляет по иному использовать некоторые, и не использовать некоторые вовсе (нитроглицерин, например, слишком чувствителен к механическим воздействиям и груза массой 2 кг, опущенного с высоты 4 см, вполне хватит, чтобы нитроглицерин детонировал). Например, там, где необходимо инициировать основной заряд механическим ударом, или пламенем используют как раз такие ВВ (тэн, азид свинца, гексоген, ТНРС). Как правило, чувствительные к механическим воздействиям ВВ, так же не переносят огня, горение идет не стабильно, в конечном итоге, переходя во взрыв. Для того чтобы получить заряд с приемлемыми характеристиками, подобные ВВ используются в сплавах (сплав, например, гесогена с тротилом обладает меньшей чувствительностью к удару, чем гесоген, и большей мощностью нежели тротил), а также в заряды из таких ВВ вводятся "легирующие добавки" - флегматизаторы (для уменьшения чувствительности, чтобы, например, простреленный пулей припас, не детонировал, или ВВ, находящееся в снаряде не детонировало при выстреле из орудия). Температура является также очень важным фактором при выборе ВВ, так далеко не все ВВ "хорошо" ее переносят. Например, тротил, приготовленный по упрощенной технологии при некоторой температуре может "потечь" так называемым "тротиловым маслом", которое может служить причиной преждевременного взрыва. У некоторых веществ с увеличением температуры увеличивается чувствительность к механическому воздействию (гексоген по этой причине не заливают, а впрессовывают).

*Химическая стойкость* предполагает устойчивость соединения во времени, т.е. взрывчатка попросту не должна со временем сгнить или разложиться, и, естественно сама по себе взорваться. Так что найти вещество, отвечающее всем этим и некоторым другим требованиям весьма не просто. Боеприпасы, оставшиеся со времен войны и взрывающиеся в наши дни – пример ВВ отличного качества, отвечающего всем этим требованиям. Химическая активность присуща некоторым ВВ, например гремучей ртути, которая неплохо взаимодействует с некоторыми металлами, разъедая их и образуя, в некоторых случаях, гремучие соли (более чувствительные к механическим воздействиям, чем сама гремучая ртуть), а это, естественно не сулит ничего хорошего. Тоже можно сказать об пикриновой кислоте.

*Гигроскопичность* – способность вбирать в себя воду (свойственна, например аммонитам и АСВВ вообще) вследствие чего качество такого ВВ ухудшается подчас настолько, что оно не детонирует вообще, так как влажность приводит к слеживанию АСВВ, которое, в конечном итоге, превращается в монолит. Вследствие этого чувствительность к детонации сильно уменьшается (хотя химических преобразований при этом не происходит). Для предотвращения слеживания, в АСВВ необходимо добавлять различные разрыхлители (жмыховую муку).

*Из многих способов к взрыву* соединений в качестве ВВ и компонентов взрывчатых смесей применяют лишь 2–3 десятка веществ. *Основные из них* - нитросоединения (тринитротолуол, тетрил, гексоген, октоген, нитроглицерин, тетранитропентаэритрит – тэн, нитроклетчатка, нитрометан и др.) и соли азотной кислоты, особенно нитрат аммония. Как правило, эти вещества применяют не в чистом виде, а в виде смесей, например смеси октогена, гесогена и тэна с тротилом, нитроглицерина с нитрогликолем, диэтиленгликольдинитратом и нитроклетчаткой, тротила с нитратом аммония, смеси аммиачной селитры с жидкими (например, соляровым маслом) и порошкообразными (например, древесной мукой, порошкообразным алюминием) горючими веществами. Для уменьшения чувствительности и опасности в обращении мощные ВВ смешивают с парафином, церезином и др. легкоплавкими добавками (флегматизация ВВ). Для увеличения теплоты взрыва в смеси вводят порошкообразный алюминий или магний. Большое значение имеют смеси ВВ, изготавливаемые из невзрывчатых (или слабовзрывчатых) горючих и окислителей – игданиты, гранулиты, дымный порох, хлоратные и перхлоратные ВВ – смеси на основе солей хлорной и хлорноватой кислот, жидкого кислорода (оксиликвиты) и др.

По взрывчатым свойствам (условиям перехода горения в детонацию) и обусловленным ими областям применения ВВ подразделяют на **инициирующие** (первичные), **бризантные** (вторичные) и **метательные** (пороха).

### • Иницирующие ВВ

*Иницирующие ВВ* характеризуются чрезвычайно высокой скоростью взрывного превращения. Чувствительность их высока, горение неустойчиво и быстро переходит в детонацию уже при атмосферном давлении. Взрыв может быть возбужден поджиганием, ударом или трением. Иницирующие ВВ используют для возбуждения взрывчатого превращения других веществ. Основные представители иницирующих ВВ – азид свинца, гремучая ртуть, тринитрорезорцинат свинца, тетразен.

#### 1. Гексаметилентрипероксиддиамин (ГМТД)

Белые ромбические кристаллы чувствительные к нагреванию, трению. При поджигании дает резкую вспышку. В неочищенном виде сравнительно безопасен. Работоспособность (расширение бомбы Трауця) 140 ml. Применяется в качестве детонатора.

#### 2. Азид свинца

Мелкие, красные кристаллы плотностью 4.6 г/см. Недопустимо взаимодействие с медью. Работоспособность 20 мл.

#### 3. Гремучее серебро

Гремучее серебро – аналог гремучей ртути. Длинные кристаллы имеющие большую чувствительность, ядовит. Взаимодействие с металлами, серной кислотой может привести к взрыву. Детонирует без оболочки. Работоспособность 25 ml.

#### 4. Нитрид йода

Черные кристаллы очень чувствительные к механическим воздействиям. В сухом виде взрывается от прикосновения. Хранить можно в увлажненном состоянии и в прохладном месте.

#### 5. Ацетиленид серебра

Работоспособность 110 мл.

Получение: в раствор состоящий из 50 гр азотнокислого серебра 200 мл воды и 30 мл HNO<sub>3</sub> плотностью 1.4 при t=80-90 С пропускают ацетилен до насыщения. Осадок оставляют на день в смеси воды и 30% HNO<sub>3</sub> после чего промывают водой и сушат.

### • Вторичные иницирующие ВВ

#### 1. Гексоген

Мелкие кристаллы белого цвета, ядовит. Плотность 1 г/см<sup>3</sup>. Температура плавления 202<sup>0</sup>С. Чувствительность к трению и нагреванию небольшая. При поджигании сгорает ярким пламенем. Минимальный иницирующий заряд 0.05 г ГМТД. Очень мощное ВВ (работоспособность 500 ml), основа пластиковой взрывчатки.

*1 Стадия* - Получение динитрата уротропина (белые кристаллы, растворимые в воде) 10 г. уротропина растворяют в 15 г. воды и при температуре 15–20<sup>0</sup> С, перемешивая добавляют 50-60% азотную кислоту, до получения концентрации HNO<sub>3</sub> в смеси - 20%. Полученные кристаллы отфильтровывают.

*2 Стадия* – Динитрат уротропина небольшими порциями добавляют в 100% азотную кислоту при перемешивании и охлаждении до 5<sup>0</sup> С. Реакцию ведут до прекращения выделения газа.

*3 Стадия* - отделение гексогена.

Смесь разбавляют до 50% концентрации HNO<sub>3</sub>. Осадок отфильтровывают и промывают водой.

## 2. Тетрил

Кристаллическое вещество белого цвета, плохо растворимое в воде. Минимальный инициирующий заряд 0.06 гр. ГМТД или 0.24 гр. гремучей ртути.

### • Бризантные ВВ

*Бризантное действие* – это дробление среды, окружающей заряд. Бризантное действие проявляется на расстоянии примерно двух радиусов заряда. Во время взрыва импульс будет максимальным, естественно, в эпицентре, и как раз этот импульс (резкий перепад давления большой амплитуды) дробит (крошит) находящиеся по близости элементы среды. По этой самой причине бризантные ВВ не используют вместо пороха - заряд просто разорвет казенную часть ствола.

*Бризантные ВВ* более инертны. Чувствительность их к внешним воздействиям гораздо меньше, чем инициирующих. Горение может перейти в детонацию только при наличии прочной оболочки либо большого количества ВВ. Поэтому они относительно безопасны в обращении. В качестве бризантных ВВ применяют главным образом нитросоединения и взрывчатые смеси на основе нитратов, хлоратов, перхлоратов и жидкого кислорода, о которых говорилось выше. Основным режим их взрывного превращения - детонация, возбуждаемая небольшим зарядом инициирующего ВВ. Бризантные ВВ применяют для взрывных работ, а также в снарядах и др. боеприпасах.

#### 1. Пикриновая кислота

Пикриновая кислотата иначе лиддит, мелинит, шимоза имеет вид светложелтых кристаллов нерастворимых в воде. Наверное самое простое в получении, мощное и безопасное ВВ, его работоспособность 350 ml. Не чувствительна к нагреванию, трению. При поджигании сгорает ярким коптящим пламенем. Минимальный инициирующий заряд 0.06 гр ГМТД или 0.23 гр. гремучего серебра.

Плотность отливки 1,5 г/см<sup>3</sup>. Пикриновая кислотата плавится при 122<sup>0</sup> С. Взаимодействие ее с металлами недопустимо, так как образуются высокочувствительные соединения – пикраты.

#### 2. Тротил

Белое кристаллическое вещество желтеющее на свету. Температура затвердевания 80.6–80.85<sup>0</sup> С. Плотность 1.66 г/см<sup>3</sup>. К удару и трению не чувствителен. Минимальный инициирующий заряд: ГМТД – 0.1 гр.

Гремучей ртути – 0.26 гр.

Динитротолуол - кристаллы желтого цвета, температура затвердевания 50-54<sup>0</sup> С.

#### 3. Нитроглицерин

Нитроглицерин – желтая маслянистая жидкость. Чрезвычайно мощное и опасное в получении ВВ. Работоспособность 550 мл. Взрывается от удара, толчка, перепада температуры. Получают нитрованием глицерина. От чистоты глицерина зависит выход и безопасность получения нитроглицерина. Разбавленный водой глицериндолжен иметь желтоватую окраску и нейтральную реакцию на лакмус. Температура плавления глицерина 19<sup>0</sup> С, кипения 290<sup>0</sup> С.

#### 4. Метилнитрат

Бесцветная прозрачная жидкость с ароматическим запахом. Чувствительность к удару небольшая. В чистом виде работоспособность 657 мл. Применяют в виде 72-75% раствора в метиловом спирте. При поджигании горит. Нагретые пары метилнитрата легко воспламеняются (при t=150<sup>0</sup> С).

#### 5. Циклотриметилентринитрозамин

Желтые кристаллы, разлагающиеся под действием света и кислот. Температура плавления 107<sup>0</sup>С. Канцероген. Работоспособность 350 мл.

#### 6. Пироксилин

Пироксилин применяется в производстве пороха и других ВВ. Имеет вид хлопчатобумажной ваты. Хорошо восприимчив к огню, при поджигании дает резкую вспышку.

#### • Метательные ВВ

Метательные ВВ горят ещё более устойчиво, чем бризантные: они не детонируют при горении даже в самых жёстких условиях [большие заряды, давления порядка десятков и сотен  $Мн/м^2$  (сотен и тысяч  $кгс/см^2$ )]. Основной режим взрывного превращения метательных ВВ - горение. Отличие метательных ВВ от бризантных определяется в основном не химическим составом, а физической структурой этих веществ (плотностью и прочностью заряда). Характеристики некоторых ВВ приведены в таблице.

Таблица 2

Характеристика некоторых взрывчатых веществ при плотности заряда 1600  $кг/м^3$

| Взрывчатые вещества | Кислородный баланс,<br>% | Теплота взрыва,<br>МДж/кг (ккал/кг) | Объём газообразных<br>продуктов взрыва, при<br>нормальных усло-<br>виях, $м^3/кг$ (л/кг) | Скорость детонации,<br>$кг/сек$ |
|---------------------|--------------------------|-------------------------------------|--|---------------------------------|
| Тротил              | - 74,0                   | 4,2 (1000)                          | 0,75 (750)   | 7,0                             |
| Тетрил              | - 47,4                   | 4,6 (1100)                          | 0,74 (740)   | 7,6                             |
| Гексоген            | - 21,6                   | 5,4 (1300)                          | 0,89 (890)   | 8,1                             |
| ТЭН                 | - 10,1                   | 5,9 (1400)                          | 0,79 (790)   | 7,8                             |
| Нитроглицерин       | + 3,5                    | 6,3 (1500)                          | 0,69 (690)   | 7,7                             |
| Амонит № 6          | 0                        | 4,2 (1000)                          | 0,89 (890)   | 5 <sup>1</sup>                  |
| Нитрат аммония      | + 20,0                   | 1,6 (380)                           | 0,98 (980)   | ~ 1,5 <sup>1</sup>              |
| Азид свинца         | -                        | 1,7 (400)                           | 0,23 (230)   | 5,3 <sup>2</sup>                |
| Баллиститный порох  | - 45                     | 3,56 (860)                          | 0,97 (970)   | 7,0                             |

<sup>1</sup> Плотность заряда 1000  $кг/м^3$ . <sup>2</sup> Плотность заряда 4100  $кг/м^3$ .

ВВ широко применяют в народном хозяйстве при взрывных работах, взрывной сварке, взрывном упрочнении металла, взрывном штамповании. ВВ, применяемые в горной промышленности, подразделяют на непродохранительные – для открытых работ и для подземных работ (кроме шахт, опасных по газу или пыли, обычно ВВ для подземных работ обладают большей детонационной способностью, чем ВВ для открытых работ, и образуют при взрыве меньше ядовитых газообразных продуктов - окислов азота и окиси углерода), и на предохранительные взрывчатые вещества (для шахт, опасных по газу или пыли). Основную массу промышленных ВВ составляют аммониты и гранулиты. В меньших количествах используют динамиты, тротил, преимущественно гранулированный (гранулотол), иногда с добавкой алюминия (алюмотол), водонаполненные взрывчатые вещества.

В военной технике ВВ применяют для снаряжения боеприпасов: вторичные ВВ – для разрывных зарядов мин, снарядов, авиационных бомб, боевых частей ракет, боевых зарядных отделений торпед, ручных и ружейных гранат и др.; метательные – в качестве пороховых зарядов артиллерийских и миномётных выстрелов, патронов для стрелкового оружия, твёрдотопливных ракетных двигателей и др.; инициирующие - для устройств, обеспечивающих детонацию разрывного или воспламенение порохового зарядов (в капсулях-детонаторах, электродетонаторах,



детонирующем шнуре и т.п.). ВВ используют также для изготовления генераторов газа высокого давления (пороховые заряды для подачи компонентов в камеру сгорания жидкостных ракетных двигателей, для огнемётов и т.д.), устройства инженерных взрывных заграждений (минные поля, фугасы). Они являются важной частью атомных и термоядерных боеприпасов: взрыв зарядов вторичного ВВ обеспечивает достижение надкритической массы ядерного заряда.

Широкое применение ВВ находят и в научных исследованиях как простое и удобное средство получения высоких температур, больших скоростей и сверхвысоких давлений. Одним из направлений развития ВВ является широкое использование пригодных для механизированного заряжания сыпучих гранулированных ВВ, взрывание зарядов без применения инициирующих ВВ (например, с помощью мощного электрического разряда), разработка и внедрение новых типов ВВ [например, соединений, содержащих богатую кислородом тринитрометильную группу  $C(NO_2)_3$ ], применение нитропарафинов, взрывчатых смесей на основе жидких окислителей (тетранитрометана, четырёхоксида азота и др.).

Первым ВВ был чёрный (дымный) порох, появившийся в Европе в 13 в. Применение вторичных ВВ началось лишь в 19 в. Пироксилин, пикриновую кислоту и тротил стали применять в военной технике, нитроглицерин и динамиты - в горной промышленности. Перед 2-й мировой войной начали применять тэн и гексоген, а после неё – октоген. В 80-х гг. 19 в. был изобретён бездымный порох, который стал основным метательным ВВ для огнестрельного оружия, а начиная с 30-х гг. 20 в. – и для реактивных снарядов (наряду со смесевыми порохами). В начале 19 в. для воспламенения чёрного пороха стали применять первое инициирующее ВВ – гремучую ртуть. Позже было обнаружено, что, увеличив заряд гремучей ртути, можно получить детонацию ВВ. Это позволило применять в больших количествах такие ВВ, которые без детонатора взорвать трудно (аммониты, динамоны, водонаполненные ВВ). Применение ВВ стало и более экономичным и более безопасным. Существенно улучшились и способы применения ВВ.

Современная взрывная техника позволяет производить взрывы огромных (несколько тысяч тонн) зарядов ВВ с большим полезным эффектом и обеспечением полной безопасности людей и прилегающих сооружений. Мировое производство ВВ составляет несколько млн. тонн в год.

Промышленные взрывчатые вещества на основе аммиачной селитры представляют собой механические смеси аммиачной селитры с другими ВВ или с горючими невзрывчатыми веществами. Во взрывчатых веществах этой группы она выполняет роль окислителя. ВВ на основе аммиачной селитры безопасны в обращении, поддаются различным видам технологической обработки, имеют низкую стоимость.

ВВ на основе аммиачной селитры делятся на несколько групп: аммоналы, граммониты, аммониты, гранулиты, игданиты, водонаполненные.

Аммониты представляют собой порошкообразные смеси аммиачной селитры с тротилом (реже с гексогеном, динитронафталином) и невзрывчатыми горючими компонентами. С целью повышения водоустойчивости аммонитов, т.е. их способности сохранять взрывчатые свойства при погружении в воду, используют водоустойчивую селитру марок ЖВ и ЖВФ, а также различные добавки, например парафин, асфальтит и др. Наиболее распространенным ВВ на основе аммиачной селитры является аммонит 6ЖВ, который часто принимают за эталон при сравнительной оценке взрывчатых свойств ВВ. Аммониты выпускаются в порошкообразном, патронированном, прессованном и шнекованном видах. Индексы аммонитов означают: ЖВ – марка водоустойчивой селитры, АП – аммонит предохранительный, К – марка малослеживающейся аммиачной селитры с добавлением красителя (фуксина) для уменьшения слеживаемости. К недостаткам аммонита относятся: недостаточная плотность, слеживаемость, гигроскопичность, низкая водоустойчивость, небольшая эффективность при взрывании крупноблочных крепких скальных пород.

Динафталит (динафталит-200) – промышленное ВВ, основными компонентами которого являются аммиачная селитра и динитронафталин. Применяется в патронированном виде при открытых и подземных работах с ручным заряжением шпуров. Распространен ограниченно.

Аммоналы – смеси порошкообразной аммиачной селитры и тротила с металлической горючей добавкой (алюминиевой пудрой). Аммоналы в гранулированном состоянии называются граммоналами.

| Условия размещения зарядов ВВ                                  | Породы крепкие и весьма крепкие (стоимость бурения 0,75)   | Породы средней крепости (стоимость бурения 0,5 руб./дм <sup>3</sup> )   | Породы слабые (стоимость бурения 0,25 руб./дм <sup>3</sup> )  |
|--|--|---|---|
| Шпуры при проходческих и очистных работах в сухих забоях       | Гранулиты: А-6, АС-8, АС-8В, АС-4, АС-М, Д-5<br>Игданит<br>Детонит М<br>Аммонал скальный № 1<br>Аммоналы М10 (патронированный). Э-5 (патронированный)<br>Аммонит № 6ЖВ<br>Динафталит | Гранулиты: АС-4, АС-8, А-6<br>Игданит<br>Аммонал водоустойчивый<br>Детонит М<br>Аммонит № 6ЖВ<br>Акванал АРЗ-8Н<br>Граммонит 79/21            | Игданит<br>Гранулиты: М, АС-4, АС-8<br>Аммонал водоустойчивый<br>Аммонит № 6ЖВ<br>Акванит АРЗ-8<br>Динафталит<br>Аммонал скальный №3<br>Граммонит 79/21           |
| Шпуры при проходческих и очистных работах в обводненных забоях | Гранулиты: АС-8, А-6<br>Детонит М<br>Аммонал М-10 (в полиэтиленовой оболочке d=45, 90 мм)<br>Аммонал скальный № 3<br>Аммонит № 6ЖВ<br>Динафталит                                     | Аммонал (в полиэтиленовой оболочке d>45. 90 мм)<br>Детонит М<br>Аммонал водоустойчивый<br>Аммонит № 6ЖВ<br>Аммонал скальный № 1<br>Динафталит | Аммонал водоустойчивый<br>Граммонит 79/21<br>Аммонит № 6ЖВ<br>Гранулит АС-8В<br>Динафталит<br>Детонит М<br>Аммонал скальный №1<br>Акванит АРЗ-8<br>Акванал АРЗ-8Н |
| Обводненные шпуры при проходке стволов шахт                    | Детонит М<br>Аммонал водоустойчивый<br>Аммонит № 6ЖВ   | Аммонал М-10 (в полиэтиленовой оболочке d=45, 90 мм)<br>Детонит М<br>Аммонит № 6ЖВ<br>Аммонал скальный № 1<br>Динафталит                      | Аммонал М-10 (в полиэтиленовой оболочке d=45, 90 мм)<br>Динафталит<br>Аммонит № 6ЖВ   |

Динамоны – смеси аммиачной селитры с жидкими или твердыми горючими добавками (соляровое масло, древесная мука, сажа, алюминиевая пудра и т.д.). Динамоны в гранулированном состоянии называются гранулитам (например, АС-4, АС-8, в которые вводится небольшое количество солярового масла и порошка алюминия, табл. 4).

К динамонам относят игданиты – простейшие ВВ, готовящиеся непосредственно на местах работ и состоящие из гранулированной (или чешуйчатой) аммиачной селитры, пропитанной небольшим количеством жидкого горючего (солярового масла или дизельного топлива). Игданиты – самые дешевые ВВ из всех применяемых. Они предназначены для использования в сухих забоях или в сухой части скважины при комбинированных зарядах.

Таблица 4

Характеристика простейших гранулированных ВВ

| ВВ                                    | Гранулит АС-4 и АС-4В | Гранулит АС-8 и АС-8В | Гранулит М | Игданит   |
|---------------------------------------|-----------------------|-----------------------|------------|-----------|
| Критический диаметр, мм               | 70÷120                | 70÷100                | 80÷110     | 160÷200   |
| Теплота взрыва, кДж/кг                | 4522                  | 5191                  | 3852       | 3973÷4061 |
| Объем газов, л/кг                     | 907                   | 850                   | 980        | 990       |
| Бризантность в стальном кольце, мм    | 22÷26                 | 24÷28                 | 18÷22      | 15÷20     |
| Скорость детонации, км/с              | 3,0÷3,5               | 3,0÷3,6               | 2,5÷3,6    | 2,8÷4,3   |
| Насыпная плотность, г/см <sup>3</sup> | 0,8÷0,85              | 0,8÷0,85              | 0,8÷0,90   | 0,80÷0,90 |

| <b>ВВ</b>                          | <b>Гранулит<br/>АС-4 и<br/>АС-4В</b> | <b>Гранулит<br/>АС-8 и<br/>АС-8В</b> | <b>Грану-<br/>лит М</b> | <b>Игданит</b> |
|------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|-------------------------|----------------|
| Кислородный баланс, %              | + 0,35                               | -3,3                                 | + 0,14                  | -1,65÷0,12     |
| Идеальная работа взрыва,<br>кДж/кг | 3645                                 | 3997                                 | 3852                    | 3164÷<br>3205  |

Игданит относится к ВВ невысокой мощности и предназначен преимущественно для взрывания пород некрепких и средней крепости. По данным проф. Г.П. Демидюка, игданиты при высокой плотности их заряжания могут применяться и для взрывания крепких пород. Область его применения расширяется. С выпуском гранулированной пористой селитры качество игданитов повысилось, а область применения расширилась как на открытых, так и на подземных работах. Однако при иницировании заряда детонирующим шпуром (ДШ) возникает необходимость в создании ДШ, устойчивого к воздействию солярового масла в течение длительного времени (до 5–10 сут).

ВВ, содержащие в своем составе в качестве основного компонента нитроглицерин, называют нитроглицериновыми.

Нитроглицериновые ВВ делятся на высокопроцентные желатинированные, или пластичные ВВ, и низкопроцентные порошкообразные ВВ, содержащие не более 15% жидких нитроэфиров (победиты, детониты). В качестве нитроэфиров применяют нитроглицерин и нитроглицоль. Нитроглицериновые ВВ обладают высокой мощностью, водоустойчивостью и детонационной способностью.

Детониты – порошкообразные ВВ (с увеличенным содержанием нитроэфиров, приближаются к пластичным) – относятся к непредохранительным ВВ. Они состоят из аммиачной селитры, тротила, 5–10% алюминиевой пудры и 6–15% нитроэфира. Патроны детонита имеют плотность 1,15 – 1,20 г/см<sup>3</sup>, что обеспечивает получение при взрывании высокого качества дробления массива горных пород.

При работе с детонитами необходимо соблюдать осторожность, защищая руки от действия нитроэфиров, не допуская просыпания ВВ из пачек и патронов. Применение детонитов (например, детонит М), несмотря на их сравнительно высокую стоимость, весьма эффективно и экономически выгодно при взрывании крепких пород.

Использование при взрывных работах гранулированных ВВ имеет ряд преимуществ по сравнению с патронированными ВВ:

- 1) возможность механизировать процесс заряжания шпуров;
- 2) пониженная чувствительность ВВ к механическим воздействиям;
- 3) повышенная плотность заряжания (1,1–1,3 г/см<sup>3</sup>);
- 4) более низкая себестоимость проведения выработки (на 15–20%). Выпускают гранулированные ВВ в россыпном виде.

Для механизированного заряжания шпуров гранулированным ВВ используют переносные зарядчики (табл. 5).

Таблица 5

Техническая характеристика пневмозарядчиков

| Параметр                               | Нагнетательные |      |      | Эжекторные |                             |                             |               |
|--|----------------|------|------|------------|-----------------------------|-----------------------------|---------------|
|  | ЗП-1           | ЗП-2 | ЗП-5 | "Зарман"   | "Кура-<br>ма-7М"<br>(ЗЭП-Г) | "Кура-<br>ма-8М"<br>(ЗЭП-8) | "Ка-<br>тунь" |
| Производительность, кг/мин             | 20             | 15   | 50   | 10         | 7                           | 15                          | 5÷20          |
| Плотность заряжания, г/см <sup>3</sup> | 1,2            | 1,2  | 1,2  | 1,15÷1,25  | 1,1                         | 1,1                         | 1,2           |
| Вместимость бункера, кг                | -              | 40   | 40   | -          | 7                           | 9                           | -             |
| Дальность                              | 50             | 30   | 70   | 10         | 2                           | 2                           | -             |

| Параметр                                    | Нагнетательные |       |       | Эжекторные |       |       |       |
|---|----------------|-------|-------|------------|-------|-------|-------|
|   | 2,0            | 6–8   | 4     | 3          | 2÷2,5 | 1,5÷2 | -     |
| Расход сжатого воздуха, м <sup>3</sup> /мин | 2,0            | 6–8   | 4     | 3          | 2÷2,5 | 1,5÷2 | -     |
| <b>Параметры заряжаемых шпуров:</b>         |                |       |       |            |       |       |       |
| диаметр, мм                                 | <85            | <50   | <76   | <45        | <46   | <46   | <75   |
| глубина, м                                  | <20            | <5    | <40   | <5         | <3    | <3    | <5    |
| Угол наклона, град.                         | 0÷360          | 0÷360 | 0÷360 | 0÷360      | 0÷60  | 60÷90 | 0÷360 |
| Высота, мм                                  | 900            | 850   | 900   | 3000       | 464   | 1374  | -     |
| Ширина, мм                                  | 550            | 570   | 570   | -          | 300   | 200   | -     |
| Масса, кг                                   | 35             | 24    | 31    | 2          | 2,2   | 2,5   | -     |
| Обслуживающий персонал, чел.                | 1              | 2     | 2     | 1          | 1     | 1     | 1     |

### *Средства инициирования (СИ) и воспламенения*

Для возбуждения детонации зарядов ВВ применяется взрыв не большого по величине заряда инициирующего ВВ, размещенного в капсуле-детонаторе (небольшого размера трубке) или электродетонаторе, или через более мощный промежуточный детонатор при использовании малочувствительных к первоначальному им импульсу ВВ. Для данного ВВ заряд детонатора должен быть немного больше минимального инициирующего заряда. Инициирующие ВВ имеют высокую чувствительность к трению, сжатию и огню, поэтому при обращении со средствами инициирования необходимо соблюдать максимальную осторожность.

#### **Средства инициирования**

Взрывание зарядов ВВ в заданной последовательности и в определенный промежуток времени осуществляется средствами инициирования (СИ), передающими импульс заряду ВВ и тем самым вызывающими (возбуждающими) его детонацию.

Специальные технические устройства, служащие для создания начального импульса при инициировании взрывчатых веществ, называются средствами инициирования.

Для гранулированных и водосодержащих ВВ требуется усиление начального импульса, для чего применяется дополнительный инициатор из более чувствительного ВВ (шашки тротила, патрон аммонита №6ЖВ).

В соответствии с видом используемых средств инициирования применяют следующие способы взрывания: *огневой, электроогневой, электрический и с помощью детонирующего шнура.*

#### **Капсюли-детонаторы**

Капсюли-детонаторы предназначены для возбуждения детонации ВВ при огневом способе взрывания зарядов, а также для инициирования детонирующего шнура.

Серийно выпускаются капсюли-детонаторы КД-8УТБ, КД8-С и КД-8УТС. В обозначении первая буква после цифры указывает наименование материала гильзы (Б – бумага, С – сталь или биметалл, УТ – с уменьшенной массой первичного инициирующего вещества).

КД8-С предназначен для возбуждения детонации зарядов взрывчатых веществ при проведении промышленных взрывных работ при температуре окружающей среды от - 60 °С до + 45 °С.

КД8 - С должен срабатывать от луча огня огнепроводного шнура ОША ГОСТ 3470-80. Высота гильзы (мм) – 51,0-4,0.

Вероятность безотказного срабатывания не менее 0,99985.

## **Огнепроводный шнур**

Огнепроводный шнур служит для передачи луча огня к инициирующему ВВ в капсулях-детонаторах. В зависимости от материала водоизолирующего покрытия выпускают следующие марки шнура: асфальтированный (ОША), с пластиковым покрытием (ОШП) и экструзионный с полиэтиленовой оболочкой (ОШЭ).

### **Техническая характеристика огнепроводных шнуров**

| Тип шнура           | ОША     | ОШП | ОШЭ     |
|---------------------|---------|-----|---------|
| Диаметр, мм         | 4,8÷5,8 | 5÷6 | 4,8÷5,1 |
| Число оплеток, шт.  | 3       | 2   | 2       |
| Теплостойкость, °С  | 45      | 50  | 50      |
| Морозостойкость, °С | -25     | -35 | -35     |

Гарантийный срок хранения шнура ОШП – пять лет, остальных – один год. Огнепроводные шнуры выпускаются отрезками длиной 10 м, свернутыми в бухты, и по 25 шт. укладывают в пачки, а пачки – в ящики. Скорость горения – 1 см/с.

Для зажигания огнепроводного шнура применяются зажигательные патроны, тлеющий зажигательный фитиль и др.

Зажигательные патроны применяют для группового зажигания огнепроводного шнура. Выпускают зажигательные и электрозажигательные патроны в бумажных гильзах марок ЗП-Б от №1 до №5. Патроны №1 предназначены для поджигания 7, №2 – 8–12, №3 – 13–19, №4 – 20–27 и №5 – 28–37 отрезков шнура.

Для группового зажигания огнепроводного шнура предназначены также электрозажигатели ЭЗ-ОШ (ЭЗ-ОШ-К), электровоспламенители ТЭЗ-ЗП, ЭВ-ПТ-Гр.

### **Электрозажигательная трубка ЭЗТ-2**

ЭЗТ-2 предназначены для электроогневого способа взрывания как на поверхности, так и в подземных выработках шахт и рудников неопасных по газу и пыли.

### **Электродетонаторы**

Электродетонатор представляет собой капсуль-детонатор с электровоспламенителем в одной гильзе. Электродетонаторы различают по роду и величине заряда, инициирующего ВВ, по времени срабатывания (мгновенного, замедленного и короткозамедленного действия), по назначению (общего назначения, для сейсморазведки, для торпедирования скважин и др.), по условиям применения (непредохранительные, предохранительные). Промышленность выпускает электродетонаторы мгновенного действия следующих марок: ЭД-8Э – водостойкий, непредохранительный, с эластичным креплением мостика накаливания; ЭД-8Ж – водостойкий, непредохранительный, с жестким креплением мостика накаливания; ЭД-КЗ-35П, ЭД-КЗ-ОП – предохранительный, повышенной мощности для шахт, опасных по газу и пыли. Электродетонаторы ЭД-1-8Т, ЭДКЗ-ПКМ, ЭД-3Н, ЭД-1-3Т, ЭД-8Ж.



Рис. 1. Электродетонаторы ЭД-1-8Т, ЭДКЗ-ПКМ, ЭД-3Н, ЭД-1-3Т, ЭД-8Ж

ЭД-1-3Т – электродетонатор защищенный, с замедлением. Используется для одиночного или группового взрывания зарядов взрывчатых веществ при взрывных работах на открытых разработках, опасных в отношении зарядов статического электричества и блуждающих токов, в сухих или обводненных местах, а также для импульсной обработки металлов.

#### Технические параметры

- Безопасный ток (в течении 5 мин.), А – 1;
- Гарантийный ток группового срабатывания, А - 5;
- Защищенность от статического электричества – выдерживает разряд конденсатора емкостью 500 пФ, заряженного до 10 кВ;
- Номинальное время срабатывания, мс – 20, 40, 60, 80, 100, 125, 150, 175, 200, 250, 300, 350, 400, 450, 500, 750, 1000, 1500, 2000, 4000, 6000, 8000, 10000.

ЭД-8Ж – электродетонатор мгновенного действия. Используется для инициирования зарядов взрывчатых веществ во время проведения взрывных работ при температуре от – 50 °С до 50 °С.

#### Технические характеристики

- Длина выводных проводов, мм – 2150–150;
- Электрическое сопротивление, Ом – 1,8–3,0;
- Длительный воспламеняющий ток, А – 0,22;
- Безопасный импульс воспламенения, А<sup>2</sup>мс, не менее – 20,6;
- Импульс воспламенения, А<sup>2</sup>мс, не более – 2,00;
- Время срабатывания, мсек – 2,0–6,0;
- Водостойкость, МПа (кгс/см<sup>2</sup>) – 1,96 (2,0) в течение 20 мин.;
- Постоянный ток срабатывания, А – 1,0;
- Сопротивление изоляции токоведущих элементов, Ом – 1,0x10<sup>5</sup>.

#### Электродетонаторы ЭД-24, ЭДС-2



Рис. 2. Электродетонаторы ЭД-24, ЭДС-2

**ЭД-24** – электродетонаторы предназначены для инициирования зарядов взрывчатых веществ при взрывных работах в шахтах и рудниках черной металлургии, в том числе с использованием обратного инициирования зарядов с применением механизированного заряжения. Серии замедления (мс) -20, 40, 80, 100, 150, 250, 500, 750, 1000, 1500, 2000, 4000, 6000, 8000, 10000.

Срабатывает в последовательных группах от взрывного устройства УВВ во взрывной цепи, не превышающей по сопротивлению 80 Ом при индуктивности 0,8 мГн.

**ЭДС-2** – электродетонаторы предназначены для инициирования зарядов взрывчатых веществ при сейсморазведке при температуре - 50 °С до 50 °С.

#### Технические параметры

- Электрическое сопротивление, Ом – 0,65–1,30;
- Безопасный ток, А –  $0,200 \pm 0,005$  (частотой 100 кГц);
- Ток срабатывания, А - 5,0 (частотой 50 кГц длительностью импульса тока 3,7 мс);
- Время срабатывания, мс –  $2,5 \pm 1,0$ ;
- Защищенность от статического электричества – не срабатывает от блуждающих токов, статического электричества, бытовых источников 500 В, 380 В, частотой 50 кГц;
- Водостойкость при давлении воды ( $0,50 \pm 0,05$ ), МПа ( $(5,0 \pm 0,5)$  кгс/см<sup>2</sup>), ч – 72,0

Электродетонаторы короткозамедленного и замедленного действия отличаются от электродетонаторов мгновенного действия наличием столбика замедляющего заряда, расположенного между первичным ВВ и электровоспламенителем. Выпускают для шахт, не опасных по газу и пыли, трех видов: ЭДКЗ, ЭДЗД и ЭД-З-Н (23 серии с замедлением до 1000 мс).

Электродетонаторы короткозамедленного действия (ЭДКЗ) выпускают с 6 ступенями замедления с номинальным временем срабатывания 25, 50, 75, 100, 150 и 250 мс; замедленного действия ЭДЗД с замедлением до 1000 мс и номинальным временем срабатывания 0,5; 0,75; 1; 1,5; 2; 4; 6; 8 и 10 с.

Электродетонаторы типа ЭДЗ-Н (непредохранительные) предназначены для замены электродетонаторов ЭДКЗ и частично ЭДЗД. Они имеют 23 ступени замедления. Первые десять ступеней имеют время замедления 10 мс, следующие четыре – 25 мс, последующие три – 50 мс и последние шесть – 100 мс. Характеристика электродетонаторов приведена в табл. 6.

Термостойкие электродетонаторы (ТЭД-165-1К; ТЭД-165; ТЭД-200; ТЭД-260; ТЭД-270) предназначены для инициирования зарядов ВВ при прострелочных и взрывных работах в нефтяных и газовых скважинах.

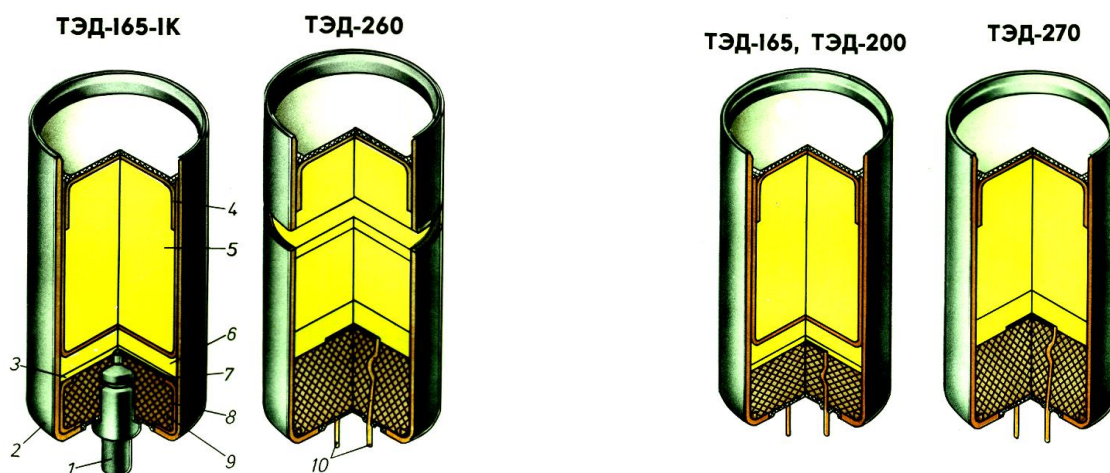


Рис. 3. Электродетонаторы термостойкие ТЭД-165-1К, ТЭД-165, ТЭД-200, ТЭД-260, ТЭД-270: 1 – контакт; 2 – колпачок; 3 – воспламенительный состав; 4 – чашечка; 5 – бризантное ВВ; 6 –

иницирующее ВВ; 7 – мостик накаливания; 8 – чашечка; 9 – прессовочный материал; 10 – провод контактный

Электродетонаторы мгновенного действия (ЭД-8-Э; ЭД-8-Ж; ЭДС) предназначены для инициирования зарядов ВВ при взрывных работах.

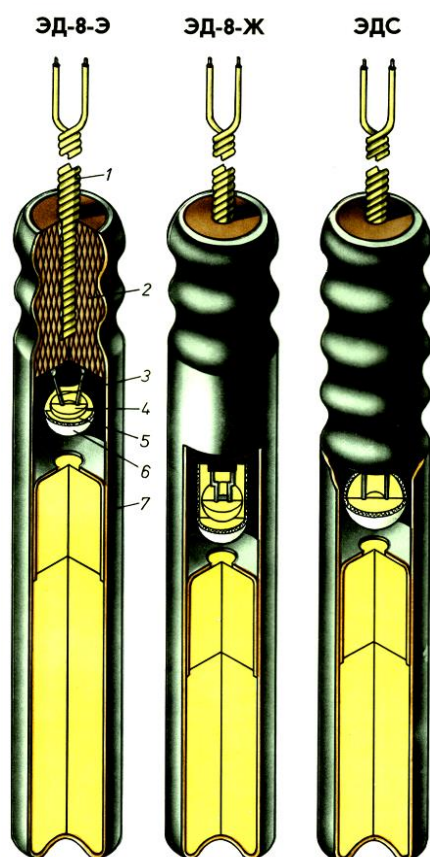


Рис. 4. Электродетонаторы мгновенного действия ЭД-8-Э, ЭД-8-Ж, ЭДС: 1 – провод; 2 – пластмассовая пробка; 3 – мостик накаливания; 4 – воспламенительный состав; 5 – зажигательный состав; 6 – нитролак; 7 – капсюль-детонатор

Таблица 6

| ЭД, ТУ, ГОСТ  | Замедление       |                           | Безопасный ток, А | Номер журнального постановления |
|---|------------------|---------------------------|-------------------|---------------------------------|
|   | Число серий      | Интервал, мс              |                   |                                 |
| <b>Непредохранительные</b>  |                  |                           |                   |                                 |
| ЭД-8Ж, ЭД-8Э  | -                | мгновенного действия      |                   | 88/71                           |
| ЭД-1-8-Т (мгновенного действия), ЭД-1-3-Т ТУ84-638-83 (замедленного действия) | 1...10           | 20÷200 (через 20 мс)      | 0,92 ±0,02        | 263/81                          |
|   | 11...14          | 225÷300 (через 25 мс)     |                   |                                 |
|   | 15...18          | 350÷500 (через 50 мс)     |                   |                                 |
|   | 19...23          | 600÷1000 (через 100 мс)   |                   |                                 |
|   | 24               | 1,5 с                     |                   |                                 |
| 25÷29   | 2÷10 (через 2 с) |                           |                   |                                 |
| ЭД-КЗ ТУ-84-317-83  | 1÷6              | 25; 50; 75; 100; 150; 250 | 0,18              | 12/66                           |
| ЭД-3-Н ТУ 84-884-80   | 1÷10             | 20÷200 (через 20 мс)      | 0,18              | 264/81                          |
|   | 11÷14            | 225÷300 (через 25 мс)     |                   |                                 |
|   | 15÷18            | 350÷500 (через 50 мс)     |                   |                                 |
|   | 19÷23            | 600÷1000 (через 100 мс)   |                   |                                 |
| <b>Предохранительные</b>  |                  |                           |                   |                                 |
| ЭД-КЗ-ОП (мгновенного действия)   | -                | -                         | -                 | -                               |
| ЭД-КЗ-П ГОСТ-21806-76   | 1÷5              | 25; 50; 75; 100; 125      | 0,18              | 203/77                          |



|            |     |                                 |        |
|------------|-----|---------------------------------|--------|
| ЭД-КЗ-ПК   | 1÷9 | До 200 мс                       | 382/87 |
| ЭД-КЗ-ПМ   | 1÷7 | 15; 30; 45; 60; 80; 100;<br>120 |        |
| ЭД-КЗ-ПМ   | 1÷9 | До 200 мс                       |        |
| ЭД-КЗ-35-П | 1÷6 | До 200 мс                       |        |

Номинальное время срабатывания указано на доньшке гильзы или металлической бирке, прикрепленной к выводным проводам. Гарантийный срок хранения всех электродетонаторов 1,5 года. Совместно с электродетонаторами поставляют контактные зажимы ЭК-ВР-А, представляющие собой металлический сердечник из белой жести в пластиковой оболочке.

### *Современные средства инициирования*

С начала 90-х годов в условиях все более сокращающегося госзаказа на ядерное оружие (ЯО) РФЯЦ-ВНИИЭФ стал активно сотрудничать с предприятиями – разработчиками обычных (неядерных) видов вооружения, военной техники (ВТ) и боеприпасов (БП), и особенно с разработчиками высокоточного оружия (ВТО). Сокращение арсенала ЯО, с одной стороны, потребности мирового рынка оружия в современном высокоэффективном оружии – с другой, явились основой этого, в настоящее время активного, сотрудничества. Накопленные во ВНИИЭФ технические решения, технологии, новые материалы при внедрении в конструкции неядерных видов вооружения, ВТ и БП позволяют во многих случаях значительно повысить их эффективность, придать им новые качества. Это в полной мере касается опыта ВНИИЭФ, накопленного в конструировании средств и систем инициирования, элементов и систем взрывной автоматики. Перед ВНИИЭФ как разработчиком ЯО с момента его образования, с выпуска его первых образцов стояла задача создания средств инициирования (электродетонаторов), работающих в пределах единиц микросекунд и имеющих разновременность работы в пределах долей микросекунды. Кроме того, высокая потенциальная опасность ЯО всегда требовала обеспечения высокой безопасности средств инициирования при их снаряжении на ядерных БП (ЯБП) и при эксплуатации в составе ЯБП, что во ВНИИЭФ было достигнуто созданием безопасных электродетонаторов (ЭД), основанных на инициировании бризантного взрывчатого вещества (ВВ) взрывающимся проволочным мостиком. Отказ от применения в конструкциях ЯБП иницирующих ВВ и по сей день является для ВНИИЭФ принципиальным. Поэтому естественно, что одним из первых приборов, предложенных ВНИИЭФ для использования в военной технике, науке и промышленности, стал безопасный электродетонатор АТЭД15, серийно выпускаемый с 1970 года Муромским приборостроительным заводом. При всей простоте конструкции АТЭД15 имеет высокие характеристики: среднее время работы составляет 2 мкс, а разновременность - 0,5 мкс. Электродетонатор снаряжен только бризантным ВВ и для своего задействования требует специально сформированного импульса тока. Благодаря этому ЭД не детонирует при пожаре, подключении к промышленной сети напряжением 220 В, пропускании через него тока до 50 А, при разрядах статического электричества и т.д. Столь высокие характеристики безопасности делают АТЭД15 незаменимым при воздействии широкого спектра поражающих факторов современного боя, а также при использовании взрывных технологий для аварийно-восстановительных и спасательных работ, для ликвидации техногенных и экологических катастроф, т.е. в экстремальных условиях. В сочетании с генераторами группового подрыва и элементами взрывной автоматики эти электродетонаторы позволяют создавать требуемой формы фронты детонации зарядов ВВ, что является обязательным для адаптивных боевых частей, учитывающих в режиме своего подрыва тип, скорость, направление полета цели и т.д. В институте разработано семейство электродетонаторов - аналогов АТЭД15 по принципу действия и близких ему по рабочим характеристикам, но отличающихся параметрами задействования, конструктивным исполнением (в т.ч. с неразрушаемыми при срабатывании корпусами), эксплуатационными характеристиками и т.д. Для задействования электродетонаторов семейства АТЭД15 разработаны и широко применяются генераторы группового подрыва. Имеющиеся стационарные генераторы позволяют подрывать в синхронном режиме до 250 ЭД на расстоянии до 50 м, переносные - до 20 ЭД на расстоянии до 20 м или 5 ЭД - до 500 м. Указанные генераторы

могут быть синхронизированы с запуском аппаратуры контроля, что вкупе с временными характеристиками ЭД делает их незаменимыми при проведении газодинамических исследований, в геофизике и т.д. Помимо традиционных генераторов (конденсаторного типа), во ВНИИЭФ разработаны взрывомагнитные и пьезогенераторы для синхронного подрыва электродетонаторов. Для случаев, когда не нужны столь малое, как у АТЭД15, время и разновременность работы, разработан низковольтный безопасный электродетонатор АЭД3011 со временем работы не более 35 мкс. Этот электродетонатор применен во взрывателе одного из модернизируемых комплексов, боевая часть которого также разрабатывается во ВНИИЭФ. Вышеприведенные характеристики ЭД обеспечивают наряду с высоким уровнем безопасности требуемое время функционирования БЧ, определяемое из условия ее максимальной эффективности. В широкой номенклатуре электродетонаторов, созданных при работах на земной поверхности, в шахтах и рудниках (не опасных по газу или пыли) и в сланцевых шахтах (опасных по пыли). Электродетонаторы ЭДБ-1 в зависимости от назначения имеют 23 серии замедления (время работы от 5 мс до 10 с). Подрыв электродетонаторов ЭДБ-1 осуществляется с помощью переносного частотного конденсаторного взрывного прибора КВП4-1/100, вырабатывающего ток взрывания частотой 20 - 50 кГц и позволяющего подорвать до 100 ЭД при длине электровзрывной сети до 1000 м. Такая система электровзрывания аналогична системе "Магнадет", разработанной английской фирмой "Ай-Си-Ай Нобель Иксплозивс" и успешно применяемой в Великобритании, США и других странах. В широкой номенклатуре электрических средств инициирования есть и электровоспламенители, нечувствительные к разрядам статического электричества, имеются наработки по полупроводниковым средствам инициирования, с пленочными мостиками и т.д. Особое место занимают средства инициирования (СИ), в которых в качестве начального импульса используются лазерное излучение, аэродинамический нагрев, механический импульс (эти СИ также снаряжены только бризантными ВВ или составами на их основе). Системы инициирования на основе светодетонаторов, задействуемых от лазерных блоков подрыва, обладают высоким уровнем защищенности от воздействующих факторов. Средства инициирования, задействуемые при аэродинамическом нагреве, могут быть использованы для запуска взрывных и пиротехнических элементов космических аппаратов и боеприпасов баллистических ракет, для приведения в действие в этих условиях разогретых источников питания и т.д. По заказам авиационных фирм ВНИИЭФ разрабатывает ряд систем образования выхода из самолета или вертолета в аварийной ситуации в воздухе или на земле, систем образования аварийной вентиляции кабины самолета при ее задымлении и т.д. Отличительная особенность этих систем - их задействие по механической команде и построение на основе элементов взрывной автоматики. При вытягивании ручки управления, расположенной в кабине или снаружи объекта, происходит формирование детонационной команды, которая используется:

- для разрушения остекления или сбрасывания фонаря,
- для удаления части обшивки
- для катапультирования членов экипажа и т.д.

Построение всех систем обеспечивается применением следующих элементов взрывной автоматики

- механическое инициирующее устройство формирует детонационный импульс при вытягивании ручки управления;

- линия передачи передает детонационный импульс, она представляет собой детонирующий шнур с малым энерговыделением, помещенный в защитный экран;
- детонирующего удлиненного кумулятивного заряда;
- соединитель взрывной обеспечивает размножение детонационного импульса и при необходимости его коммутацию по электрической команде;
- диод взрывной передает детонационный импульс в одном направлении;
- устройство задержки детонации задает алгоритм работы элементов системы;
- исполнительных устройств (пиротолкатели, пиробаллоны и т.д.) с взрывным задействованием.

Построение систем спасения на основе взрывных элементов автоматики позволяет свести до минимума количество механических связей, газовых магистралей, применение электрорадиоэлементов, что повышает стойкость и надежность систем.

Для проведения подводных аварийно-спасательных и технических работ во ВНИИЭФ разработана система электровзрывания, позволяющая проводить резку и пробитие судовой обшивки толщиной

до 10 мм на глубине до 60 м. В состав системы входят взрывная машинка, подрывной кабель, электродетонаторы типа АТЭД15, линейные и угловые кумулятивные резак и кумулятивные пробойники. Для спасательных же работ на воде институтом разработан газогенератор для надувания спасательных плотов (производительность 700 л газа).

Требуемые рабочие характеристики приборов, надежность и высокий уровень безопасности обеспечиваются применением в их конструкции специально разработанных во ВНИИЭФ новых взрывчатых и пиротехнических составов (высокодисперсные ВВ и их смеси с порошками металлов, пластические взрывчатые составы, термитные, газовые и безгазовые пиросоставы и т.д.).

### Детонирующие удлиненные заряды (ДУЗы)



Рис. 5. Детонирующие удлиненные заряды (ДУЗы)

Отличительной особенностью ДШЭ-6 ПВД от уже известного ДШЭ-12 является пониженная линейная плотность реактивного материала – 6 г на погонный метр.

### Технические параметры ДШЭ-6 ПВД (пентолит высокодисперсный)

- Масса сердцевины, г/м – 6,0;
- Диаметр шнура, мм –  $4,0 \pm 0,5$ ;
- Скорость детонации, м/с, не менее – 5500;
- Прочность на разрыв, Н, не менее – 588 (60 кгс);
- Водостойкость – 30 суток на глубине 30 м;
- Вероятность безотказного срабатывания – 0,9997;
- Длина шнура в бухте, м – 50

100ДШЭ-9 – шнур экструзионный водостойкий предназначен для передачи детонации на расстояние при температуре окружающей среды от - 50 °С до 65 °С.

### Технические параметры ДШЭ-9

- Масса сердцевины, г/м –  $9,0 \pm 0,5$ ;
- Диаметр шнура, мм –  $4,7 \pm 0,5$ ;
- Скорость детонации, м/с, не менее – 6200;
- Прочность на разрыв, Н, не менее – 588 (60 кгс);
- Водостойкость – 30 суток на глубине 30 м;
- Вероятность безотказного срабатывания – 0,9998;
- Длина шнура в бухте, м – 50, 100, 250

Детонирующий шнур экструзионный ДШЭ-12 нормальной мощности и повышенной водостойкости предназначен для передачи детонации взрывчатым веществам на расстояние при температуре от - 50<sup>0</sup>С до + 65<sup>0</sup>С.

#### Технические параметры ДШЭ-12

- Масса сердцевины, г/м - 12,0 ± 0,5;
- Диаметр шнура, мм - 5,0 ± 0,5;
- Скорость детонации, м/с, не менее - 6200;
- Прочность на разрыв, Н, не менее - 490 (50 кгс);
- Водостойкость - 30 суток на глубине 30 м;
- Вероятность безотказного срабатывания - 0,9997.
- Длина шнура в бухте, м - 50, 100.

### ДЕТонируЮЩИЕ ШНУРЫ

#### Шнур детонирующий повышенной водостойкости ДШ-В

##### Характеристики ДШ-В

|                                       |               |
|---------------------------------------|---------------|
| диаметр шнура, мм                     | 6,1-0,6       |
| масса сердцевины шнура, г/м           | 14,0±0,5      |
| длина шнура в бухте, м                | 50,0±0,5      |
| водостойкость на глубине 1м, ч        | 24            |
| термостойкость в течение 6 часов, °С  | +60           |
| морозостойкость в течении 2 часов, °С | -35           |
| скорость детонации, м/с               | не менее 6500 |



Рис. 6. Шнур детонирующий повышенной водостойкости ДШ-В

#### Шнур детонирующий усиленный модернизированный ДШУ-33 М



Рис. 7. Шнур детонирующий усиленный модернизированный ДШУ-33 М

### Характеристики ДШУ-33 М

|   |         |
|---|---------|
| диаметр шнура, мм                                   | 8,5-0,9 |
| масса сердцевины шнура, г/м                         | 33±2    |
| длина шнура в бухте, м                              | 50,0±1  |
| водостойкость при температуре 30°C, ч               | 24      |
| термостойкость в течение 24 часов, °С               | +100    |
| морозостойкость в течении 2 часов, °С               | -50±5   |
| величина гидростатического давления применения, МПа | 50      |

### Шнур детонирующий термостойкий ДШТ-200



Рис. 8. Шнур детонирующий термостойкий ДШТ-200

### Характеристики ДШТ-200

|                                       |               |
|---------------------------------------|---------------|
| диаметр шнура, мм                     | 5,5-0,75      |
| масса сердцевины шнура, г/м           | 22,0±2        |
| длина шнура в бухте, м                | 54,5±0,55     |
| водостойкость на глубине 1м, ч        | 24            |
| термостойкость в течение 5 часов, °С  | +160±10       |
| морозостойкость в течении 5 часов, °С | -50           |
| скорость детонации, м/с               | не менее 7200 |

### Шнур детонирующий термостойкий таблеточный ДШТТ-180/800

#### Характеристики ДШТТ-180/800

|                                       |               |
|---------------------------------------|---------------|
| диаметр шнура, мм                     | 8,5-0,9       |
| масса сердцевины шнура, г/м           | 45,0±3        |
| длина шнура в бухте, м                | 50,0±1        |
| прочность на разрыв, кгс              | 24            |
| термостойкость в течение 24 часов, °С | не менее 50   |
| температура применения, °С            | до 180        |
| скорость детонации, м/с               | не менее 7500 |

### Шнур детонирующий ДШТВ-150/800

#### Характеристики ДШТВ-150/800

|                             |          |
|-----------------------------|----------|
| диаметр шнура, мм           | 5,4±0,3  |
| масса сердцевины шнура, г/м | 39,0±3   |
| длина шнура в бухте, м      | 50,0±0,5 |
| прочность на разрыв, кгс    | 20       |

|                         |               |
|-------------------------|---------------|
| термостойкость, °С      | 145±5         |
| морозостойкость, °С     | -45±5         |
| скорость детонации, м/с | не менее 7500 |

### Шнур детонирующий ДШТВ-165/1000

#### Характеристики ДШТВ-165/1000

|                             |               |
|-----------------------------|---------------|
| диаметр шнура, мм           | 5,6±0,3       |
| масса сердцевины шнура, г/м | 35,0±1,5      |
| длина шнура в бухте, м      | 50,0±0,5      |
| прочность на разрыв, кгс    | 20            |
| термостойкость, °С          | 185±5         |
| морозостойкость, °С         | -45           |
| скорость детонации, м/с     | не менее 7500 |

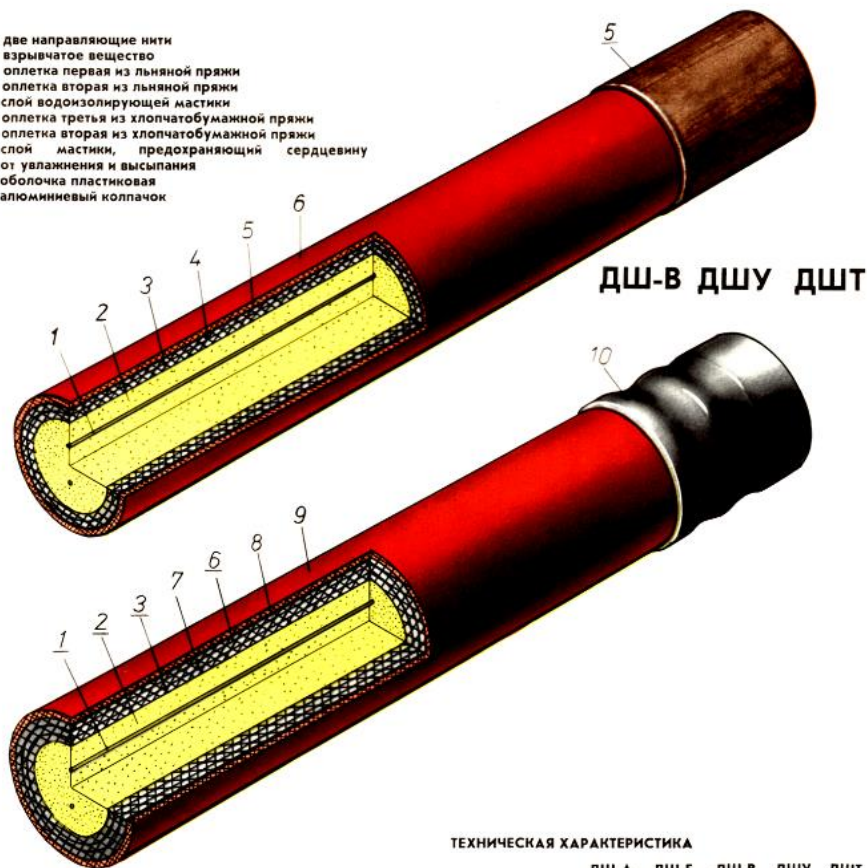
Детонирующие шнуры ДШ-А, ДШ-Б, ДШ-В, ДШУ, ДШТ предназначены для инициирования зарядов в корпусных и бескорпусных кумулятивных перфораторах и в сейсмозведочных скважинах при проведении взрывных работ.

Шнур ДШ-В используют также в качестве основного заряда в фугасных торпедях ГДШ.

Среда применения для шнуров ДШ-А, ДШ-Б и ДШТ — воздух, для шнуров ДШ-В и ДШУ — скважинная жидкость.

**ДШ-А ДШ-Б**

- 1 — две направляющие нити
- 2 — взрывчатое вещество
- 3 — оплетка первая из льняной пряди
- 4 — оплетка вторая из льняной пряди
- 5 — слой водонепроницающей мастики
- 6 — оплетка третья из хлопчатобумажной пряди
- 7 — оплетка вторая из хлопчатобумажной пряди
- 8 — слой мастики, предохраняющий сердцевину от увлажнения и высыпания
- 9 — оболочка пластиковая
- 10 — алюминиевый колпачок



#### ТЕХНИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА

|   | ДШ-А    | ДШ-Б    | ДШ-В    | ДШУ | ДШТ           |
|---|---------|---------|---------|-----|---------------|
| Наружный диаметр, мм                                      | 4,8—5,8 | 5,5—6,1 | 8,5     | 6,3 | —             |
| Длина шнура в бухте, м                                    | 50; 100 | 50; 100 | 50; 100 | 50  | 50            |
| Масса взрывчатой сердцевины на 1 м шнура, г/м             | 12      | 12,5    | 14      | 33  | 20            |
| Предельное гидростатическое давление, кгс/см <sup>2</sup> | —       | —       | 500     | 500 | —             |
| Предельная температура, °С                                | —       | —       | 100     | 100 | 165; 180; 200 |

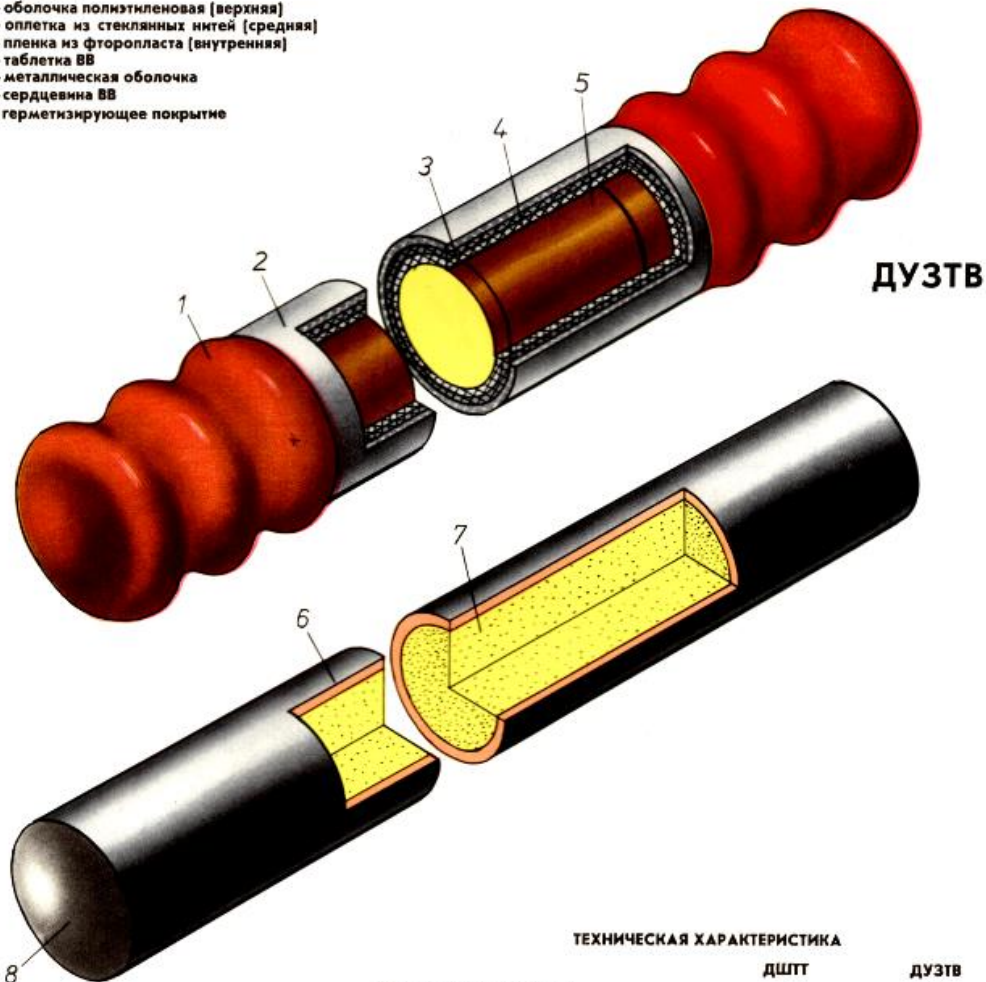
Рис. 9. Детонирующие шнуры ДШ, ДШУ, ДШТ



Детонирующие шнуры ДШТТ и ДУЗТВ предназначены для инициирования зарядов в бескорпусных кумулятивных перфораторах. В зависимости от взрывчатого вещества сердцевина шнура и прочности оболочки шнура применяют при различных давлениях и температурах.

**ДШТТ**

- 1 — колпачок
- 2 — оболочка полиэтиленовая (верхняя)
- 3 — оплетка из стеклянных нитей (средняя)
- 4 — пленка из фторопласта (внутренняя)
- 5 — таблетка ВВ
- 6 — металлическая оболочка
- 7 — сердцевина ВВ
- 8 — герметизирующее покрытие



**ТЕХНИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА**

|   | <b>ДШТТ</b>         | <b>ДУЗТВ</b>  |
|---|---------------------|---------------|
| Наружный диаметр, мм                                      | 7,2                 | 6,2           |
| Длина, м  | 50                  | 0,890—3       |
| Масса ВВ на 1 м шнура, г/м                                | от 45 до 80         | 29—32         |
| Предельное гидростатическое давление, кгс/см <sup>2</sup> | 800; 1000           | 800; 1500     |
| Предельная температура, °С                                | 180; 220            | 150; 170; 250 |
| Среда применения  | скважинная жидкость |               |

Рис. 10. Детонирующие шнуры ДШТТ, ДУЗТВ

Для взрывания зарядов применяют также детонирующие шнуры (ДШ, см. выше).

Таблица 7. Характеристика приборов при электрическом взрывании

| Тип прибора или машинки  | <b>КВП-1/100М</b> | <b>ПИВ-100М</b> | <b>ВПА</b>    | <b>КПМ-3</b> | <b>ВМК-500</b> |
|--|-------------------|-----------------|---------------|--------------|----------------|
| Максимально взрывае-мое число ЭД при их последовательном соединении, шт        | 100               | 100             | 30, 60, 120   | 200          | 800            |
| Номинальное сопротивление взрывной сети при последовательном соединении ЭД, Ом | 320               | 320             | 110, 200, 360 | 600          | 2100           |
| Номинальное напряжение на  | 600-650           | 610-670         |               | 1600         | 3000           |

| Тип прибора или машинки   | КВП-1/100М         | ПИВ-100М | ВПА                      | КПМ-3 | ВМК-500 |
|---|--------------------|----------|--------------------------|-------|---------|
| конденсаторе-накопителе, В  |                    |          |                          |       |         |
| Время зарядки конденсатора-накопителя до номинального напряжения, с | 8                  | 15       | 4                        | 10    | 20      |
| Источник питания  | Элемент 373 – 3 шт |          | Элемент переменного тока |       |         |
| Масса (без футляра), кг   | 2,5                | 2,7      | 1,9                      | 1,6   | 6,5     |

Таблица 8

| Марка машинки |      |      |     | Марка машинки |      |     |     |
|---------------|------|------|-----|---------------|------|-----|-----|
| ВМК-1/35      | 400  | 160  | 50  | ПИВ-100М      | 670  | 320 | 100 |
| ВМК-3/50      | 450  | 300  | 100 | БКВМ-1/50     | 450  | 250 | 80  |
| КПМ-1А        | 1500 | 300  | 100 | КВП-1         | 1000 | 210 | 70  |
| КПМ-2         | 1500 | 900  | 300 | СВМ-2         | 600  | 300 | 100 |
| ВМК-500       | 3000 | 2000 | 800 | ВМА-100/200   | 1200 | 600 | 200 |

### Неэлектрическая система инициирования "ЭДИЛИН"

Система "ЭДИЛИН" предназначена для инициирования зарядов промышленных взрывчатых веществ при производстве взрывных работ на земной поверхности и в подземных условиях, не опасных по газу и (или) пыли при температуре окружающей среды от минус 50 до плюс 85 °С для ДБИ1 и ДБИ3, и минус 50 до плюс 65 °С для ДБИ 2.

### Система "ЭДИЛИН" состоит из следующих элементов:

- Детонаторы скважинные ДБИ1 с временем замедления 475; 500мс;
- Детонаторы поверхностные ДБИ2 с временем замедления 0; 25; 40; 55; 70; 85; 100; 125; 150; 175; 200;
- Соединительный блок;
- Устройство стартовое;
- Детонаторы шпуровые ДБИ3 с временем замедления 0; 25; 40; 55; 70; 85; 100; 125; 150; 175; 200; 250; 300; 350; 400; 450; 500; 600; 700; 800; 900; 1000.

### Технические параметры НСИ "ЭДИЛИН":

- Диаметр волновода, мм –  $4,0 \pm 0,25$ ;
- Навеска ВВ волновода, г/м –  $0,015-0,035$ ;
- Скорость ударной волны волновода, м/с –  $1800 \pm 100$ .

### *Взрывчатое превращение вещества и состав продуктов взрыва*

#### Характеристика взрывчатого превращения вещества и его формы

**Взрыв** (или взрывчатое превращение), в широком смысле слова, представляет собой процесс чрезвычайно быстрого изменения физического или химического состояния системы, сопровождающийся переходом ее потенциальной энергии в работу. Работа, совершаемая при взрыве, обусловлена быстрым расширением газов и паров, независимо от того, существовали ли они до или образовались во время взрыва.

Определяющим признаком взрыва является резкий скачок давления в среде, окружающей место взрыва. Это является основной причиной разрушительного действия взрыва.

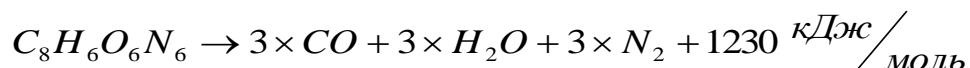
Взрывы могут быть вызваны различными физическими и химическими явлениями. Взрывы, основанные на физических явлениях, находят весьма ограниченное применение и являются главным образом предметом специальных научных исследований.



Химическим взрывом (или просто взрывом) называется очень быстрое химическое превращение вещества, сопровождающееся выделением тепла и образованием сильно нагретых и сжатых газов и паров, способных при расширении совершать механическую работу разрушения или перемещения среды.

Взрывчатые вещества представляют собой относительно неустойчивые в термодинамическом отношении системы, способные под влиянием внешних воздействий к быстрым экзотермическим превращениям, сопровождаемым образованием сильно нагретых паров и газов.

Примером взрыва может служить химическое превращение органического вещества (гексогена) в газообразные продукты и последующее расширение нагретых газов и паров – продуктов взрыва



Взрывчатое превращение веществ характеризуется тремя показателями: экзотермичностью процесса (выделением тепла); скоростью распространения процесса (кратковременность) и образованием газообразных продуктов.

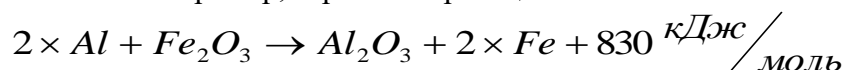
Экзотермичность процесса взрыва является первым необходимым условием, без которого невозможно возникновение и проявление взрыва.

За счет тепловой энергии реакции происходит разогрев газообразных продуктов до температуры в несколько тысяч градусов, их сильное сжатие в объеме взрывчатого вещества и последующее активное расширение.

Количество тепла, выделяющееся при взрыве 1 кг ВВ, называется теплотой взрыва. Для современных ВВ теплота взрыва изменяется в пределах от 3750 до 7550 кДж/кг.

Выделяющееся при взрыве тепло создает температурные условия, обеспечивающие надлежащую быстроту взрывной реакции (Как известно из общей химии, повышение температуры участвующих в реакции компонентов на 10° ускоряет ход реакции в два-четыре раза. Отсюда можно заключить, какова скорость реакции взрыва, протекающего при температуре 2000-2400°С.).

Однако условие экзотермичности является необходимым, но недостаточным для протекания реакции в форме взрыва. Так, известен целый ряд реакций, протекающих с выделением тепла, но не являющихся взрывчатыми. Например, термитная реакция:



Так как при этой реакции не образуются газообразные вещества, то и работа не совершается.

Большая скорость распространения процесса взрыва является одним из характерных признаков взрыва, резко отличающим его от обычных химических реакций.

Переход исходного ВВ к конечным продуктам взрыва происходит в течение  $10^{-5} \dots 10^{-6}$ с, а скорость распространения взрыва по массе вещества составляет 7000...9000 м/с.

Скорость распространения взрыва не зависит от внешних условий, так как любое внешнее воздействие совершается со скоростью, значительно меньшей, чем скорость взрыва, а поэтому не успевает повлиять на его протекание.

Взрывчатое превращение может протекать с постоянной или переменной скоростями.

Скорость взрывчатого превращения является важнейшей характеристикой, определяющей скорость выделения энергии и как следствие – эффективность действия, то есть мощность взрыва.

О мощности ВВ можно получить представление хотя бы по тому, что даже такое слабое ВВ, как дымный порох, способно при взрыве 1 кг произвести работу в 25 млн. лошадиных сил. А мощность взрыва 1 кг гексогена составляет 570 млн. кВт (в 31 раз мощнее; 1кВт=1,36 л.с.).

Интересный факт: сама по себе энергия взрывчатого вещества невелика. При взрыве 1 кг тротила выделяется в 8 раз меньше энергии, чем при сгорании 1 кг угля, но эта энергия при взрыве выделяется в десятки миллионов раз быстрее, чем при обычных процессах горения.

Образование большого количества газообразных и паровых продуктов реакции обеспечивает создание в локальном объеме высокого давления и обусловленного им разрушительного эффекта.

Вследствие нагревания до высокой температуры (3500 – 4000K) продукты взрыва оказываются в чрезвычайно сжатом состоянии (давление при взрыве достигает  $(20 \dots 40) \cdot 10^3$ МПа) и способны разрушить очень прочные преграды. В процессе расширения продуктов взрыва осуществляется

быстрый переход потенциальной химической энергии ВВ в механическую работу или в кинетическую энергию движущихся частиц.

Следовательно, для увеличения разрушительного действия разрывных зарядов боеприпасов следует использовать такие ВВ, при взрывчатом превращении которых образуется наибольшее количество газов и паров.

При взрыве 1 кг штатных ВВ образуется от 0,75 до 0,95 м<sup>3</sup> газов и паров (для сравнения: при сгорании 1 литра смеси бензина с воздухом образуется 32 литра газов, а при сгорании 1 литра пироксилинового пороха выделяется 1440 литров газов).

Итак, только одновременное сочетание трех основных факторов (экзотермичности, высокой скорости процесса и газообразования), представляющих собой взрывчато-энергетические характеристики, обеспечивает явление взрыва.

Характер взрыва определяется прежде всего скоростью протекания процесса и зависит от вида взрывчатого вещества и от условий, в которых происходит взрыв.

В зависимости от скорости процесса различают *три формы взрывчатого превращения*: горение (быстрое сгорание); собственно взрыв и детонацию.

Быстрым сгоранием взрывчатого вещества обычно называют процесс, скорость распространения которого по массе ВВ не превышает нескольких метров в секунду, а иногда - даже долей метра в секунду. Характер действия в этом случае - более или менее быстрое нарастание давления газов и производство ими работы разбрасывания или метания окружающих тел. Если процесс быстрого сгорания происходит на открытом воздухе, то он не сопровождается сколько-нибудь значительным эффектом.

Примером такой формы взрывчатого разложения может служить сгорание на открытом воздухе бездымного пороха.

Пороха (особенно бездымные) в закрытом объеме, например в патроннике ружья, разлагаются более энергично, чем на открытом воздухе, причем горение в этом случае сопровождается резким звуком. Это - типичная форма взрывчатого разложения ВВ в форме быстрого сгорания.

Собственно взрыв, называемый иногда обыкновенным взрывом или взрывом второго рода, - это процесс, который может протекать с переменной скоростью, но значительно большей, чем в первом случае, в среднем со скоростью сотен метров в секунду.

Взрывчатые вещества, разлагающиеся в этой форме, характеризуют резкий подъем давления в месте взрыва, удар газов по окружающей среде или производство работы: раскалывание и дробление преграды на небольших расстояниях от места взрыва.

Примером этой формы взрывчатого разложения может служить вызванный лучом огня взрыв прессованного пироксилина в оболочке, протекающий со скоростью нескольких сотен метров в секунду.

Детонацией, или взрывом первого рода, называют процесс, который распространяется по массе вещества с максимальной скоростью, измеряемой обычно тысячами метров в секунду. Например, скорость детонации прессованного тротилового заряда составляет около 6700 м/с.

Характер действия при детонации - особенно резкий скачок давления и удар газов, сопровождающийся сильнейшим разрушительным эффектом. Здесь налицо не раскалывание, а дробление преграды на мельчайшие куски.

При детонации разложение ВВ происходит настолько быстро (за время от  $10^{-6}$  до  $10^{-7}$  с), что газообразные продукты разложения с температурой в несколько тысяч градусов оказываются сжатыми в объеме, близком к начальному объему заряда. Резко расширяясь, они являются основным первичным фактором разрушительного действия взрыва.

В сущности обыкновенный взрыв можно рассматривать как неразвившуюся детонацию и, наоборот, детонацию нужно считать высшей формой взрыва.

Сравнивая формы превращения порохов, РТТ и ВВ, можно заметить, что горение и взрыв имеют общие и отличительные признаки.

При определенных условиях горение может переходить во взрыв, а взрыв вырождаться в горение. Эти переходы крайне нежелательны, поскольку переход горения во взрыв приводит к катастрофам, а переход взрыва в горение - к отказу действия боеприпасов у цели.

## Классификация взрывчатых веществ и требования, предъявляемые к ним

Взрывчатое вещество (или смесь) — твердое или жидкое вещество (или смесь веществ), которое само по себе способно к химической реакции с выделением газов при такой температуре и таком давлении и с такой скоростью, что это вызывает повреждение окружающих предметов.

Взрывчатые вещества отличаются друг от друга составом, природой, взрывчато-энергетическими характеристиками, а также физическими свойствами.

**Взрывчатые вещества классифицируются** (рис. 2.1) по следующим признакам: по практическому применению; по агрегатному состоянию; по составу и по направлениям применения.

По практическому применению взрывчатые вещества делят на две группы: инициирующие (ИВВ) и бризантные (БВВ).

Инициирующие взрывчатые вещества (ИВВ) применяются для инициирования (возбуждения) взрыва разрывных зарядов из бризантного (БВВ) или процесса горения метательных и твердотопливных ракетных зарядов.

Бризантные взрывчатые вещества (БВВ) применяются для совершения разрушительного действия разрывными зарядами боеприпасов и подрывных средств.

Метательные ВВ (пороха и ракетные топлива) служат источниками энергии для метания тел (снарядов, мин, пуль и т. Д.) или движения ракет.

По агрегатному (физическому) состоянию взрывчатые вещества разделяются на следующие группы: твердые (тротил, гексоген, тэн, и др.); жидкие (нитроглицерин, нитродигликоль и др.); газообразные (смеси водорода и кислорода и др.), гелеобразные и суспензионные.

Большая часть современных промышленных ВВ представляют собой суспензии смесей аммиачной селитры с различными горючими и добавками в воде (акватол, ифзанит, карбатол). Существует огромное число суспензионных взрывчатых составов, в которых либо окислители, либо горючие представляют собой жидкую среду. Применяются для заливки шпуров, но большинство таких составов со временем утратили техническую и экономическую целесообразность применения.

В военном деле применяются преимущественно твёрдые (конденсированные) ВВ, которые по физическому состоянию могут быть монолитными (тротил), порошкообразными (гексоген), гранулированными (аммиачно-селитренные взрывчатые вещества), пластичными, а также эластичными.

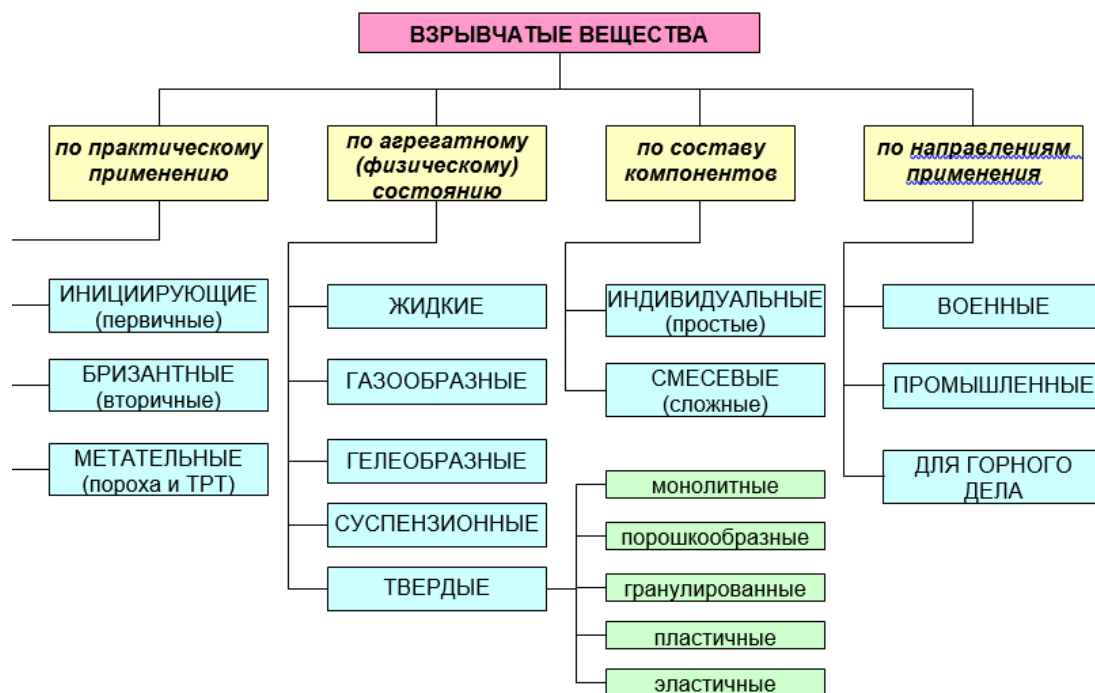


Рис. 11 Общая классификация взрывчатых веществ

По составу взрывчатые вещества делятся на две группы:

- индивидуальные ВВ, представляющие собой отдельные химические соединения (например гремучая ртуть, тротил и др). Большинство таких соединений представляют собой кислородосодержащие вещества, обладающие свойством полностью или частично окисляться внутри молекулы без доступа воздуха. Существуют соединения, не содержащие кислород, но обладающие свойством взрываться (разлагаться) (азиды, ацетилениды, диазосоединения и др.). Они, как правило, обладают неустойчивой молекулярной структурой, повышенной чувствительностью к внешним воздействиям (трению, удару, нагреву, огню, искре, переходу между фазовыми состояниями, другим химическим веществам) и относятся к веществам с повышенной взрывоопасностью.
- смесевые ВВ, представляющие собой смеси и сплавы взрывчатых и невзрывчатых в отдельности веществ (например, тротил-гексоген; гексоген-парафин; азид свинца-ТНРС и др). Эти ВВ состоят из двух и более химически не связанных между собой веществ. Многие взрывчатые смеси состоят из индивидуальных веществ, не имеющих взрывчатых свойств (горючих, окислителей и регулирующих добавок).

По направлениям применения ВВ могут быть: военные, промышленные, а также для горного дела (добыча полезных ископаемых, производство стройматериалов, вскрышные работы).

К изделиям из взрывчатых веществ, как очень ответственным элементам боеприпасов, предъявляются очень жесткие **требования**, основными из которых являются:

Высокая эффективность действия. Для различных ВВ это требование имеет неодинаковый смысл. Так, для ИВВ оно выражает высокую иницирующую способность, то есть надежное возбуждение детонации в разрывных зарядах их БВВ, а для БВВ эффективность – это прежде всего высокая мощность, большой разрушительный эффект, обеспечивающий поражающее действие боеприпасов.

Определенная чувствительность к внешним импульсам, обеспечивающая с одной стороны – безопасность при производстве ВВ, снаряжения различных видов боеприпасов и их эксплуатацию, а с другой стороны – надежность возбуждения в них взрыва при боевом применении.

Высокая химическая и физическая стойкость, химическая инертность по отношению к различным материалам, обеспечивающие стабильность взрывчато-энергетических характеристик и других свойств ВВ в процессе эксплуатации боеприпасов.

Удовлетворительные технологические качества, обеспечивающие возможность изготовления различными способами разрывных зарядов высокого качества.

Производственно-экономические требования, которые включают дешевизну и доступность сырья, простота и безопасность производства, невысокую себестоимость готового продукта).

Ряд требований имеет противоречивый характер. Так, повышение эффективности за счет роста взрывчато-энергетических характеристик, как правило сопровождается увеличением чувствительности, а также снижением химической стойкости. Поэтому для удовлетворения всему комплексу требований необходимо находить оптимальное сочетание всех характеристик взрывчатых веществ.

### ***Реакция взрыва, состав и расчет параметров продуктов взрыва***

Применение взрывчатых веществ основано на их использовании в качестве источника энергии, которая содержится в ВВ в скрытой форме.

Превращение одного вещества в другое происходит в результате изменения молекул. Атомы, входящие в состав молекул, в ходе химического процесса взрывчатого превращения перестраиваются, соединяясь по-новому. В результате появляются новые молекулы и вещество изменяется, причём постройка молекул сопровождается выделением или поглощением энергии.

Таким образом, с химической точки зрения взрыв заряда ВВ- это самораспространяющаяся химическая экзотермическая реакция, протекающая с образованием сильно нагретых газообразных продуктов, которые расширяясь и производят разрушительную работу взрыва.

Для оценки возможного разрушительного действия взрыва необходимо знать количество и состав продуктов взрыва, который зависит от состава исходного ВВ и условий протекания реакции взрывчатого превращения.

Состав продуктов взрыва и определяющий его характер взрывчатого превращения очень сильно зависит от содержания окислительных элементов (кислорода) во взрывчатом веществе. Это объясняется тем, что взрыв есть процесс окислительно-восстановительный, протекающий за счет собственного кислорода ВВ. Поэтому окисление горючих элементов взрывчатого вещества при различном содержании кислорода может быть полным или неполным. В результате будут изменяться состав продуктов взрыва, удельный объём газов и паров, теплота взрыва.

Содержание кислорода во взрывчатых веществах оценивается по величине кислородного баланса (КБ).

Большинство ВВ состоят из углерода, водорода, кислорода и азота. Углерод и водород являются горючими элементами, кислород - окислителем горючих элементов. Азот в составе ВВ связывает кислород, а в продуктах взрыва выделяется в свободном состоянии.

**Кислородный баланс** - это выраженная в процентах разность между количеством кислорода, содержащимся во взрывчатом веществе, и его количеством, необходимым для полного окисления горючих элементов: углерода до  $CO_2$ , водорода до  $H_2O$ .

Кислородный баланс ( $\alpha$ ) характеризует истинное соотношение горючих элементов и кислорода, и является характеристикой степени насыщенности молекулы ВВ кислородом.

Для вычисления кислородного баланса пользуются следующей зависимостью

$$\alpha = \frac{16 \cdot (n_0 - n_1)}{M} \cdot 100, \text{ где: } \alpha - \text{кислородный баланс; } 16 - \text{атомная масса кислорода; } M -$$

молекулярная масса ВВ;  $n_0$  - число атомов кислорода в молекуле ВВ;  $n_1$  - необходимое число атомов кислорода для полного окисления углерода и водорода.

Однако этой зависимостью удобно пользоваться для определения КБ индивидуальных (простых) ВВ. Для сложных смесей ВВ, если их состав выражен условной формулой 1 кг смеси в виде  $C_aH_bO_cN_d$ , где  $a, b, c, d$  - количество грамм-атомов соответствующих элементов в 1 кг смеси,

КБ может быть выражен зависимостью  $\alpha = \frac{16 \cdot (c_0 - c_1)}{1000} \cdot 100$ , где  $c_1 = 2a + \frac{b}{2}$  - количество

грамм-атомов кислорода, необходимое для полного окисления углерода и водорода.

В зависимости от величины кислородного баланса взрывчатые вещества принято делить на три группы:

1) Взрывчатые вещества с положительным и нулевым кислородным балансом, для которых

$\alpha \geq 0$  и  $c_1 \geq 2 \times a + \frac{b}{2}$ . В этих ВВ кислорода достаточно для полного окисления горючих элементов. К таким веществам относятся *нитроглицерин*  $C_3H_5(ONO_2)_3$ , *нитродигликоль*  $C_2H_4(ONO_2)_2$  и др.

2) Взрывчатые вещества с отрицательным кислородным балансом, то есть с количеством кислорода недостаточным для полного окисления горючих элементов, но достаточным для

превращения углерода в газообразные продукты. Для этих ВВ  $\alpha < 0$  и  $2 \times a + \frac{b}{2} > a + \frac{b}{2}$ . К

веществам этой группы относятся *гексоген*  $C_3H_6O_6N_6$ , *тэн*  $C(CH_2ONO_2)_4$  и др.

3) Взрывчатые вещества с существенно отрицательным кислородным балансом, то есть с количеством кислорода, недостаточным для окисления углерода, в результате чего в продуктах взрыва образуется свободный углерод в виде сажистых частиц. К таким взрывчатым веществам относятся *тротил*  $C_6H_2(NO_2)_3CH_3$ , *тетрил*  $C_6H_2(NO_2)_3NN O_2CH_3$  и др. Признаком ВВ этой группы

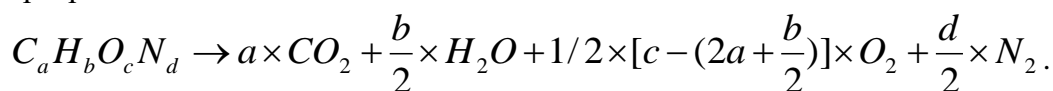
является неравенство  $a + \frac{b}{2} > c$ .

Существует несколько методов расчета состава продуктов взрыва. Наиболее простым является расчет на основе реакций взрыва с учетом величины кислородного баланса ВВ, то есть группы взрывчатого вещества по кислородному балансу (метод последовательного окисления).

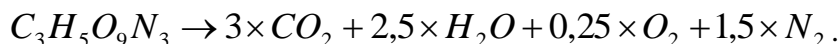
Для написания уравнений реакций взрыва необходимо знать химическую формулу исходного вещества по кислородному балансу.

Для взрывчатого вещества с положительным кислородным балансом реакция взрывчатого

превращения записывается в виде уравнения:



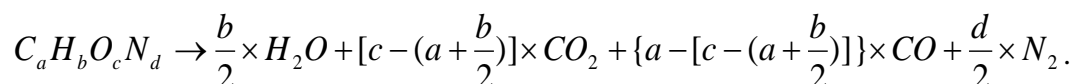
Например для нитроглицерина  $C_3H_5(ONO_2)_3$  уравнение записывается в виде:



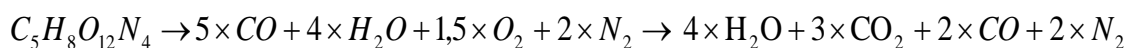
Для вещества этой группы весь углерод окисляется до  $CO_2$ , водород до  $H_2O$ , часть кислорода и азот выделяются в свободном виде. При кислородном балансе равном нулю ( $\alpha=0$ ) свободный кислород в продуктах взрыва отсутствует.

Для написания приближенного уравнения взрыва взрывчатого вещества с отрицательным кислородным балансом пользуются правилом последовательного окисления.

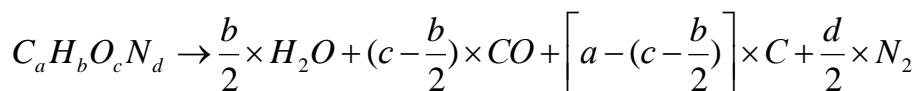
На первой стадии кислород расходуется на окисление углерода до  $CO$  и водорода  $H_2O$ . На второй стадии оставшийся кислород окисляет часть  $CO$  до  $CO_2$ . Суммарно это выражается уравнением:



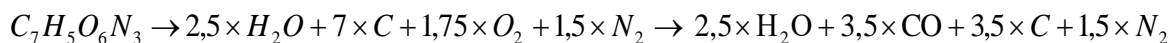
В качестве примера рассмотрим взрывчатое превращение ТЭНа  $C(CH_2ONO_2)_4$ :



Написание уравнений взрыва взрывчатых веществ с существенно отрицательным кислородным балансом, приводят в предположении, что сначала кислород окисляет водород до воды, затем оставшаяся часть кислорода реагирует с углеродом, образуя  $CO$ , а остаток углерода выделяется в свободном виде:



Примером может служить превращение тротила  $C_6H_2(NO_2)_3CH_3$ :



Приведенные уравнения реакций являются приближенными, так как между продуктами взрыва при высоких температурах всегда протекают вторичные реакции, которые могут существенно менять состав продуктов взрыва, получающийся описанным методом.

Для повышения точности расчетов необходимо учитывать вторичные реакции, для чего существуют специальные методы.

Однако во многих случаях приближенный метод расчета состава продуктов взрыва дает вполне удовлетворительные результаты.

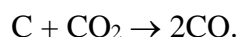
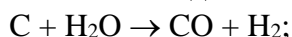
## Тема 2. Взрывчатые характеристики ВВ.

Современные промышленные ВВ содержат органические и неорганические нитраты, нитросоединения и различного рода нитроуглеродистые соединения, поэтому основными ядовитыми газами, выделяющимися при взрыве, являются оксид углерода (угарный газ), оксид (NO) и диоксид (NO<sub>2</sub>) азота.

На состав и количество ядовитых газов взрыва в первую очередь влияет кислородный баланс: чем больше он отклоняется от нуля, тем меньше потенциальная энергия ВВ по сравнению с тем уровнем ее, который был бы при нулевом  $B_k$ , и тем больше выделяется ядовитых газов. При избытке кислорода образуется некоторое количество оксидов азота, а при недостатке – оксид углерода. Поэтому для подземных работ допускаются ВВ только с нулевым или близким к нулевому кислородным балансом. Для взрывания на земной поверхности могут применяться ВВ как с положительным, так и с отрицательным кислородным балансом.

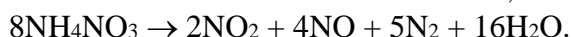
Рецептуры ВВ составляются с таким расчётом, чтобы при реакции взрыва образовались в основном пары воды, азот и углекислый газ, т.е. газообразные продукты, наименее опасные для человека. Взрывчатые вещества с нулевым кислородным балансом теоретически не должно давать ядовитых газов. Однако практика производства работ патронированными ВВ показала, что из общего количества газообразных продуктов взрыва 5...10 % приходится на ядовитые примеси, в том числе до 45 л/кг оксида углерода и до 14 л/кг оксидов азота.

Главная причина образования значительного количества оксида углерода при взрывных работах – газификация парафинированной бумажной оболочки патронов под действием высокотемпературных паров воды и углекислого газа по таким реакциям (образование СО за счёт диссоциации СО<sub>2</sub> не имеет существенного значения для большинства промышленных ВВ):



Поэтому при изготовлении промышленных ВВ массу гильзы ограничивают: на 100 г ВВ масса бумажной обёртки не должна превышать 3 г и парафина – не более 2,5 г.

Образование оксидов азота при взрывных работах происходит, как правило, за счёт медленного горения частиц, разбрасываемых при детонации ВВ (в первую очередь аммиачной селитры), протекающего в низкотемпературном режиме при наличии сравнительно низкого давления, например, следующими путями:



В связи с этим для взрывных работ в угольных шахтах допускаются ВВ, при взрыве которых выделяется не более 80 л/кг условного оксида углерода.

Пересчёт оксидов азота на условный оксид углерода производится умножением количества оксидов азота на коэффициент, равный 6,5. Считается, что 1 дм<sup>3</sup> оксидов азота эквивалентен по токсичности 6,5 дм<sup>3</sup>, а сернистых газов – 2,5 дм<sup>3</sup> оксида углерода.

### ***Определение энергетических характеристик взрывчатых веществ и взрыва***

Главные энергетические характеристики ВВ – объём газообразных продуктов, теплота, температура и давление взрыва. Первые три характеристики являются важнейшими константами ВВ, а давление зависит не только от состава ВВ, но и от условий взрывания.

### ***Определение объёма газов, выделяющихся при взрыве ВВ.***

Количество газов, выделяющихся при взрыве ВВ, определяют теоретическим путём по реакции взрывчатого превращения и опытным.

Теоретически количество газов, выделяющихся при взрыве ВВ, определяют на основании закона Авогадро, согласно которому газы взрыва, приведенные к нормальным условиям

(температура 273 К и давление 101325 Па) имеют одинаковый молярный объём, равный 22,4 м<sup>3</sup>/кмоль.

Объём газов взрыва 1 кмоль ВВ:

$$V_0 = 22,4 \Sigma n, \quad (2.1)$$

где  $\Sigma n$  – суммарное число киломолей газов взрыва, образующихся при взрыве 1 кмоль ВВ.

В технике пользуются объёмом газов, м<sup>3</sup>, выделяющихся при взрыве 1 кг ВВ, называемым *удельным объёмом* ( $V_0'$ ):

$$V_0' = V_0 / M_{ВВ}, \quad (2.2)$$

где  $M_{ВВ}$  – молярная масса ВВ, кг/кмоль.

Для индивидуальных ВВ молярную массу определяют, исходя из их химических формул. Если ВВ будут представлять собой механическую взрывчатую смесь нескольких компонентов, то

$$M_{ВВ} = M_{ВВ1} N_1 + M_{ВВ2} N_2 + \dots + M_{ВВn} N_n, \quad (2.3)$$

где  $M_{ВВ1}, M_{ВВ2}, \dots, M_{ВВn}$  – молярная масса одноимённых компонентов смеси ВВ, кг/кмоль;  $N_1, N_2, \dots, N_n$  – число киломолей одноимённых компонентов в 1 кмоль смеси ВВ.

Если требуется вычислить удельный объём для других температурных условий, то пользуются уравнением

$$V_t' = V_0' \frac{T}{273}, \quad (2.4)$$

В термодинамике константы ВВ определяют при температуре 288 К (15 °С). Тогда

$$V_{15}' = V_0' \frac{288}{273} = 1,055 V_0'. \quad (2.5)$$

**Пример 1.** Определить объём газов, выделяющихся при взрыве аммиачной селитры в нормальных условиях. Реакция разложения аммиачной селитры:



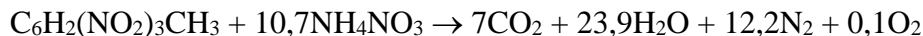
*Решение.* Объём газов, м<sup>3</sup> при взрыве 1 кмоль ВВ определяем по формуле (2.1):

$$V_0 = 22,4 \Sigma n = 22,4 \cdot 3,5 = 78,4.$$

Удельный объём, м<sup>3</sup>/кг, газов взрыва – по формуле (2.2)

$$V_0' = V_0 / M_{ВВ} = 78,4 / 80 = 0,98.$$

**Пример 2.** Определить объём газов, выделяющихся при взрыве аммонита 6ЖВ. Реакция взрывчатого разложения



*Решение.* Исходя из этой реакции

$$\Sigma n = 7 + 23,9 + 12,2 + 0,1 = 43,2.$$

Объём газов, м<sup>3</sup>, выделяющихся при взрыве 1 кмоль ВВ, находим по формуле (2.1)

$$V_0 = 22,4 \cdot 43,2 = 967,68;$$

по формуле (2.4) находим

$$M_{ВВ} = 227 \cdot 1 + 80 \cdot 10,7 = 1083.$$

Удельный объём газов, м<sup>3</sup>, выделяющихся при взрыве 1 кг ВВ, вычисляем по формуле (2.2):

$$V_0' = \frac{V_0}{M_{ВВ}} = \frac{967,68}{1083} = 0,894.$$

Удельный объём газов при температуре 15 °С ( $T = 288$  К) определяем по формуле (2.5):

$$V_{15}' = V_0' \cdot 1,055 = 0,894 \cdot 1,055 = 0,943.$$



Объём газообразных продуктов взрыва можно установить и другим методом – путём замера давления газов в стальной бомбе после взрыва в ней заряда ВВ. Для этого после взрыва бомбу выдерживают в течение 60 мин для охлаждения и выравнивания температуры её стенок с окружающей температурой. Затем измеряют давление внутри нее. Объём газов, приведенный к нормальным условиям (давление 760 мм рт. ст. и температура 273 К), вычисляют по формуле:

$$V_0 = \frac{VP \cdot 273}{101325T} \quad (2.6)$$

где  $V$  – объём бомбы, м<sup>3</sup>;  
 $P$  – давление в бомбе после взрыва, Па;  
 $T$  – температура газов в бомбе, К.

Затем устанавливают объём сконденсировавшихся паров воды (бомбу продувают сухим воздухом, который затем проходит через сосуды с хлористым кальцием и отдаёт последнему воду, вынесённую из бомбы), и прибавляют его к вычисленному значению  $V_0$ , получая при этом объём  $\Sigma V_0$ . На основании полученного результата вычисляют удельный объём газов взрыва 1 кг ВВ при парообразной воде

$$V_0' = \frac{\Sigma V_0}{Q}, \quad (2.7)$$

где  $Q$  – масса взорванного заряда, кг.

Для сохранности бомбы плотность заряжания, т.е. отношение массы заряда к объёму бомбы (или сосуда, в котором взрывается заряд), принимают не более 0,02 кг/дм<sup>3</sup>.

**Определение теплоты взрыва.** Теплота взрыва может быть определена как теоретическим, так и опытным путём. Ещё в середине XIX века русский академик Г.И. Гесс, основываясь на первом законе термодинамики, предложил метод расчёта теплового эффекта химической реакции, согласно которому суммарный тепловой эффект некоторой последовательности реакции не зависит от пути превращения исходных веществ в конечные продукты, а зависит только от начального и конечного состояний системы. Применительно к реакции взрыва этот закон Г.И. Гесса можно сформулировать так: количество теплоты, выделяющейся при взрыве, равно суммарной молярной теплоте образования продуктов взрыва за вычетом молярной теплоты образования самого ВВ:

$$Q_T = Q_{пв} - Q_{ВВ}, \quad (2.8)$$

где  $Q_T$  – молярная теплота взрыва 1 кмоль ВВ, которая выделяется после расширения продуктов взрыва до нормального давления (101325 Па) и температуры 288 К, кДж/кмоль;

$Q_{пв}$  – молярная теплота образования продуктов взрыва 1 кмоль ВВ, кДж/кмоль;

$Q_{ВВ}$  – молярная теплота образования 1 кмоль ВВ, кДж/кмоль.

Очевидно,

$$Q_{пв} = q_1 n_1 + q_2 n_2 + \dots + q_n n_n, \quad (2.9)$$

где  $q_1, q_2, \dots, q_n$  – молярная теплота образования одноимённых продуктов взрыва (при  $T=288$  К и  $P_0=101325$  Па), кДж/кмоль;

$n_1, n_2, \dots, n_n$  – количество кмоль одноимённых продуктов взрыва 1 кмоль ВВ.

Для взрывчатых механических смесей

$$Q_{ВВ} = Q_{ВВ1} N_1 + Q_{ВВ2} N_2 + \dots + Q_{ВВn} N_n, \quad (2.10)$$

где  $Q_{ВВ1}, Q_{ВВ2}, \dots, Q_{ВВn}$  – удельная теплота образования одноимённых компонентов смеси, кДж/кг.

Удельная теплота взрыва ВВ, кДж/кг, определяется по формуле

$$Q_T' = \frac{Q_T}{M_{\text{ВВ}}} \quad (2.11)$$

Молярная теплота образования некоторых ВВ и продуктов взрыва при нормальном давлении и температуре 15 °С приведена в табл. 2.1.

В расчётах параметров взрыва используют теплоту, которая выделяется при взрыве ВВ в постоянном объёме (без совершения внешней работы). Её называют *общей энергией химического превращения ВВ* или потенциальной энергией взрыва  $Q_V$ .

Молярная теплота взрыва при постоянном объёме больше значения  $Q_T$ , вычисленного по формуле (2.8), на количество теплоты  $\Delta Q_T$ , расходуемой на расширение газов, т. е.

$$Q_V = Q_T + \Delta Q_T, \quad (2.12)$$

где  $\Delta Q_T$  - количество молярной теплоты, расходуемое на работу расширения газов взрыва, кДж/кмоль.

При температуре, равной 288 К,  $\Delta Q_T = \Sigma nRT = 8,32 \cdot 288 \Sigma n = 2396 \Sigma n$ .

Таблица 2.1

Молярная теплота образования некоторых веществ

| Вещество            | Химическая формула   | Молярная теплота образования при температуре 15°С (288 К) и давлении 760 мм рт. ст. (101325Па), кДж/кмоль |
|---------------------|--|---|
| Аммиачная селитра   | NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub>  | + 371000  |
| Динитронафталин     | C <sub>10</sub> H <sub>6</sub> (NO <sub>2</sub> ) <sub>2</sub>                                   | - 23630   |
| Нитроглицерин       | C <sub>3</sub> H <sub>5</sub> (ONO <sub>2</sub> ) <sub>3</sub>                                   | + 395000  |
| Нитроглицоль        | C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> (ONO <sub>2</sub> ) <sub>2</sub>                                   | + 283000  |
| ТЭН                 | C <sub>5</sub> H <sub>8</sub> (ONO <sub>2</sub> ) <sub>4</sub>                                   | + 516000  |
| Тротил              | C <sub>6</sub> H <sub>2</sub> (NO <sub>2</sub> ) <sub>3</sub> CH <sub>3</sub>                    | + 69300   |
| Тетрил              | C <sub>6</sub> H <sub>2</sub> (NO <sub>2</sub> ) <sub>3</sub> N(NO <sub>2</sub> )CH <sub>3</sub> | - 19678   |
| Гексоген            | C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> N <sub>3</sub> (NO <sub>2</sub> ) <sub>3</sub>                     | - 65482   |
| Пироксилин          | C <sub>24</sub> H <sub>29</sub> O <sub>9</sub> (ONO <sub>2</sub> ) <sub>11</sub>                 | + 2610000   |
| Коллодионный хлопок | C <sub>24</sub> H <sub>31</sub> O <sub>11</sub> (ONO <sub>2</sub> ) <sub>9</sub>                 | + 2950000   |
| Гремучая ртуть      | Hg(CNO) <sub>2</sub>   | - 258500  |
| Вода (пар)          | H <sub>2</sub> O   | + 241500  |
| Вода (жидкость)     | H <sub>2</sub> O   | + 286000  |
| Углекислый газ      | CO <sub>2</sub>  | + 395000  |
| Оксид углерода      | CO   | + 109800  |
| Оксид азота         | NO   | - 111200  |
| Закись азота        | N <sub>2</sub> O   | - 86400   |
| Метан               | CH <sub>4</sub>  | + 78000   |
| Целлюлоза           | C <sub>6</sub> H <sub>10</sub> O <sub>5</sub>  | + 839000  |
| Оксид алюминия      | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>   | + 1870000   |

Примечание. Знаком «+» обозначена молярная теплота, затрачиваемая на образование вещества, знаком «-» – молярная теплота, выделяющаяся в процессе образования вещества.

Следовательно, молярная теплота, кДж, взрыва 1 кмоль ВВ при постоянном объёме (т.е. в момент взрыва - до расширения газов взрыва)

$$Q_V = Q_T + 2396 \Sigma n. \quad (2.13)$$

Для 1 кг ВВ теплота, кДж, взрыва при постоянном объёме составит

$$Q'_v = Q_v / M_{ВВ}, \quad (2.14)$$

**Пример.** Определить количество теплоты, выделяющейся при взрыве аммонита 6ЖВ (исходные данные ВВ даны в пример 2).

**Решение.** По формуле (2.9) молярная теплота образования продуктов взрыва, кДж/кмоль

$$Q_{пв} = 395000 \cdot 7 + 241500 \cdot 23,9 = 8536850.$$

Вычисляем теплоту образования 1 кмоль ВВ. Для тротила  $Q_{ВВ1} = 69300$  кДж/кмоль – аммиачной селитры  $Q_{ВВ2} = 371000$  кДж/кмоль (табл. 2.1). Тогда

$$Q_{ВВ} = 69300 \cdot 1 + 371000 \cdot 10,7 = 69300 + 3969700 = 4039000.$$

Находим по формуле (2.8) молярную теплоту взрыва 1 кмоль ВВ

$$Q_T = 8536850 - 4039000 = 4497850 \text{ кДж/кмоль};$$

по уравнению (2.11) определим теплоту взрыва 1 кг аммонита 6ЖВ –

$$Q_T = 4153,1 \text{ кДж/кг};$$

по (2.11) – теплоту взрыва 1 кмоль аммонита 6ЖВ при постоянном объёме

$$Q_v = 4497850 + 43,2 \cdot 8,32 \cdot 288 = 4497850 + 103514,1 = 4601364 \text{ кДж/кмоль};$$

по формуле (2.4) – молярную массу аммонита 6ЖВ

$$M_{ВВ} = 227 \cdot 1 + 80 \cdot 10,7 = 1083 \text{ кг/кмоль};$$

по (2.13) – удельную теплоту взрыва 1 кг аммонита 6ЖВ при постоянном объёме

$$Q'_T = \frac{4601364}{1083} = 4248,7 \text{ кДж/кг}.$$

Опытным путём теплота взрыва определяется взрыванием или сжиганием ВВ в калориметрической бомбе, которая помещается в водяной калориметр.

**Определение температуры взрыва.** Максимальную температуру, до которой могут нагреваться при взрыве продукты взрывчатого превращения ВВ, называют *температурой взрыва*. Для аналитического расчёта предполагается, что взрывчатое разложение происходит при постоянном объёме и выделяющаяся теплота целиком расходуется на нагревание продуктов взрыва. Тогда температура взрыва, °С может быть вычислена по формуле

$$t = \frac{Q_v}{\sum n C_v}, \quad (2.15)$$

где  $C_v$  – молярная теплоёмкость газов взрыва, кДж/(кмоль°С).

Молярная теплоёмкость  $C_v$  для газов в момент взрыва, т. е. до их расширения, берётся при постоянном объёме. Для реальных газов  $C_v$  – величина переменная, зависящая от температуры, и различная для разных газов. Малляр и Ле-Шателье (Франция) предложили для её определения уравнение

$$C_v = a + bt,$$

где  $a$  – молярная теплоёмкость продуктов взрыва при 0°С (273 К);

$b$  – приращение молярной теплоёмкости при повышении температуры на 1°С.

Подставив указанное значение  $C_v$  в формулу температуры взрыва (2.14), получим

$$t = \frac{Q_V}{\sum n(a + bt)},$$

или

$$\sum nb t^2 + \sum nat - Q_V = 0.$$

Откуда

$$t = \frac{-\sum na + \sqrt{(\sum na)^2 + 4 \sum nb Q_V}}{2 \sum nb}. \quad (2.16)$$

Продукты взрыва состоят из твердых компонентов и газов, теплоёмкость которых различна. Поэтому величина  $\sum na$  означает суммарную молярную теплоёмкость продуктов взрыва при температуре 0°C, т. е.  $\sum na = n_1 a_1 + n_2 a_2 + \dots + n_n a_n$ . Точно так же  $\sum nb$  означает суммарное приращение молярной теплоёмкости продуктов взрыва при повышении их температуры на 1°, т. е.  $\sum nb = n_1 b_1 + n_2 b_2 + \dots + n_n b_n$ . В табл. 2.2 приведены значения параметров  $a$  и  $b$  некоторых химических элементов и соединений.

Определить температуру взрыва экспериментальным путём весьма сложно вследствие кратковременности процесса и большого давления взрыва. Наиболее точен оптический цветовой метод, основанный на определении энергии по сплошному непрерывному спектру, характерному для детонации, или на определении отношения значений яркости при двух длинах волн – метод “красно-синего сравнения”.

**Пример.** Определить температуру, развивающуюся при взрыве аммонита 6ЖВ (исходные данные ВВ даны в примере 2).

**Решение.** Температуру, развивающуюся при взрыве аммонита 6ЖВ, определим по формуле (2.16), а значения входящих параметров возьмем из табл. 2.2.

Определение приближенного значения.

Определение приближенного значения.  $m$  значения молярной теплоёмкости газов взрыва при 0°C и приращение молярной теплоёмкости при повышении температуры на 1°:

$$\begin{aligned} \sum na &= a_1 n_1 + a_2 n_2 + \dots = 26 \cdot (7 + 23,9) + 20 \cdot (12,2 + 0,1) = 803,4 + 246 = 1049,4 \text{ кДж/(кмоль}^\circ\text{C)}; \\ \sum nb &= b_1 n_1 + b_2 n_2 + \dots + 0,01 \cdot (7 + 23,9) + 0,004 \cdot (12,2 + 0,1) = 0,31 + 0,049 = 0,359 \text{ кДж/(кмоль}^\circ\text{C)}. \end{aligned}$$

Подставив значения параметров в формулу (2.16), получим

$$t = \frac{-1049,4 + \sqrt{(1049,4)^2 + 4 \cdot 4601239 \cdot 0,359}}{2 \cdot 0,359} = 2405,35^\circ \text{C}.$$

Температура взрыва аммонита 6ЖВ по Кельвину

$$T = 2405,35 + 273 = 2678,35 \text{ К}.$$

$$\sum na = 4 \cdot 41,52 + 23,9 \cdot 29,85 + 12,2 \cdot 23,45 + 0,1 \cdot 24,07 = 1591,56;$$

$$\sum nb = 7 \cdot 0,003262 + 23,9 \cdot 0,00522 + 12,2 \cdot 0,001352 + 0,1 \cdot 0,002209 = 0,2001;$$

$$t = \frac{-1591,56 + \sqrt{1591,56^2 + 4 \cdot 4601239 \cdot 0,2001}}{2 \cdot 0,2001} = 2252,9^\circ \text{C}$$

$$T = 2252,9^\circ \text{C} + 273 = 2525,9 \text{ К}$$

Значения параметров  $a$  и  $b$  некоторых химических элементов и соединений

| Компоненты<br>продуктов<br>взрыва | $a$ ,<br>кДж/(кмоль·<br>°С) | $b$ ,<br>кДж/(кмоль·°С) |
|-----------------------------------|-----------------------------|-------------------------|
| CO                                | 23,80                       | 0,001307                |
| CO <sub>2</sub>                   | 41,52                       | 0,003262                |
| H <sub>2</sub> O                  | 29,85                       | 0,00522                 |
| N <sub>2</sub>                    | 23,45                       | 0,001352                |
| O <sub>2</sub>                    | 24,07                       | 0,002209                |
| H <sub>2</sub>                    | 20,478                      | 0,002446                |
| C                                 | 3,23                        | 0,00668                 |
| HCl                               | 23,02                       | 0,00167                 |
| NO                                | 24,70                       | 0,001213                |
| Na <sub>2</sub> O                 | 52,4                        | 0,0317                  |
| NaCl                              | 34,88                       | 0,02188                 |
| NaF                               | 33,32                       | 0,02047                 |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>    | 94,73                       | 0,016814                |
| CaCl <sub>2</sub>                 | 63,70                       | 0,0043995               |
| KCl                               | 37,47                       | 0,0074163               |
| CaO                               | 40,57                       | 0,0042252               |
| K <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>    | 184,85                      | 0,003174                |

Примечание. Для расчетов можно принимать следующие приближенные значения  $a$  и  $b$ : для двухатомных компонентов продуктов взрыва (N<sub>2</sub>, CO и др.) –  $a=20$  кДж/(кмоль·°С),  $b=0,0042$  кДж/(кмоль·°С), а для трехатомных (CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O и др.) – 26 и 0,0105 кДж/(кмоль·°С) соответственно.

**Определение давления взрыва.** В случае очень высокого давления, которое в момент взрыва возникает в зарядной камере (шпуре, скважине), плотность газов взрыва близка к плотности жидкости. Поэтому при определении давления газов взрыва нельзя пренебрегать объемом молекул этих газов. Кроме того, при взрыве ВВ, содержащих твердые добавки, когда твердые компоненты образуются в процессе химического превращения, необходимо учитывать также объем твердого остатка.

Обычно давление, Па, газов взрыва рассчитывают по упрощенному уравнению Ван-дер-Ваальса. Формула применительно к взрыву 1 кг ВВ

$$P = \frac{P_0 V_0' T}{[V - (\alpha + \beta)] \cdot 273}, \quad (2.17)$$

где  $P_0$  – нормальное атмосферное давление при температуре 0°С, примерно равное  $1,01 \cdot 10^5$  Па;

$V_0'$  – объем газов взрыва 1 кг ВВ при нормальных условиях (при 0°С и давлении  $1,01 \cdot 10^5$  Па);

$T$  – температура взрыва ВВ, К;

$V$  – объем зарядной камеры, м<sup>3</sup>;

$\alpha$  – коэфф. газов взрыва, т. е. несжимаемый объем молекул газов взрыва, м<sup>3</sup>;

$\beta$  – объем твердых компонентов продуктов взрыва 1 кг ВВ (твердый остаток), м<sup>3</sup>.

Величина  $\alpha$  определяется размерами молекул газа и выражает собой неупругий, несжимаемый объем, занятый самими молекулами. Численное значение  $\alpha$  достаточно точно не установлено.

Для практических расчетов рекомендуются следующие значения  $\alpha$  при плотности ВВ более 1 кг/дм<sup>3</sup>  $\alpha = 0,0006V_0'$ ; до 1 кг/дм<sup>3</sup> –  $\alpha = 0,001V_0'$ .

Параметр  $\beta$  вычисляется по формуле

$$\beta = \frac{n_{T1}m_1 10^{-3}}{\rho_{S1}} + \frac{n_{T2}m_2 10^{-3}}{\rho_{S2}} + \dots + \frac{n_{Tn}m_n 10^{-3}}{\rho_{Sn}}, \quad (2.18)$$

где  $n_{T1}, n_{T2}, \dots, n_{Tn}$  - число молей твёрдых компонентов в продуктах взрыва;  
 $m_1, m_2, \dots, m_n$  - масса твёрдых компонентов продукта взрыва, г;  
 $\rho_{S1}, \rho_{S2}, \dots, \rho_{Sn}$  - физическая плотность твёрдых компонентов, кг/м<sup>3</sup>.

Теплота образования некоторых твёрдых продуктов взрыва при нормальном давлении и температуре 288 К, а также их плотность приведены в табл. 2.3.

Для упрощения расчётов целесообразно объём зарядной камеры заменить в формуле (2.17) плотностью заряжения:

$$\Delta_{зар} = m_{ВВ} / V,$$

где  $m_{ВВ}$  - масса заряда ВВ, кг.

При взрыве 1 кг ВВ, т. е. для условий расчёта давления

$$V = 1 / \Delta_{зар},$$

Подставив значение  $V$  в уравнение Ван-дер-Ваальса (2.16) и сделав преобразования, получим:

$$P = \frac{P_0 V_0' \Delta_{зар}}{[1 - (\alpha + \beta) \cdot \Delta_{зар}]} \cdot \frac{T}{273}, \quad (2.19)$$

Таблица 2.3

Физико-химические величины продуктов взрыва (твёрдых компонентов)

| Компоненты<br>продуктов взрыва  | Плотность, кг/м <sup>3</sup> | Молярная теплота<br>образования, кДж/кмоль |
|---------------------------------|------------------------------|--|
| CaO                             | 3370                         | 635100                                     |
| KCl                             | 1980                         | 436700                                     |
| NaCl                            | 2165                         | 411100                                     |
| Na <sub>2</sub> O               | 2390                         | 418000                                     |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>   | 2390                         | 1507000                                    |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>  | 3900                         | 1670200                                    |
| Na <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> | 2536                         | 1924600                                    |
| CaCl <sub>2</sub>               | 2150                         | 797440                                     |

Как следует из формулы (2.18), давление газов взрыва ВВ, не содержащих в продуктах взрыва твёрдых веществ ( $\beta=0$ ), например, аммонита БЖВ, определится по формуле:

$$P = \frac{P_0 V_0' T \Delta_{зар}}{(1 - \alpha \Delta_{зар}) \cdot 273},$$

Плотность заряжения:

$$\Delta_{зар} = \left( \frac{d_{п}}{d_{ш}} \right)^2 \cdot \Delta_{ВВ}, \quad (2.20)$$

где  $d_{п}$  - диаметр патронов (заряда) ВВ, мм;  
 $d_{ш}$  - диаметр зарядной камеры (шпура), мм;  
 $\Delta_{ВВ}$  - плотность патронирования ВВ, кг/м<sup>3</sup>.

**Пример 1.** Определить давление продуктов взрыва аммонита 6ЖВ в зарядной камере. Диаметр патронов ВВ – 32 мм, диаметр шпура – 43 мм. Плотность ВВ – 1100 кг/м<sup>3</sup>. Остальные данные приведены в подразделах 2.4.1– 2.4.3.

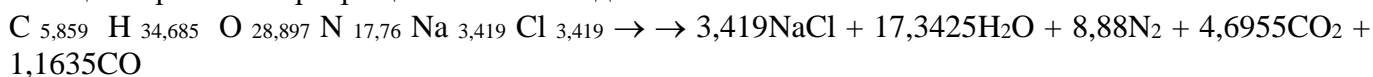
*Решение.* Для указанного диаметра шпура подсчитаем плотности заряжения по формуле (2.21)

$$\Delta_{\text{зар}} = \frac{0,032^2}{0,043^2} \cdot 1100 = 609 \text{ кг/м}^3.$$

Определим давление газов взрыва по формуле (2.20)

$$P = \frac{1,1 \cdot 10^5 \cdot 0,894 \cdot 2678,35 \cdot 609}{(1 - 8,94 \cdot 10^{-4} \cdot 609) \cdot 273} = 1198 \text{ МПа}.$$

**Пример 2.** Определить давление продуктов взрыва аммонита Т-19 в зарядной камере. Диаметр патронов ВВ – 36 мм, диаметр шпура – 43 мм, плотность ВВ равна 1050 кг/м<sup>3</sup>, теплота взрыва – 3352 · 10<sup>3</sup> Дж/кг, температура взрыва – 2503 К, удельный объём газов взрыва – 0,724 м<sup>3</sup>/кг. Реакция взрывного превращения имеет вид



*Решение.* По формуле (2.19) определяем:

$$\Delta_{\text{зар}} = \frac{34^2}{43^2} \cdot 1050 = 736,0 \text{ кг/м}^3.$$

По формуле (2.17) с учётом данных табл. 2.3 рассчитываем:

$$\beta = \frac{3,149 \cdot (22,98977 + 35,453) \cdot 10^{-3}}{2165} = 9,23 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3,$$

$$\alpha = 0,001 V_0' = 72,4 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3.$$

Подставив значение входящих параметров в формулу (2.18), получим:

$$P = \frac{101325 \cdot 0,724 \cdot 2503 \cdot 736}{[1 - (72,4 - 9,23) \cdot 10^{-5} \cdot 736] \cdot 273} = 1237574078 \text{ Па} = 1237,6 \text{ МПа}.$$

### Тема 3. Составы, производство и испытания промышленных ВВ.

#### *Классификация ВВ по химическому составу. Технологии изготовления промышленных ВВ*

ВВ можно классифицировать по различным признакам:

- по принадлежности к определенному классу химических соединений (нитроэфиры, нитросоединения, нитроамины, перхлоратные ВВ и т. п.),
- по устойчивости горения,
- по условиям применения и т. д.

Так, по скорости протекания реакции ВВ могут быть разделены на:

- иницирующие (или первичные),
- бризантные (или вторичные),
- метательные (пороха)
- пиротехнические составы.

Особенностью иницирующих ВВ является их высокая чувствительность к внешним воздействиям. Поэтому иницирующие ВВ широко используют в различных средствах взрывания. Небольшое количество иницирующего ВВ поджигают при помощи огнепроводного шнура (в капсюлях-детонаторах) или электровоспламенителя (в электродетонаторах), горение его быстро переходит в детонацию, которая возбуждает взрыв вторичного ВВ.

Горение вторичных ВВ обычно устойчиво и переход в детонацию возможен лишь при некоторых условиях, поэтому детонацию вторичных ВВ вызывают не поджиганием, а используют для этого средства взрывания (электродетонаторы, детонирующий шнур и т. п.).

Горение метательных ВВ и пиротехнических составов весьма устойчиво и не переходит в детонацию даже в условиях, при которых этот переход имеет место для вторичных ВВ.

По составу ВВ обычно подразделяют на:

- индивидуальные химические соединения
- смесевые ВВ, представляющие механические смеси нескольких компонентов.

К **индивидуальным** взрывчатым химическим соединениям относятся такие ВВ, как тротил, тетрил, гексоген, нитроглицерин, азид свинца, тэн и др.

К **смесевым** принадлежит большинство промышленных ВВ: аммониты, динамиты, гранулиты, водонаполненные ВВ и др.

Рассмотрим основные группы индивидуальных и смесевых ВВ, имеющих применение в настоящее время в горнодобывающей промышленности нашей страны.

**Нитросоединения.** Большое количество взрывчатых химических соединений относится к группе нитросоединений, представляющих органические вещества, в молекуле которых имеется нитрогруппа  $\text{NO}_2$ , связанная непосредственно с углеродом. К нитросоединениям относятся такие ВВ, как тротил, тетрил, динитронафталин, пикриновая кислота и др. Различают нитросоединения бензольного (ароматического) и парафинового рядов.

Нитросоединения ароматического ряда отличаются высокой химической стойкостью, они неспособны к самопроизвольному разложению и самовозгоранию и почти не меняют своих химических и физических свойств при длительном хранении.

Число нитрогрупп, имеющих в молекуле, их положение могут быть различными, в соответствии с этим изменяются химические, физические и взрывчатые свойства нитросоединений.

При увеличении числа нитрогрупп в молекулах нитросоединений повышается их температура плавления и увеличивается скорость детонации и работоспособность. Наибольшее распространение во взрывном деле находят тринитросоединения ароматического ряда, т. е. такие, у которых бензольное кольцо связано с тремя нитрогруппами. Характерным представителем таких веществ является тринитротолуол (тол) или тротил.



**Тротил**  $C_6H_2(NO_2)_3CH_3$  представляет собой твердое белое (быстро желтеющее на свету) вещество, имеющее температуру плавления  $80,2^\circ$ . Плотность тротила  $1,663 \text{ г/см}^3$ . Тротил практически нерастворим в воде, но хорошо растворяется в органических растворителях.

Детонационная способность тротила зависит от его физического состояния, дисперсности и плотности: с увеличением размера частиц критический диаметр детонации его увеличивается, с увеличением же плотности — уменьшается.

Скорость детонации тротила при плотности  $1,6 \text{ г/см}^3$  равна  $6800 \text{ м/с}$ . Критический диаметр детонации сухого гранулированного тротила в открытых зарядах около  $60 \text{ мм}$ , а водонаполненного —  $25\text{-}30 \text{ мм}$ .

В зависимости от плотности и условий взрывания тротила, теплота взрыва его колеблется от  $800$  до  $1000 \text{ ккал/кг}$ . Работоспособность его в свинцовой бомбе сравнительно невелика —  $295 \text{ см}^2$ , что объясняется наличием в продуктах взрыва твердого углерода (сажи), так как тротил имеет отрицательный кислородный баланс ( $-74\%$ ).

Для повышения энергии взрыва и работоспособности в тротил иногда вводят алюминиевый порошок. Опыт показал, что оптимальное количество алюминия составляет  $15\text{—}20\%$  и поэтому выпускаемый нашей промышленностью алюмотол содержит  $15\%$  алюминия.

**Нитроамины.** Органические вещества, в молекуле которых имеется нитрогруппа, связанная с атомом азота, называются нитроаминами. Многие из нитроаминов являются ВВ, например циклотриметилентринитрамин, широко известный под названием гексоген ( $C_3H_6N_6O_6$ ). До недавнего времени гексоген применяли в основном для снаряжения боеприпасов, но в последнее время его стали использовать как сенсibilизатор в промышленных ВВ, в качестве вторичного заряда в электродетонаторах и для снаряжения детонирующего шнура.

Гексоген представляет собой белый кристаллический порошок с температурой плавления  $+203,5^\circ \text{ С}$ . Плотность его около  $1,8 \text{ г/см}^3$ . Гексоген практически нерастворим в воде и плохо растворяется в органических растворителях. Химическая стойкость гексогена высокая; разложение его начинается лишь при температуре  $+200^\circ \text{ С}$ .

Гексоген обладает высокой чувствительностью к механическим воздействиям (чувствительность к удару  $70\text{-}90\%$ ) и поэтому его часто используют во флегматизированном виде.

Работоспособность гексогена в свинцовой бомбе  $475 \text{ см}^3$ , теплота взрыва около  $1300 \text{ ккал/кг}$ . Гексоген имеет малый критический диаметр ( $1\text{-}2 \text{ мм}$ ) и детонирует с высокой скоростью (при плотности  $1,7 \text{ г/см}^3$  она равна  $8,6 \text{ км/с}$ ).

Другим представителем класса нитроаминов является тетрил [ $C_6H_2(NO_2)_4NCH_3$ ], это кристаллы желтого, или светло-желтого цвета. Температура плавления тетрила около  $+129^\circ \text{ С}$ , при плавлении разлагается. Теплота взрыва тетрила -  $1090 \text{ ккал/кг}$ , работоспособность -  $340 \text{ см}^3$ .

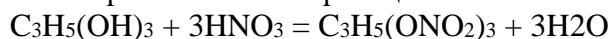
Тетрил применяют в прессованном виде в основном для снаряжения капсулей-детонаторов. Иногда прессованные шашки его используют в качестве промежуточных детонаторов для инициирования скважинных зарядов гранулированных и водонаполненных ВВ.

**Нитроэфиры.** Нитроглицерин является представителем большой группы ВВ, которые по своему химическому строению относятся к эфирам азотной кислоты. Название нитроглицерин — неправильно, так как это соединение не содержит нитрогрупп, связанных непосредственно с углеродом, но оно общепринято и сохранилось в технике. В действительности это соединение представляет собой глицеринтринитрат и является полным эфиром глицерина и азотной кислоты.

Сложные эфиры азотной кислоты (нитроэфиры) в недалеком прошлом имели большое военное и промышленное значения. Особенно широко использовали азотнокислые эфиры глицерина и целлюлозы — нитроглицерин и пироксилин, которые и в настоящее время применяют при производстве порохов. В производстве промышленных ВВ эти вещества, а также нитроглицоль, диэтиленгликольдинитрат и тэн находят ограниченное применение и используются главным образом для производства детонитов и предохранительных ВВ (V и VI класса).

Наличие в молекуле нитроэфиров нитратной группы ( $ONO_2$ ) приводит к тому, что они по своим свойствам резко отличаются от других ВВ. Это отличие выражается прежде всего в ограниченной химической стойкости нитроэфиров и их высокой чувствительности к механическим и тепловым воздействиям. Поэтому обращение с этими ВВ требует особого внимания и осторожности.

Нитроглицерин получают обработкой специального (очень чистого) глицерина смесью азотной и серной кислот по реакции:



Нитроглицерин в чистом виде представляет собой маслянистую бесцветную и прозрачную жидкость плотностью около 1,6 г/см<sup>3</sup>. Нитроглицерин плохо растворяется в воде и хорошо растворяется в большинстве органических растворителей. Температура вспышки нитроглицерина примерно равна +180—200° С.

Нитроглицерин имеет небольшой положительный кислородный баланс (+3,5 %) и является одним из наиболее мощных ВВ. Теплота взрыва нитроглицерина 1480 ккал/кг; при взрывании в свинцовой бомбе он дает расширение 550 см<sup>3</sup>.

Для нитроглицерина и некоторых ВВ на его основе характерно наличие двух скоростей детонации: малой (1100—2000 м/с) и большой (8000—8500 м/с). Однако вследствие очень высокой чувствительности нитроглицерина (детонация его вызывается падением груза массы 2 кг с высоты всего 4 см) его нельзя использовать для взрывных работ в чистом виде. Поэтому нитроглицерин обычно вводят во взрывчатые смеси в качестве сенсibilизатора.

Так как замерзший нитроглицерин (температура замерзания его +13° С) чрезвычайно чувствителен к механическим воздействиям, в качестве сенсibilизатора используют не чистый нитроглицерин, а смесь жидких нитроэфиров, например нитроглицерин и диэтиленгликольдинитрат.

Из других нитроэфиров в настоящее время находит применение тэн (пентаэритриттетранитрат) С(CH<sub>2</sub>ONO<sub>2</sub>)<sub>4</sub>. Это белое кристаллическое вещество плотностью 1,728 г/см<sup>3</sup> с температурой плавления 141° С.

В отличие от жидких нитроэфиров, тэн — химически стойкое вещество, не требующее постоянного контроля за стойкостью при хранении. Температура вспышки тэна 205° С. Он имеет высокую чувствительность к удару и поэтому чаще всего его выпускают флегматизированным.

Тэн является мощным ВВ, теплота взрыва 1360 ккал/кг, работоспособность по пробе Трауця 500 см<sup>3</sup>, скорость детонации тэна при плотности 1 г/см<sup>3</sup> равна 5,55 км/с, а при плотности 1,62 г/см<sup>3</sup> — 8,0 км/с. Применяют тэн главным образом при изготовлении детонирующего шнура, а также при изготовлении промежуточных детонаторов.

**Аммониты.** Аммонитами называют аммиачно-селитренные ВВ, представляющие смеси аммиачной селитры с нитросоединениями, главным образом с тротилом. Аммониты получают путем механического смешения аммиачной селитры с тротилом и другими компонентами в шаровых мельницах.

Несмотря на отмеченные недостатки, аммониты одно время являлись основным видом промышленных ВВ в нашей стране, так как они обладали достаточной мощностью, были недороги и относительно малочувствительны к механическим воздействиям. Благодаря этим достоинствам аммониты не утратили значения и в настоящее время. Однако область применения их теперь ограничена подземными разработками, так как на открытых работах их используют сейчас в основном в качестве промежуточных детонаторов и для вторичного дробления негабаритных кусков породы.

Чтобы знать, в каких условиях можно применять тот или иной аммонит (так же как и любое другое ВВ), их патронируют в бумажные оболочки различного цвета или в белые оболочки с отличительной цветной диагональной полосой. Так, взрывчатые вещества, допущенные для применения только на открытых работах имеют белую оболочку (или белую диагональную полосу); патроны ВВ, предназначенные к применению в подземных разработках, кроме шахт, опасных по газу или пыли, окрашивают в красный цвет; ВВ, допущенные к взрывным работам в шахтах, опасных только по газу, имеют синюю оболочку, а ВВ, разрешенные к применению по углю в шахтах, опасных по газу или пыли, желтую.

В зависимости от условий применения аммониты значительно различаются как по составу, так и по свойствам.

Характерной особенностью аммонитов, как и большинства смесевых ВВ является то, что при повышении плотности критический диаметр детонации их увеличивается. Поскольку диаметр патронов ограничен (обычно 31 ± 1 мм), при некоторой, характерной для каждого вида аммонита плотности критический диаметр соизмерим с диаметром патрона и он не детонирует. Эта

плотность называется критической плотностью и для большинства аммонитов составляет 1,3— 1,4 г/см<sup>3</sup>. Повысить критическую плотность можно введением в состав аммонита более мощных, чем тротил, сенсibilизаторов, таких, как гексоген. Так, содержащий гексоген скальный аммонит № 1 имеет критическую плотность около 1,5 г/см<sup>3</sup>, что позволяет применять его в спрессованных до плотности 1,45 г/см<sup>3</sup> зарядах. Прессование ВВ увеличивает объемную энергию заряда и повышает эффективность взрыва. С этой же целью во взрывчатые составы входят порошкообразный алюминий, повышающий теплоту взрыва ВВ.

### **Нитроглицериновые ВВ:**

- динамиты
- порошкообразные нитроглицериновые ВВ.

Характерным свойством динамитов является высокая плотность (1,4—1,5 г/см<sup>3</sup>) и пластичность, что обусловлено высоким содержанием в их составе желатинированного нитроглицерина (от 15 до 90%)

**Динамиты** обладают высокой работоспособностью и водостойчивостью.

Недостатками динамитов являются: высокая чувствительность к механическим воздействиям и сильное влияние температуры на их взрывчатые характеристики. Поэтому в настоящее время в нашей стране динамиты почти не применяют.

Группа порошкообразных нитроглицериновых ВВ представлена в нашей стране детонитами и предохранительными нитроглицериновыми ВВ (победит ВП-4, серный и нефтяной аммониты и углениты).

**Детонитами** называют аммиачно-селитренные ВВ, сенсibilизированные нитроэфиром и предназначенные для взрывных работ в шахтах, не опасных по газу и пыли.

Сенсibilизация ВВ жидкими нитроэфиром особенно важна для предохранительных ВВ, имеющих ограниченную теплоту взрыва и пониженную детонационную способность

**Победит ВП-4** является мощным предохранительным ВВ, предназначенным к применению в породных забоях шахт, опасных по метану.

**Угленит Э-6 и селектит № 1** относятся к ВВ повышенной предохранительности (V класс) и используются при короткозамедленном взрывании в угольных и смешанных тупиковых забоях. Угленит № 7 является селективно детонирующим высокопредохранительным ВВ (VI класс).

Серный и нефтяной аммониты предназначены к применению в шахтах, опасных соответственно по серной пыли и бензиновым парам.

### **ВВ простейшего состава.**

К ВВ простейшего состава относятся механические смеси аммиачной селитры с горючими невзрывчатыми добавками. В настоящее время различают три группы ВВ простейшего состава:

- динамоны,
- гранулиты

- смеси гранулированной аммиачной селитры (АС) с жидкими нефтепродуктами (обычно с дизельным топливом ДТ). Последние составы в нашей стране широко известны как **игданит**, за рубежом как смеси АС-ДТ.

**Динамонами** называют механические смеси мелкодисперсной аммиачной селитры с горючими невзрывчатыми добавками, причем для динамонов характерно использование твердых горючих веществ, таких, как древесная мука, торф, лигнин, древесный уголь, парафин, алюминиевый порошок и т. п.

Наряду с игданитами, изготавливаемыми на местах их применения, нашей промышленностью выпускаются аналогичные составы заводского изготовления — **гранулиты**, которые предназначены для взрывных работ на открытых и подземных разработках по породам различной крепости.

**Гранулит-М** представляет собой смесь пористой гранулированной селитры и минерального масла.

**Гранулит С-2** изготавливают на обычной непористой гранулированной селитре марки Б, которая смешана с минеральным маслом и мелкодисперсной пористой древесной мукой.

Наиболее распространенные **гранулиты АС-4 и АС-8** представляют собой однородные по внешнему виду гранулированные ВВ серебристо-серого цвета. Изготавливают их из гранулированной аммиачной селитры, покрытой пленкой минерального масла и опудренной мелкодисперсным алюминием.

Благодаря опудривающим добавкам гранулиты отличаются малой слеживаемостью и хорошей сыпучестью.

Все гранулиты и игданит устойчиво детонируют при применении промежуточного детонатора, представляющего собой шашку прессованного тротила или тетрила массой 150—200 г или патрон аммонита. массой 200—400 г.

Существенным недостатком всех гранулитов является их неводоустойчивость.

**Зерногранулиты и граммоналы.** Для взрывных работ на открытых разработках в настоящее время широко используют гранулированные ВВ — зерногранулиты 30/70, 30/70-В и 50/50-В, а также граммонал А-45.

**Зерногранулитами** называют грубодисперсные аммониты, изготовленные путем механического смешения гранулированной аммиачной селитры и гранулированного тротила (гранулола). Примером такого типа составов является зерногранулит 30/70, содержащий 30% аммиачной селитры и 70% тротила.

Для взрывных работ в подземных условиях применяют зерногранулит 79/21 (горячего смешения) и граммонал А-8, предназначенные для беспатронного механизированного заряжания мокрых и обводненных (с непроточной водой) шпуров.

Зерногранулиты отличаются от гранулитов лучшей детонационной способностью и водоустойчивостью.

**Водонаполненные ВВ.** В последние годы на основе аммиачно-селитренных ВВ был создан новый класс ВВ, имеющих в своем составе воду, названных поэтому водонаполненными ВВ. Эти ВВ обладают высокой объемной мощностью, хорошей пластичностью, водоустойчивостью и низкой чувствительностью к механическим воздействиям.

Добавление воды к аммиачно-селитренным ВВ снижает коэффициент трения между гранулами, в результате чего происходит уплотнение состава. Кроме того, благодаря хорошей растворимости аммиачной селитры значительное количество ее переходит в раствор, который заполняет пространство между зёрнами твердых компонентов. В результате плотность взрывчатых составов возрастает до 1,5 г/см<sup>3</sup>. Соответственно увеличивается и объемная концентрация энергии в заряде, что улучшает эффект взрыва.

Сравнительная оценка водонаполненных и простейших взрывчатых составов показывает, что:

1. Объемная концентрация энергии в шпуре или скважине у водонаполненных ВВ в 1,5—2,5 раза больше, что обеспечивает лучшее использование выбуренного объема;
2. Давление, развиваемое при взрыве водонаполненных ВВ в шпуре или скважине в несколько раз больше, чем при применении игданита и гранулитов;
3. Благодаря более высокому давлению при применении водонаполненных ВВ обеспечивается лучшее дробление породы, снижение выхода негабарита, а в целом — повышение эффективности ведения горных работ;
4. Водонаполненные ВВ обладают высокой водостойкостью, в то время как ВВ простейшего состава — неводостойки.

К группе водонаполненных ВВ, применяемых в настоящее время в нашей стране, относятся акватола 65/35, М-15 и МГ, акваниты ЗЛ и № 16 и ифзаниты.

В состав акватола входят аммиачная селитра, тротил, загуститель (обычно натриевая соль карбоксиметилцеллюлозы — КМЦ) и вода. В акватола М-15 и МГ, а также в ифзаниты добавляют крупный алюминиевый порошок. Акватола обычно изготавливают на заводах в виде сухих сыпучих смесей. Операцию водонаполнения чаще всего производят на месте проведения взрывных работ. Содержание воды в акватолах при водонаполнении не должно превышать 13—15%. При меньшем содержании воды масса обладает недостаточной текучестью, а при большем — снижается объемная концентрация энергии и ухудшаются детонационные свойства состава.

Помимо заводского изготовления водонаполненные ВВ изготавливают непосредственно на горных предприятиях либо на стационарной установке (при расходном складе взрывчатых материалов), либо в процессе заряжания скважин с помощью смесительно-зарядных установок, оборудованных на автомашинах.

В отличие от акваторов, акваниты не обладают явно выраженной текучестью, так как содержание воды в них не превышает 4—12%. Поэтому акваниты можно снаряжать в бумажные и полиэтиленовые патроны при плотности 1,5—1,6 г/см<sup>3</sup>.

В последнее время в нашей стране и за рубежом большое внимание уделяется изучению и разработке так называемых металлизированных водонаполненных ВВ, состоящих из аммиачной селитры, мелкодисперсного алюминия, воды и загустителя. Эти ВВ не содержат взрывчатых компонентов и поэтому малочувствительны к механическим воздействиям. В то же время они обладают очень высокой объемной концентрацией энергии и могут оказаться весьма эффективными при взрывных работах по крепким породам.

#### **Прочие ВВ.**

В ряде стран находят применение перхлоратные ВВ, окислителем в которых являются перхлораты калия, натрия и аммония.

Большинство перхлоратов растворимо в воде и органических растворителях. Перхлораты калия и натрия не обладают взрывчатыми свойствами, а перхлорат аммония является слабым ВВ: работоспособность в свинцовой бомбе составляет 200 см<sup>3</sup>.

Перхлоратные ВВ, как правило, имеют высокую теплоту взрыва и работоспособность. Однако вследствие высокой стоимости перхлоратов и большой чувствительности к механическим воздействиям эти ВВ не нашли применения в промышленности.

Одно время в нашей стране применяли оксиликвиты, которые по составу можно было бы отнести к простейшим ВВ. Их готовят пропиткой жидким кислородом измельченных углеродистых поглотителей: древесного угля, торфа, мха-сфагнума и др. Изготавливают оксиликвитные заряды в две стадии. Сначала готовят из углеродистых поглотителей патроны. Перед заряжением эти патроны пропитывают жидким кислородом в специальных термосах.

Оксиликвиты имеют очень высокую расчетную теплоту взрыва (1600—2300 ккал/кг) однако практический эффект взрыва мало отличается от эффекта, производимого аммиачно-селитренными ВВ. Это объясняется тем, что свойства оксиликвитов непрерывно меняются в связи с быстрым испарением жидкого кислорода и взрывание патронов в основном осуществляется в тот момент, когда оксиликвитные патроны уже имеют значительный отрицательный кислородный баланс. В связи с производством других, более совершенных — безопасных и удобных в обращении промышленных ВВ оксиликвиты в настоящее время утратили свое значение.

Ограниченное применение для взрывных работ находят пороха, однако раньше их достаточно широко использовали в горнодобывающей промышленности многих стран мира.

### ***Оценка эффективности и качества промышленных ВВ***

#### **Методы испытаний промышленных ВВ**

Для определения характеристик ВВ подвергают различного рода испытаниям:

а) для оценки взрывчатых свойств:

- скорость детонации;
- бризантность;
- работоспособность;

б) для проверки качества ВВ, соответствия ТУ или ГОСТу и пригодности к применению:

- полнота детонации;
- передача детонации от патрона к патрону;
- физическая и химическая стойкость;
- влажность;
- экссудация (для ВВ на основе нитроэфиров);

в) для определения чувствительности ВВ и опасности обращения с ними:

- чувствительность к удару и трению;

- чувствительность к тепловому и иницирующему импульсу;
- склонность к пылению и электризации;
- г) для определения технологичности применения:
  - гигроскопичность;
  - расслаиваемость;
  - сыпучесть;
  - гранулометрический состав;
  - водоустойчивость.

### Методы определения взрывчатых свойств ВВ

Для определения скорости детонации ВВ разработаны и используются три основных метода: метод Дотриша, осциллографический и фотографический.

*Метод Дотриша* - производится сравнение известной скорости детонации детонирующего шнура ( $v_{дш}$ ) со скоростью детонации испытуемого ВВ (рис. 1).

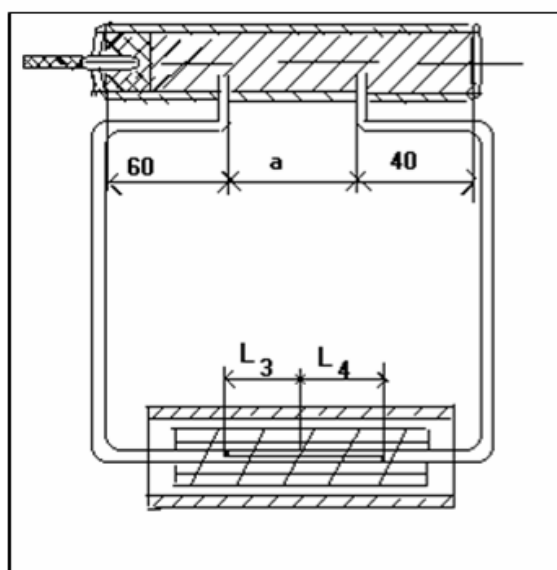


Рис. 1. Определение скорости детонации по методу Дотриша

Испытуемое ВВ (1) помещается в стальную трубу (2) длиной  $\approx 450$  мм. Труба с двух сторон завинчивается крышками (3), в одной из которых есть отверстие для капсюля-детонатора или электродетонатора (4). В боковой поверхности трубы имеются два отверстия для отрезков ДШ (5).

Свободные концы ДШ крепят на стальной пластинке (6). При взрыве детонация распространяется по заряду ВВ и по обеим ветвям ДШ. В месте на пластинке, где детонационные волны встретятся, образуется четкое характерное углубление (точка К). Расчет скорости детонации производится из предположения, что время, в течение которого проходят детонационные волны по первому отрезку ДШ и по второму (плюс испытуемое ВВ) равны.

$$\frac{|AK|}{v_{дш}} = \frac{|AB|}{v_{вв}} + \frac{|BK|}{v_{дш}} \quad (3.1)$$

Приняв  $|AK| = L_1$ ,  $|AB| = L_2$ ,  $|BK| = L_3$  и выразив из (3.1)  $v_{вв}$ , получим выражение для расчета скорости детонации

$$v_{вв} = \frac{v_{дш} \cdot L_2}{L_1 - L_3}$$

Данный метод позволяет определить скорость детонации ВВ с точностью  $\pm 3\%$ .

*Осциллографический метод* (рис. 2). В заряде (1) испытуемого ВВ размещают на определенных расстояниях несколько датчиков (2) и собирают электрическую цепь, которая соединяется с электронным осциллографом (3). При распространении по заряду детонационной волны замыкаются искровые промежутки датчиков за счет ионизированных веществ в зоне

химических реакций. На экране осциллографа фиксируются характерные всплески напряжения. Всплесков на экране будет столько, сколько датчиков размещено в заряде.

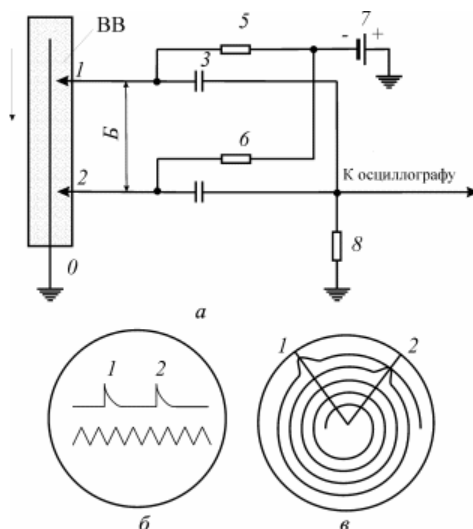


Рис. 2. Схема к определению скорости детонации ( $V_d$ ).

Зная расстояния между датчиками и скорость развертки сигнала на экране осциллографа, можно рассчитать скорость детонации как на всей длине заряда, так и на отдельных участках. Точность определения скорости детонации по этому методу составляет  $\pm 1\%$ .

Измерение скорости детонации *фотографическим методом* основано на фоторегистрации светящегося фронта детонационной волны, распространяющейся по заряду ВВ, находящемуся в стеклянной трубке (рис. 3). На принципиальной схеме заряд ВВ (1) располагается перпендикулярно оси объектива (2) скоростного фоторегистратора. Изображение проецируется на пленку (6) через регулируемую щель (3), объектив (4) и вращающееся зеркало (5). При вращении зеркала световая полоска изображения процесса перемещается вдоль фокальной плоскости, экспонируя при этом фотопленку.

Перемещение светящейся зоны детонации в сочетании с движением изображения по пленке дает линию, наклон которой определяет скорость детонации заряда ВВ. Скорость детонации рассчитывается по формуле:

$$v_d = \frac{V_p}{k} \operatorname{tg} \varphi, \quad (3.2)$$

где  $V_p$  - скорость развертки изображения, м/с;

$k$  - коэффициент поперечного увеличения системы (отношение длины изображения на пленке к длине заряда);

$\varphi$  - угол наклона кривой, град.

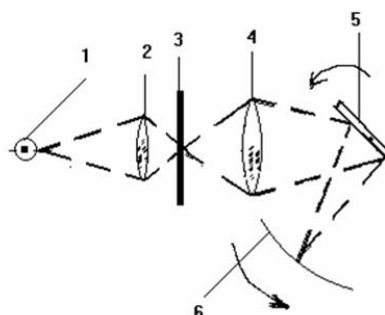
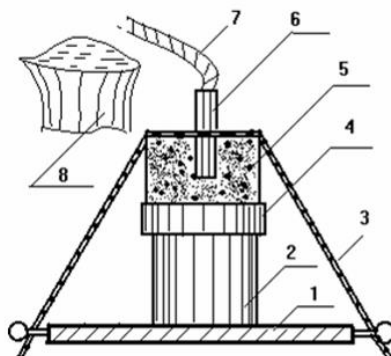
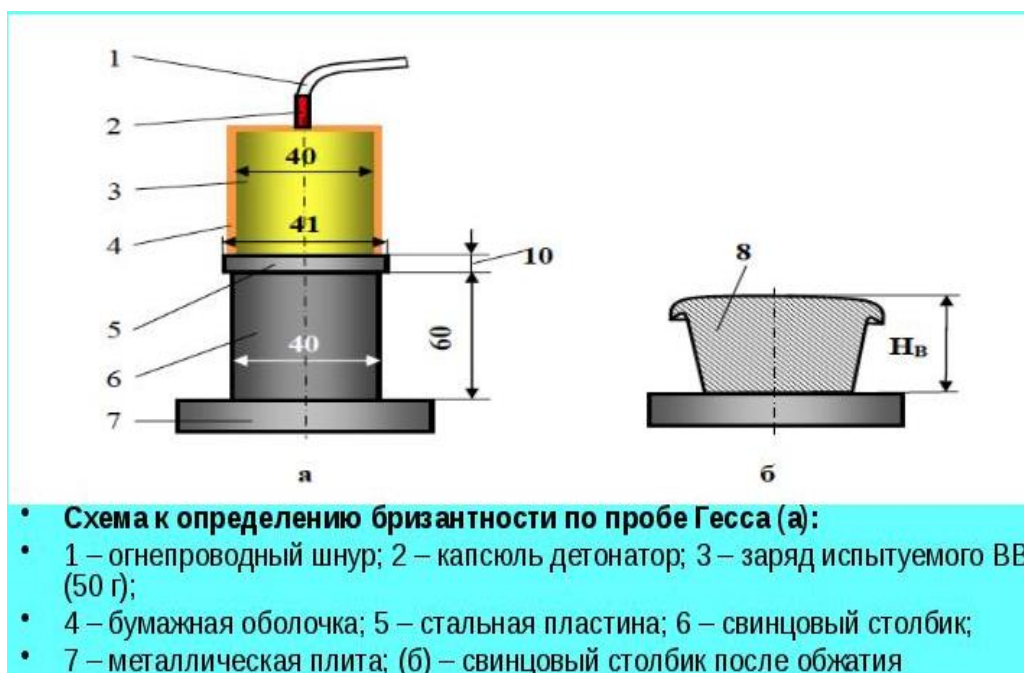


Рис. 3. Принципиальная схема к определению скорости детонации фотографическим методом

Характеристика ВВ, определяющая способность измельчать породу на контакте с ВВ и в непосредственной близости от него называется бризантностью. Эта работа определяется концентрацией энергии во фронте детонационной волны. Бризантность, следовательно,



пропорциональна  $V_d^2$  и прямо пропорциональна плотности ВВ. Одним из основных сравнительных методов определения бризантности является метод обжатия свинцовых столбиков (проба Гесса) (рис. 4).



Для определения бризантности по методу Гесса на стальную плиту (1) устанавливается свинцовый цилиндр (2) диаметром 40 мм и высотой 60 мм. На свинцовый цилиндр устанавливается стальная прокладка (3) толщиной 10 мм и диаметром 41 мм, а на нее заряд ВВ (4) массой 50 г при плотности  $1 \text{ г/см}^3$  в бумажном стакане. Испытание гранулированных и водонаполненных ВВ проводят при собственной плотности. Собранную установку закрепляют шпагатом (3) так, чтобы все изделия располагались строго по одной оси. При взрыве заряда ВВ продукты детонации наносят удар по стальной прокладке и через нее по свинцовому столбику, который деформируется (рис. 9, б) и приобретает грибовидную форму. Бризантность испытуемого ВВ оценивается по разности высот свинцового столбика до и после испытаний. Испытание производят дважды и высоту столбика после испытаний измеряют в четырех диаметрально противоположных точках. Бризантность определяется по формуле:

$$B = H_{до} - H_{пф} \quad (3.3)$$

где  $H_{до}$  - высота свинцового столбика до испытаний,  $H = 60 \text{ мм}$

$H_{пф}$  - средняя высота столбика после испытаний, мм.



Грубодисперсные ВВ с пониженной детонационной способностью ( $d_{кр} > 40$  мм) помещают в стальную гильзу. ( В таблицах обязательно указываются условия проведения испытаний).

Характеристика, определяющая способность ВВ производить общую работу и в идеальном случае равная механическому эквиваленту теплоты взрыва, называется *работоспособность (фугасность)*.

Самым распространенным методом определения работоспособности ВВ является проба Трауця (свинцовая бомба) (рис. 10). В данной установке определяется работоспособность порошкообразных, гранулированных и других ВВ, у которых критический диаметр детонации ( $d_{кр}$ ) в данных условиях не более 20 мм.

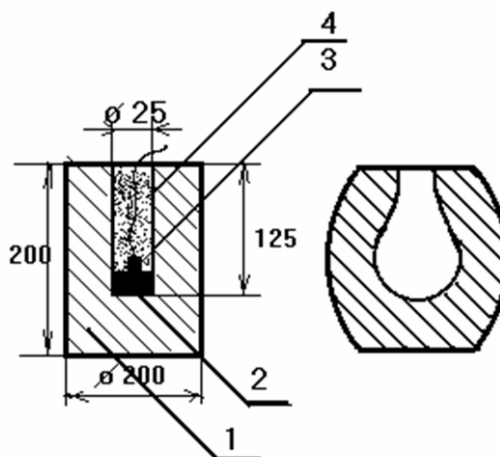


Рис. 5. Схема к определению работоспособности ВВ в свинцовой бомбе

а) до испытаний; б) после испытаний.

Навеску ВВ массой 10 г и электродетонатор размещают в бумажном стаканчике ( 1 ) и опускают в канал свинцовой бомбы ( 2 ). Свободную часть канала засыпают забойкой (кварцевый песок) ( 3 ). В результате взрыва происходит расширение канала бомбы (рис. 10 б). Производится измерение объема канала бомбы до взрыва ( $V_d$ ) и после взрыва ( $V_n$ ). Работоспособность (  $P_v$ ,  $см^3$  ) определяется по формуле

$$P_v = V_d - V_n - V_k, \quad (2.4)$$

где  $V_k$  - прирост объема бомбы за счет взрыва ЭД,  $см^3$

$$V_d \cong 30 \text{ см}^3.$$

Недостатком данного метода является то, что при  $P_v > 420 \text{ см}^3$  стенки бомбы становятся тонкими и расширение внутренней полости происходит быстрее, чем рост энергии самого ВВ.

Существует ряд установок (баллистическая мортира, баллистический маятник) в которых можно проводить испытания значительно больших по массе образцов ВВ (до 500 г). К примеру, на баллистическом маятнике кроме работоспособности можно определять и тротильный эквивалент, который равен отношению энергии которая выделяется при взрыве испытуемого ВВ (200 г) к энергии которая выделяется при взрыве эталонного ВВ той же массы (тротил).

### Методы проверки качества ВВ

Во время хранения и транспортирования ВВ возможно изменение их свойств. Поэтому во время хранения производится периодическая проверка качества ВВ. Испытания регламентированы "Едиными правилами безопасности при взрывных работах" и проводятся в следующих случаях: при поступлении на склад, при возникновении сомнений в доброкачественности ВВ, в конце гарантийного срока. Испытания проводят взрывники предприятия под руководством заведующего складом.

Все взрывчатые материалы, поступающие на склад, подвергаются внешнему осмотру (определяется наличие внешних повреждений, наличие необходимых обозначений на мешках или патронах ВВ).

*Испытание на передачу детонации.* На песчаном плотном грунте укладывают соосно два патрона ВВ. Расстояние между ними должно соответствовать величине, указанной в ГОСТе или ТУ для испытываемого ВВ. После инициирования одного из патронов должен детонировать и другой патрон за счет энергии ударной волны, передающейся через воздух. О полноте взрыва судят по образовавшимся отпечаткам на поверхности грунта. ВВ считается прошедшим испытание, если в двух параллельных опытах не произошло отказов. В случае отказа число опытов удваивается. В повторных испытаниях не должно быть ни одного отказа, в противном случае ВВ бракуется и возможность дальнейшего использования определяется комиссией.

*Испытания на полноту детонации.* На плотном песчаном грунте торцами впритык друг к другу укладываются патроны испытываемого ВВ. Количество патронов может соответствовать количеству патронов в применяемых зарядах. В наружный торец крайнего патрона вставляется КД или ЭД и производится инициирование заряда. По отпечатку на грунте судят о полноте детонации. Допускается разбрасывание отдельных гранул грубодисперсных ВВ и остатков бумаги. Количество опытов и их повторность в случае отказа как и для испытаний на передачу детонации.

Для ВВ на основе нитроэфиров, кроме того, проводятся испытания на экссудацию. Суть метода заключается в определении следов нитроэфиров на внутренней поверхности патронов (капли или следы жидкости). Если присутствуют следы или капли жидкости, то данные ВВ подлежат уничтожению.

#### 2.4. Методы оценки чувствительности и опасности ВВ в обращении

Чувствительность ВВ - восприимчивость к определенному внешнему импульсу (удар, трение, нагрев и т.д.), вызывающему детонацию ВВ. Чувствительность ВВ зависит от большого числа разнообразных факторов: гранулометрический состав, состояние ВВ (порошкообразные, гранулированные, литые), температуры, влажности, засоренности.

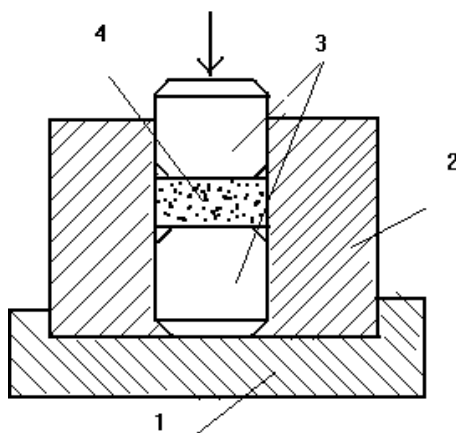


Рис. 6. Схема установки для определения чувствительности к удару (роликовый приборчик)

*Чувствительность к удару.* Испытания проводятся на специальных установках - копрах. Навеску ВВ (4) размещают между двумя роликами (3) в матрице (2,1) (рис. 6). На ролик, выступающий из матрицы, сбрасывается груз определенной массы с определенной высоты. За меру чувствительности принимается процент взрывов в 25 экспериментах. Масса груза принимается равной 10 кг или 2 кг, а высота сбрасывания 25 см, масса навески ВВ - 0,05 г.

По данному методу испытаний также можно определять нижний предел чувствительности к удару, т.е. максимальную высоту сбрасывания груза массой 10 или 2 кг на навеску ВВ массой 0,1 г при которой из 25 испытаний не происходит ни одного взрыва.

Определение чувствительности ВВ к трению проводят с помощью маятника (скользящий удар) или путем истирания навески ВВ массой 0,03 г между стальными поверхностями плоского профиля. Критерием чувствительности служит максимальное давление на навеску ВВ, при котором ни в одном из опытов не происходит разложения ВВ. Это давление называют нижним пределом чувствительности.

*Чувствительность ВВ к инициирующему импульсу* оценивается массой заряда, необходимой для возбуждения детонации испытываемого ВВ.

*Чувствительность к тепловому импульсу* определяется по температуре вспышки навески ВВ. Ниже данной температуры (с точностью  $\pm 5$  °С) ВВ не должно вспыхивать при выдержке при данной температуре в течение 5 минут.

## Тема 4. Основные закономерности детонации

### *Явление взрыва и классификация взрывных процессов*

Взрыв представляет собой один из видов физических или химических превращений веществ. В широком смысле слова взрывом называется явление крайне быстрого перехода системы веществ из одного состояния в другое, сопровождающееся столь же быстрым превращением ее потенциальной энергии в механическую работу над окружающей средой.

Энергия взрыва может иметь разную природу. Выделение ядерной, химической, электрической, тепловой, кинетической энергии, энергии упругого сжатия способно проходить в виде взрывного процесса.

При ударе движущегося с большой скоростью тела о прочную преграду его кинетическая энергия переходит в тепловую, при достаточном высоком значении энергии могут образовываться сильно сжатые газы. Примером взрывов такой природы является падение крупных метеоритов.

Физическую природу имеют взрывы баллонов со сжатыми газами или взрывы паровых котлов. В первом случае взрыв происходит или за счет чрезмерного повышения давления, например от случайного разогрева, или вследствие механических повреждений и уменьшения прочности стенок. Во втором случае явление вызвано быстрым переходом перегретой воды в парообразное состояние. При подобных взрывах изменяется только физическое состояние вещества с сохранением неизменности его химического состава.

Примером электрического взрыва могут служить взрывы, которые возникают при мощных искровых разрядах, например молниях, или при пропускании электрического тока высокого напряжения через тонкие металлические проволочки. При мощных разрядах разность потенциалов выравнивается за промежутки времени  $10^{-6}$ - $10^{-7}$  с, благодаря чему в зоне разряда колоссально растут плотность энергии и температура (до десятков тысяч градусов), что, в свою очередь, приводит к сильному подъему давления, воздуха в месте разряда и распространению интенсивного возмущения в окружающей среде.

Примерами взрыва за счет энергии упругого сжатия могут служить гигантские взрывы, протекающие внутри земной коры и приводящие к землетрясениям или разрушению вулканов при их извержении. Накапливаемые в отдельных участках земной коры напряжения могут охватывать весьма большие объемы, а при землетрясении внезапно освобождаются с выделением огромного количества энергии. Энергия сильнейших землетрясений оценивается в  $10^{16}$ - $10^{18}$  Дж, т.е. превосходит энергию взрыва миллионов тонн взрывчатых веществ (ВВ).

При атомных взрывах, обусловленных реакциями деления или синтеза ядер, достигаются весьма высокие значения параметров (температуры и давления) продуктов реакции.

Взрыв может произойти также за счет потенциальной химической энергии, которая превращается в энергию сжатых газов в результате быстрого протекания химической реакции. Химическую реакцию, сопровождающуюся или способную сопровождаться взрывом, называют взрывчатым превращением. Вещества, способные к взрывчатым превращениям, называют взрывчатыми.

Взрыв в более узком смысле слова представляет собой процесс чрезвычайно быстрого химического превращения вещества, сопровождающийся столь же быстрым выделением тепла и образованием газов.

Взрыв ВВ может протекать в формах гомогенного взрыва и самораспространяющегося превращения.

Гомогенный химический взрыв практически не имеет применения во взрывной технологии в горном деле.

Рассмотрим самораспространяющийся взрыв. Пусть в небольшой части заряда ВВ путем сильного разогрева вызвана быстрая химическая реакция. При определенных условиях эта реакция будет самопроизвольно распространяться с большой скоростью от места ее возбуждения до границ заряда. На использовании такого самораспространяющегося процесса химической реакции (взрыва) основана вся современная взрывная техника. Итак, взрыв ВВ представляет собой самораспространяющееся с большой скоростью химическое превращение, протекающее с выделением большого количества тепла и образованием газов.

Химическая реакция, протекающая в форме взрыва, определяется следующими основными условиями:

- 1) экзотермичностью химической реакции;
- 2) наличием газообразных (парообразных) продуктов реакции;
- 3) большой скоростью химической реакции.

Заметим, что только совокупность этих условий придает явлению характер взрыва. Эти условия определяют не только возможность самораспространения химической реакции в форме взрыва, но и его механическое действие.

**Экзотермичность реакции.** Выделение тепла является необходимым условием, ибо без него возникновение взрывного процесса вообще невозможно. Теплота химической реакции при взрыве является источником энергии. Если бы реакция не сопровождалась выделением теплоты, то ее самораспространение было бы исключено. Очевидно, что вещества, требующие для своего разложения притока энергии извне (эндотермическая реакция), не могут обладать взрывчатыми свойствами.

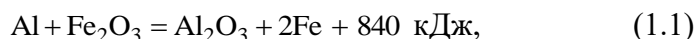
За счет тепловой энергии реакции происходит разогрев газообразных продуктов до температуры в несколько тысяч градусов и их последующее расширение. Чем больше теплота реакции и скорость ее распространения, тем больше разрушительное действие взрыва.

Теплота реакции является важнейшей характеристикой ВВ. Для современных промышленных ВВ теплота взрыва колеблется от 2900 до 7500 кДж/кг.

**Образование газов.** Высокие давления, возникающие при взрыве, и обусловленный ими разрушительный эффект достигаются вследствие того, что химическая реакция при взрыве сопровождается образованием большого количества газообразных продуктов, которое и делает возможным взрыв. Это связано с тем, что газы имеют значительно меньшую плотность и значительно больший коэффициент объемного расширения, чем твердые или жидкие вещества, так что переход твердого или жидкого вещества в газы в постоянном объеме приводит к резкому росту давления.

Вследствие этих особенностей газ или пар и является тем непосредственным физическим агентом, который, расширяясь, производит механическую работу. Чем больше объем газов или пара по сравнению с объемом вещества до взрыва, тем (при прочих равных условиях) больше энергия взрыва. У промышленных ВВ объем образующихся при взрыве газов, приведенный к нормальным физическим условиям, равен 600-1000 л на 1 кг ВВ.

Значение фактора газообразования для взрывных процессов может быть проиллюстрировано на ряде реакций, в которых не образуются газообразные продукты. Так, например, даже сильно экзотермическая, но не образующая газов реакция сгорания термитной смеси по уравнению



несмотря на большое количество выделяющегося при реакции тепла, не дает взрыва. Тепловой эффект реакции достаточен для нагревания конечных продуктов (Fe, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) до температуры 3000 °С, при которой они находятся в жидком состоянии.

Наблюдаемый в условиях воспламенения больших количеств термитной смеси довольно сильный взрыв является следствием вторичных явлений, связанных с разогревом и расширением окружающего воздуха, а также воздуха и образующих газы примесей, заключенных в рыхлой массе термитной смеси. Кроме того, частично может происходить весьма быстрое сгорание распыленного порошкообразного алюминия за счет кислорода воздуха.

**Скорость реакции.** Самым характерным признаком взрыва, отличающим его от обычных химических реакций, является высокая скорость процесса. Переход вещества к конечным продуктам взрыва происходит за сотысячные и миллионные доли секунды.

Большая скорость выделения энергии определяет преимущества ВВ по сравнению с обычными горючими веществами, хотя по количеству освобождаемой при реакции взрыва энергии при расчете на единицу массы вещества ВВ не имеют перед ними каких-либо преимуществ (табл.1.1).

Если же сравнивать между собой взрывчатые и горючие вещества в расчете на участвующие в реакции объемы, то преимущество ВВ по концентрации энергии будет очевидным.

Объемная плотность энергии, достигаемая при взрыве конденсированных (твердых или жидких) ВВ, превосходит объемную плотность обычных горючих веществ в сотни и тысячи раз (табл.1.1).

Таблица 4.1

| Взрывчатое вещество или горючая смесь  | Плотность, кг/м <sup>3</sup> | Теплотворная способность, кДж/кг | Объемная плотность энергии, кДж/кг |
|--|------------------------------|----------------------------------|------------------------------------|
| Дымный порох                           | 1,2                          | 2784,2                           | 3350                               |
| Тротил                                 | 1,6                          | 4228,7                           | 6782,62                            |
| Пироксилин при содержании азота 13,3 % | 1,3                          | 4358,5                           | 5652,18                            |
| Нитроглицерин                          | 1,6                          | 6217,4                           | 10048,3                            |
| Смесь бензола с кислородом             |                              | 9755,2                           | 18,42                              |
| Смесь углерода с кислородом            |                              | 8918,9                           | 17,58                              |
| Смесь водорода с кислородом            |                              | 1352,3                           | 7,12                               |

Высокая концентрация энергии в единице объема и огромная скорость ее выделения при взрыве обуславливают большую мощность и разрушительное действие взрывчатых веществ. Максимальная скорость распространения взрыва у современных ВВ колеблется от 2 до 9 км/с.

Таким образом, только одновременное сочетание трех основных факторов: экзотермичности реакции, наличия газов в продуктах реакции и большой скорости процесса – придают явлению характер взрыва.

Химическое превращение взрывчатых веществ в зависимости от условий возбуждения химической реакции, характера ВВ и других факторов может распространяться с различной скоростью и вследствие этого обладать существенными качественными различиями. По характеру и скорости распространения среди взрывных процессов различают горение, взрыв и детонацию.

**Горение** представляет собой процесс химического превращения, протекающий в сравнительно узкой зоне. Он происходит медленно, с переменной скоростью (обычно от долей сантиметра до нескольких метров в секунду).

Выделяющаяся в зоне реакции энергия передается от горячих продуктов ближайшим слоям исходного ВВ путем теплопроводности и излучения тепла горячими газообразными продуктами горения. Температура вещества в этих слоях повышается, и в них возникает реакция.

Скорость горения существенно зависит от внешнего действия, увеличиваясь с повышением давления. Зависимость скорости горения от давления является причиной ускорения процесса горения в замкнутом объеме. Скорость горения всегда меньше скорости звука в данном веществе. Горение является характерным видом взрывчатого превращения порохов.

**Взрыв** характеризуется резким скачком давления в узкой зоне, переменной скоростью распространения процесса, измеряемой тысячами метров в секунду, и сравнительно малой зависимостью от внешних условий. Скорость взрыва больше скорости звука в массе взрывчатого вещества.

**Детонация** представляет собой взрыв, распространяющийся по ВВ с постоянной сверхзвуковой скоростью. По характеру и сущности явления детонация не отличается от взрыва, но представляет собой его стационарную форму.

Механизм распространения химического превращения при взрыве (детонации) состоит в передаче энергии от слоя к слою волной сжатия (ударной волной).

Принципиальное отличие в механизме распространения предопределяет различные скорости рассматриваемых процессов, и различное воздействие горения и взрыва на окружающую среду.

## Общая характеристика механизмов горения и детонации

Процессы взрывчатого превращения в зависимости от природы ВВ, условий инициирования и ряда других факторов могут протекать с различной скоростью и существенно различаться по своему характеру. Между двумя принципиально отличными формами взрывных процессов: горением и собственно взрывом существуют глубокие качественные различия. Процессы горения в зависимости от внешних условий, в особенности от давления, протекают с переменной скоростью, в то время как скорость взрыва от внешних условий практически не зависит. Установлено, что между горением и взрывом существует строгая количественная граница: скорость горения, всегда меньше, а скорость взрыва всегда больше, чем скорость звука в исходном еще не разложившемся ВВ. В передаче горения по заряду ВВ определяющую роль играют законы теплопроводности, в то время как взрыв осуществляется за счет прохождения по взрывчатому веществу ударной волны.

**Механизм горения ВВ.** Горение ВВ имеет сложный характер: при нагревании ВВ источником теплоты происходит плавление и испарение тонкого слоя вещества и нагрев образовавшихся паров до температуры самовоспламенения с последующей интенсивной химической реакцией. Продукты горения нагревают следующий слой ВВ, претерпевающий те же физические процессы и химические реакции. В развитии процесса горения различают пять зон (рис.4.1): I – исходного ВВ; II – прогретого слоя конденсированного ВВ; III – прогретых паров; IV – химической реакции; V – продуктов горения.

Пары, образовавшиеся вследствие испарения конденсированной фазы (зона I), вспыхивают не сразу, а лишь по прошествии некоторого времени, необходимого для их прогрева. Прогрев и испарение ВВ имеют место в зоне II, в зоне III – прогрев и подготовка паров к горению, в зоне IV – горение. При горении ВВ энергия сообщается конденсированной фазе путем теплопроводности через слой пара.

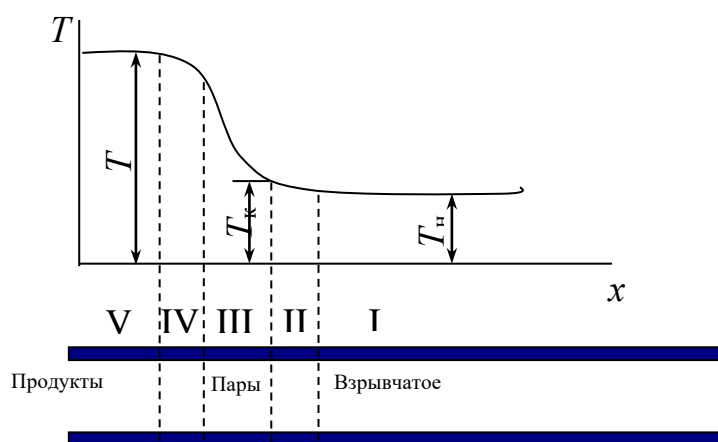


Рис.4.1

Очевидно, что при установившемся режиме горения количество вещества, испарившегося за 1 с на  $1 \text{ см}^2$  поперечного сечения заряда ВВ, равняется количеству вещества, сгоревшего за 1 с на  $1 \text{ см}^2$  – другими словами, массовая скорость испарения конденсированной фазы должна равняться массовой скорости горения пара.

**Механизм детонации ВВ.** При горении последовательность явлений включает повторяющиеся процессы передачи тепла от реагирующего слоя к соседнему. Возможен, однако, существенно другой механизм превращения ВВ, связанный с прохождением по ВВ резкого скачка давления ударной волны. При этом очередной слой ВВ подвергается резкому удару со стороны продуктов разложения предыдущего слоя. Быстрое и сильное сжатие вызывает нагрев ВВ до высокой температуры, при которой реакция его разложения идет с большей скоростью. Теплота, выделяющаяся при этой реакции, обуславливает поддержание энергии ударной волны, которая «сжигает» следующий слой ВВ и т.д. Такой вид взрывного превращения называют детонацией.

### **Понятие о волнах сжатия и разрежения. механизм возникновения ударной волны**

Распространение в газе волн сжатия конечной амплитуды рассмотрим на примере движения поршня в бесконечной трубе, заполненной газом (рис.4.2). Очевидно, что сжатый столб газа, расширяясь, будет сжимать прилегающие слои. От поршня пойдет волна сжатия, которая распространяется вдоль трубы со скоростью, равной местной скорости звука. При сжатии газ нагревается, и скорость звука в нем становится больше, чем в невозмущенном газе. Поэтому состояния, соответствующие точке *A* на рис.4.3, *a*, распространяются по газу быстрее, чем, например состояния, соответствующие точке *B*. По мере распространения волны фронт ее становится все круче и, наконец, обращается в поверхность разрыва. На этой поверхности имеет место резкое скачкообразное изменение параметров состояния газа (давления, плотности, температуры, скорости движения). Такую волну, характеризующуюся наличием поверхности разрыва основных физических параметров среды, называют ударной волной.



Рис.4.2

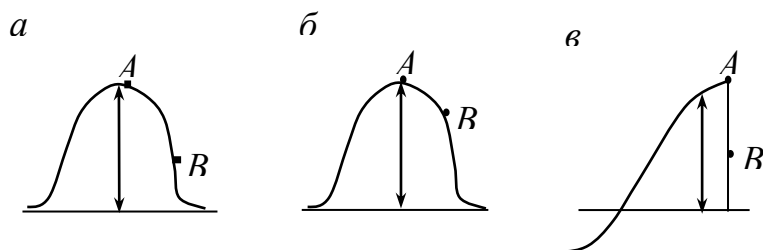


Рис.4.3

Если достаточно интенсивная ударная волна распространяется не в инертной среде, где она затухает, а в ВВ, то, сжимая и нагревая его, она может вызвать химическое превращение ВВ, его детонацию.

При детонации в результате химического превращения, идущего с высокой скоростью, выделяется энергия, которая непрерывно поддерживает проходящую по ВВ ударную волну. Распространяющуюся по ВВ ударную волну и следующую за ней зону химического превращения называют детонационной волной.

Зона химического превращения (химический пик) заканчивается воображаемой границей, условно называемой плоскостью Чепмена – Жуге, за которой процессы с выделением энергии, если они и проходят, не влияют на параметры ударной волны в заряде. Одной из основных характеристик ВВ является скорость распространения в ней детонационной волны, которая называется скоростью детонации.

Сплошная среда: твердая, жидкая или газообразная – способна передавать возмущения в виде колебательного движения в виде звуковых волн. Колебания среды вызываются силами упругости в ней. Так, если сжать объем воздуха и предоставить ему расширяться, то упругая энергия приведет в движение окружающий воздух. При этом сжатый воздух по инерции



расширится не до первоначального объема, а до большего. Работа, первоначально затраченная на сжатие, перейдет в кинетическую энергию движения; последняя, в свою очередь, будет затрачена на работу сжатия окружающей среды. Так по воздуху побежит волна сжатия, скорость которой будет равна скорости распространения звука в воздухе.

В свободном пространстве звуковая волна бежит от источника во все стороны; нам для дальнейших рассуждений удобнее считать, что звук бежит по трубе: тогда все объемы сжимаются и расширяются подобным образом. Пусть на одном торце трубы находится колеблющийся поршень, который создает попеременные сжатия и разрежения.

Сначала будем считать смещения поршня очень малыми по размаху (амплитуде). Но как бы малы они ни были, через любое поперечное сечение трубы пройдет столько же сгущений и разрежений в секунду, сколько раз их создаст поршень в своем возвратно-поступательном движении.

Скорость движения поршня прямо пропорциональна амплитуде и частоте колебаний. Следовательно, при очень малых амплитудах скорость поршня будет очень малой даже и при большой частоте колебаний. Но скорость распространения звуковых колебаний не имеет со скоростью поршня ничего общего. Для частоты колебаний, воспринимаемых человеческим ухом (от 20 до 20000 с<sup>-1</sup>, т.е. от еле слышного шелеста до рева самолетного мотора), скорость распространения звука одна и та же: при «комнатной» температуре (около 20 °С) звук распространяется по воздуху со скоростью 330 м/с.

Эта скорость определяется только свойствами самого воздуха и зависит от того, как быстро в нем движение передается от одного объема к другому. Как уже говорилось, при этом работа сжатия одного объема тратится на ускорение частиц соседнего.

Мы не будем выводить выражение для скорости звука, однако, легко понять, как оно может быть построено по известным свойствам газа. Ускорение тем больше, чем больше сила или упругость воздуха, и тем меньше, чем больше масса единицы объема, т.е. плотность воздуха. Поэтому следует ожидать, что скорость звука должна возрастать с ростом давления воздуха и убывать вместе с его плотностью. На самом деле скорость звука прямо пропорциональна корню квадратному из давления, деленного на плотность. Те, кто помнит размерности физических величин, легко могут убедиться, что эта величина действительно имеет размерность скорости, и что другой величины с такой размерностью из констант, характеризующих газ, построить нельзя.

Под корнем стоит еще коэффициент пропорциональности, равный приблизительно 1,4 – отношению теплоемкости воздуха при постоянном давлении к его теплоемкости при постоянном объеме.

Любопытно, как появился этот коэффициент. Если сжимать некоторый объем воздуха очень медленно, то его температура успеет выравняться с температурой окружающего воздуха. Такое сжатие называется изотермическим. Звуковые колебания происходят сравнительно быстро, так что температуры сжатого и окружающего объемов не успевают выравняться: часть работы сжатия тратится на нагревание окружающего объема. Такое сжатие называется адиабатическим.

Очевидно, что поскольку при этом работа тратится не только на сжатие, но и на нагревание воздуха, то при равной степени уплотнения адиабатическое сжатие требует большего давления, чем изотермическое. Адиабатическая упругость больше изотермической, поэтому в выражении для скорости звука и появляется коэффициент  $\sqrt{1,4} = 1,19$ . При очень малых частотах колебаний поршня сжатие воздуха происходило бы изотермически. Скорость распространения такого звука (инфразвука), неслышимого ухом, меньше, чем скорость обычного звука как раз в 1,19 раза.

Распространение звука интересует нас не как периодический процесс, происходящий в газе, а совсем с другой точки зрения. Чтобы разъяснить ее, представим, что поршень совершает не периодические движения, а просто равномерно вытягивается из трубы, начиная с некоторого начального положения (рис.4.4). Вслед за поршнем устремляется и воздух, но, разумеется, не во всей трубе одновременно. Сначала это будет очень тонкий слой, прилегающий к поршню, потом соседний слой и т.д. Граница между неподвижным и движущимся воздухом побежит направо по газу как раз со скоростью звука. Правее этой границы воздух еще не будет затронут движением,

левее – потечет за поршнем. Расстояние между плоскостями  $a$  и  $a'$ , проведенными через одни и те же частицы, непрерывно возрастает.

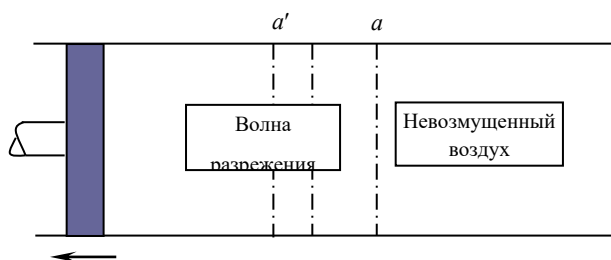


Рис.4.4

Выражаясь образно, воздух правее границы возмущений еще «не знает» о том, что поршень начал выдвигаться из трубы. Скорость звука является как бы скоростью передачи сигнала по газу – сигнала, сообщающего движение. В этом состоит значение скорости звука для газовой динамики, которая, в отличие от акустики, обычно имеет дело с непериодическими процессами, такими, например, как выдвигание или вдвигание поршня.

Можно показать, что если поршень не изменяет направления своего движения, то передняя граница возмущения всегда движется с постоянной скоростью. Для этого необходимо и достаточно, чтобы ее не догоняли звуковые сигналы, идущие слева из области текущего, разреженного газа. Если эти сигналы не приходят на переднюю границу, то газ на ней «не знает», когда и как стал двигаться поршень после того, как он впервые пришел в движение. Граница распространяется по газу так же, как если бы поршень продолжал выдвигаться из газа с той же скоростью, с какой он начал движение.

Почему же звуковой сигнал из разреженной области не может нагнать переднюю границу? Для этого есть две причины. Скорость звука, как уже было указано, пропорциональна корню квадратному из давления, деленного на плотность. Но это частное зависит согласно известному уравнению Клапейрона только от абсолютной температуры газа. Расширение газа происходит адиабатически, следовательно, он охлаждается. Поэтому в каждой точке газа, движущегося за поршнем, скорость звука меньше, чем на передней границе возмущения.

Уже по этому одному звуковой сигнал из разреженного газа не может догнать переднюю границу возмущения. Но это еще не все. Газ движется за поршнем, т.е. влево. Поэтому звуковые сигналы сносятся движущимся газом тоже влево. Скорости вычитаются, так что относительно трубы звук из разреженной области бежит еще медленнее, чем относительно самого газа. Это другая причина того, почему он не может нагнать переднюю границу возмущений, бегущую по неподвижному газу.

Возмущенная область газа, текущего за поршнем, называется волной разрежения. Так как поршень движется влево, а граница волны – вправо, область газа за волной разрежения непрерывно увеличивается. Скорость каждой частицы, захваченной волной, растет. На самой границе возмущения она еще равна нулю, левее нее возрастает и на самом поршне равна его скорости, если только сам поршень не движется слишком быстро.

Оказывается, что если в трубе воздух, а скорость поршня больше пятикратной скорости звука в невозмущенном воздухе, то течение не поспевает за поршнем, так что между поршнем и газом образуется вакуум. По мере расширения газа в вакуум скорость каждой части его объема стремится к этой пятикратной скорости звука. Отметим, что речь идет не об отдельных молекулах газа, которые движутся беспорядочно, а об упорядоченной, общей скорости переноса газа относительно трубы.

У звуковых волн, которые изучаются в акустике, скорости частиц (опять-таки небольших объемов, а не молекул!) всегда очень малы по сравнению со скоростью звука. В волне разрежения соотношение как раз обратное: газ течет быстрее звука. Такая ситуация характерна для газовой динамики, изучающей движение газов с большими скоростями.

Обычно принято сравнивать скорости частиц не со скоростью звука в невозмущенном воздухе, а с «местной» скоростью звука, т.е. с его скоростью внутри данного небольшого объема. На границе с вакуумом в волне разрежения давление газа равно нулю, равна нулю и температура.

Конечно, это относится к воображаемому «идеальному» газу, который при низких температурах не обращается в жидкость, и мы сейчас рассматриваем динамику только такого газа. Но при абсолютном нуле температуры равна нулю и местная скорость звука, ведь она пропорциональна корню квадратному из температуры. Следовательно, в этом месте, или точнее в этом объеме газа скорость течения в бесконечное число раз больше скорости звука.

Так движется газ, когда поршень выдвигается из трубы. Что же произойдет, если поршень будет вдвигаться и тем самым сжимать газ в трубе?

Пусть поршень начинает вдвигаться очень медленно. Тогда передняя граница сжатого газа побежит со скоростью звука по газу несжатому. При постепенном ускорении движения поршня образуется волна сжатия, в которой воздух адиабатически нагрет и движется вправо (см. рис.1.2). Поэтому возмущение из волны сжатия непременно нагонит ее переднюю границу: в нагретом воздухе скорость звука больше и, кроме того, она складывается со скоростью течения. Следовательно, передняя граница волны сжатия непременно «узнает» о том, что поршень движется ускоренно, сжимая газ. Можно нарисовать профиль волны сжатия, т.е. распределение давления  $P$  в ней в зависимости от координаты  $x$  (рис.4.5).

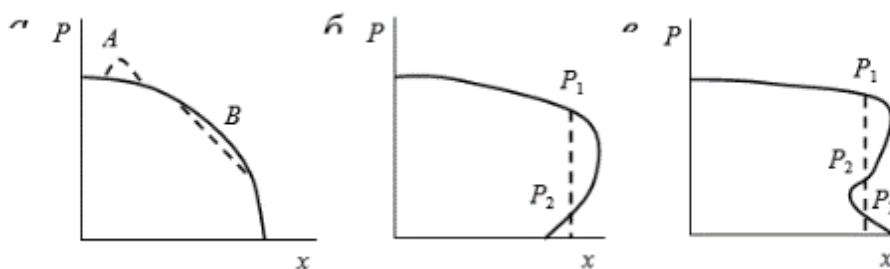


Рис.4.5

Допустим, что на этот профиль накладывается небольшой «выступ» давления  $A$ . Он не может остаться на месте даже относительно того объема газа, в котором возник, а как всякое сжатие газа побежит по нему со скоростью звука, переменной на профиле, от точки к точке. Но любую точку, например  $B$ , можно рассматривать как небольшой выступ над хордой, обозначенной пунктиром. Итак, каждое сжатие газа распространяется по нему с местной скоростью звука, причем на профиле, изображенном на рис.4.5,  $a$ , большее давление догонит и даже, казалось бы, перегонит меньшее. Но если бы так случилось, профиль, изображенный на рис.4.5,  $a$ , перестроился бы в профиль на рис.4.5,  $b$ , который отвечает физически абсурдной ситуации, когда в одной и той же точке давление газа имеет на профиле два или даже три значения (рис.4.5,  $b$  и  $v$ ). Очевидно, что на самом деле так получиться не может.

Прежде чем рассмотреть, что произойдет в газе, полезно обратиться к другому, очень сходному случаю волнового движения – морскому прибою. Оказывается, законы распространения волн по поверхности воды в неглубоком водоеме очень похожи на законы распространения волн сжатия в газе. Одни волны, как говорят, моделируют другие. Все, вероятно, знают, что электрический колебательный контур из емкости и индуктивности моделирует колебания груза, подвешенного на пружине. Роль упругого звена играет емкость, роль массы – индуктивность. Несмотря на совершенно разную физическую природу явлений, они подчиняются закономерностям одинакового вида. Это и есть моделирование.

Не всякое волновое движение в жидкости моделирует волны сжатия в газе. Например, мелкая рябь на поверхности имеет другой закон распространения. Аналогия возникает только тогда, когда длина волны сравнима с глубиной водоема. Тогда высота уровня воды в данной точке есть величина, аналогичная давлению в газе. Профилю давления в газе отвечает зримый профиль волны в воде.

Рассмотрим, как возникают в прибое волны, похожие по профилю на профиль на рис.4.5,  $b$ . Если волны набегают на отлогий берег, их гребни имеют большую скорость, чем впадины. Легко убедиться, что это должно быть так: под гребнями местная глубина больше, чем под впадинами. Но скорость волн может зависеть только от двух величин: глубины и ускорения силы тяжести. А из них можно построить только одну величину, имеющую размерность скорости: корень квадратный из глубины, умноженной на ускорение. Ту же форму имеет выражение скорости

падения тела с заданной высоты. Но если гребни бегут быстрее впадин, они должны выбегать вперед, так что волны сперва приобретают вертикальный участок переднего фронта, который затем наклоняется, как на рис.4.5, б и в. Имея такую форму, волны бежать не могут и обрушиваются в виде приboя.

Проследим теперь, как будет изменяться профиль волны сжатия в газе. Прежде чем возникнет физически невозможное перехлестывание, в некоторой точке профиля должен образоваться очень маленький вертикальный участок (рис.4.6, а и б). В зависимости от закона движения поршня этот вертикальный участок может получиться как в передней точке волны сжатия, так и в ее середине. Давление слева от этого участка будет продолжать повышаться за счет сигналов, приходящих со стороны поршня. Но как бы оно ни повышалось, вертикальная касательная  $AB$  к профилю не наклонится вправо, чтобы не дать начало невозможному профилю, изображенному на рис.4.5, б. Следовательно, единственный выход состоит в том, что из вертикальной касательной разовьется разрыв давления (рис.4.6, в и г). Место разрыва можно рассматривать как участок кривой со сколь угодно большим наклоном, так что неоднозначности давления не возникает.

Мы начали рассуждения, предполагая, что все величины в волне сжатия изменяются непрерывно, так же, как и в волне разрежения. Но оказалось, что в волне сжатия неминуемо должен наступить такой момент, когда движение больше не сможет остаться непрерывным. Однако перемещением поршня в принципе можно располагать произвольно, так что газ должен найти какой-нибудь естественный выход. Единственно возможное предположение состоит в том, что в газе возникнет скачок.

Такого рода скачок называется ударной волной. К выводу о необходимости образования ударной волны из волны сжатия газовая динамика пришла не из качественных рассуждений, а из строгих уравнений. Но те, кто пришли к этому выводу впервые, сами в него не поверили, исходя из метафизического предрассудка, что «природа не делает скачков». Вероятно, в основе этого ложного принципа лежит допущение, что скачок – это нечто беззаконное, нарушающее естественный ход вещей. На самом деле ударная волна управляется такими же строгими закономерностями, как и гладкое, непрерывное течение газа. Она возникает, развивается и распространяется в такой же согласии с механикой и общими свойствами газа, как и звуковая волна.

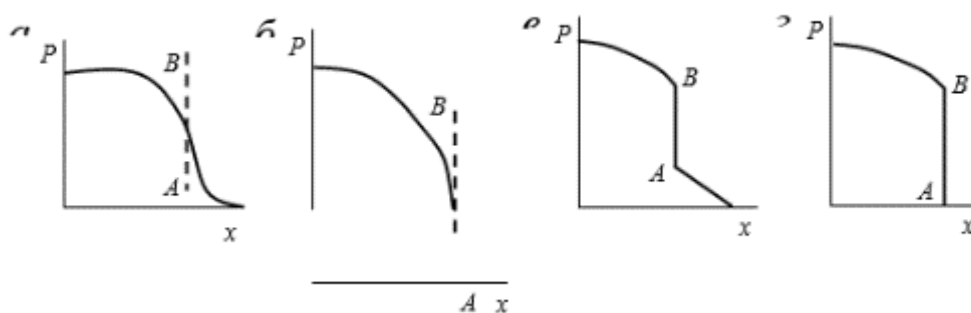


Рис. 4.6

## Физическая сущность детонации промышленных ВВ

**Детонация** – распространение взрыва по ВВ с постоянной для данного ВВ и диаметра заряда, сверхзвуковой скоростью, обусловленное прохождением по заряду ВВ детонационной волны.

Это сложное газодинамическое явление, объясняется распространением ударных волн по массе ВВ.

Ударная волна в массе ВВ возбуждается однократным начальным импульсом от внешнего источника, которым чаще всего является взрыв КД или ЭД.

Распространение взрыва по ВВ обусловлено распространением по нему ударной волны, создающей в очень узком слое скачкообразное изменение всех термодинамических параметров ВВ:

- давления,
- плотности,
- температуры.

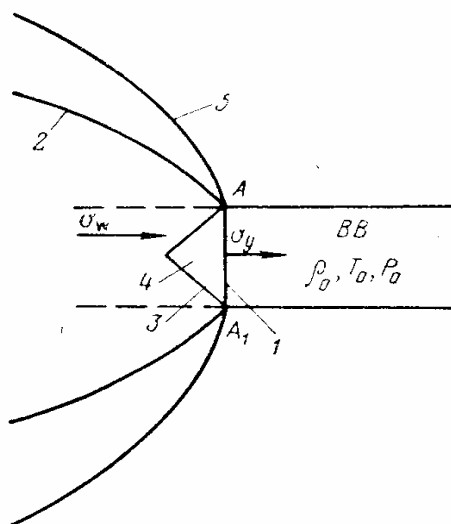
При этом за фронтом волны происходит мгновенное разогревание частиц ВВ и пузырьков газа между ними, за счет чего возникает интенсивная химическая реакция, энергия которой поддерживает распространение ударной волны по ВВ и его детонацию.

Совокупность ударной волны и прилегающей к ней зоны взрывчатого химического превращения ВВ называется **детонационной волной**.

Продукты взрыва детонаторов производят резкий удар по прилегающему к нему слою ВВ и формируют ударную волну, распространяющуюся в виде однократного скачка уплотнения по массе заряда ВВ. имеющую следующие особенности:

1. Скорость распространения ударной волны всегда выше скорости звука в данной среде (заряде ВВ).
2. На фронте ударной волны происходит скачкообразное изменение давления, плотности и температуры.
3. Частицы среды (продукты взрыва) движутся вслед за фронтом ударной волны.
4. Скорость ударной волны зависит от величины давления (амплитуды) за фронтом волны.

### Схема протекания детонации заряда ВВ



Фронт детонации волны (1) представляет собою сильную ударную волну, которая разрушает молекулы ВВ.

Освободившись от первоначальных связей, нагретые до высокой температуры атомы горючих элементов и кислорода вступают за фронтом волны в бурную химическую реакцию с выделением тепла и превращением ВВ в газообразное состояние.

Фронт детонационной волны движется со скоростью нескольких километров в секунду.

(2) – фронт ударной волны.

За фронтом ударной волны движется фронт расширения продуктов взрыва – (3),

А центру (оси) заряда движется фронт волны разряжения (4).

Условия стабильности процесса детонации обеспечивается наличием зоны нерасширившихся газов (5).

Головная часть детонационной волны называется – химическим пиком

(А-М).

Энергия выделяющаяся при реакции , догоняет фронт ударной волны и подпитывает его, не давая затухнуть.

Время химической реакции за фронтом ударной волны весьма мало:

Для тротила – 1мкс

гексогена - 0.1 мкс

аммиачная селитра – 30 мкс

### ***Работа и баланс энергии взрыва***

Работа заряда взрыва проявляется во многих формах :

- полезных, с целью которых производят взрыв.

-бесполезных, представляющих потери, также вредным воздействием на законтурный массив. В зависимости от условий взрыва и его целей работы, КПД взрыва будет меняться. При взрывных работах в скальных породах наибольшее значение имеет работа дробления и перемещения пород а в рыхлых – простреливание (образование полостей) и выброс на определенную высоту и расстояние.

Энергия , затраченная при взрыве на разрушение, перемещение горной массы, образование сейсмических и воздушных волн, нагревание породы и воздуха, характеризует полную работу взрыва.

Работа взрыва совершается за счет теплоты, выделившейся при взрыве , поэтому общая энергия взрыва

$$E = E_y * Q;$$

где:  $E_y$  – удельная теплота взрыва; кдж/кг;

$Q$  – масса заряда ВВ, кг;

Работу произведенную взрывом по разрушению и перемещению массива породы ,называют полезной работой взрыва (  $A_n$  ). Полезная работа взрыва составляет часть полезной энергии( теплоты ) взрыва.

$$A_n = E * h_n;$$

где -  $h_n$  - к.п.д. взрыва = 0.7- 0.8 ;

Однако отдельные виды виды работы могут изменяться.

Так, если взрыв произведен на поверхности массива, то полная работа остается прежней, работа по разрушению среды и сейсмическая волна в массиве уменьшится, а на образование воздушной волны увеличится.

Максимальная работа взрыва ( $A_n$ ), которую могут совершить газы взрыва (при расширении до атмосферного давления) при условии перехода всей внутренней энергии газов в механическую работу, называют идеальной работой взрыва.

Приняв приближенно, что при определенном взрыве к.п.д. действия различных ВВ примерно одинаковы, можно сравнивать их эффективность по теплотам взрыва этих ВВ.

### **Схема баланса взрыва**

В качестве исходной, взята потенциальная химическая энергия В.В.

Из-за возможности разброса непрореагировавшего ВВ, недостаточной полноты взрывчатого превращения фактическая теплота взрыва меньше на величину химических потерь.

Фактическая теплота взрыва не может быть превращена в работу даже при идеальном ходе процесса разрушения, т.к. происходит нагревание разрушаемой среды продуктами взрыва.

Разность между фактической теплотой и полной называют тепловыми потерями.

Общая величина полной работы взрыва находится в этих пределах, но она может расходоваться на те, или иные формы общего, бризантного или местного действия взрыва.

Большая часть полной работы проявляется в виде общего (фугасного) действия.

### ***Формы работы взрыва и методы их определения***

Работа взрыва совершается за счет тепловой энергии, выделяющейся при взрыве заряда ВВ. Исходя из законов термодинамики, М. П. Чельцов в 1880 г. впервые оценил величину работы взрыва и предложил формулу

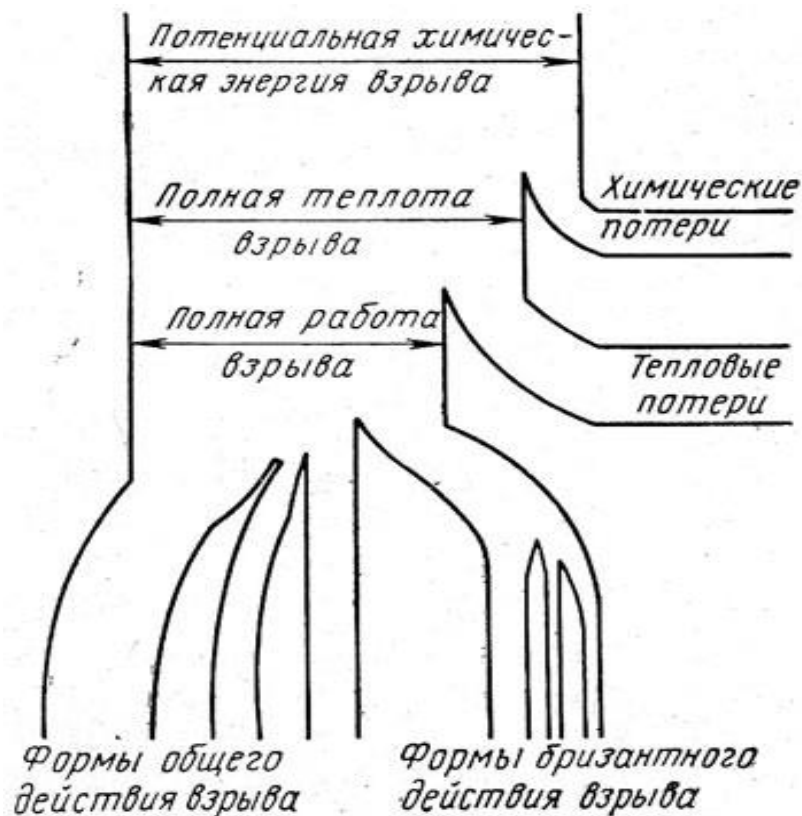
$$A_{\text{п}} = Q \left[ 1 - \left( \frac{V_0}{V_1} \right)^{k-1} \right] = Q \left[ 1 - \left( \frac{1}{p_0} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right],$$

где  $A_{\text{п}}$  — полная идеальная работа газов взрыва при расширении их до атмосферного давления;  $Q$  — теплота взрыва;  $V_0$  и  $V_1$  — начальный и конечный объемы газов;  $p_0$  — начальное давление газов взрыва;  $k$  — показатель адиабаты.

Полная энергия, выделяемая при взрыве, равна произведению теплоты взрыва  $Q$  на массу заряда  $s$ . Таким образом, теплота взрыва является одной из важнейших характеристик взрывчатой системы. Однако полная теплота взрыва не может быть полностью преобразована в механическую работу даже при идеальном ходе химической реакции взрывчатого превращения ВВ. Разность между полной теплотой взрыва и полной работой называют тепловыми потерями.

При взрыве заряда в горной породе происходят дробление и пластическая деформация среды, примыкающей к заряду, возникновение и развитие трещин, смещение частиц породы в результате распространения в ней волновых возмущений, упругие колебания среды и, наконец, выброс породы из воронки взрыва и образование воздушных ударных и звуковых волн. Не все из перечисленных видов работы взрыва являются полезными. Такие виды работ, как переизмельчение и пластические деформации среды, вблизи заряда являются ненужными с точки зрения технологии взрывной отбойки.

В зависимости от условий взрыва доля энергии, идущая на производство той или иной формы работы, может меняться. Полная теплота взрыва при условии завершения реакции взрывчатого превращения остается неизменной. Величина полезной работы взрыва составляет около 60—70% потенциальной энергии ВВ. В то же время коэффициент полезного действия взрыва (отношение полезных форм работы взрыва к теплоте взрыва) относительно невелик и составляет всего несколько процентов. Наиболее наглядно баланс энергии (работы) взрыва можно представить в виде поточной диаграммы, предложенной М. А. Садовским и А. Ф. Беляевым, которые объяснили физическую сущность различных форм работы взрыва.



**Рис. 137. Баланс энергии взрыва по М. А. Садовскому и А. Ф. Беляеву**

Согласно этим представлениям, формы механической работы взрыва в среде условно разделяются на бризантное (или дробящее) и фугасное (или общее) действие. **Бризантным действием** называют те формы работы взрыва, которые осуществляются в непосредственной близости от поверхности заряда. Они составляют сравнительно малую часть общей работы взрыва и в значительной степени зависят от скорости детонации ВВ. Теоретические попытки оценки бризантного действия взрыва предпринимались многими авторами. Одни предлагали оценивать бризантность величиной кинетической энергии продуктов взрыва (Бихель), количеством движения (Редль), мощностью или работой, совершаемой единицей массы заряда ВВ в единицу времени (Гесс) или мощностью, выделяемой единицей объема ВВ (Каст). Однако во все формулы, предложенные этими исследователями, входило произведение плотности ВВ на скорость детонации  $\rho D$  или на квадрат скорости  $\rho D^2$ . Поэтому **бризантное действие взрыва** скорей всего определяется величиной начального давления газов взрыва или импульсом. Если давление детонации невелико, то дробящее действие будет весьма незначительным, даже при взрывании заряда ВВ, имеющего большую энергию. М. А. Садовский и А. Ф. Беляев считали, что бризантное действие определяется не полным импульсом взрыва, а его головной частью, которую в пределе можно считать пропорциональной максимальному детонационному давлению:

$$p = \frac{\rho D^2}{4}.$$

**Большую часть полной работы взрыва представляют общие, или фугасные, формы,** которые проявляются в образовании котловых полостей, дроблении породы в пределах зоны разрушения, т. е. на значительном расстоянии от заряда.

Критерием оценки фугасного действия ВВ является величина энергии ВВ, отнесенная к единице массы заряда ВВ, т. е. теплота взрыва.

Разрушающее действие открытого заряда, имеющего контакт с горной породой, будет относительно малым по сравнению с объемом разрушения при взрывании того же заряда внутри этой породы. В первом случае характер разрушения среды зависит от активной массы заряда и его скорости детонации, во втором — от полной энергии, т. е. от всей массы ВВ, умноженной на его



удельную теплотворную способность (теплоту взрыва). Таким образом, для **оценки бризантных форм работ**, необходимо замерять разрушение (деформацию) среды при контактных взрывах наружных зарядов, а для **фугасных** — те же характеристики разрушения, но при взрыве внутренних зарядов.

Это положение послужило основой для создания различных проб (**методов испытаний**) для определения бризантности и фугасности ВВ.

Так как **фугасные формы работы** взрыва являются превалирующими в общем балансе энергии ВВ, то пробы для их определения **называют пробами на работоспособность ВВ**. Существует множество различных проб, определяющих бризантность и работоспособность ВВ. Однако наиболее распространенными и общепризнанными являются классические (**проба Гесса на бризантность и проба Трауцля на работоспособность**), в которых мерой бризантности и работоспособности ВВ являются пластическая деформация свинцового цилиндрика в первой или раздутие канала свинцового блока (бомбы) во второй.

## Тема 5. Детонационный процесс в газовых смесях.

### *Общие представления о детонационных волнах*

Изучая природу, человек в каком-то смысле создает ее заново, приспособляя к потребностям практики и задачам научного исследования. Можно сказать, что цивилизация началась с того, что люди научились добывать огонь, т.е. искусственно воспроизводить горение. В эпоху, переходную от феодализма к новому времени, получил широкое распространение порох. В этой главе мы будем говорить еще об одном явлении природы, которое связано с горением и взрывом – о детонации.

Известно, что смесь водорода или метана с кислородом способна быстро сгорать. Обычная скорость распространения пламени в таких смесях 10-20 м/с. Для измерения скорости смесь напускают в стеклянную трубку и поджигают с одного конца электрической искрой. Пока искра слабая, горение распространяется в газе с указанной скоростью. Но сильная искра или взрыв небольшого заряда вызывают совсем другое явление: пламя распространяется по газу со скоростью около 2000 м/с. Трубка разлетается вдребезги, взрыв сопровождается сильным звуковым эффектом. Это явление и называется детонацией.

Обычное пламя передается от одного участка газа к соседнему теплопроводностью и диффузией. Тепло, выделяющееся в зоне горения, разогревает прилегающий слой газа, пока в нем не начинается реакция, скорость которой очень сильно зависит от температуры. Смесь, компоненты которой при комнатной температуре не прореагируют и за миллион лет, при 1000-1500 °С воспламенится и сгорит за малые доли секунды.

Важную роль при этом играет не только перенос тепла, но и перенос активных центров реакции, т.е. атомов и молекул с ненасыщенными валентностями. Такие активные центры начинают и поддерживают реакцию там, где в инертном веществе она не идет. Уходя из зоны горения, тепло и активные центры поджигают соседние, еще не сгоревшие участки газа, и пламя распространяется. Количественную теорию этого процесса в виде соотношения между скоростью распространения пламени, теплотой реакции и коэффициентом теплопроводности предложили Я.Б.Зельдович и Д.А.Франк- Каменецкий.

Молекулярные процессы переноса тепла и активных центров сравнительно медленны. Поэтому скорость горения, обусловленного процессами переноса, гораздо меньше скорости звука. Естественный масштаб скорости в газовой динамике – скорость звука.

Скорость детонации, наоборот, в несколько раз больше скорости звука, и в 100 с лишним раз превышает скорость горения. Никакими процессами переноса объяснить детонацию нельзя, хотя такие попытки раньше делались. О них можно прочитать в старой литературе по физической химии.

На самом деле детонация – газодинамическое явление и очень естественно объясняется распространением ударных волн. Действительно, в волне, бегущей со скоростью 2000 м/с, давление повышается в 40 раз. Абсолютная температура газа возрастает в 6-7 раз и достигает 1800-2000 °С. При такой температуре реакция развивается очень быстро. Выделяющееся тепло реакции возмещает необратимую потерю энергии, происходящую при ударном сжатии газа, еще не вступившего в реакцию. Этим детонационная волна сама себя поддерживает.

При данной теплотворной способности смеси скорость детонации пропорциональна корню квадратному из теплоты реакции, отнесенной к единице массы смеси, и почти не зависит от начального давления газа. Ударная волна в газе может иметь самую различную скорость, и, разумеется, затухает, если ее не поддерживает внешний источник энергии.

Задача теории детонации состоит в том, чтобы показать, с какой именно скоростью в данных условиях распространения движется детонационная волна и объяснить, почему скорость детонации связана, в первую очередь, с теплотой реакции.

Прежде всего, надо выяснить, при каких условиях скорость распространения детонационной волны по всей длине трубки постоянна. Для этого необходимо, прежде всего, чтобы расширяющиеся после сгорания продукты детонации не влияли на зону горения. Сгоревший газ может вытекать наружу через открытый конец трубки или еще быстрее смешиваться с воздухом,

сразу разлетаясь в стороны, если трубка разрывается. Но все это никак не влияет на скорость распространения детонационной волны по несгоревшему газу. Следовательно, скорость волны относительно продуктов детонации никак не может быть дозвуковой.

Разъясним это утверждение. Толщина фронта сильной ударной волны примерно равна одному свободному пробегу молекулы газа. На этом пробеге газ сжимается и нагревается. Но и после нагревания химическая реакция происходит далеко не при каждом столкновении молекул. Чтобы молекула прореагировала химически, она должна столкнуться с другими молекулами от 10 до 100 тыс. раз. Следовательно, реакция протекает не в самом фронте ударной волны, а в некотором слое позади него, толщина которого больше свободного пробега в 10-100 тыс. раз и может достигать поэтому 1 мм. Область, где протекает реакция, будем называть в дальнейшем зоной реакции.

Чтобы скорость детонации оставалась постоянной, условия в зоне реакции не должны меняться по мере распространения детонационной волны по газу. Но после зоны реакции газ расширяется, т.е. в нем происходит движение по типу волны разрежения. Волна разрежения, как мы указывали ранее, никогда не может быть стационарной. Она непрерывно растягивается по длине. Следовательно, при распространении детонационной волны зона реакции, которая должна быть стационарна, соприкасается с областью нестационарной волны разрежения.

Это возможно только тогда, когда звуковые возмущения из области нестационарного движения не догоняют зону реакции. В противном случае они принесли бы в зону реакции пониженное давление и температуру и тем замедлили протекание реакции, так что не осуществился бы стационарный режим. Таким образом, фронт детонационной волны должен двигаться относительно продуктов детонации со сверхзвуковой, или в крайнем случае, со звуковой скоростью.

Еще в начале XX в. Чепмен и независимо от него Жуге показали, что выражение скорости детонации через теплоту реакции согласуется с опытом только тогда, когда осуществляется именно этот крайний случай. Если скорость детонации относительно продуктов детонации равна скорости звука в них, то относительно несгоревшего газа она еще больше. По закону сложения скоростей она равна сумме скорости течения продуктов детонации в точке, где закончилась реакция, и скорости звука в них в этот момент, т.е. до начала расширения. Это называется условием Чепмена – Жуге.

Но в течение нескольких десятилетий не было доказано, что так и должно быть, исходя из газодинамики и общих условий протекания химических реакций в зоне горения. Только в 1939 г. Я.Б.Зельдович сумел теоретически подтвердить невозможность сверхзвуковых режимов при распространении детонационной волны и тем самым полностью обосновал условие Чепмена – Жуге. Мы не сможем подробно проследить за этим доказательством, а наметим только общий путь.

Изобразим на рис.5.1 две адиабаты Гюгонио. Сплошная кривая, проходящая через начальное состояние, относится к самому фронту ударной волны, где реакция еще не началась. Такая адиабата отвечала бы ударной волне, бегущей по тому же газу, что и детонационная, но без дальнейшей химической реакции. Так как реакция начинается после ударного сжатия газа, ясно, что эта адиабата имеет вполне определенный физический смысл. Штриховая кривая есть тоже адиабата Гюгонио; она построена по тем же уравнениям, но в предположении, что химическая реакция закончилась и ее энергия выделилась полностью.

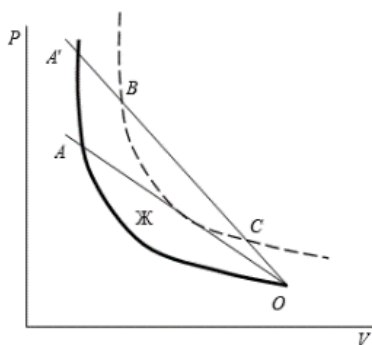


Рис. 5.1

Штриховая кривая не может проходить через начальное состояние, в котором химическая энергия еще не выделена. Она должна лежать выше сплошной кривой. Действительно, когда выделяется теплота химической реакции, газ нагревается, от этого при неизменном объеме его давление становится больше.

Мы указывали, что состояние при ударном сжатии меняется вдоль хорды, соединяющей начальное состояние с конечным, причем это следует только из законов сохранения массы и количества движения. Так как эти законы выполняются и в ходе химической реакции, состояние при этом тоже может изменяться только вдоль той же прямой. Отсюда следует, что хорда непременно должна иметь общую точку со штриховой кривой, потому что иначе состояние, изменяясь в ходе химической реакции, не сможет нигде соответствовать полному выделению химической энергии. То состояние, в котором все, что должно сгореть, сгорело, принадлежит этой адиабате по самому ее определению, но лежит и на хорде по законам сохранения массы и импульса.

Всякий ударный переход до начала реакции осуществляется прямо из начального состояния  $O$  в точку  $A'$  сплошной кривой. После этого начнется химическая реакция. Как уже говорилось, точка, изображающая состояние, будет перемещаться по хорде от  $A'$  до  $B$ , лежащей на штриховой кривой, где реакция заканчивается.

Однако анализ показывает, что если хорда пересекается с адиабатой в точке  $B$ , то получается дозвуковой режим, который мы исключили раньше по условию стационарности. Если бы реакция закончилась в другой точке пересечения хорды со штриховой кривой – точке  $C$ , то как удалось бы показать, это отвечало бы сверхзвуковому режиму. При этом зона реакции убегала бы от продуктов реакции со сверхзвуковой скоростью, что условию стационарности не противоречит.

Но между точками  $B$  и  $C$  состояние проходило бы через точки, отвечающие более чем полному выделению химической энергии. Очевидно, что в них никак невозможно попасть: занять энергию неоткуда. Можно было бы еще предположить скачкообразный переход из  $B$  в  $C$ , минуя все промежуточные, энергетически невыполнимые состояния. Но это была бы ударная волна разрежения, которая исключается вторым началом термодинамики.

Итак, невозможны ни дозвуковой, ни сверхзвуковой режимы распространения детонационной волны. Остается только звуковой режим. Ему отвечает одна определенная хорда  $OA$ , касающаяся штриховой кривой в точке  $Ж$  (точке Жуге), где скорость детонационной волны относительно продуктов реакции равна скорости звука в них.

В приведенном здесь рассуждении мы по умолчанию приняли, что выделение энергии следует за ходом реакции, т.е., что пока вещество реагирует, энергия только выделяется. Возможен, однако, и другой ход реакции: в ее начальной фазе энергия выделяется, а затем часть ее поглощается и затрачивается на дальнейшее протекание реакции. В этом случае наличествует фаза реакции, в которой тепловыделение больше, чем окончательное. Не может ли при этом осуществиться сверхзвуковой режим, для которого как раз и требуется, чтобы в ходе реакции выделялась энергия, большая итоговой? Однако К.И.Щепкин показал, что и здесь условие Чепмена – Жуге сохраняет силу. Необходимо только, чтобы сама реакция протекала все время в одном направлении.

Таким образом, остается единственный режим детонации. По условию Чепмена – Жуге может быть вычислена скорость детонационной волны, которая для газов в согласии с опытом зависит только от теплоты реакции. Заметим, что все это относится только к так называемой свободной волне, ничем не подпираемой сзади.

Есть еще одно допущение, по существу, гораздо более важное. Мы принимали, что плоский фронт детонации так и распространяется по газу, не искривляясь. Опыт показывает, что на самом деле это не всегда так. Более того, детонационная волна может распространяться не при любой концентрации смеси и не при любом диаметре трубки. Существуют известные пределы ее распространения, концентрационные и по радиусу. Вблизи от пределов фронт детонационной волны никогда не бывает плоским.

## Гидродинамическая теория детонации

Согласно гидродинамической теории, передача детонация обусловлена распространением по ВВ ударной волны (рис.5.2). Если амплитуда во фронте этой волны больше некоторой величины, то волна при своем распространении способна за своим фронтом возбуждать интенсивную химическую реакцию, за счет которой поддерживается постоянство параметров волны и стационарный характер детонационного процесса в целом. Таким образом, скорость детонации может быть рассчитана как скорость распространения ударной волны по ВВ.

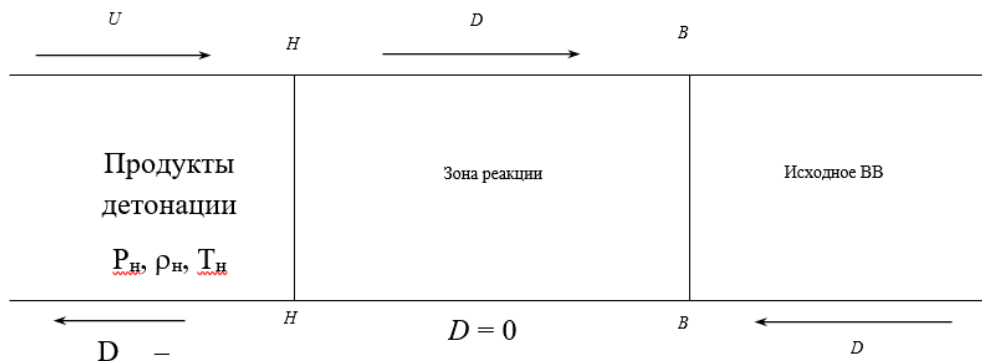


Рис.5.2

Движение обычной ударной волны складывается из движения скачка уплотнения и перемещения самой среды. Детонационная волна обладает более сложной структурой: распространение последней обусловлено движением ударной волны, зоны химической реакции и конечных продуктов взрыва.

Поверхность, которая разделяет зону химической реакции и продуктов детонации (ПД), при стационарной детонации называется поверхностью Чепмена – Жуге (*H-H*). Параметры ПД на этой поверхности называются параметрами детонационной волны или параметрами Чепмена – Жуге (или параметрами в точке Жуге). Исходное взрывчатое вещество отделяется от зоны химической реакции фронтом ударной волны (*B-B*).

Как уже указывалось, для описания стационарного процесса детонации достаточно сопоставить состояние исходного вещества и конечных продуктов реакции. Сама зона реакции может не рассматриваться. В системе координат, движущейся со скоростью  $D$  в сторону, противоположную распространению детонации, эта зона остается неподвижной. При этом для определения параметров детонационной волны мы можем воспользоваться основными уравнениями теории ударных волн.

Для вывода основных соотношений элементарной гидродинамической теории ударных волн рассмотрим в качестве примера образование плоской прямой ударной волны. Пусть поршень с постоянной скоростью  $U$  вдвигается в цилиндр, заполненный идеальной сжигаемой средой. Такой средой может быть газ (процесс будет считаться адиабатическим) с площадью поперечного сечения  $S$  (рис.5.3).

Под действием поршня в газе возникает ударная волна – область сжатия, распространяющаяся в невозмущенный газ.

На переднем фронте ударной волны происходят скачкообразные изменения давления, плотности и температуры газа. Допустим, что в начальный момент ( $t = 0$ ) поршень находится в плоскости  $A$ , через время  $t$  поршень займет положение  $B$ , а в плоскости  $C$  будет находиться фронт ударной волны, которая будет образовываться при этом движении поршня и распространяться со скоростью  $D$ . Пусть параметры среды перед фронтом ударной волны и за ее фронтом соответственно следующие: давление  $P_0$  и  $P_1$ , плотность  $\rho_0$  и  $\rho_1$ , температура  $T_0$  и  $T_1$ . Для того, чтобы найти связь между этими параметрами, воспользуемся законами сохранения массы, импульса и энергии.

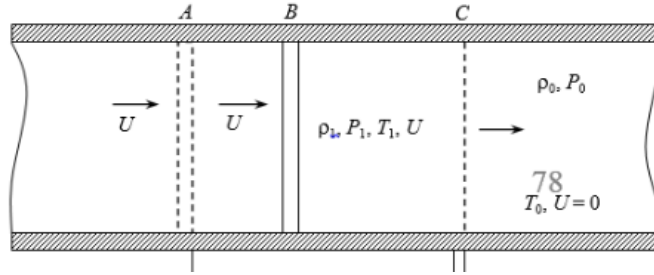


Рис.5.3

За время  $t$  поршень переместится на расстояние  $Ut$ , а фронт ударной волны на расстояние  $Dt$ . Масса вещества, сжатого за это время, равна  $\rho_1(D-U)St$ , до сжатия масса этого вещества равнялась произведению  $\rho_0DtS$ . Из закона сохранения массы имеем

$$\rho_0DtS = \rho_1(D-U)St \quad (5.1)$$

или

$$\rho_0D = \rho_1(D-U). \quad (5.2)$$

Изменение импульса этой массы равно импульсу силы, действующей на нее:

$$(P_1 - P_0)St = \rho_0DSUt$$

или

$$P_1 - P_0 = \rho_0DU. \quad (5.3)$$

Поскольку процесс считается адиабатическим, изменение полной энергии данной массы вещества  $\rho_0DtS$  равно работе внешних сил  $P_1Ut$ . Обозначим внутренние энергии единицы массы вещества до и после сжатия соответственно  $\varepsilon_0$  и  $\varepsilon_1$ , кинематическую энергию единицы массы после сжатия  $U^2/2$ . Тогда

$$\rho_0DSUt \left( \varepsilon_1 - \varepsilon_0 + \frac{U^2}{2} \right) = P_1SUt$$

и

$$\rho_0D \left( \varepsilon_1 - \varepsilon_0 + \frac{U^2}{2} \right) = P_1U. \quad (5.4)$$

Уравнения (5.2), (5.3), (5.4) совместно с уравнениями состояния вещества позволяют определить любую из величин  $P_1$ ,  $\rho_1$ ,  $T_1$ ,  $U$  и  $D$ , если одна из них задана и известны параметры начального состояния  $P_0$ ,  $\rho_0$  и  $T_0$ .

Все изложенное относится также и к детонационной волне, представляющей собой ударную волну, которой сопутствует быстрая химическая реакция. Уравнения сохранения массы и количества движения для ударной и детонационной волн совершенно одинаковы. При составлении уравнения сохранения энергии в случае детонационных волн к тепловой части внутренней энергии необходимо добавить удельную теплоту взрыва  $q$ , т.е. потенциальную химическую энергию, выделяющуюся во фронте детонационной волны. Так, для идеального газа в случае ударной волны  $\varepsilon_0 = cvT_0$ , а в случае детонационных волн  $\varepsilon_0 = cvT_0 + q$ , где  $cv$  — теплоемкость при постоянном объеме.

Законы сохранения массы и сохранения количества движения одинаковы и для ударных, и для детонационных волн при любом уравнении состояния, поэтому выводы из них являются универсальными.

Непосредственно из уравнения сохранения массы (5.2) следует, что скорость потока

$$U = \frac{P_1 - P_0}{\rho_1} D. \quad (5.5)$$

Поскольку вещество в ударной волне сжимается ( $\rho_1 > \rho_0$ ), скорость  $U > 0$  и направлена в ту же сторону, что и  $D$ . С другой стороны  $(\rho_1 - \rho_0)/\rho_1 < 1$ , следовательно,  $U < D$ . Таким образом, следствием закона сохранения массы при сжатии в ударной волне является возникновение за фронтом ударной волны потока вещества, движущегося в направлении распространения волны.

Весьма важно соотношение (5.3), согласно которому избыточное давление на фронте ударной волны равно произведению начальной плотности среды, скорости распространения фронта

ударной волны и скорости потока вещества непосредственно за фронтом волны. Это соотношение справедливо и для детонационных волн. В этом случае  $\rho_0$  представляет собой начальную плотность ВВ, а  $D$  – скорость детонации.

Для весьма сильных ударных волн и практически всегда для детонационных  $P_1 \gg P_0$ , поэтому значением  $P_0$  можно пренебречь. Тогда

$$P \cong \rho_0 DU .$$

Из основных уравнений (5.2) и (5.3) можно получить выражения для  $D$  и  $U$ , подставив в них объем единицы массы  $V = 1/\rho$ .

Отсюда

$$\frac{D}{V_0} = \frac{D-U}{V_1}; \quad (5.6)$$

$$P_1 - P_0 = \frac{DU}{V_0}. \quad (5.7)$$

Из уравнения (5.6) следует

$$U = D \frac{V_0 - V_1}{V_0} \quad (5.8)$$

или

$$D = \frac{V_0}{V_0 - V_1} U \quad (5.9)$$

Подставив (5.8), (5.9) в уравнение (5.7), получим

$$D^2 = V_0^2 \frac{P_1 - P_0}{V_0 - V_1}; \quad (5.10)$$

$$U^2 = (P_1 - P_0)(V_0 - V_1). \quad (5.11)$$

Найдем соотношение между давлением и удельным объемом в ударной волне. Для удельного изоэнтропического процесса связь между давлением и объемом задается уравнением адиабаты Пуассона:

$$P \vartheta^k = \text{const},$$

где  $k = c_p/c_v$ ;  $c_p$  – теплоемкость при постоянном давлении.

Это уравнение, предполагающее постоянство энергии, к ударной волне не применимо, поскольку одним из важнейших свойств ударной волны является то, что в ней из-за необратимых потерь энергии при переходе через скачок энтропия растет тем значительнее, чем сильнее волна.

Заменив  $\rho_0$  на  $1/V_0$  в уравнение (5.4), запишем

$$\frac{D}{V_0} \left( \varepsilon_1 - \varepsilon_0 + \frac{U^2}{2} \right) = P_1 U,$$

а с учетом (5.10) и (5.11) получим

$$\varepsilon_1 - \varepsilon_0 = \frac{P_1 + P_0}{2} (V_0 - V_1). \quad (5.12)$$

Если термодинамические свойства вещества известны, то можно выразить удельную энергию как функцию давления и объема единицы массы:

$$\varepsilon_1 = f(P_1, V_1); \quad \varepsilon_0 = f(P_0, V_0).$$

Подставив эти значения в уравнение (2.12), получим уравнение некоторой кривой, проходящей через точку  $P_0, V_0$  и указывающей на искомую связь  $P$  и  $V$ . Эту кривую называют ударной адиабатой, или динамической адиабатой, или адиабатой Гюгонио.

Рассмотрим ударную волну в идеальном газе, для которого  $k = c_p/c_v = \text{const}$ . Внутренняя удельная энергия такого газа

$$\varepsilon_1 = \frac{P_1 V_1}{k-1}; \quad \varepsilon_0 = \frac{P_0 V_0}{k-1}.$$

Подставим эти значения в уравнение (2.12) и после несложных преобразований получим

$$\frac{V_1}{V_0} = \frac{\rho_0}{\rho_1} = \frac{(k-1)P_1 + (k+1)P_0}{(k+1)P_1 + (k-1)P_0}$$

или

$$\frac{P_1}{P_0} = \frac{(k+1)\rho_1 - (k-1)\rho_0}{(k+1)\rho_0 - (k-1)\rho_1}.$$

Последнее уравнение устанавливает связь между параметрами идеального газа на поверхности нестационарного сильного разрыва и называется уравнением динамической адиабаты.

Если  $P_1 \gg P_0$ , то пренебрегая значением  $P_0$  по сравнению с  $P_1$ , можно вычислить предельное увеличение плотности в сильной ударной волне

$$\frac{\rho_1}{\rho_0} = \frac{k+1}{k-1} \quad \text{или} \quad \frac{V_1}{V_0} = \frac{k-1}{k+1}.$$

Как уже было сказано, уравнение адиабаты Гюгонио устанавливает связь между параметрами среды до и после прохождения через нее скачка уплотнения. Изобразив эту связь в виде диаграммы в координатах  $P - V$ , мы получим так называемую кривую Гюгонио (рис.5.4).

Используя эту диаграмму, можно в простой и наглядной форме исследовать некоторые особенности ударных волн. Проведем через точки  $A (P_0, V_0)$  и  $B (P_1, V_1)$ , характеризующие состояние соответственно невозмущенной среды и среды, сжатой ударной волной, прямую. Очевидно, что  $(P_1 - P_0)/(V_0 - V_1) = \text{tg}\alpha$ , где  $\alpha$  – угол наклона этой прямой к оси абсцисс. Таким образом,  $D$  и  $U$  целиком определяются углом наклона  $\alpha$ .

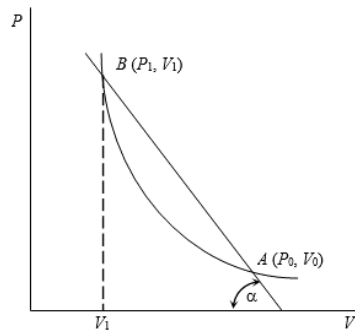


Рис.5.4

Все точки на кривой Гюгонио, лежащие выше точки  $A$ , соответствуют ударной волне, так как для них  $D > C$  и  $U > 0$ . Для ветви же кривой, лежащей ниже точки,  $D > 0$  и  $U < 0$ . Это означает, что среда будет перемещаться в сторону, противоположную распространению возбуждения, и мы будем иметь волну разрежения.

В случае динамической адиабаты бесконечно большое давление получим при  $V_1 = V_0(k-1)/(k+1)$ . Выражение для предельного значения объема единицы массы  $V_1$  при  $P \rightarrow \infty$  можно использовать для вывода некоторых важных соотношений, справедливых для сильных ударных волн. Подставив эти выражения в уравнение (5.10) и пренебрегая  $P_0$ , имеем

$$D^2 = \frac{k+1}{2} P_1 V_0.$$

При аналогичной подстановке в уравнение (2.11) получим

$$U^2 = \frac{2}{k+1} P_1 V_0.$$

Тогда

$$U = \frac{2}{k+1} D.$$

Согласно закону сохранения количества движения при сжатии  $P_1 \cong \rho_0 D U$  можно записать

$$P_1 = \frac{2}{k+1} \rho_0 D^2.$$

Не следует думать, что при сжатии в ударной волне от состояния  $(P_0, V_0)$  до некоторого состояния  $(P_1, V_1)$  проходятся все промежуточные точки на динамической адиабате; в действительности вещество скачком переходит из состояния  $(P_0, V_0)$  в состояние  $(P_1, V_1)$ . Волна с другим давлением также внезапно переведет вещество в другую точку  $(P', V')$ . Кривая динамической адиабаты



представляет собой геометрическое место точек, отвечающих состояниям, получившимся из данного исходного состояния при однократном сжатии ударными волнами разной интенсивности. Реакции взрывного превращения в зависимости от природы ВВ и внешних условий могут протекать с различной скоростью и отличаться по своему характеру (горение, детонация). Пусть ударная волна распространяется по ВВ и исходное состояние системы характеризуется начальным давлением  $P_0$  и начальным удельным объемом  $V_0$ . Под действием ударной волны состояние исходного вещества скачком изменяется и соответствует точке с координатами  $P_1$  и  $V_1$ , лежащей на адиабате Гюгония. Скорость изменения состояния в сильной ударной волне так велика, что приближенно переход из состояния  $(P_0, V_0)$  в состояние  $(P_1, V_1)$  можно считать мгновенным. В сжатом веществе начинается химическая реакция, которая развивается, хотя и весьма быстро, но не мгновенно. По мере прохождения реакции свойства вещества будут изменяться, одновременно начнется выделение тепла. Предположим, что через некоторое время прореагировала часть вещества и выделилось определенное количество тепла. При этом состояние системы будет описываться уже не адиабатой для исходного вещества, а некоторой другой адиабатой, которая, поскольку в системе выделилось тепло, будет лежать выше адиабаты исходного вещества (рис.5.5). Изменение состояния при переходе от адиабаты для исходного вещества 1 к адиабате 2 является не произвольным, а строго определенным.

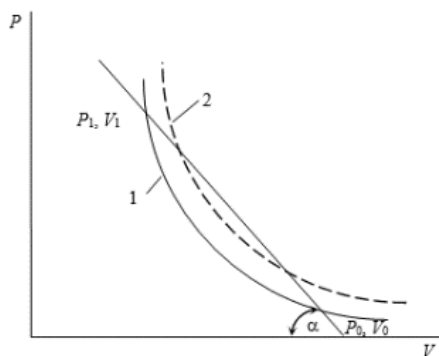


Рис.5.5

Если процесс детонации стационарен, то переход от адиабаты 1 к адиабате 2 должен совершаться по прямой линии, соединяющей точки с координатами  $(P_1, V_1)$  и  $(P_0, V_0)$ . Как видно из рис.5.5, выражение  $(P_1 - P_0)/(V_0 - V_1)$  определяет тангенс угла наклона прямой, соединяющей точки, соответствующие исходному состоянию  $(P_0, V_0)$  и фронту ударной волны  $(P_1, V_1)$ . При стационарном режиме детонации с такой же скоростью, что и фронт ударной волны должны распространяться все другие промежуточные состояния, соответствующие выделению той или иной энергии реакции, т.е. изменение состояния в процессе химической реакции должно происходить по прямой, соединяющей точки с координатами  $(P_0, V_0)$  и  $(P_1, V_1)$ , так как только на этой прямой все промежуточные состояния распространяются по веществу с той же скоростью  $D$ , что и фронт волны. На диаграмме  $P-V$  прямая равных скоростей распространения, по которой совершается переход с одной адиабаты на другую, описывается уравнением и называется прямой Михельсона.

$$P = P_0 + \frac{D^2}{V_0^2}(V_0 - V)$$

Рассмотрим переход от адиабаты Гюгонии для исходного вещества к адиабате для конечных продуктов, соответствующей полному завершению реакции и выделению полного тепла (рис.5.6).

В случае устойчивой нормальной детонации в результате сжатия исходного вещества в ударной волне состояние его будет соответствовать точке 1. По мере прохождения реакции состояние вещества изменяется по прямой 1-2-0. Точка касания 2 отвечает конечному состоянию продуктов детонации после завершения химического превращения и выделения полного тепла. Точка касания часто называется точкой Жуге. Очевидно, что исходное вещество не может быть сжато до состояния, лежащего на адиабате 0-6-1-3 ниже точки 1: соответствующая прямая Михельсона (например, 0-6), по которой должно изменяться состояние, не попадает на адиабату конечных продуктов. Казалось бы, однако, что исходное вещество может быть сжато до любого состояния, отвечающего точкам адиабаты, расположенным выше точки 1 (например, до состояния

3), и переход с адиабаты исходного вещества по адиабате продуктов может помимо касательной осуществляться по бесчисленному количеству прямых Михельсона, являющихся секущими адиабаты конечных продуктов, одна из которых 3-4-5-0 показана на рис.5.6. Каждой секущей соответствует собственная скорость детонации.

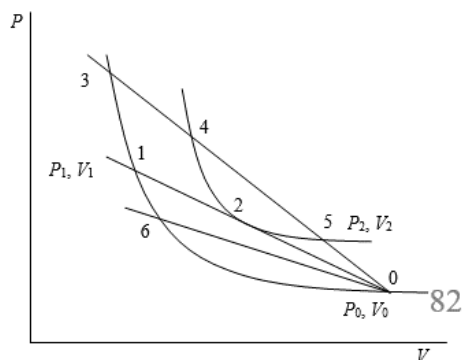


Рис.5.6

Итак, процесс химического превращения в детонационной волне сопровождается расширением вещества и падением давления. Наиболее высокое давление достигается в исходном веществе, по мере прохождения реакции и выделения тепла давление падает и после завершения реакции оказывается меньше, чем исходное. При переходе на адиабату конечных продуктов промежуточные и конечное состояния соответствуют точкам на прямой Михельсона, причем конечное состояние, единственное по своей реализации, соответствует также единственной точке на адиабате Гюгонио для конечных продуктов. Очевидно, что адиабата и прямая в случае их касания имеют одну общую точку. На рис.5.6 это точка 2. Состояние  $(P_2, V_2)$  соответствует поверхности, которая разделяет зону химической реакции и продукты детонации и называется поверхностью Чепмена – Жуге.

Для детонационных волн так же, как и для ударных волн, справедливы законы сохранения массы, импульса, энергии, поэтому основные соотношения (5.10) и (5.11) остаются в силе.

При детонации  $D = \text{const}$  и тогда

$$P = P_0 + \frac{V_0 - V_2}{V_0^2} D^2 ;$$

$$\varepsilon_2 - \varepsilon_0 = \frac{1}{2}(P_2 + P_1)(V_0 - V_2) + Q_V, \quad (5.13)$$

где  $q_V$  – удельная энергия взрывчатого превращения.

Уравнение Гюгонио (5.13) получено из закона сохранения энергии

$$\frac{D}{V_0} \left( \varepsilon_1 - \varepsilon_0 + \frac{U_2^2}{2} \right) = P_1 U_2.$$

После подстановки  $D = V_0 \sqrt{P_1 - P_0 / (V_0 - V_1)}$  имеем

$$\varepsilon_1 - \varepsilon_2 = \frac{P_1 + P_0}{2} (V_0 - V_1),$$

где  $\varepsilon_2$  – удельная энергия продуктов за зоной химической реакции;  $U_2$  – скорость продуктов детонации за фронтом волны.

Первое слагаемое правой части уравнения (5.13) соответствует изменению внутренней энергии вследствие сжатия вещества ударной волной; второе слагаемое – избытку энергии за счет теплоты реакции.

Состояние реагирующей смеси изменяется вдоль прямой Михельсона непрерывным образом. Поскольку реакция протекает необратимо, энтропия всей реагирующей смеси возрастает необратимо и достигает максимума на прямой 0-1 (рис.5.6) в точке касания 2, отвечающей полному выделению тепла. При бесконечно малом перемещении по прямой вблизи точки касания прямая отстоит от кривой на бесконечно малые второго порядка. Тепловой эффект при таких перемещениях также бесконечно мало отличается от полного теплового эффекта, достигаемого на кривой. Это значит, что энтропия, возрастающая по мере перемещения по прямой 1-2 и

достигающая в точке 2 максимума, при бесконечно малых перемещениях вблизи точки касания не изменяется, т.е. вблизи точки касания адиабата Гюгонио совпадает с изоэнтропой (адиабатой Пуассона).

Кривая Гюгонио для детонационной волны (рис.5.7) построена для конечных продуктов реакции, обладающих повышенным содержанием энергии, и поэтому должна лежать соответственно выше, чем кривая Гюгонио для ударной волны, производящей сжатие исходного взрывчатого вещества.

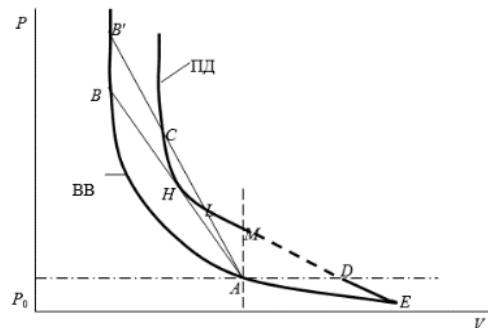


Рис.5.7

Для процессов детонации реальное значение имеет лишь ветвь  $CH$  на кривой Гюгонио для продуктов детонации, ибо вдоль этой ветви  $D > 0$  и  $U < 0$ , что соответствует процессам горения, в которых продукты горения движутся в сторону, противоположную направлению распространения фронта пламени. Участок  $MD$  не отвечает никакому реальному стационарному процессу, так как здесь  $P_H - P_0 > 0$  и  $V_0 - V_H < 0$ , т.е.  $D$  и  $U$  имеют мнимые значения (здесь и далее индекс  $H$  указывает, что параметр относится к плоскости Чепмена – Жуге).

Проведем из точки  $A$  ( $P_0, V_0$ ) прямую  $AC$  под некоторым углом  $\alpha$ . Она пересечет кривую Гюгонио (для продуктов детонации) в двух точках, но при этом из условия  $D = V_0 \sqrt{\text{tg} \alpha}$  следует, что одна и та же скорость детонации может быть реализована при двух различных состояниях разложившегося вещества во фронте волны, что с физической точки зрения является абсурдным.

Чемпен и Жуге высказали и с разных точек зрения обосновали положение, что процессу детонации отвечает лишь одно единственное состояние продуктов взрыва, характеризуемое точкой  $H$ , в которой прямая Михельсона касается адиабаты Гюгонио для ПД. Очевидно, что в этой точке  $\text{tg} \alpha$ , а следовательно и скорость детонации минимальна. Эта минимальная стационарная скорость называется нормальной скоростью детонации.

Доказано, что вблизи точки касания адиабата Гюгонио совпадает с изоэнтропой (адиабата Пуассона). Покажем, что в этом состоянии, которому соответствует точка  $H$ , скорость детонации равна скорости распространения возмущения в продуктах взрыва (относительно неподвижного наблюдателя):  $D = U_H + C_H$ , где  $C_H$  – скорость звука в плоскости Чепмена – Жуге. Условие касания можно записать в виде

$$\frac{P_H - P_0}{V_0 - V_H} = - \left( \frac{dP}{dV} \right)_H. \quad (5.14)$$

Поскольку в этой точке адиабата Гюгонио совпадает с изоэнтропой, то

$$\left( \frac{dP}{dV} \right)_H = \left( \frac{dP}{dV} \right)_S.$$

Это углы наклона касательных в точке  $H$  к адиабате Гюгонио и изоэнтропе. Следовательно,

$$\frac{P_H - P_0}{V_0 - V_H} = - \left( \frac{dP}{dV} \right)_S. \quad (5.15)$$

Используя выражение (5.10), запишем

$$D = V_0 \sqrt{\frac{P_1 - P_0}{V_0 - V_1}} = V_0 \sqrt{\frac{P_H - P_0}{V_0 - V_H}} = V_0 \sqrt{- \left( \frac{dP}{dV} \right)_S}.$$

Из уравнения сохранения массы  $\rho_0 D = \rho_1 (D - U)$  следует, что

$$V_0 = \frac{D}{D - U_H} V_H.$$

Тогда

$$D - U_H = V_H \sqrt{\frac{P_H - P_0}{V_0 - V_H}} = V_H \sqrt{-\left(\frac{dP}{dV}\right)_S} = \sqrt{\left(\frac{dP}{d\rho}\right)_S} = \sqrt{k \frac{P_H}{\rho_H}}.$$

Здесь  $\sqrt{(dP/d\rho)_S} = C$  – местная скорость звука. Так называется скорость распространения в данной точке среды бесконечно малых возмущений.

Для идеального газа  $P/\rho^k = \text{const}$ , поэтому  $C^2 = k(P/\rho)$ , что характеризует местную скорость звука, т.е. скорость звука в продукте взрыва в точке касания тотчас после завершения реакции. Отсюда  $DU_H = C_H$ .

Таким образом, основные соотношения во фронте детонационной волны определяются на основе законов сохранения массы, импульса, энергии и условий устойчивой детонации. Для определения температуры необходимо к этим уравнениям добавить уравнение состояния  $P_H = f(\rho_H, T_H)$ .

Следовательно, для количественной характеристики процессов детонации ВВ необходимо знать величины  $P_H$ ,  $\rho_H$ ,  $T_H$ ,  $U_H$ ,  $D$ . Для определения этих параметров детонационной волны мы имеем пять основных уравнений. Выпишем их:

$$\begin{aligned} E_H - E_0 &= \frac{P_H + P_0}{2} (V_0 - V_H) + Q_V; \quad D = V_0 \sqrt{\frac{P_H - P_0}{V_0 - V_H}}; \\ U_H &= (V_0 - V_H) \sqrt{\frac{P_H - P_0}{V_0 - V_H}}; \quad \frac{P_H - P_0}{V_0 - V_H} = \left(-\frac{dP}{dV}\right)_S = \frac{kP_H}{V_H}; \\ &P_H = f(\rho_H, T_H). \end{aligned} \quad (5.16)$$

Химические реакции в детонационной волне не мгновенны. Время протекания химической реакции определяется средним числом столкновений  $\nu \gg 1000$ , которое необходимо для совершения одного элементарного акта реакции. Поэтому ширина фронта детонационной волны во много раз больше ширины фронта ударной волны, что приводит к резкому уменьшению градиентов в переходной зоне и позволяет пренебречь в ней силами вязкости и теплопроводностью. Вследствие относительно небольшого температурного градиента роль теплового потока в передаче детонации по веществу мала. Сжатие исходного вещества ударной волной происходит настолько быстро, что за время сжатия химический состав его не успевает измениться. Химическая реакция начинается и происходит в уже сжатом веществе и сопровождается выделением энергии, что обуславливает подъем температуры и последующее расширение продуктов реакции. Вследствие этого давление во фронте несколько снижается.

Условие стационарности детонационного процесса требует, чтобы вся зона реакции и все промежуточные ее состояния перемещались по веществу с одной и той же скоростью. Если бы такое постоянство скоростей не наблюдалось, то детонационная волна в ходе своего распространения деформировалась бы, что привело бы к нарушению ее устойчивости и стационарного характера процесса в целом.

Такой режим, при котором  $D = \text{const}$ , может быть реализован лишь в случае, когда все параметры состояния протекания химической реакции или после ее завершения будут изменяться вдоль прямой Михельсона:

$$P = P_0 + \frac{D^2}{V_0^2} (V_0 - V).$$

Процесс формирования детонационной волны можно проследить по диаграмме (рис.5.8). Пусть исходное ВВ сжато ударной волной, обладающей скоростью  $D$ , равной скорости детонации, до состояния  $B$ , требуемого для возбуждения химической реакции. По мере протекания реакции и выделения тепла вещество переходит в состояния, промежуточные между исходным веществом и конечными продуктами взрыва. Переход их состояния  $B$  в конкретное состояние  $H$  совершается по прямой  $BH$  при соблюдении постоянства скорости и обусловлен расширением продуктов реакции вследствие выделения тепла. На рис.5.8 показан примерный характер распределения давления и плотности за фронтом детонационной волны.

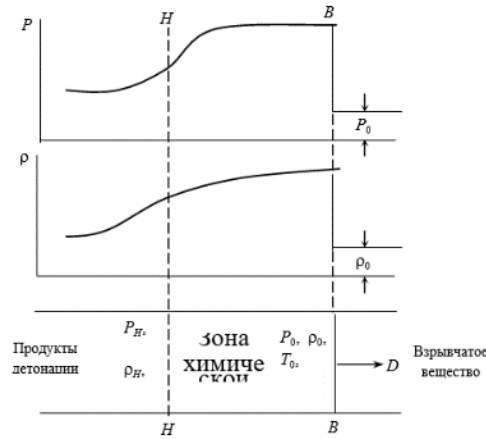


Рис. 5.8

Кроме нормального режима детонации, соответствующего прямой  $AB$ , касательной к конечной ударной адиабате ПД, возможны еще два других детонационных режима: пересжатой и недосжатой детонации. Для первого режима  $U + C > D$ , а для второго  $U + C < D$ . Параметры  $U$  и  $C$  в этих неравенствах характеризуют состояния ПД после окончания химической реакции (точки  $C$  и  $L$  на рис.5.7).

Возбудим детонацию с помощью более сильной ударной волны, обладающей скоростью  $D_1 > D$  и сжимающей вещество до состояния, характеризуемого точкой  $B'$ . Конечное состояние продуктов реакции определяется точкой  $C$ . Однако в этом состоянии детонационная волна не может быть устойчивой, так как в продуктах детонации возникает волна разрежения, головная часть которой распространяется в этих продуктах со скоростью, равной  $U + c$ , где  $c$  – скорость звука.

Пересжатый режим точки  $C$  на практике может возникнуть тогда, когда детонация заряда  $ВВ$  возбуждается инициатором, имеющим повышенную скорость детонации по сравнению с иницируемым зарядом либо при ударе  $ВВ$  инертным телом с такой скоростью, что в  $ВВ$  реализуется ударное сжатие, соответствующее точке  $B'$ . В этом случае нормальный режим детонации, соответствующий прямой  $AB$ , устанавливается на некотором расстоянии от места инициирования. На этом участке детонация представляет собой неустановившийся процесс.

В этом случае состояние ПД (точка  $C$ ) лежит на ветке  $HC$  детонационной адиабаты продуктов детонации. Но волны разрежения для пересжатой детонации догоняют фронт детонационной волны, поскольку  $Uc + cc > D$  и делают его нестационарным.

### Расчет параметров детонационной волны для газовых смесей

Для количественной характеристики процессов детонации  $ВВ$  необходимо знать следующие величины:  $P_H, \rho_H, T_H, U_H$  и  $D$ . Для определения этих параметров детонационной волны мы имеем пять основных уравнений (5.16). Заметим, что вид уравнения состояния в этой системе зависит от состояния вещества (газовые взрывчатые смеси, конденсированные  $ВВ$ ). Для газов уравнение состояния имеет вид  $P_H = \rho_H RT_H$ .

Найдем скорость детонации. Запишем формулу (2.15) в виде

$$\frac{P_H - P_0}{V_0 - V_H} = k \frac{P_H}{V_H}.$$

В случае детонационных волн  $P_2 \gg P_0$ , поэтому

$$V_H = \frac{k}{k+1} V_0 \quad \text{и} \quad \frac{V_H}{V_0} = \frac{k}{k+1}. \quad (5.17)$$

С учетом соотношений (5.17) и уравнения (5.10) найдем

$$D^2 = V_0^2 \frac{kP_H}{V_H} \quad \text{или} \quad D = \frac{V_0}{V_H} \sqrt{kP_H V_H}. \quad (5.18)$$

По уравнению состояния идеального газа

$$P_H V_H = n R T_H, \quad (5.19)$$

где  $n$  – число молей на единицу массы.

Подставив (5.17) и (5.19) в уравнение (5.18), получим

$$D = \frac{k+1}{k} \sqrt{k n R T_H}.$$

Вместо  $n$  можно ввести среднюю молекулярную массу продуктов взрыва  $\bar{\mu} = 1/n$ , тогда

$$D = \frac{k+1}{k} \sqrt{\frac{k R T_H}{\bar{\mu}}}.$$

Из полученных уравнений следует, что скорость детонации при прочих равных условиях должна быть пропорциональна температуре детонации  $T_H$  и числу молей газа  $n$  на единицу массы. Для вычислений эти уравнения неудобны, так как в них входит температура детонации  $T_H$ , которая не равна температуре мгновенного превращения при постоянном объеме из-за дополнительного разогрева при сжатии в детонационной волне.

Поэтому введем в рассмотрение энтальпию  $H$  или тепловую функцию, задаваемую соотношением  $H = c_p T$ . Для идеального газа

$$H = c_p T = \frac{k}{k-1} P V.$$

Из уравнения состояния следует

$$T = \frac{P V}{R}, \quad k = \frac{c_p}{c_v}, \quad R = c_p - c_v = c_v (k - 1).$$

Поскольку внутренняя энергия

$$E = c_v T = \frac{1}{k-1} P V,$$

то энтальпия

$$H = E + P V.$$

Для разности удельных внутренних энергий двух состояний мы получили уравнение (5.12), для разности энтальпий двух состояний имеем

$$H - H_0 = \frac{V + V_0}{2} (P - P_0).$$

Энтальпия исходного состояния с учетом удельной потенциальной энергии  $q$ , выделяемой при реакции в виде тепла:

$$H_0 = \frac{k}{k-1} P_0 V_0 + q,$$

а энтальпия продуктов детонации в точке  $H$

$$H_H = \frac{k}{k-1} P_H V_H.$$

Отсюда

$$H_H - H_0 = \frac{V_H + V_0}{2} (P_H - P_0)$$

или

$$\frac{k}{k-1} P_H V_H - \frac{k}{k-1} P_0 V_0 - q = \frac{V_0 + V_H}{2} (P_H - P_0).$$

Поскольку в реальных детонационных процессах

$$q \gg \frac{k}{k-1} P_0 V_0 = c_p T_0, \quad \text{а} \quad \frac{k}{k-1} P_0 V_0 \ll \frac{k}{k-1} P_H V_H,$$

то

$$\frac{k}{k-1} P_H V_H - q = \frac{V_0 + V_H}{2} P_H,$$

откуда

$$P_H V_0 = 2(k-1)q.$$

Поскольку

$$D^2 = kV_0^2 \frac{P_H}{V_H} \quad \text{и} \quad \frac{V_0}{V_H} = \frac{k+1}{k},$$

то

$$D^2 = 2(k^2 - 1)q; \quad D = \sqrt{2(k^2 - 1)q}.$$

В полученной зависимости  $D$  выражено в функции только удельной теплоты взрыва  $q$  и величины  $k$ .

Теперь определим связь скорости детонации  $D$  и скорости потока продуктов в точке Жуге  $U_H$ .

Из уравнений сохранения массы и импульса (5.11) с учетом  $V_H = \frac{k}{k+1}V_0$  и  $P_H V_0 = 2(k-1)q$  имеем

$$U_H^2 = 2 \frac{k-1}{k+1} q = 2 \frac{(k^2 - 1)}{(k+1)^2} q.$$

Так как  $D^2 = 2(k^2 - 1)q$ , то  $U_H = D/(k+1)$  и  $P_H = \rho_0 D U = \frac{\rho_0 D^2}{k+1}$ .

Теория ударных волн позволяет выразить скорость потока вещества и давление на фронте сильной ударной волны в виде

$$U = \frac{2}{k+1} D; \quad P_1 = \frac{2}{k+1} \rho_0 D^2.$$

Следовательно, в исходном ВВ, сжатом ударной волной, давление и скорость движения вещества в 2 раза выше, чем в продуктах тотчас после завершения реакции.

Таким образом, сильная ударная волна сжимает взрывчатое вещество от начального состояния  $P_0, V_0$ , в соответствии с ударной адиабатой Гюгонио, до состояния  $P_1, V_1$ , где  $P_1 \gg P_0$ . Затем в веществе (в зоне реакции) начинается быстрая химическая реакция, выделяется тепло, падает давление, увеличивается удельный объем. Через время  $\tau$  реакция заканчивается и вещество переходит в состояние, отвечающее точке Жуге на адиабате конечных продуктов В этой точке  $P_2 = P_1/2; U_2 = U_1/2; C_2 = D - U_2$ .

Это головная часть детонационной волны носит название химического пика. В нем  $C > D - U$ , и это означает, что энергия, выделяющаяся при реакции, идет к фронту ударной волны и подпитывает его, не давая затухнуть. После точки Жуге спад давления идет медленнее, и на кривой в этой точке наблюдается излом.

## Тема 6. Детонационный процесс в конденсированных ВВ.

### Теория детонации конденсированных ВВ

В конденсированных, т.е. жидких и твердых, ВВ в единице объема сконцентрировано до  $2,5 \text{ ккал/см}^3$  химической энергии, в то время как во взрывчатом газе до  $10^{-3} \text{ ккал/см}^3$ . Начальная плотность конденсированных ВВ  $\rho_0 \approx 2,0 \text{ г/см}^3$ , а при их детонации плотность продуктов детонации (ПД)  $\rho_H = 2,7 \text{ г/см}^3$ ; давление в детонационной волне  $P_H = 40 \cdot 10^9 \text{ Па}$ , а температура  $T_H = 4000 \text{ К}$ . Весь процесс химического превращения длится очень малые промежутки времени ( $\sim 10^{-7} \text{ с}$ ), что затрудняет экспериментальное изучение этого процесса, который значительно сложнее, чем во взрывчатом газе.

В отличие от газовых молекулы конденсированных ВВ находятся в тесном контакте между собой, что может существенно влиять на механизм химической реакции. Однако, как показали Л.Д.Ландау и К.П.Станюкович, основные положения гидродинамической теории детонации, полученные для газовых взрывчатых систем, остаются корректными и для конденсированных ВВ. Как и при детонации газов, фронт детонационной волны конденсированного ВВ представляет собой ударную волну, в которой ВВ сжимается ударно как инертное вещество. Тепло химической реакции, выделяющейся за фронтом ударной волны, восполняет необратимые потери энергии, имеющие место при ударном сжатии ВВ, благодаря чему параметры ударной волны остаются постоянными, т.е. эпюра давлений в стационарной детонационной волне не меняется по мере ее движения по заряду.

За зоной химической реакции с повышением давления распространяется зона ПД, где давление в изэнтропной волне расширения изменяется сравнительно медленно. Эти две зоны разделены поверхностью Чепмен – Жуге. Таким образом, стационарная зона (зона химической реакции) граничит с областью нестационарного течения ПД (область зон разрежения).

В стационарной детонационной волне эпюра давлений и скоростей определяется кинетикой разложения ВВ, а в зоне расширяющихся продуктов детонации она зависит от геометрии заряда и характеристик внешней среды (воздух, вода, оболочка и т.д.). Стационарная зона при нормальном режиме детонации должна двигаться относительно ПД со сверхзвуковой скоростью; в противном случае волна разрежения догонит стационарную зону (зону химической реакции), что приведет к расширению вещества в зоне химической реакции, падению давления и температуры, и процесс стационарного распространения детонационной волны станет невозможным. Поэтому возмущения из зоны продольных волн при стационарном режиме детонации не могут догнать зону химической реакции. В самой же зоне химической реакции скорость возмущений больше скорости ударной волны, что обеспечивает влияние выделяющейся химической энергии на ударную волну.

Параметры детонационной волны ( $\rho_H \gg \rho_0$ ) в точке Жуге связаны с параметрами исходного покоящегося ВВ законами сохранения массы, импульса, энергии, условиями Чепмена – Жуге и уравнениями состояния, которые можно записать в виде

$$\rho_0 D = \rho_H (D - U_H); \quad P_H = \rho_0 D U_H;$$
$$E_H = \frac{1}{2} P_H (V_0 - V_H) + q_V; \quad - \left( \frac{\delta P}{\delta V} \right)_H = f(\rho_H, T_H).$$

В отличие от детонации идеального газа, когда известны уравнения состояния продуктов детонации  $P_H = f(\rho_H, T_H)$ , а также функция  $E_H = E(P_H, \rho_H)$ , что позволяет по известным  $q_V$ ,  $\rho_0$  и  $P_0$  найти  $D$ ,  $P_H$ ,  $\rho_H$ ,  $T_H$ , достаточных сведений о составе и свойствах продуктов детонации конденсированных ВВ во фронте детонационной волны нет. Поэтому для расчетов необходимо привлечение экспериментальных данных. Так как плотность продуктов детонации приблизительно равна плотности твердого вещества (вернее, они одного порядка), Ландау и Станюкович предложили рассматривать состояние ПД как состояние кристаллической решетки твердого тела. Известно, что энергия твердого тела складывается из упругой энергии, обусловленной силами взаимодействия между молекулами, и из тепловой энергии колебаний частиц около их положения равновесия. Можно предположить поэтому, что в условиях детонации упругая



энергия и упругая часть давления являются преобладающими. Иными словами, давления в ПД зависят в основном от плотности ВВ.

Следовательно, получив экспериментальную зависимость  $D = f(\rho_0)$ , можно установить уравнение состояния.

Из уравнения (2.10) для скорости детонации  $D$  (для ударной волны), пренебрегая  $P_0$ , имеем

$$P_H = D^2 \frac{V_0 - V_H}{V_0^2}$$

или

$$P_H = D^2 \frac{\rho_0(\rho_H - \rho_0)}{\rho_H}. \quad (6.1)$$

Здесь скорость  $D$  определена из эксперимента как начальная функция плотности ВВ  $\rho_0$ . Установлено, что при плотности 1,0-1,7 г/см<sup>3</sup> приближенно можно считать, что  $D$  прямо пропорционально  $\rho_0$ :  $D = A\rho_0$ , в первом приближении для индивидуальных ВВ  $A \approx 4,5 \cdot 10^5$  см<sup>4</sup>/(г·с).

Однако в выражении (6.1) неизвестна плотность продуктов взрыва во фронте детонации  $\rho_H$ . Допустим, что  $\rho_H$  пропорциональна начальной плотности ВВ, т.е.  $\rho_H = h\rho_0$ , где  $h$  – коэффициент пропорциональности.

Подставляя  $D$  и  $\rho_H$  в (6.1), имеем

$$P_H = A^2 \rho_0^2 \frac{\rho_0(h\rho_0 - \rho_0)}{h\rho_0} = A^2 \frac{h-1}{h} \rho_0^3. \quad (6.2)$$

Введя обозначение

$$\frac{A^2(h-1)}{h} = c,$$

получим

$$P_H = c\rho_0^3.$$

Выражение (6.2) можно записать в виде

$$P_H = A^2 \frac{h-1}{h^4} h^3 \rho_0^3 = A^2 \frac{h-1}{h^4} \rho_H^3,$$

так как  $h\rho_0 = \rho_H$ . Обозначив  $A^2 \frac{h-1}{h^4} = B$ , получим  $P_H = B\rho_H^3$ .

Таким образом, из экспериментально установленного факта, что скорость детонации приближенно пропорциональна начальной плотности ВВ, следует, что давление во фронте детонации пропорционально кубу плотности ВВ и кубу плотности продуктов взрыва.

Константу  $h$  определим из выражения для  $D$ , находя его минимум, так как точка касания соответствует минимальной из возможных скоростей детонации. Подставив  $P_H = B\rho_H^3$  в уравнение

$$P_H = D^2 \frac{\rho_0(\rho_H - \rho_0)}{\rho_H},$$

найдем

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

Дифференцируя  $D$  по  $\rho_H$  и приравнявая производную нулю, имеем

$$\frac{\partial D^2}{\partial \rho_H} = B \frac{\rho_0(\rho_H - \rho_0)4\rho_H^3 - \rho_H^4\rho_0}{\rho_0^2(\rho_H - \rho_0)^2} = 0;$$

так как знаменатель не может быть равен бесконечности, то

$$\rho_0(\rho_H - \rho_0)4\rho_H^3 - \rho_H^4\rho_0 = 0 \quad \text{или} \quad 3\rho_H = 4\rho_0,$$

т.е.  $\rho_H = 4/3\rho_0$ , следовательно  $h = 4/3$ . Из соотношения  $\rho_H/\rho_0 = (k+1)/k$  найдем показатель политропы  $k = 3$ .

Теперь можно записать формулы для расчета параметров на фронте детонационной волны:

$$D = V_0 \sqrt{\frac{\rho_H - \rho_0}{V_0 - V_H}}; \quad P_H = \rho_0 D U = \frac{\rho_0 D^2}{k+1}; \quad U = D \frac{1}{k+1};$$

$$C = D \frac{k}{k+1}; \quad V_H = V_0 \frac{k}{k+1}.$$

Обычно экспериментально измеряют кинематические параметры  $D$  и  $U$  и вычисляют плотность продуктов  $\rho_H$ , давление в детонационной волне, местную скорость звука. При этом наиболее точные значения плотности получаются при расчете по формуле  $P = \rho_0 D U$ , так как в нее входят непосредственно только экспериментальные величины.

Уравнение политропы позволяет рассчитать скорость детонации как функцию теплоты взрыва и показателя политропы:

$$D = \sqrt{2q_V(k^2 - 1)}. \quad (6.3)$$

Полученные из выражения (6.3) значения  $D$  для конденсированных ВВ всегда завышены, даже с учетом переменного, зависящего от плотности ВВ, значения  $k$ . Указанная формула применима только при предельной плотности ВВ, при которой энергия химического превращения полностью переходит в упругую энергию без повышения температуры. Тем не менее, для ряда оценок полезно пользоваться зависимостью в виде

$$D = f(\rho_0) \sqrt{2q_V(k^2 - 1)}.$$

В частности для приближенной оценки скорости детонации нового ВВ при равных плотностях и предполагаемых близких значениях показателя политропы нового и эталонного ВВ можно воспользоваться соотношением

$$\frac{D_x}{D_{эт}} = \sqrt{\frac{q_x}{q_{эт}}},$$

где индекс  $x$  относится к новому ВВ, индекс  $эт$  – к эталонному ВВ с известной скоростью детонации.

Для вычисления температуры детонации может быть использована зависимость, предложенная Г.А.Авакяном:

$$T_d = 4,8 \cdot 10^{-9} P V (V - 0,2) \mu_{ср},$$

для скорости детонации

$$D = f(\rho_0) \sqrt{\frac{T_d}{\mu_{ср}}},$$

где  $\mu_{ср}$  – средняя молекулярная масса;

$$f(\rho_0) = \sqrt{\frac{10,4 \cdot 10^8 \rho_0}{\frac{k}{(k+1)^2} \left( \frac{5k}{k+1} - \rho_0 \right)}}.$$

Если  $f(\rho_0)$  аппроксимировать как линейную зависимость, то

$$D = 643 \sqrt{\frac{T}{\mu_{ср}}} + k(\rho_0 - 1,6),$$

где при  $\rho_0 = 1,6 \text{ г/см}^3$   $k = 3600$ ; при  $\rho_0 > 1,6 \text{ г/см}^3$   $k = 4000$ .

Температура в детонационной волне в этом случае

$$T_d = \frac{k_T q_V}{C_V} + 290k,$$

где  $k_T$  – безразмерный эмпирический коэффициент,  $k_T = 0,773 + 7,75 \cdot 10^{-5} q_V$ .

Экспериментально установлено, что для конденсированных ВВ, состоящих из углерода, водорода, азота и кислорода в диапазоне плотностей от  $0,5$  до  $4,0 \text{ г/см}^3$ , зависимость скорости детонации от плотности может быть представлена уравнением

$$D_{\rho_1} = D_{\rho_0} + M(\rho_1 - \rho_0),$$

где  $M$  – коэффициент пропорциональности (табл.3.1).

Таблица 6.1

| Взрывчатое вещество            | Плотность $\rho_0$ , г/см <sup>3</sup> | Скорость детонации $D_{\rho_0}$ , м/с | Коэффициент $M$ |
|--------------------------------|--|---------------------------------------|-----------------|
| Тротил                         | 1,0                                    | 5010                                  | 3225            |
| ТЭН                            | 1,0                                    | 5550                                  | 3950            |
| Пентолит 50/50 (ТЭН-тротил)    | 1,0                                    | 5480                                  | 3100            |
| Гексоген                       | 1,0                                    | 6080                                  | 3590            |
| Тетрил                         | 1,0                                    | 5600                                  | 3225            |
| Пикриновая кислота             | 1,0                                    | 5255                                  | 3045            |
| Тетритол 65/35 (тетрил-тротил) | 1,6                                    | 7300                                  | 3400            |
| Азид свинца                    | 4,0                                    | 5100                                  | 560             |
| Гремучая ртуть                 | 4,0                                    | 5050                                  | 890             |

При начальной плотности  $\rho_0 > 1,0$  г/см<sup>3</sup> давление в точке Жуге и скорость детонации могут быть вычислены с помощью соотношений

$$P_H = F\varphi\rho_0^2; \quad D = A(1 + B\rho_0)\sqrt{\varphi}; \quad \varphi = N\sqrt{M_{cp}q_V},$$

где  $F = 15,58$ ;  $A = 1$ ;  $B = 1,3$ .

Для определения числа молей  $N$  продуктов детонации на 1 г ВВ, средней молярной массы продуктов детонации  $M_{cp}$  и теплоты взрыва  $q_V$  в точке Чепмена – Жуге необходимо знать формулу химической реакции ВВ и теплоту образования продуктов детонации и ВВ.

### Критические условия распространения детонации

При выводе основных соотношений в детонационной волне рассматривалась одномерная задача для плоской волны. В этом случае вся потенциальная химическая энергия реализуется в детонационной волне и определяет параметры детонации (скорость, давление и др.). В случае неоднородного течения за ударным фронтом параметры детонации в определенных границах становятся зависимыми от поперечных размеров заряда, как это впервые показал Ю.Б.Харитон. Так как зона химического превращения в детонационной волне имеет конечные размеры, то во время химической реакции образующиеся сжатые газообразные продукты стремятся к расширению в радиальном направлении. В результате этого в зону реакции с боковой поверхности заряда входит волна разрежения, а охваченная ею масса вещества теряется как поставщик энергии относительно ударного фронта. Так как глубина проникновения волны разрежения обратно пропорциональна радиусу заряда, то относительные потери энергии в детонационной волне должны уменьшаться с увеличением радиуса заряда (рис.6.1).

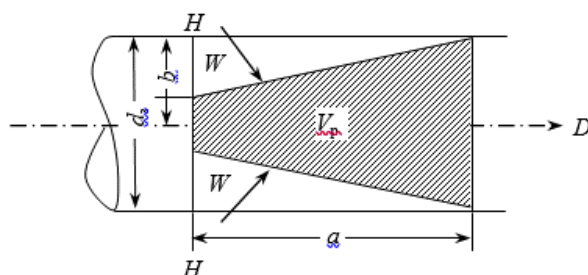


Рис.6.1

Для оценки возникающих в результате действия боковой волны разрежения тепловых потерь в детонационной волне  $D$  Л.В.Дубнов предложил упрощенную схему расчета, основанную на

пропорциональности тепловых потерь массе  $m_p$  или объему  $V_p$  вещества в зоне реакции, охваченной волной разрежения  $W$ . Сам же объем  $V_p$  определяется из соотношения скорости детонации и скорости волны разрежения.

Тепловые потери приводят к уменьшению скорости детонации. Теплоту, реализуемую в детонационной волне, можно назвать эффективной теплотой  $Q_э$ , с учетом которой истинная скорость детонации

$$D = f(\rho_0) \sqrt{2Q(k^2 - 1)},$$

где  $k$  – показатель политропы.

Согласно принятой схеме,

$$\frac{Q_э}{Q_V} = \frac{V_3 - V_p}{V_3} = \eta_d, \quad (6.4)$$

где  $V_3$  – полный объем зоны реакции,  $V_3 = \frac{\pi d^2}{4} a$ ;  $a$  – ширина зоны химической реакции (рис.6.1),

$a = (D - U)\tau$ ;  $d_3$  – диаметр заряда;  $\tau$  – продолжительность реакции в детонационной волне;  $(V_3 - V_p)$  – объем, не охваченный волной разрежения, равный объему усеченного конуса,

$$V_3 - V_p = \frac{1}{2} \pi a [d_3^2 + d_3(d_3 - 2b) + (d_3 - 2b)^2];$$

$b$  – максимальный путь, пройденный волной разрежения за время  $\tau$ ;  $b = c\tau$ ;  $\eta_d$  – некоторый коэффициент трансформации энергии взрыва в энергию детонационной волны.

При  $\eta_d = 1$ , т.е. в том случае, когда тепловые потери отсутствуют, скорость детонации достигает максимального (для данной плотности ВВ) значения. Эту скорость называют идеальной и обозначают  $D_H$ . Режим распространения детонации по веществу с идеальной скоростью называют идеальным.

Подставив значения объемов в уравнение (6.4), получим

$$\eta_d = 1 - \frac{2b}{d_3} + \frac{1}{3} \frac{4b^2}{d_3^2}. \quad (6.5)$$

Это уравнение справедливо в пределах  $b \leq d_3/2$ .

Скорость волны разрежения равна скорости звука в ПД и пропорциональна скорости детонации. Тогда

$$b = C\tau = C \frac{a}{D - U}. \quad (6.6)$$

Но так как  $C$  и  $U$  пропорциональны скорости детонации, то выражение (6.6) можно представить в виде

$$b = ka,$$

где  $k = 2/3$  при  $C = 0,5D$  и  $U = 0,25D$ .

Подставив значение  $b$  в выражение (3.5), получим

$$\eta_d = 1 - \frac{2ak}{d_3} + \frac{1}{3} \left( \frac{2a}{d_3} \right)^2 k^2.$$

Уравнение

$$D = D_H \sqrt{\eta_d} = D_H \sqrt{1 - \frac{2ak}{d_3} + \frac{1}{3} \left( \frac{2a}{d_3} \right)^2 k^2} \quad (6.7)$$

отражает зависимость скорости детонации в заряде произвольного диаметра от диаметра заряда и ширины зоны реакции  $a$ . Так как  $2a/d_3 < 1$  и  $k < 1$ , то  $\eta_d$  возрастает с увеличением  $d$  и уменьшением  $a$ .

Экспериментальные измерения показывают, что скорость детонации с увеличением диаметра заряда растет асимптотически (рис.3.2). Начиная с некоторого предельного диаметра заряда  $d_{пр}$ , дальнейшее его увеличение уже не способствует увеличению скорости.

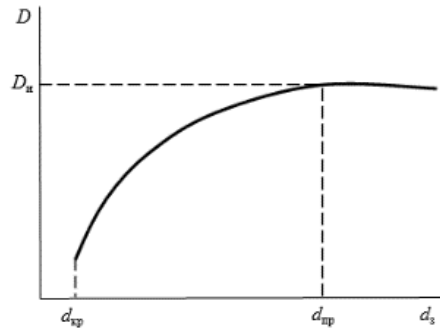


Рис.6.2

При выводе уравнения (6.7) сделано допущение о прямолинейности ударного фронта в детонационной волне и усреднена скорость звука в продуктах взрыва. В реальных условиях всегда имеется некоторая кривизна фронта, зависящая от диаметра заряда, а местная скорость звука в продуктах меняется вместе с изменением их плотности по мере завершения химической реакции. Соответственно характер расхождения потока за фронтом и фронт волны разрежения будут иными, чем это показано на рис.6.1. Это может внести определенные изменения в выражение для  $\eta_d$ .

К близкому уравнению (6.7) для  $D/D_n$  пришел Л.Рот, вводя поправки в уравнение, вытекающее из закона сохранения массы вещества в детонационной волне. Предположив, что потери массы  $\Delta m$  в потоке вследствие бокового расширения в зоне реакции пропорциональны боковой поверхности зоны и обратно пропорциональны площади сечения заряда, он получил уравнение

$$\Delta m = \frac{4k\pi d_3 a}{\pi d_3^2} m = 4k \frac{a}{d_3} m$$

где  $k$  – коэффициент пропорциональности.

Так как  $m \approx \rho_0 D_n$ , то из-за потерь массы в потоке скорость детонации уменьшается с  $D_n$  до  $D_0$ . Поскольку

$$\rho_0 D \approx m - \Delta m = \rho_0 D_n - 4k \frac{a}{d_3} \rho_0 D_n = \rho_0 D_n \left(1 - 4k \frac{a}{d_3}\right),$$

то

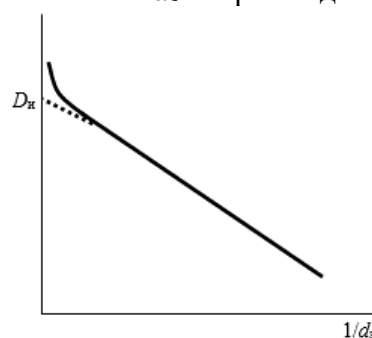
$$D = D_n \left(1 - 4k \frac{a}{d_3}\right).$$

Широко известно также уравнение, предложенное Г.Эйрингом,

$$D = D_n \left(1 - \frac{a}{d_3}\right), \quad (6.8)$$

которое может быть получено из уравнения (3.7), если принять  $k = 1$  и ограничиться двумя первыми членами при разложении в ряд Тейлора.

Экспериментальная проверка уравнений (6.7) и (6.8), предусматривающих линейную зависимость  $D = f(1/d_3)$ , показала, что эта зависимость вблизи  $D_n$ , т.е. при больших  $d_3$ , приобретает криволинейный характер (рис.6.3). Это свидетельствует о более сложном характере зависимости  $a$  от величины  $d_3$ . Во всяком случае, при экспериментальных определениях электромагнитным способом А.Н.Дреминым с сотрудниками установлено, что увеличение  $d_3$  сопровождается уменьшением  $a$ .



Несмотря на искажение линейной зависимости  $D = f(1/d)$  вблизи  $D_{и}$ , ее прямолинейным участком, получаемым по двум-трем опытам, экстраполируемым до пересечения с осями координат, часто пользуются для оценки значений  $D_{и}$  и  $Q_3$  изучаемого ВВ.

Начиная с некоторого диаметра заряда, называемого критическим, радиальные энергетические потери становятся столь большими, что энергетическое равновесие в детонационной волне нарушается, устойчивое распространение ее по заряду становится невозможным и детонация затухает.

Впервые критическое условие устойчивого распространения детонации, связанное с поперечным размером заряда, сформулировал Ю.Б.Харитон: детонация может устойчиво распространяться по заряду, если продолжительность завершения реакции в волне  $\tau$  меньше времени разброса вещества в радиальном направлении  $\theta$ . Исходя из условия,

$$\tau = \frac{a}{D-U} \ll \theta = \frac{d_{кр}}{2C},$$

можно найти критический диаметр

$$d_{кр} \cong 2C\tau \frac{a}{D-U}. \quad (6.9)$$

Из соотношения (6.9) видно, что  $d_{кр}$  тем меньше, чем меньше время реакции и ширина зоны реакции.

Если принять  $U = \frac{1}{4}D$  и  $C = \frac{1}{2}D$ , то  $d_{кр} = \frac{4}{3}a$  (здесь  $a$  – ширина зоны реакции), т.е.  $d_{кр}$  близок по величине к ширине зоны реакции. Порядок такого соотношения для твердых ВВ подтверждается опытными данными.

Условия энергообмена между зоной химической реакции и ударным фронтом и, соответственно, условия устойчивости детонации описаны Ф.А.Баумом. В качестве эффективной (участвующей в энергообмене) зоны принят некоторый конический объем с основанием на ударном фронте и вершиной на оси заряда (заштрихованный участок на рис.6.1). Если  $l_{эф} = a$ , то  $D = D_{и}$ .

Таким образом, условие  $b = d_3/2$  по данной схеме соответствует  $d_{пр}$ . Критическое же условие устойчивости, наступающее при  $d \leq d_{кр}$ , отвечает такому уменьшению эффективной зоны, при котором давление ведущей процесс ударной волны не поддерживается на уровне, достаточном для инициирования впереди лежащих слоев ВВ. Исходя из данной схемы и зависимости  $D \approx \sqrt{Q_3}$ , предложена формула для приближенного вычисления скорости детонации в заряде произвольного диаметра:

$$D = D_{и} \sqrt{d_3 / d_{пр}}.$$

Одна из причин неточности расчета по этой формуле состоит в том, что ширина зоны принимается постоянной, не зависящей от диаметра заряда.

Иная модель критического диаметра для твердых неоднородных ВВ основана на газодинамическом анализе структуры течений за ударным фронтом, связанной с кривизной фронта, и сводится к тому, что, начиная с некоторого диаметра заряда, поток вещества сразу за фронтом заворачивает в сторону от оси заряда и вещество разбрасывается из зоны реакции. В соответствии с принципом Харитона это приводит к затуханию детонации. Предложены уравнения, связывающие  $d_{кр}$  с кинетикой реакции разложения ВВ в детонационной волне, физическими, термохимическими и теплофизическими свойствами ВВ.

Из сказанного выше следует, что  $D_{и}$  и  $D_{кр}$  при заданной плотности ВВ (и постоянстве состава ПД) являются величинами постоянными. Напротив,  $d_{пр}$  и  $d_{кр}$  не могут рассматриваться независимо от среды, в которой взрывается ВВ, ибо сопротивление среды радиальному разлету ПД определяет время этого разлета и соответственно глубину проникновения волны разрежения в зону реакции.

При свободном разлете (в вакуум или малоплотную среду) значения  $d_{пр}$  и  $d_{кр}$  в 1,5-2,5 раза больше, чем при взрывании зарядов в прочной металлической оболочке или в скальной горной породе.

Первоначально предполагалось, что влияние плотной оболочки заряда на  $d_{кр}$  и  $d_{пр}$  связано преимущественно с ее массой. Были даже выведены соответствующие зависимости. Так, например, А.Ф.Беляев полагал, что в грубом приближении масса оболочки эквивалентна

приведенной массе ВВ, т.е. наличие оболочки как бы увеличивает диаметр заряда ВВ на величину, пропорциональную отношению плотностей оболочки и ВВ:

$$\Delta d = 2\Delta \frac{\rho_m}{\rho_0},$$

где  $\Delta$  – толщина оболочки;  $\rho_m$  – плотность материала оболочки.

Г.Эйринг предложил следующее соотношение, учитывающее массу оболочки:

$$\frac{D}{D_{и}} = 1 - 2,17 \frac{\rho_0 a^2}{g_m d_з^3},$$

где  $g_m$  – масса оболочки, приходящаяся на единицу ее площади.

Позже было показано, что на величину  $d_{кр}$  в значительной степени влияет прочность оболочки на разрыв. Последняя возрастает с увеличением толщины стенок, что и дает видимую зависимость от массы оболочки. Непрочные, но массивные оболочки оказывают сравнительно слабое влияние на величины  $d_{кр}$  и  $d_{пр}$ .

В пластичных, легко деформируемых грунтах (глинистых и др.)  $d_{кр}$  мало отличается от  $d_{кр}$  заряда, взрываемого без оболочки на открытом воздухе. В большей мере влияют на эти характеристики несвязанные грунты (песок), вода. В скальных породах указанные критические величины заметно уменьшаются.

Критические геометрические характеристики заряда зависят также от плотности ВВ и его однородности. Для примера на рис.3.4 показана зависимость критического диаметра заряда тротила от плотности для частиц размером 0,01-0,05 мм (кривая 1) и 0,07-0,2 мм (кривая 2). Для индивидуальных ВВ с увеличением плотности величина  $d_{кр}$  уменьшается вплоть до области, близкой к плотности монокристалла, где, как показал А.Я.Апин, может наблюдаться некоторое увеличение  $d_{кр}$  (рис.6.4). Подобный вид зависимости объясняется тем, что с увеличением плотности ВВ увеличивается давление в детонационной волне, соответственно ускоряется химическая реакция и уменьшаются время реакции и ширина зоны. Некоторые данные о параметрах детонации индивидуальных ВВ в зарядах диаметром 40 мм приведены в табл.6.2. Данные о влиянии диаметра заряда на параметры детонации литого ( $\rho_0 = 1,6 \text{ г/см}^3$ ) и порошкообразного ( $\rho_0 = 1 \text{ г/см}^3$ ) тротила, представлены в табл.6.3.

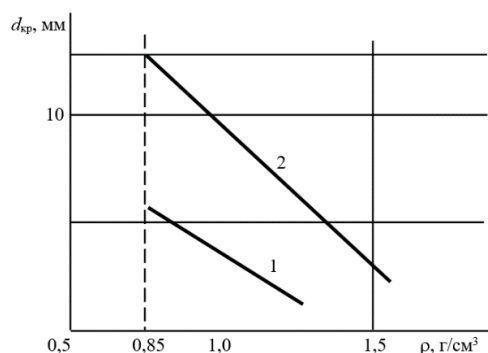


Рис.6.4

При постоянной плотности с увеличением диаметра заряда параметры детонации несколько возрастают. При этом для порошкообразного тротила показатель политропы при диаметрах 60-100 мм практически остается неизменным, при диаметре 40 мм он несколько выше; для литого тротила при изменении диаметра с 27,5 до 60 мм он заметно уменьшается. Время реакции и ширина зоны в указанном диапазоне диаметров уменьшаются незначительно.

Таблица 6.2

| ВВ     | $\rho_0$ ,<br>г/см <sup>3</sup> | $D$ ,<br>м/с | $U$ ,<br>м/с | $P_H$ ,<br>Па | $\rho_H$ ,<br>г/см <sup>3</sup> | $k$  | $\tau$ ,<br>мкс | $a$ , мм |
|--------|---------------------------------|--------------|--------------|---------------|---------------------------------|------|-----------------|----------|
| Тротил | 1,59                            | 6,91         | 1,61         | 17,8          | 2,08                            | 3,3  | 0,2             | 0,97     |
|        | 1,45                            | 6,5          | 1,51         | 14,2          | 1,89                            | 3,3  | 0,2             | 1,0      |
|        | 1,36                            | 6,2          | 1,45         | 12,2          | 1,77                            | 3,27 | 0,32            | 1,35     |
|        | 1,00                            | 5,0          | 1,32         | 6,6           | 1,36                            | 2,8  | 0,47            | 1,58     |

|                                   |      |      |      |      |      |      |      |      |
|-----------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|
|                                   | 0,8  | 4,34 | 1,05 | 3,6  | 1,09 | 3,13 | 0,85 | 2,53 |
| Гексоген                          | 1,72 | 8,46 | 2,12 | 30,8 | 2,29 | 3,0  | 0,1  | 0,7  |
|                                   | 1,60 | 8,13 | 2,0  | 36,0 | 2,12 | 3,06 | 0,2  | 1,0  |
|                                   | 1,46 | 7,6  | 1,88 | 20,8 | 1,92 | 3,05 | 0,2  | 1,0  |
|                                   | 1,29 | 7,0  | 1,82 | 16,4 | 1,74 | 2,85 | 0,24 | 1,12 |
|                                   | 1,1  | 6,18 | 1,76 | 12,0 | 1,54 | 2,52 | 0,33 | 1,29 |
|                                   | 0,95 | 5,8  | 1,72 | 9,5  | 1,35 | 2,37 | 0,4  | 1,4  |
| Тэн<br>флегмат<br>изирован<br>ный | 1,66 | 8,1  | 1,83 | 24,6 | 2,14 | 3,42 | 0,1  | 0,5  |
|                                   | 1,51 | 7,42 | 1,67 | 18,7 | 1,95 | 3,44 | 0,16 | 0,84 |
|                                   | 0,95 | 5,3  | 1,28 | 6,5  | 1,25 | 3,14 | 0,33 | 1,53 |

Таблица 6.3

| Тротил          | $d_z$ , мм | $D$ , м/с | $U$ , км/с | $P_H$ , Па | $\rho_H$ , г/см <sup>3</sup> | $k$  | $\tau$ , мкс | $a$ , мм |
|-----------------|------------|-----------|------------|------------|------------------------------|------|--------------|----------|
| Литой           | 60         | 6,85      | 1,6        | 17,5       | 2,09                         | 3,28 | 0,3          | 1,43     |
|                 | 40         | 6,74      | 1,49       | 16,0       | 2,05                         | 2,52 | 0,315        | 1,51     |
|                 | 35         | 6,4       | 1,43       | 15,2       | 2,03                         | 3,68 | 0,31         | 1,5      |
|                 | 27,5       | 6,2       | 1,2        | 11,9       | 1,98                         | 4,15 | 0,35         | 1,67     |
| Порошкообразный | 100        | 5,1       | 1,54       | 7,8        | 1,43                         | 2,31 | 0,42         | 1,35     |
|                 | 80         | 5,08      | 1,5        | 7,7        | 1,42                         | 2,39 | 0,4          | 1,28     |
|                 | 60         | 5,06      | 1,53       | 7,7        | 1,43                         | 2,31 | 0,46         | 1,45     |
|                 | 40         | 5         | 1,32       | 6,6        | 1,36                         | 2,79 | 0,47         | 1,58     |

Для порошкообразных и особенно смесевых промышленных ВВ, состоящих из разнородных компонентов, большое влияние на критический диаметр оказывает размер частиц ВВ, что объясняется с позиции механизма взрывного горения пористых зарядов при детонации. С уменьшением размера частиц сокращается время их полного сгорания. А.Ф.Беляев вывел эмпирическую зависимость для однородных ВВ:

$$d_{кр} = \frac{aS}{1 + bS},$$

где  $a$  и  $b$  – коэффициенты;  $S$  – характерный линейный размер частицы. Например, для фракций тротила между ситами № 15 и 20 при насыпной плотности  $d_{кр} = 20$  мм, а для очень мелкого продукта (просеянного через сито № 90)  $d_{кр} = 10$  мм.

Критический диаметр уменьшается с увеличением реакционной способности ВВ, которая зависит от природы вещества, его физического состояния (размеров частиц, пористости, плотности заряда), а для смесевых ВВ и от равномерности смешения.

Известное представление о сравнительной химической активности в детонационной волне дают величины  $d_{кр}$  при плотности 1 г/см<sup>3</sup>: 4 мм для гексогена; 5 мм для тетрила и тэна.

Механизм реакции взрывчатого превращения в детонационной волне существенно влияет на критические размеры зарядов, условия возбуждения и распространения детонации.

Можно выделить два характерных режима детонационного превращения: для физически однородных, или гомогенных, ВВ (например, жидких ВВ или монокристаллов) и для насыпных зарядов. По А.Н.Дремину, химическая реакция в детонационной волне в гомогенных системах происходит в форме теплового взрыва за ударным фронтом. Для этого режима характерно, что основное время падает на период индукции (вспышки) или подготовки вещества к реакции, а собственное время интенсивной реакции превращения сравнительно мало. Данный механизм, требующий сильного гомогенного сжатия и разогрева вещества, обуславливает высокое давление инициирующей ударной волны, слабую зависимость скорости детонации от диаметра заряда и узкий диапазон между  $d_{кр}$  и  $d_{пр}$ . Так как за малый период собственно химической реакции образующиеся газы не успевают значительно расширяться, потери вследствие влияния боковой



волны разрежения невелики. Поэтому поперечный размер заряда при  $d_z > d_{кр}$  мало влияет на параметры детонации.

В насыпных зарядах, имеющих значительную пористость, реакция начинается в «горячих точках», например, в результате адиабатического сжатия и разогрева воздушных включений («пузырьковый» механизм) или схлопывания пор, или поверхностного трения частиц при смещениях в процессе ударного сжатия и т.п. Из возникающих очагов реакция в форме горения распространяется сначала по поверхности, а затем вглубь частиц (зерен) вещества. Такой механизм принято называть механизмом взрывного горения в детонационной волне. Представления о нем впервые были сформулированы А.Я.Апиным и позже развиты в ряде работ его учеников.

Механизм взрывного горения отличается тем, что для его возникновения требуется значительно меньшее давление инициирующей ударной волны, чем для возбуждения детонации в жидких ВВ. Так, например, критическое давление возбуждения детонации в порошкообразном тротиле  $P_{кр} = 0,7 \div 0,8$  ГПа, в нитроглицерине  $P_{кр} = 12$  ГПа. Реакция, сопровождаемая газообразованием, начинается непосредственно за ударным фронтом, протекает сравнительно медленно в виде послонного горения отдельных зерен вещества, что приводит к относительно большим значениям ширины зоны реакции. С этим связано сильное влияние поперечного размера заряда на скорость детонации при  $d < d_{пр}$ .

Теория взрывного горения при детонации порошкообразных ВВ, получившая широкое признание, объясняет снижение  $d_{кр}$  с уменьшением размеров частиц ВВ, падение восприимчивости к ударному импульсу с уменьшением пористости заряда, максимум на кривой  $D(\rho_0)$  для некоторых ВВ и другие явления. Вместе с тем некоторые явления, на первый взгляд, противоречат этой теории. Одно из них состоит в том, что на диаграмме  $P - \tau$  экспериментальные точки для одних и тех же ВВ, но с разными размерами кристаллов ложатся вблизи общей кривой, в то время как согласно теории взрывного горения при равных давлениях детонации время завершения реакции должно уменьшаться с уменьшением размеров частиц ВВ. Удовлетворительного объяснения этому явлению с позиций взрывного горения пока не найдено. Возможно, такое выравнивание времени связано с растрескиванием крупных зерен при горении в детонационной волне, сопровождающимся увеличением поверхности горения. Кроме того, порошки в детонационной волне должны уплотняться и соответственно первоначальные размеры не должны влиять на процесс детонации.

Необратимое уплотнение порошков в ударных волнах подтверждается наблюдениями. О явлении схлопывания пор в порошках при прохождении ударной волны свидетельствуют также опыты Л.Г.Болховитинова и В.А.Васильева, выполненные на электромагнитной установке. Волны в порошках имели двугорбый профиль, что интерпретировалось как двухстадийность процесса: первая стадия – гомогенизация вещества, вторая – ударное сжатие сплошного вещества. Другое возражение (уплотнение порошков) менее существенно, так как места схлопывания и служат «горячими точками», откуда начинается горение, и чем их больше, тем меньше общее время сгорания вещества в зоне реакции.

Помимо двух основных описанных режимов детонации возможны промежуточные, характерные, например, для литых или прессованных зарядов с малой пористостью. Чем больше отношение периода индукции реакции к времени собственной реакции, тем ближе процесс отвечает тепловому взрыву, т.е. режиму детонации однородных ВВ.

По влиянию диаметра заряда (см. рис.6.4) на скорость детонации в неидеальном режиме прессованные и литые ВВ занимают промежуточное положение между жидкими и порошкообразными ВВ.

### ***Возбуждение детонации***

В принципе детонацию в ВВ можно возбудить любым внешним воздействием достаточной интенсивности, вызывающим быструю химическую реакцию в веществе, сопровождающуюся возникновением в нем самоподдерживающейся ударной волны. Однако временные и масштабные параметры развития детонации зависят от вида и интенсивности воздействия, внешних условий, массы и геометрии заряда ВВ, физико-химических свойств самих ВВ. Так, простые виды

воздействия (например, удар, трение, нагрев) легко возбуждают детонацию в инициирующих ВВ, для которых свойственно быстрое нарастание скорости реакции (в форме горения) и давления в очаге первичного разогрева.

Вторичные бризантные ВВ также способны к детонации под воздействием простых видов импульса (при поджигании, нагреве или интенсивном ударе), но устойчивая детонация в них возникает лишь при благоприятных условиях, важнейшим из которых является высокое внешнее давление. Последнее может возникнуть за счет самих продуктов горения, если затруднен их отток из зоны горения, например, при горении ВВ в замкнутых аппаратах, длинных трубах и т.п.

Наиболее легким и надежным способом возбуждения детонации во вторичных бризантных ВВ является ударно-волновое воздействие. В практических целях чаще всего детонацию вторичных ВВ возбуждают с помощью взрыва инициирующих ВВ (точнее, тех или иных инициирующих устройств или схем, обязательным элементом которых является заряд инициирующего ВВ), в экспериментальных целях иногда пользуются также другими источниками формирования ударной волны (искровым разрядом, соударением с быстро летящим телом и др.).

Механизм инициирования детонации в ВВ при ударно-волновом воздействии изучен не полностью. Схематически его можно описать следующим образом. Первой стадией воздействия ударных волн на ВВ является адиабатическое сжатие и разогрев некоторого слоя вещества до температуры самовоспламенения, причем зона воспламенения может быть как сплошной (гомогенный разогрев), так и дискретной (очаговый разогрев, образование в массе ВВ очагов воспламенения или «горячих точек»). Так как разогрев происходит в результате адиабатического сжатия в ударной волне, то для каждого ВВ, соответственно его химической природе и физическому состоянию, имеется некоторое критическое давление  $P_{кр}$  инициирующей волны, обеспечивающее разогрев вещества или отдельных очагов в нем («горячих точек») до температуры вспышки  $T_{всп}$ , причем абсолютная величина  $T_{всп}$  сравнительно слабо зависит от давления.

Характер разогрева, сплошного или очагового, определяет критическое давление инициирующей волны. Сплошной, гомогенный разогрев до температуры вспышки, свойственный физически однородным телам: взрывчатым жидкостям, монокристаллам или близким к ним малопористым системам типа гелей, высокоплотных отливок или запрессовок – требует давления порядка многих десятков или даже сотен тысяч атмосфер ( $n \cdot 10$  ГПа). Очаговый разогрев (например, при сжатии воздуха между твердыми частицами ВВ, при трении между частицами вещества или другими неоднородными поверхностями, при сдвигах, микроударах, свойственных порошкообразным ВВ) требует значительно меньших усилий, и критическое давление инициирующей ударной волны имеет порядок тысяч атмосфер ( $n \cdot 0,1$  ГПа). Однако нагрев вещества до  $T_{всп}$  сам по себе еще недостаточен для реализации вспышки. Необходимо, чтобы эта температура сохранялась в веществе на время периода индукции, отвечающего параметрам состояния сжатого вещества  $T_{всп}$  и  $P_{кр}$ , т.е. чтобы время сжатия вещества в волне или пребывания его в фазе сжатия было больше периода задержки вспышки:  $\tau_{сж} \geq \tau(T_{всп}, P_{кр})$ . Если же зона реакции до вспышки будет захвачена волной разгрузки, то вспышка может не реализоваться.

Второе условие можно выразить через импульс ударной волны  $I \int_0^{\tau} P dt$ . Тогда критические условия воспламенения примут вид

$$P = P_{кр}; \quad I_{мин} = P_{кр} \tau(T_{всп}, P_{кр}). \quad (6.9)$$

В этой записи критические условия воспламенения не связаны с линейным размером заряда и с их помощью нельзя установить протяженность зоны воспламенения ВВ. Если бы параметры волны оставались неизменными при ее распространении по веществу, то зона воспламенения не имела бы ограничений и перемещалась бы вслед за ударным фронтом (случай детонационной волны). Если же учитывать диссипативные потери энергии ударной волны и соответствующее падение ее параметров при перемещении по ВВ, то условия (6.9) отвечают бесконечно малой глубине зоны воспламенения. Для того, чтобы зона имела конечные размеры, требуется выполнение следующих условий:  $P_n > P_{кр}$ , а  $I > I_{мин}$ , где  $P_n$  и  $P_{кр}$  – начальное и критическое давление волны соответственно. Разность определяется задаваемой глубиной зоны.

Если в первом приближении принять, что давление уменьшается с увеличением расстояния по гиперболическому закону, то затухание волны можно описать выражением

$$P_x = P_0 \frac{A}{x},$$

где  $P_x$  – текущее давление на фронте волны, в общем случае

$$P_x = AP_0 x^{-n}; \quad (6.10)$$

$A$  – эмпирический коэффициент;  $P_0$  – давление на фронте волны в месте отсчета;  $x$  – расстояние пробега волны по веществу.

Таким образом, при заданной глубине зоны  $a$  параметры волны (начальное давление и импульс), обеспечивающие прогрев и воспламенение ВВ в слое заданной толщины, при вычислении по уравнению (6.10) должны иметь следующие значения:

$$P_n = P_{кр} \frac{a}{A}; \quad I_{min} = P_n \tau$$

Итак, инициирующая способность ударных волн определяется давлением на ее фронте и длительностью фазы сжатия. Задаваясь постоянным значением одной из этих величин, вторую можно избрать критерием восприимчивости ВВ к ударно-волновому воздействию.

На этом основаны экспериментальные методы определения ударно-волновой чувствительности (для тротила). В качестве такого критерия часто пользуются величиной критического давления инициирующей волны  $P_{кр}$ , значения которой для некоторых индивидуальных и смесевых ВВ следующие:

| ВВ                           | Тротил        | Гексоген | Тетрил | ТГ 50/50 | Аммонит ПЖВ-20 |
|------------------------------|---------------|----------|--------|----------|----------------|
| $\rho_0$ , г/см <sup>3</sup> | 1,6; 1,34     | 1,74     | 1,7    | 1,7      | 1,34           |
| $P_{кр}$ , ГПа               | 1,96;<br>0,77 | 1,76     | 2,55   | 2,94     | 0,7            |

С увеличением плотности ВВ  $P_{кр}$  возрастает. На рис.6.5 приведена зависимость  $P_{кр}$  от плотности заряда для тротила.

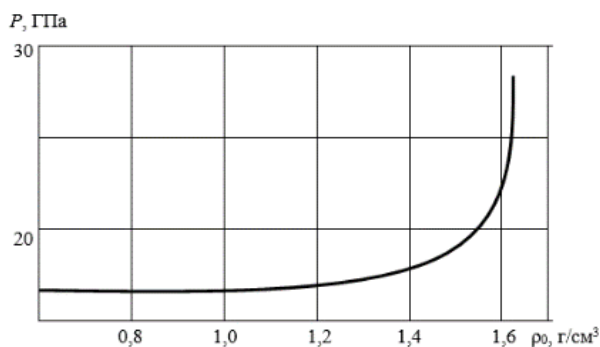


Рис.6.5

Если задаться постоянным давлением инициирующей волны, например, выбрав в качестве генератора ударных волн некоторое ВВ с известными и постоянными параметрами детонации, то критерием чувствительности может стать масса инициирующего заряда, так как она определяет временные характеристики волны и суммарный импульс ее фазы сжатия. Минимальную массу инициирующего ВВ, обеспечивающую возбуждение детонации в испытываемом ВВ, часто называют минимальным инициирующим импульсом (МИИ) и выражают в граммах. Для большинства индивидуальных и тонкодисперсных смесевых ВВ при насыпной плотности МИИ составляет от 0,1 до 0,2 г гремучей ртuti. Для низко чувствительных гранулированных и водосодержащих промышленных ВВ эта величина на 2-3 порядка выше.

А.И.Романовым с сотрудниками предложен приближенный метод расчета минимальных размеров промежуточных детонаторов. Он основан на предпосылке, что энергия инициирующей волны должна быть не меньше, чем минимальная энергия детонационной волны в возбуждаемом

ВВ, достаточная для самораспространения детонации, т.е. энергия волны при  $d_{кр}$ . Исходя из этой посылки, получено выражение

$$d_6 = d_{кр} \frac{\rho_0^{1/3} D_{кр}^{2/3}}{\rho_d^{1/3} D_d^{2/3}},$$

где  $d_d$ ,  $\rho_d$  и  $D_d$  – соответственно минимальный диаметр, плотность и скорость детонации промежуточного детонатора;  $\rho_0$  и  $D_{кр}$  – плотность и скорость детонации инициируемого ВВ при его критическом диаметре.

Выражение справедливо при  $h_6/d_6 > 2,25$ , где  $h_6$  – высота шашки-детонатора. При  $h_6/d_6 = 1,5$  вводится поправочный коэффициент 1,02.

Экспериментальные определения  $d_6$  совпадают с расчетными: расхождение не превышает 14 %.

Как и  $P_{кр}$ , минимальный инициирующий импульс возрастает с увеличением плотности ВВ.

## . Чувствительность ВВ

### Чувствительность ВВ к тепловому импульсу

Подобно невзрывчатым химическим системам ВВ способны претерпевать медленное разложение, которое протекает во всей массе вещества, а не на узком фронте реакции. Для обычных ВВ скорость такого разложения при нормальной температуре неумовимо мала, но с повышением температуры быстро растет. Большинство ВВ при повышенной температуре (ниже температуры вспышки) претерпевают медленный распад, скорость которого подчиняется закону молекулярной реакции:

$$v = \frac{dx}{dt} = k(a - x), \quad (6.11)$$

где  $v$  – скорость химической реакции;  $x$  – количество вещества, разложившегося к данному моменту времени  $t$ ;  $k$  – константа скорости реакции, показывающая, какая часть вещества реагирует в единицу времени;  $a$  – начальная концентрация вещества.

Коэффициент  $k$  зависит от температуры и энергии  $E$  активации:

$$k = k_m e^{-E/RT},$$

где  $k_m$  – константа уравнения Аррениуса.

Исследования термического распада ВВ приводят к заключению о необычайно большой роли в этих процессах продуктов распада, действующих автокаталитически и резко ускоряющих распад ВВ. Ускорение реакции ее продуктами распада называют автокатализом. Катализаторами в данном случае выступают промежуточные реакции, оксиды азота, регенерирующие в процессе протекания реакции. Роль положительных катализаторов реакции могут выполнять некоторые примеси к ВВ, например следы свободных кислот, мелких частиц металлов, в некоторых случаях следы влаги.

При побочных процессах скорость распада уже не подчиняется закону молекулярной реакции и значительно выше, чем рассчитанные по формуле (6.11) значениями. Поэтому в это уравнение необходимо вводить еще один член, характеризующий влияние катализаторов. Тогда

$$v = \frac{dx}{dt} = k(a - x) + (a - x)x^u,$$

где  $u$  – порядок реакции, идущей с участием катализатора.

Характер изменения скорости реакции в зависимости от продолжительности процесса представлен на рис.6.6, где кривая 1 представляет чисто молекулярную реакцию, а кривая 2 – процесс при наличии автокатализатора, кривые 3-7 показывают, что скорость реакции увеличивается с ростом температуры. Особый характер кривых 4-6 сравнительно с кривыми 2 и 3 объясняется тем, что в некоторый момент времени скорость разложения и соответственно выделения теплоты реакции достигают значений, при которых теплоприход превышает теплорасход и изотермичность процесса нарушается. Если к этому моменту осталось достаточное количество исходного вещества, то температура его начинает повышаться, что приводит к дальнейшему ускорению реакции, заканчивающейся вспышкой. При дальнейшем повышении температуры промежутки

времени  $\tau$ , называемыми периодами задержки взрыва, будут уменьшаться. Можно представить себе такую температуру  $T_7$ , при которой начальная скорость процесса равна критическому значению, т.е. нарушение изотермичности и соответственно возникновение вспышки произойдет при неизменно малом значении периода задержки. То же должно иметь место при любой температуре большей, чем  $T_7$ .

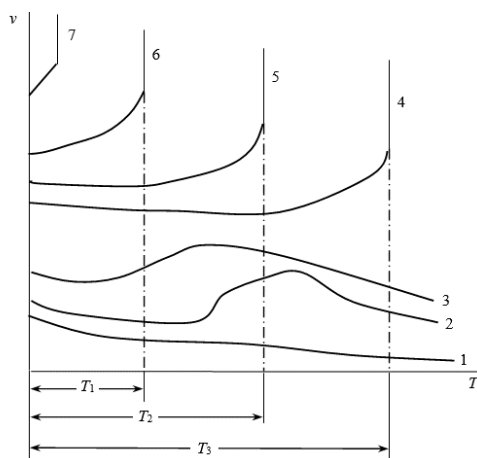


Рис.6.6

Минимальная температура, при которой изотермичность нарушается, т.е. теплоприход становится больше теплоотвода и химическая реакция вследствие вызванного этим резкого ускорения принимает характер взрывчатого прерывания, называется температурой вспышки.

Для ВВ связь между периодом задержки (периодом индукции) и температурой вспышки выражается зависимостью

$$\tau = c e^{E/RT}, \quad (6.12)$$

где  $\tau$  – период задержки;  $c$  – постоянная, зависящая от состава ВВ;  $E$  – энергия активации, Дж/моль;  $T$  – температура вспышки.

Уравнение (6.12) можно представить в виде  $\ln \tau = \ln c + E/RT$ , что указывает на существование линейной зависимости между  $\ln \tau$  и  $1/T$  (рис.6.7).

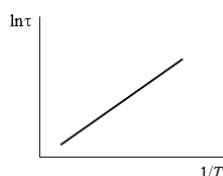


Рис. 6.7

Температура вспышки ВВ  $T_{всп}$  (табл.6.4) не является строго постоянной величиной, но существенно зависит от условий опыта (количества используемого ВВ, степени его измельчения и т.д.). поэтому для получения корректных результатов испытания необходимо проводить в строго определенных стандартных условиях. Обычно  $T_{всп}$  определяют в специальных приборах при нагревании навески ВВ в бане, наполненной сплавом Вуда. С увеличением массы ВВ температура вспышки снижается, с увеличением скорости нагрева навески ВВ возрастает.

Таблица 6.4

| Взрывчатое вещество | Температура вспышки, °С | Взрывчатое вещество | Температура вспышки, °С |
|---------------------|-------------------------|---------------------|-------------------------|
| Гремучая ртуть      | 175-180                 | Пикриновая кислота  | 290-300                 |

|               |     |                 |         |
|---------------|-----|-----------------|---------|
| Азид свинца   | 340 | Аммониты        | 220-240 |
| Нитроглицерин | 200 | Дымный порох    | 290-310 |
| ТНРС          | 275 | Тетрил          | 195-200 |
| Пироксилин    | 195 | Тротил          | 295-300 |
| ТЭН           | 215 | Бездымный порох | 180-200 |
| Гексоген      | 230 | Нитрогликоль    | 215     |

### ***Чувствительность ВВ к механическим воздействиям***

Основными формами механического воздействия на ВВ могут быть удар, накол и трение. Способность ВВ взрываться при механических воздействиях называется чувствительностью к механическим воздействиям.

Процесс возбуждения взрыва механическим импульсом значительно сложнее, чем тепловым. Чувствительность как свойство ВВ должна выражаться через другие его свойства и параметры состояния. Однако установлено, что такие характеристики ВВ, как энергия активации, энтальпия образования, теплота взрыва, не являются характеристиками, определяющими чувствительность ВВ. Поэтому необходимо изучать природу чувствительности ВВ при механических воздействиях.

Были выдвинуты две основные точки зрения на механизм этого процесса: нетепловая и тепловая теории реакции химического процесса.

Согласно нетепловой теории, химические реакции начинаются вследствие деформации молекул при ударе. Активация молекул происходит при достижении напряжениями критических напряжений всестороннего сжатия, либо под действием сдвиговых напряжений.

Исследования П.В.Бриджмена показали, что ВВ выдерживает статические нагрузки до  $10^{10}$  Па. Известно, что энергия внутримолекулярных связей органических ВВ значительно больше энергии межмолекулярных связей. Поэтому разрушение самих молекул при деформации таких веществ происходит практически не будет. Эти доводы показывают несостоятельность нетепловых гипотез возбуждения взрыва для большинства органических ВВ при сравнительно низкоскоростном (до 100 м/с) ударе.

По тепловой теории при ударе по заряду ВВ происходит его разогрев, который и приводит к быстрой экзотермической реакции. Впервые эта теория была сформулирована П.Бертло и развита в исследованиях Ю.Б.Харитона, Ф.А.Бауле, А.Ф.Беляева и др. Поскольку энергия удара, вызывающая взрыв, в большинстве случаев недостаточна для разогрева ВВ до температуры вспышки, Ю.Б.Харитон предположил, что при ударе возникают локальные очаги разогрева. Тепловая теория, опирающаяся на возникновение взрыва в локальных очагах разогрева, получила название теории «горячих точек». По этой теории при ударе или ином динамическом воздействии в ВВ возникают напряжения. Поскольку в твердом ВВ всегда имеются неоднородности (полости, дефекты кристаллов и т.д.), в малых объемах могут возникать пики напряжений. В этих объемах и появляются «горячие точки», являющиеся наиболее вероятными очагами взрыва.

По Ф.Бодуэну, причинами возникновения «горячих точек» являются следующие процессы:

- адиабатическое сжатие небольших газовых включений в жидких, пластичных и твердых ВВ;
- трение твердых частиц высокоплавких примесей;
- вязкий разогрев при быстром течении в жидких ВВ.

В твердых ВВ, как считают Г.Т.Афанасьев и В.К.Боболев, локальный разогрев при ударе возникает в результате прочностного разрушения заряда. Сначала происходит практически изотермическая упругая деформация заряда. Действие высоких нормальных напряжений в области сжатия приводит к росту температуры плавления ВВ, разрушение происходит под действием касательных напряжений (неупругая, неизотермическая деформация); это разрушение сопровождается выбросом части веществ из области сжатия и резким спадом давления.

При прочностном разрушении упругая энергия, запасенная в образце, переходит в работу деформации на разрыве. На поверхности разрыва в результате трения (при условии сжатия) возникает локальный разогрев.

Взрыв в локальном очаге может возникнуть, если температура в нем достигнет критической  $T_{кр}$ . Для наиболее распространенных ВВ  $T_{кр} = 700-900$  К, а размеры «горячих точек» не превышают  $10^{-3}-10^{-5}$  см.

Для оценки чувствительности ВВ созданы различные приборы (копры). Испытания заключаются в том, что на навеску ВВ (0,05 г), заключенную в специальный приборчик, сбрасывают с некоторой высоты груз определенной массы (от 2 до 10 кг). При этом фиксируется число взрывов из 25 опытов. За чувствительность к удару принимают частоту взрывов, выраженную в процентах. В табл.3.5 приведены данные о чувствительности некоторых ВВ к удару.

Таблица 6.5

| Взрывчатое вещество | Частота взрывов при высоте падения груза 0,25 м, % |                          | Нижний предел чувствительности в приборчике 2 при массе груза 10 кг, мм |
|---------------------|--|--------------------------|---|
|                     | Стандартный приборчик                              | Приборчик 2 (Н.А.Холева) |   |
| Тротил              | 4-28   | 0-8                      | 500   |
| Алюмотол            | 24-28  | 0-8                      | 500   |
| Аммонит             | 13-32  | 4-28                     | 500   |
| Граммонит           | 4  | 0                        | 500   |
| Тротил              | 48-60  | 16-24                    | 150   |
| Гексоген            | 70-90  | 80-90                    | 70  |
| ТЭН                 | 100  | 100                      | 50  |

### ***Действие взрывного импульса на взрывчатые вещества***

Взрыв заряда ВВ может быть возбужден взрывом другого заряда. В частном случае, когда заряды находятся на некотором расстоянии друг от друга, происходит передача детонации на расстояние. Заряд, который взрывается первым, называют активным или инициирующим; заряд, который взрывается под влиянием взрыва активного заряда, называют пассивным или инициируемым зарядом.

Чтобы возбудить в ВВ детонацию, ему надо сообщить импульс достаточной интенсивности. Чувствительность ВВ к инициирующему действию взрыва другого ВВ называют восприимчивостью, или чувствительностью к детонации.

Для большинства вторичных бризантных ВВ таким импульсом служит ударная волна от взрыва некоторого заряда инициирующего ВВ или другого более мощного вторичного ВВ (промежуточного детонатора). Устойчивую детонацию (при  $d_3 > d_{кр}$ ) возбуждает инициирующая ударная волна с давлением на фронте  $P_{кр}$ , превышающим некоторый минимум, свойственный каждому ВВ. Это критическое давление зависит от физического состояния ВВ (его плотности, диаметра заряда и других свойств, определяющих детонационную способность ВВ), а также от длительности фазы сжатия в ударной волне  $\tau_+$ . С увеличением плотности ВВ и уменьшением диаметра заряда  $P_{кр}$  возрастает, с увеличением  $\tau_+$  – снижается. Для порошкообразных аммонитов  $P_{кр} = 0,5 \div 1,0$  МПа, для прессованных индивидуальных ВВ  $P_{кр} = 1,5 \div 3,0$  МПа, для жидких ВВ типа нитроглицерина  $P_{кр} = 10$  МПа.

Поскольку длительность действия волны возрастает с увеличением инициирующего заряда, чувствительность ВВ к детонационному импульсу может быть оценена по минимальному значению заряда инициирующего ВВ, вызывающего детонацию в возбуждаемом ВВ. Эту величину называют массой заряда минимального инициирующего импульса и выражают в граммах инициирующего ВВ, как правило, гремучий ртути плотностью  $1,0$  г/см<sup>3</sup> (табл.6.6). Восприимчивость к инициирующему импульсу, так же как и чувствительность к удару, зависит от плотности ВВ: она тем меньше, чем выше плотность ВВ.

Таблица 6.6

| Взрывчатое вещество | Масса заряда минимального инициирующего импульса, г | Взрывчатое вещество   | Масса заряда минимального инициирующего импульса, г |
|---------------------|---|-----------------------|---|
| Тротил              | 0,25  | Динамит 62-процентный | 0,14  |
| Тетрил              | 0,15  | Аммонит скальный №1   | 0,19  |
| Гексоген            | 0,14  | Детониты              | 0,12-0,18   |
| ТЭН                 | 0,15  | Аммонит ПЖВ-20        | 0,28  |
| Аммонит             | 0,17  | Акванит № 2           | 0,8   |

Для ряда промышленных ВВ с пониженной восприимчивостью или зарядов с повышенной плотностью инициирующее действие капсюля-детонатора или детонирующего шнура оказывается недостаточным, требуется более мощный начальный импульс в виде взрыва промежуточного детонатора. Вопрос о возбуждении детонации больших зарядов промышленных ВВ изучен недостаточно, особенно это относится к определению инициирующего импульса, характеризуемого массой промежуточного детонатора (боевика). Объясняется это тем, что в практических условиях способность заряда к восприятию детонации зависит от многих факторов; состояния ВВ (например, крупности частиц), способа размещения патронов, наличия оболочки, диаметра заряда, конструкции боевика, наличия воды в зарядной камере и т.д. Все эти причины приводят к тому, что значение предельного инициирующего заряда увеличивается по сравнению с указанными на 3-4 порядка и полностью ими определяется, поэтому в промышленности применяется следующая схема инициирования взрыва заряда ВВ: капсюль-детонатор → промежуточный детонатор (боевик) → заряд ВВ.

На основе серии экспериментов установлено, что для инициирования больших зарядов промышленных ВВ (порошкообразных, гранулированных, водосодержащих) во всех случаях достаточно применить мощный промежуточный детонатор в виде шашки массой 200-400 г.

### *Особенности детонации смесевых взрывчатых веществ*

Главная особенность промышленных ВВ состоит в том, что они являются физически и химически неоднородными системами, чем объясняются особенности их детонации и некоторые аномалии с позиций классической теории детонации конденсированных ВВ.

Большинство промышленных ВВ представляет собой смеси разнородных по химическим и физическим свойствам материалов. Перечислим их:

- высокоактивные индивидуальные ВВ, разлагающиеся в детонационной волне с большой скоростью (нитроглицерин, гексоген, тэн и др.);
- менее активные, но с сильно выраженными взрывчатыми свойствами вещества типа тротила;
- вещества со слабо выраженными взрывчатыми свойствами, разлагающиеся при детонации со скоростью, на порядок меньшей, чем мощные индивидуальные ВВ (аммиачная селитра, динитронафталин и др.);
- горючие материалы, не обладающие взрывчатыми свойствами (алюминий, древесная мука, парафин и др.);
- совершенно инертные, не принимающие участия в химических реакциях при взрыве и могущие претерпевать лишь фазовые переходы вещества (минеральные соли – пламегаситель, вода и др.).

Соответственно промышленные ВВ являются и кинетически неоднородными системами. В отличие от индивидуальных ВВ или их смесей с близкими кинетическими характеристиками компонентов, для которых свойственен преимущественно одностадийный переход исходного вещества в продукты взрыва, химические реакции при взрыве промышленных смесевых ВВ проходят в несколько стадий. Типичной схемой является первоначальное разложение или газификация в детонационной волне исходных компонентов (первичные реакции) и последующее



взаимодействие продуктов разложения между собой или с веществами, не претерпевшими на первой стадии химических или фазовых превращений, такими как алюминий и др. (вторичная реакция).

Многостадийность приводит к усилению, по сравнению с индивидуальными порошковыми ВВ, зависимости критических условий распространения (критического диаметра, минимального инициирующего импульса) и параметров детонации при  $D < D_{кр}$  от размеров частиц компонентов. В определенных условиях значение может иметь не только абсолютный размер частиц, но и соотношение между размерами частиц разных компонентов. Например, смесь гексогена и аммиачной селитры в зарядах не слишком большого диаметра полностью детонирует только в том случае, если частицы селитры мельче, чем частицы гексогена. В противном случае в детонационной волне в основном разлагается только гексоген, а разложение селитры не «поспевает» за гексогеном. Чтобы исключить такое явление, иногда пользуются буферными веществами, которые по скорости разложения занимают промежуточное положение между компонентами с резко выраженными кинетическими отличиями и служат как бы связующими мостиками. Этот прием, например, использован в скальных аммоналах, главными компонентами которых являются селитра и гексоген, а буферным веществом – тротил.

На детонационную способность промышленных ВВ может влиять равномерность смешения компонентов. Сильное влияние размеров частиц и равномерности смешения компонентов промышленных ВВ на их детонационную способность и детонационные характеристики в неидеальном режиме объясняется тем, что общее время и полнота завершения реакции зависят не только от скорости сгорания отдельных частиц (первичные реакции), но и от скорости вторичных реакций, проходящих в газовой фазе и определяемых условиями диффузии, смешения продуктов первичного распада.

Чем мельче частицы разнородных компонентов и равномернее их распределение в объеме, тем быстрее завершится их сгорание, а также смешивание и взаимодействие продуктов сгорания.

С указанными особенностями взрывчатого превращения промышленных ВВ в детонационной волне связаны характерные для этих ВВ явления: растянутость зоны химической реакции, большой, как правило, интервал между  $d_{кр}$  и  $d_{пр}$ , сильная зависимость этих характеристик от технологии изготовления, экстремальная зависимость скорости детонации (и бризантности) от плотности заряда при  $d_3 < d_{пр}$  и ряд других.

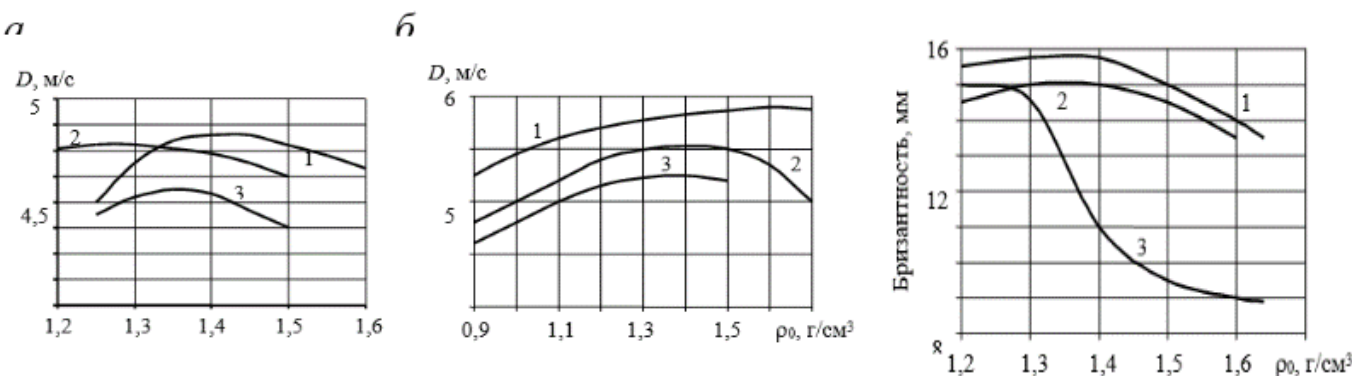


Рис. 6.8

На кривой зависимости скорости детонации от плотности для промышленных ВВ при  $d_3 < d_{пр}$  получаемый максимум может быть объяснен следующим образом. С увеличением плотности, с одной стороны, возрастает скорость детонации на основании общих (формальных) закономерностей распространения детонационных волн, вытекающих из гидродинамической теории. Кроме того, в соответствии с механизмом взрывного горения высокопористых веществ в детонационной волне увеличивается скорость сгорания частиц с повышением плотности ВВ, так как возрастает давление, а вместе с ним и скорость горения, подчиняющаяся известному закону горения:  $u_r = a + b^v P$ . Этот закон, как показал А.Ф.Беляев, может быть распространен на горение под большим давлением с учетом того, что показатель степени уменьшается с увеличением

давления  $P$ . С другой стороны, с увеличением плотности уменьшается свободная поверхность частиц, что затрудняет поджигание и распространение горения на поверхности частиц. Затрудняются также процессы диффузионного смешивания продуктов первичного распада (горения), необходимые для вторичных реакций с большим тепловыделением. Двойное и противоположно направленное влияние плотности закономерно приводит к экстремальному виду зависимости.

Для многих промышленных ВВ спад скорости детонации или бризантности после максимума может быть достаточно резким, а, начиная с некоторой плотности, детонация в заряде данного диаметра вообще становится неустойчивой. В связи с этим явлением для промышленных ВВ вводят понятие критической плотности  $\rho_{кр}$ . Это явление иллюстрируют кривые 1, 2 и 3 на рис.6.8, а для победита ВП-3, аммонита ПЖВ-20 и победита ВП-1 соответственно и кривые 1, 2 и 3 на рис.6.8, б, указывающие на зависимость скорости детонации аммонита ПЖВ-20 от диаметра заряда: 100, 40 и 20 мм соответственно. На рис.6.9 показана зависимость бризантности от плотности ВВ: победита № 6 и ПУ-2 (кривые 1 и 2) и аммонита № 8 (кривая 3).

Критическая плотность, точка максимума на кривой  $D = f(\rho_0)$  и другие характеристики, связанные с экстремальным видом зависимости параметров детонации от плотности, не являются константами того или иного промышленного ВВ, определяемыми его химическим составом. На них влияют изменение физических характеристик ВВ (размеры частиц, равномерность распределения частиц компонентов в массе вещества и др.), поперечные размеры зарядов, наличие оболочки заряда и ее свойства. Воздействие перечисленных факторов объясняется механизмом потерь в детонационной волне за счет боковых волн разрежения и кинетикой реакции в волне либо скоростью радиального расширения продуктов детонации.

В отличие от индивидуальных ВВ, с увеличением плотности время реакции и ширина зоны реакции в промышленных ВВ возрастают. С уменьшением размера частиц время реакции сокращается; с увеличением диаметра заряда удлиняется время проникновения волны разрежения в заряд. Соответственно точка максимума на кривой  $D = f(\rho_0)$  сдвигается вправо, в область более высоких плотностей (см. рис.6.8). В пределе при достаточно большом диаметре заряда, когда боковые потери в детонационной волне очень малы, смесевые промышленные ВВ не отличаются от индивидуальных, т.е. наблюдается нормальная монотонная зависимость скорости детонации от плотности. Этот предел зависит от других свойств ВВ и оболочки заряда, влияющих на боковые потери.

С увеличением содержания сенсibilизатора в составе ВВ (например тротила в аммоните), точка максимума сдвигается вправо при меньших диаметрах заряда. По наблюдениям В.К.Боболева, уже при 50-процентном содержании тротила в аммоните зависимость  $D = f(\rho_0)$  имеет такой же вид, как и для чистого тротила.

Таким образом, аномальная зависимость  $D = f(\rho_0)$  для промышленных ВВ относится только к области неидеальной детонации, и всегда может быть найден такой диаметр заряда  $d_{пр}$ , при котором зависимость приобретает нормальный характер, отвечающий теории. Но так как  $D = D_{и}$  при  $d_{пр}$ , то нормальный характер зависимости относится к области идеальной детонации, т.е.  $D_{и} = f(\rho_0)$ .

Из сказанного также следует, что  $d_{кр}$  и  $d_{пр}$  зависят не только от химического состава ВВ, но и от плотности заряда. В отличие от индивидуальных ВВ, с возрастанием плотности смесевых ВВ  $d_{кр}$  и  $d_{пр}$  увеличиваются. Идеальная скорость детонации зависит только от химического состава и плотности ВВ. Влияние плотности на  $d_{кр}$  и минимальный инициирующий импульс может быть проиллюстрировано на примере предохранительных ВВ (табл.6.7).

Для аммонита грубого измельчения влияние степени измельчения тротила несколько сильнее, чем для селитры (табл.6.8). Для тонких смесей влияние измельчения обоих компонентов равнозначно.

Как и для индивидуальных ВВ,  $d_{кр}$  уменьшается при помещении зарядов в прочные оболочки. В стальных трубах с толщиной стенок 4-5 мм, моделирующих скальную горную породу,  $d_{кр}$  уменьшается в несколько раз по сравнению с  $d_{кр}$  зарядов в бумажной оболочке. Так, например,  $d_{кр}$  открытого заряда гранулита  $M$  на пористой селитре составляет 60-70 мм, а в

стальной трубе 20-25 мм;  $d_{кр}$  открытого заряда того же ВВ на непористой гранулированной селитре увеличивается до 120-150 мм, а в стальной трубе до 30-35 мм.

Таблица 6.7

Таблица 6.8

| Степень измельчения компонентов, мкм |         | Начальная плотность заряда, г/см <sup>3</sup> | Критический диаметр, мм |
|--------------------------------------|---------|---|-------------------------|
| аммиачной селитры                    | тротила |   |                         |
| 200-300                              | 400-600 | 0,8   | 19                      |
| 200-300                              | 200-390 | 0,81  | 17                      |
| 200-300                              | 100-200 | 0,85  | 12                      |
| 200-300                              | 60-100  | 0,9   | 11                      |
| 60-100                               | 100-20  | 0,8   | 8-9                     |
| 60-100                               | 60      | 0,9   | 8                       |
| 500-800                              | 204-390 | 0,8   | 15                      |
| 300-500                              | 204-390 | 0,9   | 17                      |
| 100-200                              | 204-390 | 0,9   | 10                      |
| 60-100                               | 204-390 | 0,9   | 10                      |

Для промышленных ВВ характерен большой разрыв величин  $d_{кр}$  и  $d_{пр}$ , их отношение может достигать 10. Так, например, для тонкодисперсных аммонитов в открытых зарядах при рабочей плотности  $d_{кр} = 10-15$  мм, а максимальная скорость детонации наблюдается при заряде диаметром 80-100 мм. Гранулированные смеси устойчиво детонируют в открытых зарядах диаметром 40-150 мм при максимальной скорости в зарядах диаметром более 200 мм (рис.6.10). В прочных оболочках этот разрыв сужается.

Водосодержащие ВВ (акватола и гранулированные ВВ, взрываемые в водной среде), имеющие малую пористость, по некоторым свойствам приближаются к жидким ВВ: малый интервал между  $d_{кр}$  и  $d_{пр}$ ,  $D$  и  $D_{и}$ , высокое критическое давление инициирования детонации  $P_{кр}$ . Вместе с тем, вследствие значительной неоднородности, водосодержащие ВВ по структуре детонационной волны отличаются от жидких ВВ. По некоторым признакам они приближаются к литым или прессованным ВВ.

При водонаполнении скорость детонации гранулола и граммонитов повышается, а критический диаметр увеличивается.

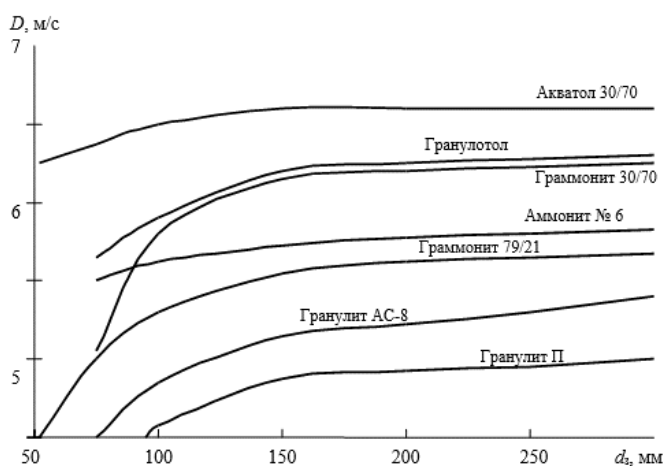


Рис.6.10

С уменьшением размеров гранул  $d_{кр}$  для сухих ВВ уменьшается. Так, например, для гранулотола при уменьшении размера гранул до 2 мм  $d_{кр}$  уменьшается до 20 мм. В водонаполненном состоянии размер гранул практически не влияет на величину  $d_{кр}$ . При возбуждении детонации ударной волной реакция начинается сразу же за ударным фронтом, как у порошкообразных ВВ, и развивается до вспышки, как у жидких ВВ, но на некотором расстоянии от поверхности нагружения, т.е. в глубине заряда. Записи профиля детонационной волны в водосодержащих гранулированных ВВ на электромагнитной установке отчетливо фиксируют химический пик. Величины  $\tau$  и  $a$  для ВВ в водонаполненном состоянии значительно меньше, чем для ВВ в сухом.

Результаты исследований позволяют предполагать, что химическая реакция в детонационной волне начинается и развивается в отдельных гранулах ВВ и завершается подобием вспышки. Если ВВ представляет собой смесь нескольких компонентов (тротила, селитры и др.), то на второй стадии продукты разложения гранул разнородных веществ взаимодействуют между собой.

Скорость детонации граммонитов продолжает расти в открытых зарядах с увеличением их диаметра до 300 мм (рис.6.10), причем с увеличением содержания тротила  $d_{пр}$  снижается. Скорость детонации открытых зарядов гранулитов растет при увеличении диаметра зарядов свыше 300 мм. Водонаполненные ВВ (в скважинах) достигают максимальной скорости детонации в зарядах диаметром около 150 мм.

Исследования детонации гранулированных и водосодержащих ВВ в практических условиях и на моделях выполнены И.Т.Колесниченко. В табл.6.9 приведены результаты измерения скорости детонации в различных средах. Испытания в стальной трубе полностью моделируют взрывание в крепком известняке в шпурах равного диаметра. Вместе с тем в скважинах диаметром 150 мм гранулированные ВВ детонируют с большей скоростью, чем в трубе диаметром 50 мм. Это свидетельствует о том, что в трубе указанного диаметра идеальный режим детонации гранулированных аммиачно-селитренных ВВ не достигается. Для водосодержащих ВВ различия скоростей детонации при взрывании в трубе и скважине меньше, кроме акватолы 65/35, содержащего всего 35 % порошкообразного тротила, для которого разница в скорости детонации достигает 590 м/с. Аммониты детонируют в идеальном режиме в трубе диаметром 50 мм.

Таблица 6.9

| ВВ                   | Скорость детонации, км/с                |                          |                           |   |                                    |
|----------------------|---|--------------------------|---------------------------|---|------------------------------------|
|                      | в стальной трубе с толщиной стенок 3 мм | в шпурах диаметром 50 мм |                           | в скважинах диаметром 150 мм в крепком известняке | в открытом заряде диаметром 150 мм |
|                      |   | в крепком известняке     | в мягком глинистом грунте |   |                                    |
| Граммонниты: 80/20   | 3,2                                     | 3,18                     | 2,8                       | 4,46  | 3,77                               |
| водосодержащий 50/50 | 4,8                                     | —                        | —                         | 4,98  | 4,45                               |
| водосодержащий 30/70 | 4,75                                    | —                        | —                         | 5,142   | 4,54                               |
| Гранулит АС-8        | 3,29                                    | 3,3                      | 2,97                      | —   | —                                  |
| Гранулит П           | 2,52                                    | 2,6                      | 2,1                       | 3,97  | 2,75                               |
| Игданит              | —                                       | —                        | —                         | 3,76  | 1,54                               |

|                                |      |      |       |      |       |
|--------------------------------|------|------|-------|------|-------|
| Гранулол<br>водосодержащ<br>ий | 5,28 | 5,3  | –     | 5,39 | –     |
| Акватола 65/35                 | 4,84 | 4,82 | Отказ | 5,39 | Отказ |
| Акватола 50/50                 | –    | –    | –     | 5,6  | 5,23  |
| Аммонит № 6                    | 4,45 | 4,5  | 4,43  | 4,5  | 4,42  |

В мягких грунтах гранулированные ВВ детонируют с меньшей скоростью, чем в крепких горных породах; водосодержащие ВВ при недостаточном диаметре скважины могут давать отказы; и лишь аммониты, имеющие малый критический диаметр, детонируют примерно с одинаковой, близкой к идеальной, скоростью в шпурах диаметром 50 мм, выбуренных в скальных породах и в грунтах. Из данных табл.6.9, а также из рис.6.10 следует, что в производственных условиях при взрывании скальных горных пород скважинными зарядами диаметром 150-250 мм применяемые гранулированные и водосодержащие ВВ детонируют со скоростью, приближающейся к максимальной. При шпуровом взрывании этими ВВ скорость не достигает максимума, т.е. детонация протекает не в идеальном режиме.

Параметры детонационной волны для ряда ВВ определены на электромагнитной установке (табл.6.10). Различие параметров детонации ВВ, полученных разными авторами или в разное время для одних и тех же промышленных ВВ, объясняется, возможно, непостоянством свойств самих ВВ, характерным для смесевых, особенно аммиачно-селитренных ВВ. Несмотря на это, прослеживаются некоторые общие закономерности: время реакции в волне уменьшается с увеличением плотности заряда, как и у индивидуальных ВВ. При изменении диаметра заряда одинаковой плотности заметного изменения величины  $\tau$  не наблюдается.

Таблица 6.10

| ВВ                  | $\rho_0$ ,<br>г/см <sup>3</sup> | $d_z$ ,<br>мм | $D$ ,<br>м/с | $U$ ,<br>м/с | $P_H$ ,<br>Па | $k$  | $\tau$ ,<br>мкс | $a$ , мм |
|---------------------|---------------------------------|---------------|--------------|--------------|---------------|------|-----------------|----------|
| Аммонит<br>ПЖВ-20   | 0,9                             | 40            | 3,69         | 0,99         | 3,29          | 2,74 | 0,66            | –        |
|                     | 0,9                             | 60            | 4,15         | 1,04         | 3,87          | 3    | 0,73            | –        |
|                     | 0,9                             | 80            | 4,34         | 1            | 3,91          | 3,3  | 0,66            | –        |
|                     | 0,9                             | 120           | 4,4          | 1,05         | 4,16          | 3,2  | 0,75            | –        |
|                     | 1,0                             | 26            | 3,39         | 1,51         | 3,98          | 1,96 | 0,75            | 1,51     |
|                     | 1,0                             | 32            | 3,61         | 1,21         | 4,48          | 1,95 | 0,7             | 1,51     |
|                     | 1,0                             | 40            | 3,82         | 1,25         | 4,88          | 2,05 | 0,79            | 1,83     |
|                     | 1,0                             | 60            | 4,22         | 1,32         | 5,68          | 2,2  | 0,76            | 2,02     |
|                     | 1,0                             | 120           | 4,54         | 1,37         | 6,35          | 2,32 | 0,75            | 2,18     |
| Аммонит<br>ПЖВ-20   | 1,34                            | 40            | 4,8          | 0,97         | 6,27          | 3,9  | –               | –        |
|                     | 1,7                             | 40            | 4,83         | 0,8          | 6,57          | 5    | 0,43            | –        |
|                     | 1,7                             | 60            | 5,20         | 0,96         | 8,5           | 4,4  | 0,34            | –        |
|                     | 1,7                             | 70            | 5,32         | 1,02         | 9,2           | 4,2  | 0,37            | –        |
|                     | 1,7                             | 80            | 5,35         | 1,05         | 9,54          | 4,1  | 0,33            | –        |
|                     | 1,7                             | 100           | 5,5          | 1,12         | 1,05          | 3,9  | 0,37            | –        |
| Гексонит<br>3       | 1,34                            | 40            | 4,86         | 0,97         | 6,33          | 4    | –               | –        |
| Окончание табл.3.10 |                                 |               |              |              |               |      |                 |          |
| ВВ                  | $\rho_0$ ,<br>г/см <sup>3</sup> | $d_z$ ,<br>мм | $D$ ,<br>м/с | $U$ ,<br>м/с | $P_H$ ,<br>Па | $k$  | $\tau$ ,<br>мкс | $a$ , мм |
| Гексамон<br>1       | 0,87                            | 40            | 3,56         | 1,38         | 4,26          | 1,58 | 1               | 1,77     |
|                     | 1,34                            | 40            | 5,35         | 1,19         | 9,55          | 3,5  | –               | –        |
| Гексамон            | 0,89                            | 40            | 3,5          | 1,33         | 4,2           | 1,64 | 0,97            | 1,73     |

|                            |      |     |      |      |      |      |      |     |
|----------------------------|------|-----|------|------|------|------|------|-----|
| 5                          | 1,7  | 40  | 5,65 | 1,08 | 10,3 | 4,23 | 0,54 | 2,3 |
| Аммонит<br>№ 6ЖВ           | 1,0  | 25  | 3,13 | 0,81 | 2,54 | 2,88 | –    | –   |
|                            | 1,0  | 40  | 3,8  | 1,31 | 4,97 | 1,9  | –    | –   |
|                            | 1,0  | 60  | 4,34 | 1,51 | 6,55 | 1,88 |      | –   |
|                            | 1,0  | 80  | 4,52 | 1,62 | 7,32 | –    | –    | –   |
|                            | 1,0  | 100 | 4,6  | 1,64 | 7,66 | 1,84 | –    | –   |
| Граммони<br>т 80/20        | 1,0  | 100 | 4,3  | 1,55 | 6,8  | 1,8  |      | –   |
| Гранулит<br>АС-8           | 1,0  | 100 | 4,1  | 1,6  | 6,7  | 1,6  | –    | –   |
| Аммонит<br>скальный<br>№ 1 | 0,95 | 100 | 5,11 | 1,8  | 8,9  | 1,8  | –    | –   |
| Аммонал<br>ВА-4            | 0,92 | 100 | 4,6  | 1,68 | 7,3  | 1,7  | –    | –   |
| Аммонит<br>№ 10ЖВ          | 0,74 | 100 | 4,6  | 1,6  | 5,56 | 1,9  | –    | –   |

При ВВ большой плотности ( $1,7 \text{ г/см}^3$ ) значения показателя политропы аномально высоки ( $k = 4 \div 5$ ), для гранулированных ВВ при насыпных плотностях  $0,9\text{-}1,0 \text{ г/см}^3$  очень малы ( $k < 2$ ). Абсолютные значения ширины зоны и времени реакции порошкообразных смесевых ВВ, в том числе предохранительных, близки к тем же величинам для порошкообразного тротила.

Для расчета параметров ударных волн, созданных детонацией зарядов данного ВВ на границе раздела с различными средами, необходимо, кроме давления детонации, знать ударную адиабату продуктов детонации (ПД) и среды. Для приближенного построения ударной адиабаты ПД в диапазоне плотностей, отвечающих области отражения детонационных волн от плотных сред, можно пользоваться степенной зависимостью между давлением и плотностью. С использованием данных табл.6.10 и эмпирической зависимости  $P = A(\rho_0/\rho_1)$  рассчитаны ударные адиабаты ПД для зарядов диаметром 80 мм: для аммонала ВА-4  $P = 34u + 2u^2 + u^3$ ; для аммонала скального № 1  $P = 42u + 2u^2 + 0,8u^3$ .

С учетом этих зависимостей и значений давлений детонации рассчитываются давления на границе раздела в средах, ударные адиабаты которых известны. Некоторые данные о начальных параметрах ударных волн в горных породах приведены в табл.6.11.

Таблица 6.11

| ВВ                          | Давление на границе раздела ВВ – порода $P_H$ , ГПа |            |             |               |                          |
|-----------------------------|---|------------|-------------|---------------|--------------------------|
|                             | Дуни<br>т   | Гран<br>ит | Базаль<br>т | Извест<br>няк | Глинист<br>ый<br>алеврит |
| Аммонал ВА-4                | 11,9  | 10,2       | 9,9         | 9,1           | 7,5                      |
| Аммонал скальный<br>№ 1     | 14,1  | 12,0       | 11,8        | 10,9          | 8,9                      |
| Аммонит № 6ЖВ               | 13,8  | 11,0       | 10,8        | 9,9           | 8,9                      |
| Акванит № 3                 | 16,44   | 13,2       | 12,9        | 11,8          | 9,0                      |
| Тротил<br>(водонаполненный) | 16,75   | 13,5       | 13,1        | 12,0          | 9,15                     |

Расчет параметров идеальной детонации смесевых промышленных ВВ в принципе не отличается от аналогичных расчетов для индивидуальных ВВ, если вторичные реакции в газовой фазе полностью завершаются в детонационной волне, т.е. до плоскости Чепмена – Жуге. В этом случае отличия состоят лишь в ширине зоны реакции в волне и в поперечных размерах заряда  $d_{пр}$ ,

обеспечивающих протекание детонации в идеальном режиме. Для смесевых ВВ ширина зоны больше и, соответственно, детонация в неидеальном режиме протекает в большем интервале по диаметру заряда (между  $d_{кр}$  и  $d_{пр}$ ), чем для индивидуальных ВВ.

К такого рода смесевым системам, как показывают измерения, можно, в частности, отнести тонкодисперсные аммониты, для которых профиль массовой скорости в детонационной волне, получаемой на электромагнитной установке, имеет достаточно четко обозначенный излом, отвечающий плоскости Чепмена – Жуге. Поэтому для них при расчетах параметров детонации можно пользоваться величиной полной теплоты взрыва, складываемой из теплоты разложения нитросоединений (например, тротила) и аммиачной селитры и теплоты реакции взаимодействия между продуктами их распада.

В меньшей мере исследованы с этой точки зрения грубодисперсные (гранулированные) смеси и составы, содержащие невзрывчатые горючие (металлы, органические вещества и др.). При фиксации профиля массовой скорости или давления в детонационной волне не всегда в таких смесях удастся четко выделить точку излома, отвечающую плоскости Чепмена – Жуге, а экспериментальные значения параметров детонации в ряде случаев оказываются ниже расчетных. Это говорит о том, что не вся потенциальная теплота сгорания горючего реализуется в детонационной волне и что часть горючего реагирует за плоскостью Чепмена – Жуге, т.е. уже в расширяющихся продуктах взрыва.

Механизм и кинетика детонации смесевых ВВ является до настоящего времени одной из наименее проработанных проблем теории ВВ. Отсюда сложность и недостаточная достоверность расчетов. В зависимости от кинетических характеристик компонентов, их количественного соотношения в составе ВВ, размера частиц, пористости заряда и ряда других факторов химические и физические процессы в детонационной волне протекают по-разному.

Если скорость разложения компонентов, определяемая их кинетическими константами (энергией активации реакции распада) и размером частиц, более или менее одинакова, то в волне может быть реализована вся потенциальная энергия смеси, и кинетика в данном случае определит лишь ширину зоны реакции и предельный диаметр заряда, обеспечивающий идеальный режим детонации. Причем регулированием соотношения размеров частиц компонентов в известных пределах можно сближать периоды полного разложения компонентов с различными кинетическими характеристиками, т.е. как бы увеличивать степень «кинетической однородности» смеси.

Если в кинетическом отношении смесь неоднородна, то в детонационной волне реализуется лишь часть потенциальной энергии системы, включающая теплоту разложения более активного компонента и лишь некоторую долю теплоты разложения менее активного компонента и теплоты вторичных реакций в газовой фазе. В пределе детонация может поддерживаться лишь теплотой разложения одного компонента, если его концентрации достаточно для стационарного распространения детонации; малоактивные компоненты ведут себя в этом случае как балластные материалы. Типичными представителями таких систем являются смеси высокобризантных ВВ с алюминиевым порошком, селективно-детонирующие предохранительные ВВ, содержащие высокоактивный нитроглицерин и смесь малоактивных минеральных солей. В этих смесях «детонационная» теплота, в основном, складывается из теплоты разложения активного компонента и лишь на стадии расширения продуктов взрыва реализуется полная потенциальная энергия ВВ.

Детонация кинетически неоднородных взрывчатых систем описана в работах А.Я.Апина, В.Г.Хотина и др.

Расчет параметров детонации смесей с неполным тепловыделением (неполным разложением малоактивных компонентов) в детонационной волне крайне затруднен, так как для этого требуется знание кинетики разложения компонентов и вторичных реакций в волне. Качественные оценки давались в связи с изучением явления малой скорости детонации у ряда смесевых ВВ, аномальной по отношению к детонации Чепмена – Жуге, причиной которой является как раз неполное тепловыделение в детонационной волне.

Более точные расчеты могут быть сделаны в предположении полного отсутствия реакции в малоактивных компонентах или без учета медленно протекающих вторичных реакций, например реакции окисления алюминия газообразными продуктами разложения ВВ, или для смесей, заведомо содержащих инертные компоненты, не участвующие в реакции взрывчатого

превращения, например соли-пламегасители в составе предохранительных ВВ. В таких смесях возможны два механизма детонации, на которые указал А.Я.Апин. Если частицы активного компонента имеют достаточно большой поперечный размер, превосходящий  $d_{кр}$ , а их концентрация такова, что имеется прямой контакт между частицами, то детонация может распространяться по этим частицам как по каркасу со скоростью, свойственной данному ВВ. Инертный материал в данном случае служит как бы «внутренней оболочкой» и не только не снижает, но может даже увеличить скорость детонации по сравнению со случаем, когда межгранульное пространство заполнено воздухом. Примером является гранулированный тротил (гранулотол) в насыпном и водонаполненном виде.

Другой механизм относится к таким смесям, в которых активный компонент настолько разбавлен инертным, что детонация по каркасу становится невозможной. Это приводит не только к неоднородности фронта детонации, но и к снижению его параметров вследствие затрат энергии на прогрев, сжатие и разгон частиц инертного материала в детонационной волне. С учетом этих потерь рекомендовано следующее выражения для расчета давления в детонационной волне смеси ВВ с инертной добавкой:

$$P = \frac{\rho_0 D^2}{k+1} \left( 1 - \alpha \frac{\rho_0}{\rho_d} \right),$$

где  $D$  – скорость детонации смеси, определяемая экспериментально или расчетом;  $k$  – показатель политропы продуктов взрыва;  $\alpha$  – массовая доля добавки;  $\rho_0$  – плотность ВВ;  $\rho_d$  – плотность добавки.

А.А.Котомин предложил схему расчета параметров детонации ВВ с инертными добавками. При этом исходным является уравнение, в котором влияние инертной добавки выражается через некоторое приращение скорости детонации  $\Delta D$ . Такое приращение может иметь как отрицательный, так и положительный знак:

$$D_{\max} = D_{ВВ} + \Delta D,$$

где  $D_{\max}$  – максимальная скорость детонации состава с добавкой;  $D_{ВВ}$  – скорость детонации чистого (исходного) ВВ при той же парциальной плотности, что и в составе,  $\rho_H = \beta \rho_{\max}$ ;  $\beta$  – массовая доля ВВ в составе;  $\rho_{\max}$  – максимальная плотность ВВ (монокристалла).

Скорость детонации при заданной плотности рассчитывается по формуле Кука

$$D_{ВВ} = D_{\rho_m} + M(\rho_H - \rho_m),$$

где  $D_{\rho_m}$  – известная скорость детонации ВВ при некоторой плотности  $\rho_m$ , определенная экспериментально или по расчету;  $M$  – коэффициент линейной зависимости  $D = f(\rho_0)$ , для тротила  $M = 3030$ , для гексогена  $M = 3250$ .

Приращение скорости детонации для случая, когда добавка является металлом, оксидом, солью или другим малосжимаемым материалом, вычисляется по эмпирической формуле

$$\Delta D = a(b - \rho_d) \frac{\alpha \rho_{\max}}{\rho_{\max}},$$

где  $a$  и  $b$  – коэффициенты;  $\rho_d$  – плотность добавки;  $\alpha$  – ее массовая доля в составе;  $\rho_{\max}$  – максимальная плотность состава,

$$1/\rho_{\max} = \sum c_i / \rho_i; \quad \sum c_i = 1;$$

$c_i$ ,  $\rho_i$  – массовая доля и плотность компонентов состава.

Значения коэффициентов  $a$  и  $b$  принимаются по следующим данным:

| Добавка                               | $a$ ,<br>м <sup>4</sup> /(кг·с) | $b$ , 10 <sup>-3</sup><br>кг/м <sup>3</sup> |
|---------------------------------------|---------------------------------|---|
| Оксиды с размером частиц,<br>мкм:     |                                 |   |
| < 10                                  | 1,25                            | 4,0   |
| > 10                                  | 0,575                           | 9,1   |
| Неорганические<br>и органические соли | 1,76                            | 3,6   |



Если в составе ВВ содержится несколько разнородных добавок, то их влияние на скорость детонации суммируется:  $(\Delta D_d = \sum \Delta D_i)$ .

Определив  $D_{\max}$ , можно, пользуясь линейной зависимостью  $D = f(\rho_0)$ , получить значение скорости детонации при реальной плотности состава

$$D_{\rho_m} = D_{\max} - M(\rho_{\max} - \rho_0),$$

где  $M$  – линейный коэффициент для ВВ, с которым смешана добавка.

Указанный расчет справедлив при содержании добавки не более 60-70 % по массе.

Для расчета показателя политропы ВВ предложены эмпирические формулы:

$$k = 1,85 + 1,15 \frac{\rho_0}{\rho_{\max}} + 2,85\alpha \quad \text{при} \quad 0,4 \leq \frac{\rho_0}{\rho_{\max}} \leq 0,9;$$

$$k = k_H + 2,85\alpha \quad \text{при} \quad \frac{\rho_0}{\rho_{\max}} > 0,9,$$

где  $\rho_0$  – плотность ВВ;  $\rho_{\max}$  – максимальная плотность заряда;  $k_H$  – показатель политропы чистого ВВ, для тротила  $k_H = 2,8$ , для гексогена  $k_H = 2,7$ .

Вычислив  $k$ , по известному уравнению  $P = \rho_0 D^2 / (k + 1)$  рассчитывают давление детонации.

Часто ВВ с инертными добавками, например предохранительные, применяют в патронах диаметром меньше  $d_{\text{пр}}$  и, таким образом, детонация происходит не в идеальном режиме. А.А.Котомин предложил методику расчета параметров детонации в неидеальном режиме:

$$D = D_H \left( g - h \frac{d_{\text{кр}}}{d} \right); \quad d_{\text{пр}} / d_{\text{кр}} = 1,15 \frac{h}{g - 1}.$$

Коэффициенты  $g$  и  $h$  вычисляются из эмпирических зависимостей в виде многочленов, как функции размера частиц ВВ, объемной доли добавки в составе ВВ и пористости заряда. Величина  $g$  близка к единице,  $h$  – к 0,1.

## Список рекомендованной литературы

1. ФЕДЕРАЛЬНЫЕ НОРМЫ И ПРАВИЛА В ОБЛАСТИ ПРОМЫШЛЕННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ "ПРАВИЛА БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ, ХРАНЕНИИ И ПРИМЕНЕНИИ ВЗРЫВЧАТЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРОМЫШЛЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ"
2. Шевцов Н.Р., Таранов П.Я., Левит В.В., Гудзь А.Г. Разрушение горных пород взрывом: Учебник для вузов. – 4-е издание переработанное и дополненное – Донецк: , 2003. – 253 с.
3. Мейдер, Ч. Численное моделирование детонации /Ч. Мейдер. – М.: Наука, 1985. – 384 с.
4. Андреев, К.К. Теория взрывчатых веществ / К.К. Андреев, А.Ф. Беляев. □ М.: Оборонгиз, 1960. – 597 с.
5. Физика взрыва. – Т. 1; под ред. Л.П. Орленко. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2002. – 832 с.
6. Дубнов, Л.В. Промышленные взрывчатые вещества / Л.В. Дубнов, Н.С. Бахаревич, А.И. Романов. – М.: Наука, 1988. – 358 с.
7. Поздняков, З.Г. Справочник по промышленным взрывчатым веществам и средствам взрывания / З.Г. Поздняков, Б.Д. Росси. – М.: Недра, 1977. – 253 с.
8. Хомченко, Г.П. Общая химия / Г.П. Хомченко. – М.: Высшая школа, 1981. – 460 с.
9. Хомченко, И.Г. Общая химия / И.Г. Хомченко. – М.: Химия, 1987. – 464 с.
10. Теория детонации промышленных взрывчатых веществ: Учеб. пособие / Г.П.Парамонов, Ю.И.Виноградов, В.А.Артемов, В.Н.Ковалевский; Санкт-Петербургский государственный горный институт (технический университет). СПб, 2004. 102 с. ISBN 5-94211-173-1