

Л. В. ДУБНОВ
Н. С. БАХАРЕВИЧ
А. И. РОМАНОВ

ПРОМЫШЛЕННЫЕ ВЗРЫВЧАТЫЕ ВЕЩЕСТВА

3-е издание, переработанное и дополненное



МОСКВА "НЕДРА" 1988

ББК 33.133
Д79
УДК 622.235.2

Рецензенты: канд. техн. наук В. М. Скоробогатов, канд. техн. наук
Б. Н. Кукиб

Д $\frac{25002000000-279}{043(01)-88}$ 224-88

ISBN 5-247-00285-7

© Издательство «Недра», 1982, с
изменениями
© Издательство «Недра», 1988, с
изменениями

ПРЕДИСЛОВИЕ

Взрывчатые вещества (ВВ) как высококонцентрированный и экономичный источник энергии широко применяют в различных отраслях народного хозяйства. Около 90 % всего объема руд цветных и черных металлов в нашей стране добывают взрывным способом. Массовые взрывы широко используются при вскрытии рудных тел, угольных пластов и месторождений других полезных ископаемых, в строительстве, при сооружении плотин и насыпей, прокладке авто- и железнодорожных магистралей, водных каналов, спрямлении русел рек, прокладке нефте- и газопроводов, особенно в труднодоступной для техники местности, при проведении тоннелей, прокладке шахтных стволов и других горных работ.

ВВ также широко применяют при взрывных способах обработки металлов в машиностроении и металлургии — штамповке, сварке, изготовлении биметаллических листов, упрочнении деталей машин, резании металлов; при сейсморазведке, перфорации нефтяных скважин, при тушении лесных пожаров, уплотнении грунтов, в гидромелиоративном строительстве, расчистке и выравнивании местности и для других технических нужд.

Продолжается поиск и исследование дальнейших путей использования и управления энергией взрыва. В настоящее время применяется взрывной способ производства некоторых особенно ценных минералов и искусственных материалов, ускоряются отдельные химические процессы с использованием сверхвысоких давлений взрыва, проводятся работы по искусственному дождеванию, внедряются методы взрывного бурения.

Эффективность и безопасность различных видов взрывных работ в значительной степени зависят от свойств применяемых ВВ. Многообразие условий применения и широкий диапазон технических требований к промышленным ВВ обуславливают различия их по химическому составу, физическим и взрывчатым свойствам.

В первых двух изданиях книги Промышленные взрывчатые вещества было изложено состояние теории промышленных ВВ на период 60—70-х годов и описан ассортимент ВВ, применяв-

шихся в горной промышленности и других отраслях народного хозяйства в тот период.

За прошедшее время в нашей стране и за рубежом дальнейшее развитие получили гранулированные, водосодержащие, эмульсионные и суспензионные промышленные ВВ, которые в наибольшей мере отвечают требованиям комплексной механизации буровзрывных работ (складирования, транспортирования и заряжания ВВ). Они стали основными типами ВВ для горной промышленности взамен аммонитов.

Качественные изменения в ассортименте промышленных ВВ повлекли за собой и дальнейшее углубленное изучение особенностей детонации гранулированных и водосодержащих ВВ на основе аммиачной селитры, отличающихся значительной физической и химической неоднородностью.

Эти изменения отражены в настоящем издании книги.

1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ПРОМЫШЛЕННЫХ ВВ, ИХ КЛАССИФИКАЦИЯ И ИСТОРИЯ РАЗВИТИЯ

1.1. ВВ КАК ХИМИЧЕСКАЯ СИСТЕМА. ОСНОВНЫЕ ФОРМЫ ПРЕВРАЩЕНИЯ

Взрывчатыми называют вещества (химические соединения) или их смеси, способные к крайне быстрому самораспространяющемуся химическому превращению с выделением тепла и образованием газообразных продуктов. Взрывчатыми могут быть вещества любого агрегатного состояния — твердые, жидкие, газообразные, в том числе суспензии, эмульсии, коллоидные растворы, взвеси твердых или жидких веществ в газах. Наиболее широко применяются ВВ твердого и жидкого агрегатного состояний (конденсированные ВВ).

Как химический источник тепловой энергии, конденсированные ВВ отличаются высокой объемной концентрацией (4—15 МДж/дм³). В отличие от обычных топлив, при сгорании которых расходуется газообразный кислород, большинство ВВ содержит связанный кислород и выделяет тепло в результате внутримолекулярных окислительно-восстановительных реакций распада или реакций взаимодействия между составными частями взрывчатой смеси, продуктами их разложения или газификации. Вторая особенность ВВ состоит в большой скорости выделения энергии при взрыве. Выделившаяся тепловая энергия преобразуется в кинетическую энергию первоначально сильно сжатых газообразных продуктов взрыва, которые, расширяясь, способны произвести механическую работу и оказать сильное разрушающее действие в окружающей плотной среде (или на сооружение). В результате быстрого расширения газообразных продуктов взрыва в окружающей среде возникает ударная волна.

В зависимости от характера внешнего воздействия химическое превращение в ВВ возможно в трех основных формах: медленное термическое разложение, горение и детонация. Промежуточной является форма взрывного горения.

Термическое разложение — сравнительно медленный процесс распада вещества, который происходит при равномерном прогреве массы ВВ. Процесс подчиняется обычным законам химической кинетики. Константа скорости реакции, в соответствии с уравнением Аррениуса $K = Ae^{-E/(RT)}$ по экспоненциальному закону возрастает с увеличением температуры T и зависит от кинетических

констант $ВВ$ — энергии активации E и предэкспоненциального множителя B (R — универсальная газовая постоянная).

При достижении некоторых критических условий нагрева процесс термического разложения автоускоряется и переходит во взрыв (тепловой). Критическая температура нагрева и время развития теплового взрыва уменьшаются с увеличением массы $ВВ$. Эти величины связаны определенными соотношениями (см. раздел 5).

Горение возникает при поджигании $ВВ$. Это самораспространяющийся процесс химического превращения вещества, происходящий в сравнительно узкой зоне (пламени), которая перемещается по веществу в результате прогрева впереди лежащих слоев по механизму теплопроводности или диффузионного теплообмена с нагретыми продуктами горения. Различают стационарное, или нормальное горение, перемещающееся по $ВВ$ с постоянной скоростью от долей до нескольких сотен сантиметров в секунду, и нестационарное, или взрывное, распространяющееся с непостоянной скоростью до сотен метров в секунду.

Способность к послыльному нормальному горению зависит от структуры $ВВ$. Она свойственна веществам с малопористой структурой, полученной, например, желатинизацией или сильным уплотнением массы (коллоидные, дымные пороха). Скорость нормального горения зависит от внешнего давления p и выражается законом

$$U_r = A + Bp^n,$$

где A и B — постоянные для данного $ВВ$ величины; $n \leq 1$ — эмпирический коэффициент.

Температурная зависимость скорости горения описывается выражением

$$U_r = 1/(A_1 - B_1 T_0),$$

где T_0 — начальная температура вещества. Давление в зоне нормального горения невелико.

Нестационарное самоускоряющееся или пульсирующее горение возникает в пористых и высокоактивных $ВВ$. Оно распространяется в результате диффузии (проникания) высокотемпературных продуктов горения в глубь вещества (горение в объеме). При больших скоростях горения процесс приобретает взрывной характер, развиваются высокие давления газов, в окружающей среде возникает ударная волна, но меньшей интенсивности, чем при детонации. По этой причине такой процесс называют взрывным горением.

Зависимость скорости горения от давления является причиной ускорения процесса при горении в замкнутом объеме, где прогрессивно возрастает давление газов. В этих условиях горение может перейти во взрыв (детонацию). Способность к переходу горения в детонацию зависит от химической природы и струк-

туры $ВВ$. Особенно легко этот переход происходит в инициирующих $ВВ$, которые не способны к стационарному горению даже на открытом воздухе. Условия и механизм перехода горения в детонацию подробно рассмотрены в разделе 5.

Детонация возникает в $ВВ$ при ударно-волновом возбуждении. Она представляет собой процесс перемещения по $ВВ$ с постоянной сверхзвуковой скоростью (порядка тысяч метров в секунду) узкой зоны химической реакции с крутым скачком давления на фронте (детонационной волны). В результате исключительной кратковременности химического превращения конденсированного $ВВ$ при детонации нагретые до нескольких тысяч градусов газообразные продукты реакции первоначально занимают объем, близкий к объему исходного вещества, и развивают огромное давление — в десятки и сотни тысяч атмосфер (при детонации газов — десятки атмосфер). Основные закономерности детонации описываются в разделе 3.

Все процессы, сопровождающиеся образованием в окружающей среде скачка давления (ударной волны), обобщенно называют взрывом. К этой категории явлений относятся как детонация, так и взрывное горение, но первая распространяется по $ВВ$ со сверхзвуковой, а второе — с дозвуковой скоростью. При взрывном горении энергия переносится продуктами реакции взрывчатого превращения, при детонации — ударной волной, к которой примыкает зона реакции. Детонация оказывает наиболее сильное разрушительное действие. Поэтому в настоящее время в большинстве видов взрывных работ используют $ВВ$ в режиме детонации. Дымные пороха в режиме взрывного горения применяют в ограниченных масштабах при добыче штучного камня (гранита, мрамора и др.), когда при взрывании для минимального нарушения целостности монолитных блоков требуется сравнительно «мягкая» нагрузка на массив.

Резко выраженный динамический характер нагружения при детонации и развиваемые при этом сверхвысокие давления позволяют эффективно использовать $ВВ$ не только в традиционной области взрывного дробления и перемещения горных пород, но и в таких сравнительно новых областях использования энергии взрыва, как обработка металлов взрывом, получение искусственных минералов, проведение ускоренных процессов полимеризации химических продуктов, в сейсморазведке и других областях.

1.2. КЛАССИФИКАЦИЯ $ВВ$

$ВВ$ классифицируют по нескольким признакам: по характерной в условиях эксплуатации форме химического превращения, по чувствительности к простым видам внешнего воздействия, по химической природе или составу, по условиям применения.

В зависимости от характерной формы химического превраще-

ния и назначения ВВ подразделяют на три класса: метательные, или пороха, бризантные ВВ и пиротехнические составы.

К порохам относят ВВ, способные к нормальному горению и применяемые в качестве метательных средств (в огнестрельном оружии, в огнепроводных шнурах, замедлителях и т. п.).

К бризантным относят ВВ, способные к устойчивой детонации и используемые во взрывной технике как средство дробления, разрушения горных пород, сооружений, конструкций и в других целях. Из бризантных ВВ выделяют подкласс инициирующих ВВ, применяемых только в средствах инициирования.

К пиротехническим составам относят большую и разнообразную по химическому составу группу смесей, содержащих окислитель и горючее и применяемых в пиротехнических изделиях различного назначения. Среди них имеются смеси, обладающие всеми признаками взрывчатости (осветительные составы, фото-смеси, фейерверки). Эти составы в условиях применения, как правило, срабатывают в режиме взрывного горения.

Приведенное деление ВВ на три класса в некоторой степени условно, так как исходит не только из свойств, но и от назначения ВВ. Поэтому могут быть случаи, когда ВВ одного и того же химического состава без каких-либо структурных изменений используется и как метательное, и как бризантное в зависимости от способа инициирования. К таким ВВ могут быть отнесены бездымные пороха, которые при поджигании нормально горят, а при возбуждении мощным детонационным импульсом детонируют. Именно поэтому некондиционные бездымные пороха не уничтожают (сжиганием), а используют на взрывных работах (они особенно эффективны при взрывании в воде). Однако бездымные пороха все же относят к метательным ВВ согласно их основному назначению. Напротив, имеются вещества и составы, которые в силу своих химических или физических свойств не способны одновременно к нескольким режимам превращения. Например, инициирующие ВВ и некоторые жидкие бризантные ВВ не способны к стационарному горению, дымный порох и многие пиротехнические составы (термиты и др.) — к устойчивой детонации.

Способность к той или иной форме превращения в сильной степени зависит от структуры ВВ, его пористости, вязкости, агрегатного состояния. Одни и те же вещества или смеси при структурных изменениях приобретают характерные свойства ВВ того или иного класса. Так, например, пироксилин (нитроклетчатка) сам по себе является типичным бризантным ВВ, а обработанный летучей спиртоэфирной смесью приобретает рогообразную мало-пористую структуру и типичные свойства пороха (пироксилиновый порох). Тот же пироксилин, пластифицированный нитроглицерином (в весовом соотношении примерно 2:1), также имеет свойства пороха (баллиститные пороха), а смесь нитроглицерина с меньшим количеством нитроклетчатки (7—8 %) отличается сту-

денистой структурой и под названием желатин-динамита (гремучего студня) известна как мощное бризантное ВВ, чувствительное к импульсу капсюля-детонатора (КД). Дымный порох в уплотненном состоянии способен к стационарному горению, в рыхлом — взрывается при поджигании (режим взрывного горения); долгое время широко использовался на взрывных работах и для снаряжения артиллерийских разрывных гранат.

По чувствительности (восприимчивости) к простым формам начального импульса бризантные ВВ подразделяются на первичные (инициирующие) и вторичные.

Первичные ВВ, к которым, в частности, относятся широко применяемые в средствах инициирования такие вещества, как гремучая ртуть, азид свинца, тринитрорезорцинат свинца, при поджигании малых масс (доли грамма) детонируют, точнее — возникающее горение очень быстро переходит в детонацию. Детонация легко возбуждается в них и при механических воздействиях. Детонацию во вторичных ВВ возбуждают с помощью ударно-волновой нагрузки, причем давление в инициирующей волне должно быть не меньше сотен мегапаскалей. Обычно детонацию вторичных ВВ возбуждают с помощью контактного взрыва некоторой массы первичного ВВ, помещенного в капсюль-детонатор. Именно поэтому первичные ВВ называют также инициирующими. Детонация вторичных ВВ при поджигании возможна лишь в замкнутых камерах с прочными стенками, т. е. в условиях прогрессивно нарастающего давления в камере. Поджигание как технический способ возбуждения детонации вторичных ВВ целенаправленно применяется крайне редко. Более подробные сведения о механизме возбуждения детонации во вторичных ВВ изложены в разделе 3. На практике к собственно ВВ относят только бризантные ВВ. Бризантные ВВ, применяемые в гражданских отраслях народного хозяйства, получили наименование промышленных ВВ.

По химическому составу ВВ подразделяют на индивидуальные соединения и смеси.

Наиболее распространенные индивидуальные бризантные ВВ относятся к органическим азотистым соединениям ароматического, алифатического и гетероциклического рядов, в том числе к нитросоединениям, содержащим группу NO_2 (тротил, динитронафталин, тринитробензол, нитрометан, пикриновая кислота), нитратам спиртов, содержащим группу ONO_2 (нитроглицерин, нитрогликоли, тэн), нитраминам, содержащим группу N—NO_2 (тетрил, гексоген, октоген). Из неорганических соединений слабые взрывчатые свойства имеют аммониевые соли азотной (аммиачная селитра) и хлорной кислот (перхлорат аммония). Перечисленные ВВ применяются либо самостоятельно, либо в качестве компонентов взрывчатых смесей (см. раздел 8). В индивидуальных ВВ процесс химического превращения протекает одностадийно в виде реакции мономолекулярного распада.

Все многообразие применяемых или запатентованных взрывчатых смесей можно свести к двум основным типам: состоящим из окислителя и горючего и состоящим из одного или нескольких индивидуальных ВВ и различного рода добавок, обеспечивающих заданные технологические или эксплуатационные свойства смеси.

Взрывчатые смеси первого типа (окислитель — горючее) широко представлены в современном ассортименте промышленных ВВ. В отличие от взрыва индивидуальных ВВ взрывчатое превращение смеси данного типа происходит в две стадии. Первой стадией является разложение или газификация одного или нескольких компонентов, второй стадией — взаимодействие продуктов разложения (газификация) между собой или с частицами неразлагающегося компонента, например металла. При этом компоненты смеси могут быть сами по себе как взрывчатыми, так и невзрывчатыми. Основная часть тепла при взрыве этих смесей выделяется на второй стадии процесса, т. е. в результате вторичных реакций взаимодействия в газовой фазе или во взвеси. Тепловые же эффекты первой стадии могут быть как экзотермическими, так и эндотермическими.

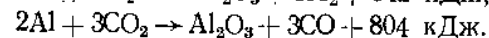
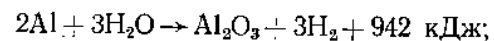
Взрывчатые смеси типа окислитель — горючее имеют ряд преимуществ перед индивидуальными ВВ: они, как правило, более экономичны, позволяют регулировать состав продуктов и тепловые эффекты взрыва. К их недостаткам можно отнести пониженную по сравнению с индивидуальными ВВ детонационную способность, меньшую физическую стабильность.

В качестве окислителей в большинстве случаев применяют минеральные соли, способные при разложении выделять свободный кислород. К ним относятся соли азотной (нитраты аммония, натрия, калия, кальция и др.), хлорной (перхлораты аммония, натрия, калия), хлорноватой (хлорат калия) кислот. Наиболее широкое применение в составах ВВ получил нитрат аммония (аммиачная селитра), на основе которого создан целый класс промышленных ВВ. Перхлоратные и хлоратные ВВ применяются в очень ограниченных масштабах. Известны, но сравнительно мало применяются также составы, в которых в качестве окислителя содержатся жидкий кислород (оксиликвиты), жидкие окислы азота, азотная кислота, тетранитрометан.

В качестве горючего во взрывчатых смесях используют высококалорийные органические соединения (жидкие и твердые продукты переработки нефти, различные виды целлюлозы и др.), металлы и их соединения (алюминий, ферросилиций и др.), индивидуальные ВВ с отрицательным кислородным балансом, выделяющие при своем разложении горючие газы — окись углерода, водород, метан и твердое вещество — сажу (тротил, динитронафталин и др.).

Если в качестве горючего применяют металлические порошки, например алюминий, то окислителем могут служить не только соединения, выделяющие при своем разложении свободный кис-

лород, но и соединения, содержащие связанный кислород, но способные вступать в экзотермическую реакцию взаимодействия с металлом, например, пары воды и углекислый газ. При этом алюминий окисляется до своего высшего окисла, водород полностью восстанавливается, а двуокись углерода переходит в окись по формулам:



Поставщиком кислородсодержащих газов могут быть почти все индивидуальные ВВ. Поэтому на практике применяют смеси индивидуальных ВВ с металлами, в которых ВВ выступает в роли окислителя по отношению к металлу, например, смесь тротила с алюминием (алюмотол). При этом получают выигрыш по теплоте взрыва.

Взрывчатые смеси второго типа komponуются для достижения каких-либо специальных свойств ВВ. Например, многие мощные индивидуальные ВВ, такие, как гексоген, октоген, плавятся при высокой температуре (выше 200 °С) с разложением. Для получения литейного состава эти вещества смешивают с другими индивидуальными ВВ, имеющими низкую температуру плавления, например с тротилом (температура плавления около 80 °С). Из такой смеси делают отливки нужной формы, например шашки-детонаторы. При взрыве каждый из компонентов такой смеси разлагается независимо с выделением соответствующего количества тепла, суммарный тепловой эффект складывается. Некоторое отклонение от правила аддитивности возможно из-за равновесных реакций в продуктах взрыва. К многим мощным индивидуальным ВВ для сближения их чувствительности к механическим воздействиям добавляют 4—8 % низкоплавких углеводородов (воск, парафин, церезин), называемых флегматизаторами. В этих смесях флегматизаторы с энергетической точки зрения являются балластом. В другие смеси вводят вещества, называемые сенсibilизаторами, повышающие чувствительность, например, к инициирующему импульсу. В качестве сенсibilизатора в промышленные ВВ часто вводят нитроглицерин (углениты).

Характерным видом взрывчатой смеси рассматриваемого типа являются желатин-динамиты. Они состоят из нитроглицерина и нитроклетчатки (7—8 %). Цель введения нитроклетчатки в нитроглицерин — придание ему гелеобразной консистенции. Обращение с таким студнеобразным ВВ (возможность его патронирования) значительно более удобно и безопасно, чем с жидким нитроглицерином.

Смеси, содержащие нитроглицерин или другие жидкие нитраты спиртов (нитрогликоли) в качестве основного взрывчатого компонента или в качестве сенсibilизатора, получили наименование нитроэфирсодержащих ВВ или динамитов.

Во многих случаях взрывчатые смеси имеют признаки обоих типов, т. е. их можно отнести к смешанному типу. Например, большинство нитроэфирсодержащих ВВ помимо жидкого или желатинированного нитроглицерина содержат смесь окислителя (неорганического нитрата) и горючего (древесная мука). В таких смесях нитроглицерин имеет многоцелевое назначение: как мощный взрывчатый компонент, как пластификатор и как сенсibilизатор. К взрывчатым смесям смешанного типа можно отнести также водосодержащие промышленные ВВ, пластифицированные водным гелем, и предохранительные ВВ (ПВВ), взрывчатой основой которых, например, является смесь аммиачной селитры с тротилом, а третий компонент — соль-пламегаситель обеспечивает необходимые предохранительные свойства.

Промышленные ВВ можно сгруппировать следующим образом: индивидуальные ВВ типа нитросоединений, нитратов, нитраминнов и их смеси, включая смеси с металлами;

ВВ на основе аммиачной селитры, в том числе:

смеси гранулированной аммиачной селитры с невзрывчатыми горючими (простейшие ВВ, взрывные агенты, AN—FO, гранулы, игданиты),

смеси аммиачной селитры с тротилом или другими нитросоединениями (аммониты),

смеси аммиачной селитры с алюминием или другими металлами (аммоналы),

водосодержащие смеси, пластифицированные водным гелем (акватолы, аквациты, акваалы, slurry).

Аммониты и аммоналы, изготовленные на гранулированной селитре, называют, соответственно, граммонитами и граммоналами; нитроэфирсодержащие ВВ, в том числе порошкообразные, содержащие не более 15 % нитроэфиров (детониты, углениты), и полупластичные и пластичные составы, содержащие более 15 % нитроэфиров (динамиты);

хлоратные и перхлоратные ВВ;

взрывчатые смеси на основе жидких окислителей (нитропарафины и др.).

По условиям применения ВВ выбираются с наиболее высокими для данной обстановки технико-экономическими показателями. Для каждого типового условия применения должен быть выбран оптимальный тип ВВ, в рамках которого могут быть несколько сортов, отвечающих наиболее высоким технико-экономическим показателям взрывных работ.

Обычно под *типом* ВВ понимают некоторую качественную общность по химическому составу и технологии изготовления, а под *сортом* или *маркой* ВВ — конкретную рецептуру. При этом число типовых условий должно быть не слишком большим. В противном случае ассортимент ВВ очень расширяется, что вступает в противоречие с принципом унификации. Критериями отбора дол-

жны служить условия применения, которые требуют специфических свойств ВВ и, соответственно, рецептурного состава и технологии их изготовления. Так, возможность применения ВВ на подземных работах или только на земной поверхности определяет кислородный баланс ВВ, от которого зависит количество образующихся при взрыве токсичных газов.

Степень обводненности забоев обуславливает требования по водостойчивости ВВ; присутствие в подземных выработках горючих газов и пыли определяет требования к предохранительным свойствам ВВ; для применения ВВ на больших глубинах с высокой температурой необходимы термостойкие ВВ. Изложенные предпосылки являются основой современной классификации промышленных ВВ по области применения.

Действующая в СССР классификация по условиям применения охватывает ВВ, применяемые в горнодобывающей промышленности и в строительстве. Согласно этой классификации по условиям применения ВВ подразделяют на неприохранительные для взрывания только на земной поверхности (класс I), неприохранительные ВВ для взрывания на земной поверхности и в забоях подземных выработок, в которых либо отсутствует выделение горючих газов или пыли, либо применяется инертнизация призабойного пространства, исключающая воспламенение взрывоопасной среды при взрывных работах (класс II), и ПВВ, допущенные в шахты и подземные рудники с пылегазовым режимом (классы III—VII).

ВВ I класса не имеют особых ограничений, кроме общих требований по безопасности обращения. ВВ II класса не должны выделять при взрыве токсичных газов больше допустимой нормы. Этот показатель регулируется кислородным балансом ВВ. Чем ближе баланс к нулевому, тем меньше в продуктах взрыва ядовитых газов.

Предохранительные ВВ разбиты на пять классов по степени предохранительности; чем выше класс, тем выше степень предохранительности. В других странах принято от трех до пяти классов, но принципы классификации примерно те же. В дополнение к семи основным классам выделен специальный класс, охватывающий ряд ВВ специального назначения. В нем имеется четыре группы.

Первая группа ВВ специального класса применяется для взрывных работ на земной поверхности: импульсная обработка металлов; инициирование скважинных и сосредоточенных зарядов; контурное взрывание для заоткоски уступов; разрушение мерзлых грунтов; взрывное дробление негабаритных кусков породы; сейсморазведочные работы в скважинах; создание заградительных полос при локализации лесных пожаров и другие специальные работы. Условия применения второй группы ВВ специального класса для взрывных работ следующие: в забоях подземных

выработок, не опасных по газу и пыли; при взрывании сульфидных руд; дроблении негабаритных кусков породы; контурном взрывании и других специальных работах. Третья группа ВВ специального класса применяется при прострелочно-взрывных работах в разведочных, нефтяных и газовых скважинах.

Четвертая группа ВВ специального класса предназначена для взрывных работ в серных, нефтяных и других шахтах, опасных по взрыву серной пыли, водорода и паров тяжелых углеводородов.

Степень опасности забоев по метану при взрывных работах устанавливается специальными инструкциями или другими нормативными документами, утвержденными в установленном порядке.

Перечень конкретных видов подземных выработок, в которых должны применяться ВВ соответствующих классов, устанавливается Едиными правилами безопасности при взрывных работах или другими нормативными документами, согласованными с Госгортехнадзором СССР и утвержденными в установленном порядке.

1.3. КРАТКАЯ ИСТОРИЯ РАЗВИТИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ВВ

Первым ВВ военного и гражданского назначения был черный (дымный) порох, представляющий собой смесь калиевой селитры, серы и древесного угля. В Европе он стал известен в XIII в., а в Китае, Индии и Византии еще раньше. Первое описание порохоподобных смесей для фейерверков даю китайским ученым Сунь-Сымяо в 682 г. М. Грек (XIII—XIV вв.) описал смеси на основе калиевой селитры, применявшиеся в Византии начиная с VII в. в качестве «греческого огня». В Европе, согласно летописям, первооткрывателем пороха следует признать англичанина, францисканского монаха Роджера Бекона (1242 г.). Спустя сто лет (1351 г.) рецепт черного пороха был воспроизведен Бертольдом Шварцем.

Начало применения пороха в горном деле, по разным источникам, относят к XVI—XVII вв. Еще в середине XVI в. в России с помощью пороха взрывали подводные скалы и камни для расчистки русел судоходных рек, а начиная с 1617 г. порох начали применять на взрывных («порохострельных») работах в рудниках. При этом порох в бумажных патронах заряжали в шпурсы диаметром от 1/8 до 2 дюймов и глубиной около 1 м, выбуравшие вручную. Для изоляции патронов покрывали смолой. Заряженные шпурсы забивали глиной, пороховой заряд поджигали с помощью выводной пороховой трубки. В Западной Европе первое применение пороха на взрывных работах относят к 1627 г. при проведении штольни на руднике в Словакии. Начиная с 1632 г. порох начали применять при взрывных работах в серебряных рудниках Швеции. К концу XVII в. взрывные работы с помощью пороха были широко распространены в горной промышленности многих стран.

В течение нескольких столетий, до середины XIX в., черный порох оставался единственным, практически применяемым ВВ, хотя начиная с последней четверти XVIII в. были открыты другие ВВ. В 70—80-х годах XVIII в. французские химики А. Лавуазье и К. Бертольд изобрели взрывчатую смесь на основе хлората калия (бертолетовой соли) и организовали ее производство. Но взрыв на заводе, где готовилось это ВВ, отодвинул на многие годы практическое использование хлоратных ВВ. В 1771 г. П. Вульфом был синтезирован тринитрофенол (пикриновая кислота), являющийся мощным бризантным ВВ. Но его взрывчатые свойства и способность к детонации стали известными лишь в 1873 г. благодаря исследованиям Г. Шпренгеля. В 1832 г. были получены

первые образцы нитроклетчатки (Браконо), а в 1846 г. запатентован способ получения пироксилина из хлопковой целлюлозы. Спустя 38 лет химик П. Вьель предложил способ изготовления из пироксилина бездымного пороха. В 1847 г. итальянцем А. Собrero был синтезирован нитроглицерин — мощное бризантное ВВ, сыгравшее большую роль в замене черного пороха на бризантные ВВ в горном деле. Это вещество сразу же вызвало большой интерес у химиков и специалистов взрывного дела, особенно в России. Уже в 1854 г. известный русский ученый академик Н. Н. Зинин с В. Ф. Петрушевским исследовал взрывчатые свойства нитроглицерина и вскоре предложил применять его взамен черного пороха для снаряжения мин и гранат. В 1863—1866 гг. под руководством В. Ф. Петрушевского выполнены практические опыты по подрыву мин, снаряженных чистым нитроглицерином и смесями на его основе, в целях разрушения металлических конструкций, подводных камней, мостов и других сооружений. Для этих опытов было изготовлено около 2,9 т нитроглицерина. Несмотря на то что нитроглицерин и его смеси в этих опытах поджигали с помощью пороховых запалов, дробящее действие взрыва было сильным и превосходило действие взрыва черного пороха. Особую известность приобрел динамит Петрушевского, состоящий из нитроглицерина и углекислого магния. Последний выполнял роль поглотителя жидкого нитроглицерина. Примерно к тем же годам относятся опыты по взрыванию жидкого нитроглицерина на золотых приисках Восточной Сибири, описанные в Горном журнале за 1868 г. Параллельно с работами русских ученых и инженеров широкие исследования по взрыванию нитроглицерина и его смесей, а также по разработке промышленной технологии получения нитроглицерина выполнены шведским инженером А. Нобелем, жившим вначале в России и знавшим об опытах Н. Н. Зинина и В. Ф. Петрушевского. В 1864 г. Нобель взял патент на применение нитроглицерина в качестве ВВ и построил в Швеции и Германии заводы по его производству. В 1867 г. А. Нобель изобрел гремучертутнотетриловый капсюль-детонатор.

После открытия явления детонации был синтезирован ряд новых бризантных и инициирующих ВВ, предложены взрывчатые смеси различного химического состава. В 1863 г. И. Вильбрандтом был получен тротил, в 1887 г. К. Мартенсом — тетрил, в 1894 г. — Толлсом и Виганом — тэн, в 1897 г. Ленце — гексоген, в 1890 г. Т. Курциусом — азид свинца. Эти ВВ с начала XX в. сами по себе или в составе взрывчатых смесей получили широкое применение в боеприпасах, средствах инициирования, на взрывных работах. В 1941 г. как побочный продукт в производстве гексогена Г. Райтом и В. Бахманом был обнаружен октоген — мощное термостойкое ВВ.

Первыми смесями бризантными ВВ, получившими широкое применение в горной промышленности, были динамиты. Вначале это был гурдинамит, состоявший из нитроглицерина и кизельгура в качестве поглотителя. В дальнейшем развитие получили физически более стабильные и мощные пластичные ВВ, или желатин-динамиты различного состава, запатентованные А. Нобелем в 60—70-х годах прошлого столетия. В них нитроглицерин связан нитроклетчаткой (коллоидным хлопком), с которой образует желатин. Простейшим по составу и в то же время наиболее мощным динамитом был гремучий студень, содержащий нитроглицерин и нитроклетчатку. Динамиты более сложного состава содержали помимо нитроглицеринового желатина смесь окислителя и горючего, например натриевой, калиевой или аммиачной селитры с древесной или злаковой мукой. При значительном содержании порошкообразных компонентов динамиты приобретают подпластичную структуру. Для понижения температуры замерзания в некоторые сорта динамитов (труднозамораживающие) вводят паряду с нитроглицерином другие жидкие нитроэфир, например нитрогликоли, образующие с нитроглицерином эвтектические смеси. Во многих странах мира (Швеция, Англия и др.) динамиты оставались основным типом промышленных ВВ вплоть до второй половины нынешнего века.

В России пластичные динамиты различных марок начали изготавливать на нескольких заводах, начиная со второй половины 70-х годов прошлого века.

В послереволюционный период и до 1932 г. промышленность выпускала динамиты четырех марок: 93, 88, 83 и 62 %-ные (проценты, указанные в индексе, отвечают содержанию в них нитроглицерина и других жидких нитроэфиров), позднее — только 62 %-ный динамит, как менее опасный в обращении. После Великой Отечественной войны в стране был возобновлен выпуск 62 %-ного труднозамерзающего динамита, содержащего смесь нитроглицерина с нитродигликолем. Однако уже к началу 60-х годов выпуск пластичных динамитов, вследствие повышенной опасности обращения с ними, был прекращен и продолжалось изготовление только порошкообразных составов, содержащих не более 15 % жидких нитроэфиров (детонитов, угленитов и др.).

Динамиты сыграли большую роль в развитии взрывного дела. Они превосходили черный порох по силе взрыва и концентрации энергии (теплота взрыва динамита составляла 7100—10700 МДж/м³), обладали высокими водоустойчивостью и пластичностью, были менее опасными в обращении, чем черный порох, очень чувствительный к лучу огня. Эти свойства делали динамиты особенно эффективными для широко распространенного в то время шпурового метода ведения взрывных работ с ручным заряданием шпуров патронами.

Однако динамиты весьма чувствительны к механическим воздействиям и поэтому опасны в обращении. Особенно опасны остатки патронов в стаканах шпуров при последующем обуривании забоев. Чувствительность динамитов к механическим воздействиям еще более возрастает в замерзшем и полуттаившем состоянии, вследствие чего динамиты требовали отапливаемых складов для хранения (температура замерзания нитроглицерина +12 °С). По экономическим показателям — стоимости и ресурсам по сырью (глицерину), технологическим затратам при изготовлении и другим показателям динамиты значительно уступают современным промышленным ВВ на основе аммиачной селитры. Наконец, динамиты как по уровню своей чувствительности, так и по характеру расфасовки (патроны диаметром 20—40 мм) мало пригодны для механизированного зарядания, хотя предпринимались попытки пневмозарядания шпуров динамитными патронами в Швеции.

По указанным причинам почти параллельно с развитием динамитов во многих странах велся поиск других, менее опасных и более дешевых смесевых бризантных ВВ.

В Англии Г. Шпренгель в 70-х годах прошлого века изучал смеси крепкой азотной кислоты с углеводородами. Аналогичные смеси на основе жидких окислителей под названием панкластитов предложены в 1878 г. французом Е. Тюрисном. Эти ВВ в небольших количествах применялись в боеприпасах и на взрывных работах, однако широкого развития не получали. Во второй половине нынешнего века они вновь привлекли внимание специалистов, появившись ряд новых патентов. В Советском Союзе в 50—60-х годах проводились шпуровые опыты по использованию смесей жидких углеводородов с четырехокисью азота и терранитрометаном для взрывного бурения. Одной из особенностей таких взрывчатых смесей является их малый критический диаметр, что позволяет выполнять последовательные взрывы сравнительно небольших масс такого рода жидких ВВ.

Наиболее широко применялись смеси на основе жидкого кислорода — оксидиквиты. Первые исследования смесей на основе обогащенного кислородом (60 %) жидкого воздуха выполнил в 1897 г. К. Линде (Германия). Он применял жидким окислителем патроны, состоявшие из смеси керосина с кизельгуром или сажи, сырой нефти и кизельгура. Первые опытные взрывы с применением таких оксидиквитных патронов выполнены при проведении Симплонского туннеля в 1899 г. Промышленное применение оксидиквитов начато после того, как была разработана технология получения жидкого кислорода достаточно высокой чистоты (выше 90 %). Начиная с 1918 г. оксидиквиты стали широко применять в качестве промышленных ВВ при добыче железной руды в Лотарингском бассейне (Франция), где были построены крупные установки по производству жидкого кислорода. В 30-х годах более половины объема взрывных работ в бассейне было выполнено с помощью оксидиквитов. На втором месте

по объему производства оксидиквитов стояли США, где начиная с 1926 г. и по 50-е годы эти ВВ применяли при вскрышных работах на угольных копях и на других работах. В угольной промышленности их доля от общего расхода ВВ составила около 8 %. В качестве поглотителя жидкого кислорода в большинстве сортов оксидиквитов применялись различные виды сажи и древесный уголь.

В СССР первые производственные опыты с оксидиквитами проведены в Криворожском бассейне в 1926 г., в значительных объемах оксидиквиты применяли при строительстве Днепростроя (1927—1933 гг.). В условиях Днепростроя оксидиквиты показали достаточно высокую эффективность. Интерес к оксидиквитам вновь возник в годы Великой Отечественной войны в связи с острой нехваткой ВВ заводского производства для нужд гражданской промышленности. В 1942 г. при Норильском горнорудном комбинате под руководством А. Д. Яхонтова, Ю. И. Зинюка и К. И. Иванова была создана крупная установка по производству оксидиквитов, которая действовала до 1956 г. В качестве поглотителя в оксидиквитных патронах использовался прессованный верховой торф местного происхождения. Оксидиквиты применялись на открытых разработках комбината. В военные годы оксидиквиты применялись также на открытых и подземных разработках Артемовского рудника на Дальнем Востоке. В разработку отечественных сортов оксидиквитов, технологию их получения и методов использования большой вклад внесли Ж. К. Граубин, В. А. Ассонов, Л. Н. Марченко.

Основным недостатком оксидиквитов является их малая «живучесть», вызванная испарением жидкого кислорода.

В ограниченных масштабах нашли применение хлоратные и перхлоратные ВВ. Хлораты применялись на калийных рудниках в Германии. Перхлоратные ВВ в довольно больших количествах в послевоенный период выпускались в Японии под названием карлитов. Как хлоратные, так и перхлоратные ВВ отличаются высокой чувствительностью к механическим воздействиям, особенно к трению, и по этой причине не получили развития в других странах.

Из взрывчатых смесей типа окислитель — горючее наиболее широкое применение получили ВВ на основе аммиачной селитры. Это объясняется прежде всего их экономичностью, широкой сырьевой базой, огромными масштабами производства аммиачной селитры, используемой в сельском хозяйстве в качестве минерального удобрения. Вторым существенным достоинством ВВ этого типа является их низкая чувствительность к механическим воздействиям, что снижает опасность в обращении с ними, облегчает организацию их массового производства как в заводских, так и в местных условиях, позволяет механизировать операции транспортирования и зарядания. Сдерживающими моментами для широкого применения этих ВВ долгое время являлись их неводоустойчивость, гигроскопичность, недостаточная физическая стабильность, низкая насыщенная плотность и некоторые другие эксплуатационные недостатки. По этим причинам в течение многих лет предпочтение отдавалось динамитам. Однако постепенно, в результате совершенствования рецептурного состава, а также благодаря развитию техники и технологии буровзрывных работ достоинства этих ВВ стали преобладать над их недостатками. Масштабы их применения возрастали, и к настоящему времени этот тип промышленных ВВ почти полностью вытеснил динамиты.

ВВ на основе аммиачной селитры предложены почти одновременно с динамитами. Первый патент на них принадлежал изобретателям И. Норбину и И. Ольсену и относится к 1867 г. Им же предложены взрывчатые смеси, состоящие из аммиачной селитры и древесного угля или горючих органических соединений, в том числе азотистых (типа нитросоединений). Уже в 1869 г. в небольших количествах ВВ этого типа под названиями аммиачный порох и аммонкрут изготовлялись в Германии.

В 70-х годах XIX в. в Англии и Швеции появились ряд патентов на ВВ на основе аммиачной селитры различного состава, в том числе с добавкой нитроглицерина в качестве сенсибилизатора. Однако первое их крупное производство было организовано во Франции, где П. Фавье в 1884 г. разработал ВВ, состо-

ящее из селитры и ди- или тринитроафталина. Составы, разработанные Фавье, в связи с их низкой температурой взрыва в первую очередь предназначались для угольных шахт. Они были первыми предохранительными ВВ, и, кроме Франции, производили их также в России. К этому же примерно времени относится организация во Франции и несколько позже в России производства предохранительных ВВ, состоявших из аммиачной селитры и нитроглицерина, под названием гризутингов, имевших температуру взрыва 1650—1900 °С.

В 1886 г. П. М. Чельцов проводил опыты по взрыванию состава под названием «громобой», содержавшего аммиачную селитру и пикрат аммония. Это был первый образец аммонита в России.

С открытием и началом производства тротила в начале XX в. во многих странах появились смеси селитры с тротилом под названием аммонитов — для взрывных работ и аммотолов — для снаряжения боеприпасов. Кроме тротила, некоторые сорта аммонитов содержали невзрывчатые органические горючие. Известны также составы аммонитов, содержавшие в качестве взрывчатого горючего ди- и тринитробензол, тринитроксилот, нитропроизводные нафталина и другие нитросоединения. Получили развитие и смеси, не содержавшие индивидуальных ВВ. В Австрии начиная с 1900 г. начали производить динамон, содержащий в качестве горючего красный древесный уголь. В 1899—1901 гг. немецкие ученые Р. Эскалес и Г. Каст изучали взрывчатые свойства смесей, содержавших металлический алюминий (аммовалов), что стало началом практического использования этих высокоэнергетических смесевых ВВ в гражданской и военной взрывной технике.

Уже в 1910 г. производство аммонитов в Германии достигло 30 тыс. т, а к 1920 г. аммониты составили около 7 % всего количества выпускаемых промышленных ВВ. ВВ на основе аммиачной селитры, преимущественно с добавкой нитроглицерина, стали основным видом предохранительных ВВ во всех угледобывающих странах вплоть до 60-х годов нашего столетия. В Англии в 30-х годах аммониты составляли около 1/5 от общего производства промышленных ВВ, причем значительная доля из этого количества относится к предохранительным ВВ. В США в 30-х годах начали выпускать смесь кристаллической аммиачной селитры с парафином, названную нитроаммоном.

Особенно быстрое и широкое развитие получили ВВ этого типа в нашей стране. Составы, не содержавшие нитроглицерина, начали применять на открытых горных работах и в шахтах не опасных по газу и пыли. Это были аммониты № 2 и № 3 одинакового состава, но различной технологической обработки. Они различались по взрывчатым характеристикам: аммонит № 2 с более высокой детонационной способностью и выделявший меньшее количество ядовитых газов при взрыве применялся преимущественно в патронированном виде на подземном горных работах, аммонит № 3 — только на открытых работах в непатронированном виде. В 1936 г. в угольных шахтах был допущен к применению предохранительный аммонит № 1, содержащий 10 % поваренной соли. В те же годы ассортимент промышленных ВВ был пополнен зернистым динамитами № 1, отличающимся высокой физической стабильностью и детонационной способностью (разработан С. И. Рудаковским). Это ВВ особенно широко применялось на рудниках Криворожья. В 1936 г. под руководством Б. Д. Росси был освоен выпуск динамона К, содержащего в качестве горючего муку сосновой коры. Динамоны сыграли большую роль в народном хозяйстве в годы Великой Отечественной войны, особенно в ее начале, когда почти все ресурсы тротила и нитроглицерина расходовались на нужды фронта. В эти годы Б. Д. Росси, Н. Е. Яременко, В. И. Красельщик (Союзвзрывпром), К. К. Андреев, Л. В. Дубнов (МХТИ им. Менделеева), В. А. Асонов, Л. Н. Марченко (ИГД АН СССР) разработали ряд рецептов динамонов на местном органическом сырье — торфе, жмыхе и т. п. (динамоны Т, Ж) и организовали их массовое производство. В числе разработанных составов были и предохранительные динамоны (марки Ж), содержавшие поваренную соль. Из-за недостаточно высокой детонационной способности и сильного пыления при зарядании россыпью выпуск динамонов в дальнейшем был прекращен.

В военные годы был начат выпуск новых марок предохранительных и не предохранительных аммонитов: III/1, № 8, АП-1, № 6 и № 7. Предохранительные аммониты содержали от 19,5 до 32 % поваренной соли определенного фракционного состава и характеризовались более высокой антигризутностью, чем выпускавшиеся до войны гризутины и аммонит № 1. Аммониты № 6 и № 7 в отличие от аммонита № 2 имели близкий к нулевому кислородный баланс (у аммонита № 2—9,1 %) и по этой причине характеризовались более высокой энергией взрыва и выделяли при взрыве меньше ядовитых газов. Так, теплота взрыва аммонита № 2 составляла 2940 кДж/кг, работоспособность по пробе Трауцля 300 см³, он выделял при взрыве 25 л на 1 кг ВВ высокоокислительных окислов азота. Для аммонитов № 6 и № 7 соответствующие показатели были следующими: теплота взрыва около 4200 кДж/кг, работоспособность 350—360 см³, содержание окислов азота в продуктах взрыва не более 7 л/кг. Организация промышленного выпуска этих ВВ явилась практическим завершением научных исследований в области промышленных ВВ, которые в предвоенные годы выполнялись в МакНИИ, МХТИ им. Менделеева и других организациях под руководством видных ученых К. К. Андреева, А. И. Гольбандера, А. И. Селезнева.

Большая работа по внедрению в горную промышленность ВВ на основе аммиачной селитры взамен динамитов в довоенные годы была проведена крупными специалистами взрывного дела В. А. Асоновым и Г. П. Демидюком. Уже в 1939 г. объем производства ВВ этого типа в стране составил около 80 % общего количества промышленных ВВ. В других странах коренной поворот в сторону этих безопасных и экономичных ВВ произошел лишь в послевоенные годы, главным образом в связи с развитием ВВ простейшего состава в виде смесей гранулированной аммиачной селитры с дизельным топливом (АН—ФО).

Большое значение для развития промышленных ВВ имели теоретические работы видных советских ученых Ю. Б. Харитона, А. Ф. Беляева, К. К. Андреева, А. Я. Алдина, В. К. Боболса по изучению механизма, критических условий возбуждения и распространения детонации смесевых ВВ типа окислитель — горючее.

Новый качественный скачок в развитии промышленных ВВ в нашей стране произошел в послевоенные годы. Он был связан с народнохозяйственными планами развития горнодобывающей и других отраслей промышленности и строительства, где используется энергия взрыва. Требовалось не только многократно увеличить объем производства промышленных ВВ, но и повысить их качество, создать широкий ассортимент, отвечающий различным условиям ведения взрывных работ, современной технике и технологии буровзрывных работ. К решению этих задач был привлечен широкий круг организаций и специалистов химического и горного профиля. Основные разработки новых промышленных ВВ выполнялись специализированными лабораториями, проведение испытаний и оценку эффективности выполняли ЦНИГРИ, НИГРИ, ИГД и другие научно-исследовательские институты промышленности, производственно-экспериментальное управление треста Союзвзрывпром; оценку безопасности применения — МакНИИ, ВостНИИ, КНИИМ. Окончательные рекомендации на новые ВВ принимались Междуведомственной комиссией по взрывному делу, в которой участвовали крупнейшие специалисты взрывного дела (Н. В. Мельников, В. А. Асонов, Э. О. Миндели, Г. П. Демидюк, М. Н. Косацев, М. М. Докучаев).

В сравнительно короткий срок, уже к концу 50-х годов, отечественный ассортимент промышленных ВВ был почти полностью обновлен и модернизирован. Одной из важных задач было придание порошкообразным составам водостойчивости. Исследование механизма замкания гидрофильных порошков показало, что эта задача может быть решена равномерным распределением небольшого количества высокогидрофобного вещества в массе аммонита, т. е. созданием προσταгентной гидрофобной решетки. Исследования также показали, что не обязательно покрывать каждую частицу гидрофильного вещества (аммиачной селитры) сплошной пленкой из водонепроницаемого материала. Этот прием оказался особенно эффективным для тонкодисперсных порошков,

сформованных в виде зарядов (патронов) с пористо-капиллярной структурой. Он был положен в основу оригинального способа получения водоустойчивой селитры (марки ЖВ), предложенного Н. М. Шестаковым и впервые реализованного на Березниковском азотно-туковом заводе в середине 50-х годов. По предложенному способу на стадии кристаллизации в селитру вводят железные соли жирных кислот совместно с парафином в количестве до 0,5%. Такое содержание жирного компонента не оказывает заметного флегматизирующего действия на аммонит и, напротив, стабилизирует его, снижая склонность к слеживанию. Патронированные аммониты, изготовленные на этой селитре (также получившие индекс ЖВ), сохраняют свои взрывчатые свойства после пребывания в воде в течение 1 ч на глубине 1 м, так как вода крайне медленно проникает в глубь патрона по порам, стенки которых имеют гидрофобные включения. Промышленный выпуск водоустойчивой селитры позволил создать широкий ассортимент водоустойчивых аммонитов и других ВВ на основе аммиачной селитры различного химического состава и назначения, включая непригодные для хранения аммониты № 6ЖВ и № 7ЖВ, водоустойчивые аммониты, мощные скальные аммониты и аммоналы, содержащие гексоген, мощные порошкообразные нитроэфирсодержащие ВВ — детониты, предохранительные аммониты ПЖВ-20, АП-5ЖВ, Т-19, углениты и др. Лучшие из них сохранились в ныне действующем ассортименте промышленных ВВ.

За высокие эксплуатационные характеристики советские водоустойчивые аммониты, аммоналы и порошкообразные нитроглицериновые ВВ были награждены дипломом 1-й степени на международной выставке «Химия-70». Эти работы выполнены под руководством Б. Я. Светлова, З. Г. Позднякова, Н. С. Бахаревич, Л. В. Дубнова.

Для открытых горных работ в сухих забоях предназначались более дешевые, с уменьшенным содержанием тротила аммониты № 9 и № 10, в которых в качестве основного горючего компонента вводилась древесная мука. Эти аммониты отличались более низкой детонационной способностью, чем аммониты № 6ЖВ и № 7ЖВ, и по этой причине применялись только на земной поверхности для заряжания скважин. Впоследствии были заменены гранулированными ВВ.

Для подземных горных работ некоторое время выпускались в патронах диаметром 60—120 мм динамоны АМ-8 и АМ-10, содержавшие в качестве горючих минеральное масло и алюминиевую пудру. Предназначались они для заряжания скважин и благодаря содержанию алюминия характеризовались сравнительно высокими величинами теплоты взрыва (5000—5500 кДж/кг). Их выпуск был прекращен после внедрения алюмосодержащих гранулитов марки АС, которые заряжались россыпью с помощью пневмозарядчиков.

Водоустойчивые аммониты, аммоналы и детониты сыграли большую роль в послевоенном развитии горнодобывающей промышленности. Однако для обеспечения механизированного заряжания, транспортирования и складирования промышленных ВВ требовалось придать им новые качества. Тонкодисперсные аммониты из-за пыления, недостаточной сыпучести, относительно высокой чувствительности к механическим воздействиям для этих целей мало пригодны. Новым требованиям в наибольшей мере отвечали гранулированные и тесучие ВВ. Кроме того, для заряжания обводненных скважин большого диаметра водоустойчивые порошкообразные аммониты не годились — смешиваясь с водой, они теряли свои взрывчатые свойства; они также недостаточно потоняемы. В 50-х годах для заряжания обводненных скважин был организован выпуск шнекованных зарядов из водоустойчивого аммонита В-3. Это ВВ содержало в качестве гидрофобных и пластифицирующих добавок асфальтит и парафин. Заряды имели плотность 1,25 г/см³. В дальнейшем они были заменены на более удобные в обращении и пригодные для механизированного заряжания гранулированные водоустойчивые ВВ.

Непредохранительные аммониты и другие порошкообразные промышленные ВВ в настоящее время предназначаются главным образом для изготовления патронов-боевиков для возбуждения детонации в гранулированных и водо-

содержащих ВВ, недостаточно чувствительных к первичным средствам инициирования, особенно на подземных горных работах, где тротильные и другие шашки-детонаторы не допущены к применению по причине образования при взрыве большого количества ядовитых газов. Аммониты, аммоналы и детониты применяются также на некоторых специальных видах работ, например, в тех случаях, когда требуются ВВ высокой детонационной способности в патронах малого диаметра: для оконтуривающего взрывания, для вторичного дробления негабаритов, для изготовления шланговых зарядов или на других работах, где невозможно или невыгодно механизированное заряжание (корчевка пней, ликвидация ледяных затворов, геологоразведочные работы и др.).

На смену аммонитам были разработаны гранулированные и водосодержащие ВВ, которые широко применялись в горнодобывающей промышленности. Их главное достоинство — пригодность к механизированным способам заряжания. К недостаткам относится пониженная детонационная способность (большой критический диаметр, для некоторых составов превышающий 100 мм, невосприимчивость к первичным средствам инициирования), которая, однако, становится не столь значимой в связи с увеличением диаметра скважин на земной поверхности и плотной укладкой ВВ в зарядные емкости (шпур, скважина) при беспатронном заряжении с помощью пневмозарядчиков в подземных выработках. Плотное прилегание ВВ к стенкам шпура (скважин) уменьшает критический диаметр заряда.

Было установлено, что дробящая способность ВВ, во всяком случае для метода скважинных зарядов рыхления и отбойки горной породы с относительно большими значениями ЛНС, в большей мере определяется общей энергией взрыва, чем кинематическими параметрами и давлением в детонационной волне. Этот вывод в значительной степени обосновали теоретические и экспериментальными исследованиями А. Ф. Беляев, Г. П. Демидюк, Л. И. Барон и С. П. Левчик, А. Е. Азаркович, А. П. Тихомиров, В. К. Рубцов. Кроме того, гранулированные ВВ отличаются не низкими параметрами детонации, как таковыми, а большим интервалом между минимальным и максимальным их значениями, отвечающими критическому $d_{кр}$ и предельному $d_{пр}$ диаметрам заряда. Так, например, игданит (смесь гранулированной селитры с дизельным топливом) в бумажных патронах диаметром 150 мм детонирует со скоростью 1,54 км/с, а в скважинах того же диаметра, выбуренных в крепких известняках, — со скоростью 3,76 км/с. При идеальном режиме детонации, отвечающем $d_{пр}$, скорость детонации для гранулированных ВВ пропорциональна \sqrt{Q} , где Q — удельная теплота взрыва, как и для других ВВ. Различие в режимах детонации состоит в том, что сам $d_{пр}$ для гранулированных ВВ на порядок больше, чем для порошкообразных аммонитов, и, соответственно, длиннее зона химической реакции в детонационной волне, а профиль давления в ней более пологий.

Развитие гранулированных ВВ шло одновременно по нескольким направлениям. В США, Канаде, странах Западной Европы, Японии преимущественное развитие получили гранулированные ВВ простейшего состава, состоящие из гранулированной селитры и дизельного топлива или другого низковязкого минерального горючего (АН—ФО). Такие составы благодаря простоте рецептуры и технологии смешивания, а также низкой чувствительности к механическим воздействиям можно изготовлять как на специализированных заводах, так и на горных предприятиях (стационарных установках или в передвижных смешительно-зарядных агрегатах). При этом для заводского изготовления простейших ВВ, подлежащих хранению и транспортированию, применяют пористую селитру с повышенной пыляемостью по отношению к минеральному маслу. Так, гранулированная селитра, выпускаемая фирмой «Асахи» (Япония), имеет пыляющую способность 16—17%. Обычные же сельскохозяйственные сорта селитры удерживают не более 4—8% низковязкого горючего. Смеси на пористой селитре характеризуются более высокой детонационной способностью, меньшим критическим диаметром.

В СССР гранулированные ВВ простейшего состава (игданиты) разраба-

тивались и исследовались под руководством академика Н. В. Мельникова и проф. Г. П. Демидюка в ИГД АН СССР. Первые промышленные испытания игданита проведены в 1958 г. Игданит изготавливают на многих горных предприятиях страны с использованием механизированных стационарных установок и самоходных смесительно-зарядных машин. Производство игданита составляет незначительный процент общего количества всех изготавливаемых в стране перепредохранительных промышленных ВВ.

Несколько позже был организован промышленный выпуск бестротилового гранулированного ВВ заводского изготовления, названных гранулитом, разработанных под руководством З. Г. Позднякова. Простейший из них — гранулит М, по химическому составу является аналогом игданита, но вместо дизельного топлива содержит более вязкое соляровое масло и изготавливается на пористой гранулированной селитре. Гранулиты более сложного состава помимо жидкого горючего (солярового, индустриального масла) содержат твердые дисперсные горючие, вводимые в состав ВВ либо как припудривающие добавки (древесная мука), препятствующие стеканию масла с поверхности частиц пористой селитры, либо в качестве высокоэнергетической добавки (алюминиевая пудра). Гранулиты, содержащие алюминий, имеют индекс АС. По энергетическим характеристикам гранулиты марки АС превосходят неметаллизированные ВВ простейшего состава на 17—35% (теплота взрыва гранулит М и гранулит АС-8 соответственно 3860 и 5250 кДж/кг).

Для придания гранулитам водоустойчивых свойств в их состав вместо жидкого горючего вводят легкоплавкие гидрофобные воски и парафины (методом смешивания гранул селитры с расплавленным углеводородом). В индекс соответствующих водоустойчивых гранулитов добавляют букву «В», например, гранулит АС-4В.

Одним из достоинств взрывчатых смесей типа АН—ФО, игданита, гранулитов, содержащих жидкую фазу или пластичные легкоплавкие горючие, является их способность уплотняться в шпурах и скважинах при пневмозарядке. При этом плотность заряда достигает 1,15 г/см³, в то время как для патронированных ВВ плотность зарядки (немеханизированного) не превышает 0,9 г/см³. Благодаря этому свойству по объемной концентрации энергии взрыва в зарядной камере гранулированные ВВ данного типа приближаются к наиболее мощным аммоналам (детонитам) и показывают высокую эффективность.

Параллельно с гранулированными ВВ, не содержащими нитросоединений, в СССР развивались тротилосодержащие гранулированные ВВ, более стойкие к воде, чем ВВ простейшего состава.

Первыми советскими высоководоустойчивыми гранулированными ВВ были гранулотол (гранулированный тротил) и алюмотол (гранулированная смесь тротила с алюминиевым порошком), технология изготовления которых разработана совместно работниками науки и промышленности. Их производство освоено в 50-х годах.

Детальное исследование свойств и параметров взрыва этих ВВ в водной среде с определением оптимальных размеров гранул и содержания алюминия в составе алюмотола выполнено Б. Я. Светловым, Р. Н. Солнцевой. В частности, установлено, что эти ВВ, обладающие резко отрицательным кислородным балансом, при взрыве в воде выделяют на 15—18% больше тепла, чем при взрыве в воздухе, что согласуется с результатами термохимических исследований водосодержащих ВВ, выполненных А. Я. Апиним, Ю. А. Лебедевым и В. И. Пепекиным.

Вследствие исключительно малой растворимости тротила в воде гранулотол можно считать неограниченно водоустойчивым ВВ. Алюмотол обладает несколько меньшей стабильностью, так как алюминий способен взаимодействовать с водой, но в капсулированном состоянии его реакционная способность невелика и алюмотол способен длительное время пребывать под водой без разложения (за исключением сред с высокой щелочностью). Аналогичные гранулотолу и алюмотолу ВВ вскоре стали изготавливать и применять в других странах — телетол и алюмотол в США, гранатолы в Болгарии и др.

Еще большим тепловым эффектом, чем при взрывания в воде, гранулотол и алюмотол дают при взрывании в растворе аммиачной селитры. Это объясняется повышением плотности окружающей заряд жидкой среды, а также тем, что растворенный в воде окислитель способен вступать в экзотермическую реакцию с горючими продуктами взрывчатого превращения тротила. Данные исследования послужили основанием для изготовления механических смесей гранулированной селитры с гранулированным или чешуйчатым тротилом, названных первоначально зерногранулитом, а затем переименованных в граммониты. При погружении таких ВВ в воду селитра полностью или частично, в зависимости от количества воды в скважине, переходит в раствор. Смеси с низким содержанием тротила (граммонит 79/21) могут эффективно применяться только в слабо обводненных скважинах, смеси с более высоким его содержанием — в сильно обводненных, но не в скважинах с проточной водой.

Начиная с 60-х годов граммониты стали одним из основных видов промышленных ВВ для открытых работ, а граммонит 79/21, имеющий нулевой кислородный баланс, применяется также на подземных работах для зарядки минных камер и нисходящих скважин. Дальнейшее совершенствование ВВ данного типа привело к созданию высокоустойчивых гранулированных ВВ — гранулотол с малопористой структурой гранул, из которых селитра вымывается очень медленно.

Другим современным типом промышленных ВВ являются текучие водосодержащие суспензионные ВВ. Это — взрывчатые смеси, состоящие из гранулированной аммиачной селитры, тротила и алюминия, пластифицированные водным гелем. Имеются сорта, не содержащие алюминия или не содержащие тротила. В последнем случае для обеспечения надежной детонации в них вводят пузырьки воздуха или других газов, а в качестве структурирующей (гелеобразующей) добавки — природные или синтетические полимерные вещества и смолы, набухающие в воде. Образующиеся структуры не только придают составам пластические свойства, но также предотвращают проникновение жидкой воды в глубь состава при его погружении в воду.

Плотность водосодержащих ВВ 1,3—1,5 г/см³; по этому показателю они приближаются к динамитам, но менее чувствительны к механическим воздействиям. Реологические свойства водосодержащих ВВ зависят от содержания в них загустителя. При малом содержании загустителя водосодержащие ВВ подвижны и могут перекачиваться с помощью насосов. Этот тип ВВ получил широкое развитие в США и Канаде в результате исследований М. Кука [37]. Водосодержащие ВВ составляют около 10% от общего количества промышленных ВВ, расходуемых в США и Канаде.

В СССР исследования и разработка этих ВВ была начата в 60-х годах. Параллельно разрабатывались несколько типов водосодержащих ВВ с различными реологическими свойствами.

К водосодержащим ВВ заводского изготовления относятся гранулированные составы, содержащие загуститель, пластифицируемые водой в процессе пневмозарядки (акванит АРЗ).

Для приготовления ВВ непосредственно на горных предприятиях Институтом физики Земли АН СССР под руководством Г. П. Демидюка предложены водосодержащие ВВ под названием ифзаниты, которые готовятся смешиванием насыщенного раствора аммиачной селитры, содержащего загуститель, с порошкообразными компонентами (тротилом, гранулированной селитрой). Ленинградским горным институтом под руководством проф. А. Н. Ханукаева разработана технология получения «горячельющихся» акватолов, которые заливается в скважины в горячем состоянии [62]. При остывании часть селитры в них кристаллизуется. По аналогичной технологии готовят водосодержащие ВВ — карботолы, разработанные Н. А. Анаксимом с сотрудниками, содержащие низкоплавкую эвтектическую смесь аммиачной селитры с карбамидом. Ифзаниты, акватолы и карботолы изготавливаются и применяются на Соколовско-Сарбайском, Норильском, Михайловском, Ждановском и других горных комбинатах.

В СССР и в других странах гранулированные и водосодержащие ВВ становятся основными типами непередохранительных промышленных ВВ.

В заключение рассмотрим кратко историю развития предохранительных ВВ.

Как указывалось выше, первые предохранительные ВВ ограничивались по температуре взрыва, что вытекало из тепловой теории антигризуности, родоначальниками которой в 80-х годах прошлого столетия были французские ученые Малляр и Ле-Шателье. Этим требованиям отвечали аммиачно-селитренные смеси, причем во многие составы для снижения температуры взрыва вводили невзрывчатые соли, а для сохранения высокой детонационной способности нитроглицерин.

В 40-50-х годах работами советских и зарубежных исследователей: К. К. Андреева, А. И. Гольбиндера, Л. В. Дубцова, Е. Одибера выявлено и ингибирующее (тормозящее) действие солей щелочных металлов и некоторых других соединений на реакцию взрывного окисления метана и других природных горючих газов. Эти исследования привели к выводу, что соли-пламегасители, вводимые в состав предохранительных ВВ, предотвращают воспламенение метано-воздушной смеси не только вследствие охлаждения продуктов взрыва, но и в результате своего ингибирующего действия. Отсюда следовал второй вывод о возможности повышения энергетических характеристик предохранительных ВВ или степени их предохранительности путем подбора солей-пламегасителей с наибольшей ингибирующей способностью, определяемой их химической природой и величиной удельной поверхности. На этой теоретической основе создавались послевоенные предохранительные ВВ (аммониты, углениты, побелиты и др.), разработанные Н. С. Бахаревич, В. С. Васильевой, В. Ф. Старокожевым с сотрудниками. В дальнейшем теоретические и прикладные исследования в данной области были продолжены в работах В. Е. Александрова, Б. И. Вайнштейна, А. П. Глазковой, В. И. Зенца, Б. П. Кукиба.

Наряду с классическим типом предохранительных ВВ, о которых сказано выше, в 30—50-х годах в Западной Европе и Японии широко применялись патроны в предохранительных оболочках. Основная масса солей-пламегасителей выносилась на периферию заряда в виде оболочки. Тем самым достигалась высокая степень антигризуности патронов и вместе с тем сохранялась необходимая детонационная способность, так как внутренняя часть патрона (ядро) не была перегружена невзрывчатыми солями. Применялись оболочки нескольких типов: активная, состоящая из бикарбоната натрия, поваренной соли и нитроглицерина (Германия, Чехословакия), трубчатая, твердая или сыпучая — из солей-пламегасителей (Бельгия, Великобритания), пастообразная (Япония).

В МакНИИ под руководством Ф. М. Галаджия в 60-х годах созданы патроны в двухстенных полиэтиленовых оболочках, заполняемых раствором аммиачной селитры. Во внутреннюю часть патронов помещалось стандартное предохранительное ВВ, например аммонит ПЖВ-20 (патроны ПВП-1-У) или угленит Э-6 (патроны СП-1). Такие патроны характеризовались высокой предохранительностью, малой горючестью и вместе с тем достаточной эффективностью. Производились в СССР в течение ряда лет. Созданию этих патронов предшествовали широкие исследования явления выгорания (дефлаграции) ВВ в производственных условиях, выполненные МакНИИ, ВостНИИ и другими организациями в связи с участвовавшими случаями аварий в угольных шахтах по этой причине. Они совпали с внедрением короткозамедленного взрывания, что побудило искать между ними причинную связь. Были развернуты и широкие теоретические исследования этого вопроса. Исследования Ф. М. Галаджия и И. И. Попова, К. К. Андреева и В. Г. Хотина, Л. В. Дубцова и А. И. Романова, Ф. М. Гельфанда с сотрудниками показали, что главной причиной выгорания является потеря детонационной способности заряда и что в этом случае в замкнутой зарядной камере (шпуре, скважине) при детонационном импульсе возникает горение ВВ. При групповом одновременном взрывании под действием волн сжатия, возникающих от предшествующих взрывов, ВВ в шпурах сильно уплотняется и теряет свою детонационную способность. По той же

причине нарушается сплошность заряда, что также приводит к срыву нормальной детонации. Таким образом, создаются благоприятные условия для выгорания.

Среди рекомендованных мер, направленных на устранение этого опасного явления как источника подземных газовых взрывов и пожаров, помимо горнотехнических мер (устраивания минимально допустимого расстояния между шпурами, тщательной очистки шпуров и др.) реализован ряд мер, связанных с улучшением свойств ВВ. Они сводились к повышению детонационной способности ВВ в уплотненном состоянии, снижению их способности к горению, повышению сопротивляемости динамическим нагрузкам. Реализация этих предложений выразилась, в частности, в создании предохранительного аммонита Т-19 повышенной детонационной способности и повышения качества других предохранительных аммонитов, разработке ряда конструкций сплошных (однопатронных) зарядов, создания невыгорающих патронов в водонаполненных полиэтиленовых оболочках. Кроме того, в методику испытаний введена новая проба на сохранность детонационной способности предохранительных ВВ при динамическом обжатии, моделирующая условия одновременного взрывания двух зарядов, — испытание в углецементном блоке.

В последние 10—20 лет во многих угледобывающих странах стали широко применять высокопредохранительные, так называемые селективно-детонирующие ВВ (углениты, импорт. бельгийский шарбрит, немецкие веттер-секюрит и веттер-карбонит, английские юниджекс и дайнаджекс, чешский гармонит и др.). В состав этих ВВ входят неодинаковые по химической активности компоненты, например нитроглицерин (10—15%) и смесь хлористого аммония с нитратом натрия. При взрывании в шпуре с забойкой, т. е. в условиях замкнутой камеры, взрывчатое превращение претерпевает весь состав ВВ. При этом выделяется вся потенциальная энергия ВВ. При взрывании полностью или частично открытого заряда детонация проходит только по нитроглицерину, а остальные компоненты разбрасываются как инертные вещества. При этом выделяется не больше $\frac{1}{3}$ от потенциальной энергии ВВ, и такой взрыв не опасен. Дополнительное преимущество таких ВВ состоит в том, что при взрыве в результате реакции между твердыми компонентами, например хлористым аммонием и натриевой селитрой (ионообменная пара солей), выделяется ультрадисперсный хлористый натрий, в таком состоянии обладающий очень сильным ингибирующим (пламегасящим) действием. Принцип селективной детонации используется и в новейших разработках высокопредохранительных ВВ.

2. ТЕРМОДИНАМИКА ВЗРЫВА

Взрыв можно уподобить своеобразной тепловой машине, в которой потенциальная химическая энергия преобразуется в тепловую, а затем в механическую работу, которую совершают в окружающей среде (горной породе и др.) нагретые и сжатые продукты взрыва (ПВ) в процессе своего расширения.

Теплота взрывчатого превращения, сокращенно называемая теплотой взрыва, является одной из главных характеристик взрывчатого вещества. Она характеризует ВВ как источник энергии, определяет его работоспособность и параметры детонации.

2.1. ТЕПЛОТА ВЗРЫВА, СОСТАВ ПРОДУКТОВ ВЗРЫВА

Для расчета теплового эффекта взрыва обычно пользуются законом Гесса, основанным на первом начале термодинамики, согласно которому изменение внутренней энергии или теплосодержания (энтальпии) изолированной системы является однозначной функцией параметров состояния системы. По этому закону суммарный тепловой эффект некоторой последовательности химических реакций не зависит от пути превращения исходных веществ в конечные продукты, а определяется только начальным и конечным состоянием системы. Общий тепловой эффект равен алгебраической сумме тепловых эффектов промежуточных реакций.

Применительно к явлению взрыва можно принять, что само взрывчатое вещество является некоторым промежуточным продуктом реакции между химическими элементами, входящими в его состав, а конечным состоянием системы являются более термодинамически устойчивые продукты разложения ВВ. Тогда по закону Гесса теплота взрыва $Q_{\text{взр}}$ должна составлять разницу между теплотой образования ПВ $\sum q_{\text{ПВ}}$ и теплотой образования ВВ $q_{\text{ВВ}}$, т. е.

$$\left. \begin{aligned} Q_{\text{взр}} &= \sum q_{\text{ПВ}} - q_{\text{ВВ}}, \\ \text{или } Q_{\text{взр}} &= -\sum \Delta H_{f, \text{ПВ}}^{\circ} + \Delta H_{f, \text{ВВ}}^{\circ} \end{aligned} \right\} \quad (2.1)$$

Величиной, адекватной теплоте образования, является термодинамическая функция — энтальпия образования ΔH_f° , имеющая обратный знак.

Так как взрыв происходит практически при неизменном объеме вещества, то теплоту взрыва следует рассчитывать при постоянном объеме (Q_v), для чего нужно знать и теплоты образования при постоянном объеме. Если справочные данные по тепло-

там (энтальпиям) образования относятся к постоянному давлению Q_p , то пользуются выражением

$$Q_v = Q_p + A p (v_2 - v_1),$$

где второй член его правой части представляет собой работу, совершаемую ПВ при их расширении; A — механический эквивалент тепла; p — конечное давление ПВ; v_1 и v_2 — соответственно начальный и конечный удельные объемы газов.

При расширении ПВ до атмосферного давления и температуры $+18^{\circ}\text{C}$, пренебрегая величиной v_1 ввиду ее малости, получим численное значение поправки, равное $2,43 n$, где n — число молей газообразных ПВ, образующихся при взрыве 1 кг или другой единицы массы ВВ.

При расчетах необходимо также указать, в каком агрегатном состоянии находится вода в ПВ — в парообразном или жидком, подставляя соответствующие значения теплот образования в уравнение (2.1). Разница между получаемыми значениями теплот взрыва равна теплоте конденсации водяных паров, содержащихся в ПВ, т. е. $4,17 n_{\text{H}_2\text{O}}$, где $n_{\text{H}_2\text{O}}$ — число молей H_2O . Следует заметить, что при экспериментальном определении теплоты взрыва (см. раздел 9) обычно измеряют теплоту при воде жидкой, так как тепловой эффект в тех или иных калориметрических установках фиксируют при полном охлаждении ПВ, т. е. в условиях конденсации водяных паров.

Теплоты взрыва обычно вычисляют в расчете на 1 кг ВВ, что удобно для последующих расчетов других параметров взрыва. Для индивидуальных ВВ часто приводят значения теплот взрыва, отнесенных к одному грамм-молю. Теплоты (энтальпии) образования индивидуальных ВВ, компонентов смесевых ВВ и продуктов их разложения, как правило, известны и помещены в соответствующих термодинамических справочниках. В табл. 2.1 приведены их значения для наиболее обиходных веществ. При необходимости они могут быть также рассчитаны по соответствующим методикам [8]. Для этого достаточно знать химическую формулу ВВ и теплоты продуктов его полного сгорания.

Главная сложность расчетов по выражению (2.1) связана с определением истинного состава ПВ к моменту завершения процесса их расширения или любой другой стадии, при которой определяется тепловой эффект взрыва.

Дело в том, что конечный состав ПВ не идентичен начальному. Это очевидно для смесевых ВВ, у которых продукты распада компонентов вступают во взаимодействие (вторичные реакции) в газовой фазе. Но это справедливо и для индивидуальных ВВ, так как продукты их разложения способны вступать в обратимые (равновесные) реакции друг с другом, а равновесное их состояние определяется параметрами состояния газов: при малых

Таблица 2.1

Вещество	Химическая формула	Теплота образования		
		При постоянном давлении, кДж/моль	При постоянном объеме	
			кДж/моль	кДж/кг
Тротил	$C_7H_5N_5O_6$	59,4 (74,8)	42,3	186,7
Динитронафталин	$C_{10}H_6N_2O_4$	-15,2	-29,8	-138
Гексоген	$C_3H_7N_6O_6$	-71,6 (-62)	-93,3	-420,3
Тэн	$C_5H_8N_4O_{12}$	531,6 (525,6)	402,3	1 588,6
Октоген	$C_4H_8N_8O_8$	-46 (-48,3)	—	—
Нитроглицерин	$C_3H_5N_3O_9$	365,0 (374)	344,5	1 516,6
Нитроглицоль	$C_2H_4N_2O_6$	244,0	229,4	1 508,6
Нитродиглицоль	$C_4H_8N_2O_7$	428,2	407,7	2 078,3
Азотнокислый аммоний	NH_4NO_3	365,7	354,8	4 433,0
Азотнокислый натрий	$NaNO_3$	467,6	462,8	5 444,7
Азотнокислый калий	KNO_3	494,4	489,5	4 841,5
Азотнокислый кальций	$Ca(NO_3)_2$	937,8	928,0	5 655,3
Перхлорат аммония	NH_4ClO_4	293,8	281,7	2 397,7
Перхлорат калия	$KClO_4$	437,4	431,1	3 119,1
Коллоидный хлопок (12,2 % азота)	$C_6H_7N_3O_{12}$	2762,8	2700,0	10 310,1
Целлюлоза	—	964,0	946,0	5 835,3
Парафин	$C_{19}H_{40}-C_{33}H_{72}$	—	—	2 197,6
Хлористый аммоний	NH_4Cl	313,7	306,4	5 726,4
Минеральные масла	—	—	—	2009-2176
Стеариновая кислота	$C_{17}H_{35}COOH$	933,5	888,2	3 131,1
Оксид углерода	CO	112,5	113,7	4 060,4
Двуокись углерода	CO_2	395,6	395,6	8 987,3
Вода (пар)	$H_2O_{п}$	241,9	240,6	13 354,6
Вода (жидкость)	$H_2O_{ж}$	286,2	282,5	15 717,6
Оксид азота	NO	-90,4	-90,4	-3014,0
Оксид алюминия	Al_2O_3	1670,2	1666,4	16 346,3
Углекислый натрий	Na_2CO_3	1129,7	1126,1	10 624,1
Хлористый натрий	$NaCl$	411,6	410,4	7 019,9
Хлористый калий	KCl	436,8	435,6	5 843,6
Двуокись азота	NO_2	-33,0	-33,0	-717,4

Примечание. В скобках указаны величины, приведенные в работе [21].

давлениях (примерно до 100 МПа) — температурой, а при больших давлениях — также давлением.

Так как при расширении ПВ меняются параметры их состояния, и соответственно меняется их равновесный химический состав, то каждому текущему («замороженному») состоянию отвечает свой тепловой эффект. Отличия по крайним значениям теплот взрыва могут быть большими или меньшими в зависимости от химического состава ВВ. Они меньше для ВВ, в которых кислорода достаточно для полного окисления горючих элементов до

их высших окислов (ВВ с нулевым или положительным кислородным балансом), и больше для ВВ с недостатком кислорода (ВВ с отрицательным кислородным балансом).

При свободном расширении ПВ, не ограниченном по времени, их конечный состав должен отвечать наиболее устойчивому состоянию — максимуму энтропии. Этому состоянию отвечает и максимальное тепловыделение.

Из сказанного следует, что реальная теплота взрыва, которая может быть экспериментально определена, рассчитана или реализована, есть величина непостоянная. Она зависит от того, при какой степени расширения газов будут выполнены измерения или расчет. Поэтому при расчетах теплоты взрыва необходимо задаваться некоторым конечным состоянием ПВ, отвечающим моменту завершения отбора тепловой энергии от ПВ. Такому условию может, например, отвечать давление в ПВ, равное давлению среды, в которой произведен взрыв, т. е. моменту полного торможения расширяющихся ПВ.

В многообразии возможных значений $Q_{взр}$ обычно выбирают два значения, отвечающих двум характерным точкам состояний ПВ: в начальный момент взрыва, т. е. в самой детонационной волне после завершения разложения ВВ (в точке Чепмена—Жуге) и при расширении газов до давления окружающей среды (воздушной, горной, водной). Соответствующие теплоты А. Я. Апин и Ю. А. Лебедев условно назвали «детонационной» и «фугасной» теплотами взрыва. Однако и эти величины нельзя рассматривать как некоторые константы ВВ, зависящие только от их химического состава. Детонационная теплота может меняться от давления в детонационной волне, которое в сильной степени зависит от плотности ВВ, а фугасная теплота — от давления внешней среды и газодинамических условий процесса расширения ПВ.

Наиболее определенной термодинамической величиной является Q_{max} , отвечающая максимальному тепловому эффекту, возможному при взрыве данного ВВ, и наибольшему значению энтропии S системы. Q_{max} достигается в том случае, когда образуются высшие окислы горючих элементов, содержащихся в ВВ.

Q_{max} является константой ВВ, так как она определяется только химическим составом ВВ и не зависит от начальных и конечных параметров состояния ПВ.

Абсолютное значение Q_{max} будет тем выше, чем ниже теплота образования ВВ, что вытекает непосредственно из уравнения (2.1), и зависит от обеспеченности состава ВВ кислородом и теплотворной способности горючих элементов, содержащихся в ВВ.

Обеспеченность состава кислородом характеризуют кислородным балансом ВВ (КБ) или кислородным коэффициентом α_k , которые в относительных величинах выражают избыток или недостаток кислорода для полного окисления горючих элементов до их высших окислов.

Если ВВ содержит углерод, водород, азот и кислород и описывается формулой $C_aH_bN_cO_d$, то высшими окислами являются CO_2 и H_2O , а кислородный баланс можно записать в виде

$$КБ = \frac{\left[d - \left(2a + \frac{b}{2} \right) \right] 16}{12a + b + 14c + 16d} 100, \quad (2.2)$$

где a , b , c и d — число атомов соответственно углерода, водорода, азота и кислорода; 12, 14 и 16 — атомные массы соответственно углерода, азота и кислорода. Знаменатель дроби в уравнении (2.2) определяет молекулярную массу ВВ. Кислородный коэффициент

$$\alpha_k = d / (2a + b/2). \quad (2.3)$$

Сбалансированности химического состава ВВ по кислороду отвечают $КБ=0$ и $\alpha_k=1$.

Расчет кислородного баланса и коэффициента α_k смесевых ВВ ведут следующим образом. Вычисляют количество каждого из химических элементов, содержащегося в 1 кг смеси, и выражают его в грамм-атомах. Затем составляют условную элементную формулу для 1 кг смесевых ВВ, аналогичную по виду химической формуле для индивидуального ВВ, и далее ведут расчет, как это было показано выше. Если в смесевом ВВ содержится алюминий, то уравнения для $КБ$ и α_k имеют следующий вид:

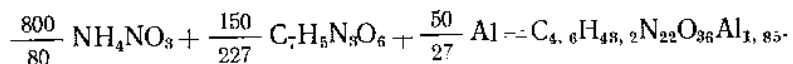
$$КБ = \frac{[d - (2a + b/2 + 3/2e)] 16}{1000} 100;$$

$$\alpha_k = d / (2a + b/2 + 3/2e),$$

где e — количество грамм-атомов алюминия.

В качестве примера приведем расчет $КБ$ аммонала, состоящего из аммиачной селитры (молекулярная масса $M=80$), тротила ($M=227$) и алюминия.

Рассчитываем элементный состав 1 кг ВВ указанной рецептуры и выписываем его условную химическую формулу

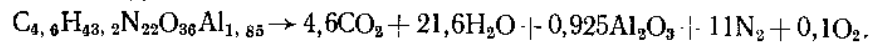


По формуле (2.2) получим

$$КБ = \frac{\left[36 - \left(2 \cdot 4,6 + \frac{43,2}{2} + \frac{3}{2} \cdot 1,85 \right) \right] 16}{1000} 100 = \pm 3,5 \%$$

Если кислородный баланс нулевой или положительный, то Q_{max} рассчитывается исходя из образования при взрыве высших

окислов всех горючих элементов, содержащихся в составе ВВ. В нашем примере реакция взрывчатого превращения аммонала имеет вид

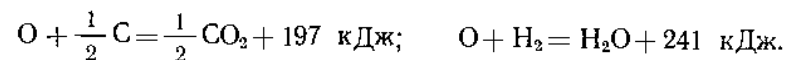
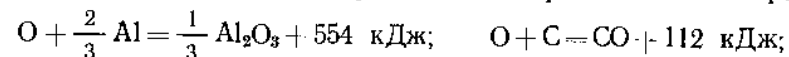


Вычисляется Q_{max} :

$$Q_{max} = (4,6 \cdot 395,6 + 21,6 \cdot 240,6 + 0,925 \cdot 1666,4) - (10 \cdot 354,8 + 0,66 \cdot 42,3) = 4980 \text{ кДж/кг} = 1180 \text{ ккал/кг}.$$

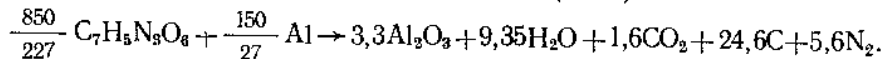
Если баланс отрицательный и кислорода не хватает для образования высших окислов всех элементов, то для вычисления Q_{max} надо отыскать те реакции, которые происходят с наибольшим выделением тепла в расчете на 1 атом кислорода.

Пусть в составе ВВ имеются следующие горючие элементы: углерод, водород, алюминий. Оценим тепловые эффекты возможных реакций их окисления в расчете на 1 грамм-атом кислорода:



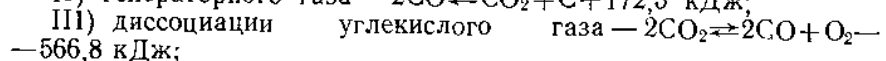
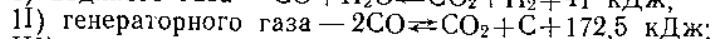
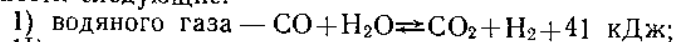
Приведенные значения тепловых эффектов показывают, что при ограниченном ресурсе кислорода в составе ВВ для получения Q_{max} кислород должен последовательно расходоваться на реакцию окисления алюминия до Al_2O_3 , затем водорода до воды и углерода до углекислого газа. Оставшиеся количества горючих элементов должны выделяться в свободном виде, т. е. в виде молекулярного водорода и твердого углерода. Между этими элементами, а также образующимися молекулярным азотом происходят некоторые экзотермические реакции, например образование углеводородов или аммиака. Однако при расчетах этими реакциями обычно пренебрегают ввиду их малости, так же как образованием нитридов алюминия при избытке алюминия в составе ВВ.

В качестве примера приведем реакцию взрывчатого превращения алюмотола, содержащего тротил и алюминий, отвечающую условию максимального тепловыделения (Q_{max}):



Тогда $Q_{max} = 7940 \text{ кДж/кг} = 1870 \text{ ккал/кг}$.

К основным равновесным реакциям в продуктах взрыва можно отнести следующие:



IV) диссоциации водяных паров — $2\text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons 2\text{H}_2 + \text{O}_2 - 483,9$ кДж;
 V) окисления азота — $\text{N}_2 + \text{O}_2 \rightleftharpoons 2\text{NO} - 180,8$ кДж.

Отметим следующую качественную зависимость для равновесных реакций, вытекающую из общих законов химической термодинамики: с увеличением температуры равновесие сдвигается в сторону продуктов, образующихся с поглощением тепла, а с увеличением давления — в сторону реакций, идущих с уменьшением объема газов, т. е. числа молей газообразных ПВ. Эта зависимость является частным случаем принципа Ле Шателье, согласно которому при действии на равновесную систему сил, нарушающих равновесие, система стремится к такому состоянию, когда эффект внешнего возмущающего действия ослабевает. Согласно этому принципу, при расширении ПВ и их охлаждении реакция V однозначно протекает справа налево, а реакция I — слева направо, т. е. должна увеличиваться концентрация молекулярных азота и кислорода, углекислого газа и молекулярного водорода. Влияние одновременного охлаждения и снижения давления на реакции II, III и IV противоречиво, и в какую сторону сдвинется равновесие, можно определить лишь расчетом по зависимости констант равновесия этих реакций от температуры и давления. Замечено, однако, что при расширении ПВ ВВ с отрицательным КБ увеличивается концентрация СО, т. е. реакция генераторного газа протекает справа налево, хотя и с поглощением тепла, а реакции диссоциации углекислого газа и водяных паров в ПВ взрывчатого вещества с положительным КБ при расширении газов практически не протекают.

В общем виде и с достаточным приближением при невысоких давлениях зависимость констант равновесия от температуры T описывается выражением

$$\lg K_p = A - B/T, \quad (2.4)$$

где A и B — эмпирические коэффициенты; K_p — константа равновесия.

В табл. 2.2 приведены значения коэффициентов A и B для некоторых равновесных реакций [34].

При больших степенях сжатия газов, когда константа равновесия зависит также от давления, в уравнение константы $K_p = p_A p_B / (p_C p_D)$ вместо парциальных давлений реагирующих газов (p_A, p_B, p_C, p_D), отвечающих их концентрациям в смеси, согласно методике Льюиса подставляют термодинамические функции, названные фугативностями, которые связаны с парциальными давлениями p соотношением

$$f_i = \bar{p}_i \gamma_i,$$

где γ_i — коэффициент активности [8].

Таблица 2.2

Реакция газов	A	B
$\text{CO}_2 + \text{H}_2 \rightleftharpoons \text{CO} + \text{H}_2\text{O}$	1,23	1 100
$\text{CO}_2 + \text{C} \rightleftharpoons 2\text{CO}$	8,73	8 480
$\text{CO}_2 \rightleftharpoons \text{CO} + \frac{1}{2}\text{O}_2$	4,3	14 510
$\frac{1}{2}\text{N}_2 + \frac{1}{2}\text{O}_2 \rightleftharpoons \text{NO}$	0,65	4 750

Тогда для биомолекулярной реакции типа $A + B = C + D$ константа равновесия с учетом давления

$$K'_p = \frac{\bar{p}_A \bar{p}_B \bar{p}_C \bar{p}_D}{\bar{p}_C \bar{p}_D \bar{p}_C \bar{p}_D} = K_p \frac{\gamma_A \gamma_B}{\gamma_C \gamma_D}.$$

Расчет коэффициентов активности для различных газов как функции параметров их состояния приведен в курсах химической термодинамики. Исходным является уравнение

$$\lg \gamma = -\lg \frac{1}{RT} \int_0^p a dp, \quad \text{где } a = \frac{RT - pv}{p}.$$

В табл. 2.3 приведены значения констант равновесия реакций водяного (I) и генераторного (II) газов при давлении детонации, рассчитанные В. Н. Зубаревым и Н. И. Телегиным.

Наиболее постоянный состав ПВ, мало зависящий от степени расширения (параметров состояния), имеют ВВ с нулевым или положительным КБ, так как степень диссоциации CO_2 и H_2O при не очень высоких температурах невелика. В крайне малых количествах образуется окись азота по реакции V. Экспериментально наблюдаемые при взрыве аммиачно-селитренных смесей окислы азота объясняются не прохождением равновесной реакции V, а неполнотой реакции разложения селитры при некоторых неблагоприятных условиях взрыва.

Так как при взрыве ВВ с нулевым и положительным КБ почти нацело образуются высшие окислы горючих элементов, то фактическую теплоту взрыва этих ВВ можно считать близкой к Q_{max} .

Значительно сложнее рассчитывать теплоту взрыва ВВ с отрицательным кислородным балансом. В принципе эта задача решается путем составления замкнутой системы уравнений, в которую включаются уравнения материального баланса для каждого элемента, содержащегося в ВВ, и уравнения констант равновесия наиболее значимых равновесных реакций, например, реакций I и II.

Если элементный состав ВВ отвечает, например, формуле $\text{C}_a \text{H}_b \text{N}_c \text{O}_d$ и ВВ имеет отрицательный КБ, то в ПВ могут содер-

Таблица 2.3

Давление, ГПа	Константы равновесия газовых реакций при различной температуре, К				
	2000	3000	4000	5000	6000
Реакция водяного газа					
5	8,78	11,8	12,7	13,6	14,3
10	19,3	21,6	18,3	17,8	17,8
20	$1,33 \cdot 10^2$	72,5	45,8	37,0	29,3
40	$4,22 \cdot 10^3$	$7,17 \cdot 10^3$	$2,61 \cdot 10^3$	$1,36 \cdot 10^3$	$2,24 \cdot 10^2$
Реакция генераторного газа					
5	$3,69 \cdot 10^2$	5,34	0,214	$5,24 \cdot 10^{-2}$	$2,19 \cdot 10^{-2}$
10	$9,27 \cdot 10^3$	18,8	2,16	0,434	0,146
20	$6,75 \cdot 10^5$	$1,61 \cdot 10^2$	33,8	4,41	1,30
40	$3,01 \cdot 10^8$	$1,31 \cdot 10^6$	$9,74 \cdot 10^2$	87,7	14,4

жаться следующие газы и твердые вещества: CO_2 , CO , C в виде сажи, графита или алмаза [21], H_2O , H_2 , N_2 . Соответственно реакцию разложения можно представить в виде $\text{C}_a\text{H}_b\text{N}_c\text{O}_d \rightarrow m\text{CO}_2 + n\text{CO} + p\text{C} + r\text{H}_2\text{O} + q\text{H}_2 + \frac{c}{2}\text{N}_2$.

Уравнения материального поэлементного баланса:

$$m + n + p = a; \quad 2r + 2q = b; \quad 2m + n + r = d.$$

Уравнения констант равновесия реакций I и II:

$$K_I = nr/(mq); \quad K_{II} = n^2/m.$$

При отсутствии в ПВ твердого углерода из системы уравнений исключаются K_{II} и p .

Для решения вышеприведенной системы уравнений необходимо знать значения температуры и давления (при больших степенях сжатия газов), от которых зависят константы равновесия газовых реакций при данной степени расширения. Ими вначале задаются или в нулевом приближении рассчитывают по Q_{max} . А затем точное решение находится методом последовательного приближения (итерации), а именно, по найденному в нулевом приближении составу ПВ рассчитывают температуру и давление газов. По этим величинам находят уточненные значения констант равновесия. Затем вновь решают систему уравнений, находят в первом приближении состав ПВ, и так поступают до тех пор, пока расхождение в результатах счета не будут превышать задаваемой точности определений. Выполненный по такой методике расчет состава ПВ и теплоты взрыва гексогена при больших степенях расширения, т. е. фугасной теплоты, дал следующие результаты:

34

Таблица 2.4

Плотность, г/см ³	H_2O	H_2	CO_2	CO	C	N_2
Гексоген						
1,8	3,0	—	1,49	0,02	1,49	3,0
1,0	2,8	0,11	0,67	1,855	0,45	2,98
1,1*	2,13	0,75	0,93	2,01	—	3,0
ТЭн						
1,77	4,0	—	3,89	0,223	0,89	2,0
0,5	3,73	0,167	2,81	2,19	—	1,93
Тротыл						
1,64	2,5	—	1,66	0,188	5,15	1,5
0,732	1,76	0,707	0,69	2,86	3,45	1,49

* Экспериментальные значения

реакция разложения $\text{C}_3\text{H}_6\text{N}_6\text{O}_6 \rightarrow 0,76\text{CO}_2 + 2,24\text{CO} + 2,24\text{H}_2\text{O} + 0,76\text{H}_2 + 3\text{N}_2$;

теплота взрыва $Q_{\text{ф}} = 1187,6$ кДж/моль — 5350 кДж/кг.

Расчет выполнялся в предположении, что в охлажденных ПВ не содержится твердый углерод и что константа равновесия водяного газа является функцией только температуры.

В табл. 2.4 приведены данные расчета состава ПВ в детонационной волне для нескольких индивидуальных ВВ [34]. Для сравнения приведен экспериментально определенный состав ПВ гексогена при взрыве заряда в толстостенной медной оболочке, т. е. в условиях, моделирующих «замораживание» начального состава ПВ [40].

Для сокращения объема вычислений на машине (числа итераций) подбирают с самого начала возможно более близкие к истинной температуре и давление в ПВ, отвечающих заданной степени расширения газов. Для этого пользуются законами расширения ПВ, принимая их как изэнтропические. В области высоких давлений (примерно до $p = 100$ МПа) закон расширения описывается политропой вида $p v^n = \text{const}$, при меньших давлениях — адиабатой $p v^\gamma = \text{const}$, где $\gamma = c_p/c_v$, т. е. отношение теплоемкостей ПВ при постоянных давлении и объеме ($c_p = c_v + R$), как для идеальных газов.

Наряду с методами расчета состава ПВ через константы равновесия имеются другие современные термодинамические методы, основанные на требовании минимума потенциалов Гиббса $g_{T,p}$ или Гельмгольца $f_{T,v}$ в равновесном состоянии ПВ [21, 35]. Они опираются на известное положение Гиббса, что равновес-

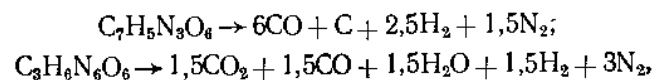
35

ному состоянию реагирующих газов в изолированной системе отвечают экстремальные значения характеристических функций при заданных значениях двух внешних термодинамических параметров. В равновесном состоянии удельные изобарно-изотермический потенциал (энергия Гиббса) и изохорно-изотермический потенциал (энергия Гельмгольца) при заданных значениях внешних термодинамических параметров достигают минимума. Тогда, задаваясь температурой и давлением, отвечающим данной степени расширения ПВ, можно составить систему уравнений, включающую уравнения поэлементного материального баланса и выражения для минимумов потенциалов Гиббса ($g_{p,T} = \min$). При этом в числе учитываемых продуктов взрыва могут быть все те соединения, которые могут образовывать химические элементы, содержащиеся в ВВ, при их взаимодействии, если известны их термодинамические характеристики. Их число может быть ограничено разумными пределами. Задача решается путем отыскания минимума функции $g_{p,T} = \min$ методом неопределенных множителей Лагранжа. Причем вначале параметрами состояния ПВ (p, T) задаются, а потом уточняют методом последовательного приближения, для чего разработаны прикладные программы машинного счета [21, 40].

Для менее точных оценок и решения ряда прикладных задач взрывного дела часто пользуются приближенными методами расчета энергетических характеристик ВВ, основанных либо на эмпирических зависимостях состава ПВ и теплот взрыва от химического состава ВВ, либо на каких-либо общих термодинамических принципах.

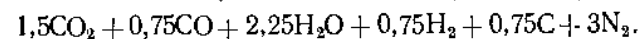
Так, для расчета фугасной теплоты взрыва в некоторых методиках исходят из принципа Ле-Шателье, принимая, что конечный состав ПВ по окончании расширения должен отвечать максимальному объему газов или максимальному числу молей газообразных ПВ.

Расчет по v_{\max} для ВВ, не содержащих алюминия, предусматривает такую последовательность расходования кислорода: вначале весь углерод окисляется до окиси, затем равными долями — на окисление водорода до воды и окиси до двуокиси углерода. По этой схеме, например, тротил и гексоген разлагаются на следующие продукты:

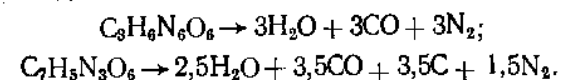


Недостаток данной методики состоит в том, что не учитывается влияние охлаждения газов в процессе их расширения на равновесные реакции, идущие с выделением тепла, например реакцию генераторного газа. Исходя из этого и основываясь на экспериментальных данных, Б. Я. Светлов предложил оперировать усреднен-

ным составом ПВ, получаемым по расчетам на v_{\max} и Q_{\max} [51]. Для гексогена в этом случае состав ПВ будет следующим



Для малых степеней расширения ПВ, в частности при определении детонационной теплоты, иногда для грубых оценок пользуются методикой расчета по Бринкли-Вильсону. Она исходит из приоритета реакций с максимальным тепловыделением, но вместе с тем учитывает равновесные реакции с участием углеродсодержащих соединений. По этой методике вначале водород окисляется до воды, затем углерод до окиси, затем окись до двуокиси. По этой схеме реакции разложения гексогена и тротила в детонационной волне имеют вид



Наряду с вышеприведенными схематическими методами расчета состава ПВ, необходимого для вычисления теплоты взрыва по формуле (2.1), предложены полуэмпирические методы приближенного расчета теплоты, не требующие знания состава ПВ. В основе их лежит идея, что фактическая теплота взрыва тем больше приближается к максимальной, вычисление которой не представляет трудностей, чем выше кислородный коэффициент ВВ. В таком случае теплоту взрыва можно выразить как некоторую функцию химического состава ВВ через его кислородный коэффициент α_k и Q_{\max} .

Г. А. Авакян, исходя из этих предпосылок, предложил определять теплоту образования ПВ по следующей формуле

$$q_{\text{ПВ}} = kq_{\text{ПВ max}}, \quad (2.5)$$

где k — коэффициент реализации энергии; $q_{\text{ПВ max}}$ — теплота образования ПВ, отвечающая Q_{\max} .

Путем обработки опытных определений была найдена зависимость для уплотненных индивидуальных ВВ ($\rho_0 = 1,6 \text{ г/см}^3$): $k = 0,32\alpha_k^{0,24}$.

Подставив найденное выражение для $q_{\text{ПВ}}$ в уравнение (2.1), получим для ВВ с отрицательным кислородным балансом общей формулы $C_aH_bN_cO_d$ выражение для расчета детонационной теплоты взрыва

$$Q_d = 0,32\alpha_k^{0,24}(47d - 5,25b) - q_{\text{обр. ВВ}}, \quad (2.6)$$

где $q_{\text{обр. ВВ}}$ — теплота образования ВВ.

В. И. Пепекин, учитывая зависимость теплоты взрыва от плотности ВВ, предложил универсальную формулу расчета, справедливую в широком диапазоне плотностей.

Зависимость теплоты взрыва от плотности можно аппроксимировать как линейную функцию вида $Q = A + B\rho_0$. В табл. 2.5 при-

Таблица 2.5

Вещество	α_k	ρ_0 , г/см ³	A	B	Q, кДж/кг
Тротил	0,36	1,0	580	281	3600
Тринитробензол	0,44	0,74	620	283	3558
»	0,44	1,66	—	—	4605
Тетрил	0,48	0,98	680	282	4018
Пикриновая кислота	0,52	0,9	630	223	3474
Гексоген	0,67	1,1	990	172	4981
»	0,67	1,7	—	—	5400
Октоген	0,67	1,3	990	172	5065
»	0,67	1,8	—	—	5400
Тэн	0,86	0,9	1250	56	5442
»	0,86	1,7	—	—	5651

ведены значения коэффициентов для некоторых веществ и экспериментальные величины теплот взрыва при подрыве зарядов в массивных медных оболочках.

Из табл. 2.5 видно, что зависимость теплоты взрыва от плотности усиливается с уменьшением кислородного коэффициента ВВ. Эта зависимость может быть использована до значений $\alpha_k=1,4$.

К аналогичным наблюдениям о влиянии плотности на теплоту взрыва пришел Б. Я. Светлов [51]. Он измерял теплоты взрыва водонаполненных ВВ в стеклянных оболочках. Вода, вытесняя воздух из межгранульных пустот, повышала плотность заряда на 0,25 г/см³. При этом водосодержащий гранулолот выделял при

Таблица 2.6

Содержание тротила в смеси, %	Кислородный баланс, %	Теплота взрыва ВВ, кДж/кг		Прирост теплоты, %
		сухих	водосодержащих	
21—23,5	+0,2	3965	3505	—12
		4080	3745	—8
50	—27	3975	3975	0
		3645	3765	+3,5
70	—46	3775	4330	+15
		3640	3935	+8
100	—74	3250	4220	+30
		3640	4100	—12,5

Примечание. В числителе приведены данные по Б. Я. Светлову, в знаменателе — по М. Куку [37].

взрыве на 14 %, а алюмотол — на 16 % больше тепла, чем при взрыве в сухом состоянии. Влияние кислородного баланса иллюстрируется табл. 2.6. Взрывали смеси тротила с аммиачной селитрой.

Основываясь на найденных зависимостях теплоты взрыва от плотности и кислородного коэффициента ВВ, В. И. Пепекин предложил следующую формулу для расчета детонационной теплоты:

$$Q_d = Q_{\max} [1 - (0,528 - 0,165\rho_0)(1,4 - \alpha_k)^{1,4}]. \quad (2.7)$$

Из уравнения (2.7) следует, что при $\alpha_k=1,4$ $Q_d=Q_{\max}$.

Для более точных расчетов рекомендована более сложная формула, в которой учитывается соотношение между водородом и углеродом в молекуле (составе) ВВ:

$$Q_d = Q_{\max} \left\{ 1 - (0,528 - 0,165\rho_0)(1,4 - \alpha_k)^{1,4} \times \left[1 - \left(\frac{b}{a+b} \right)^{(5,73 - 2,28\rho_0)(1,4 - \alpha_k)^2} \right] \right\}.$$

При плотности ВВ 1 г/см³ погрешность расчета по формуле (2.7) не превышает 1,8 %, при меньших плотностях она выше.

Найденные указанными способами теплоты взрыва позволяют решать обратную задачу — определить состав продуктов взрыва. Для этого составляется система уравнений, содержащая уравнения элементарного и теплового балансов. В качестве последнего может быть использовано уравнение (2.5) или (2.7). Этих уравнений достаточно для решения системы, если в ней имеется четыре неизвестных, например, содержание в ПВ СО, СО₂, Н₂ и Н₂О. Если же неизвестных пять и предполагается наличие в ПВ также твердого углерода, то необходимо в систему дополнительно включить еще одно независимое уравнение, например уравнение для константы равновесия реакции водяного газа.

Следует заметить, что экспериментально определяемый состав ПВ во многих случаях, особенно для ВВ с отрицательным КБ, не совпадает с расчетным составом, даже вычисленным по точным термодинамическим методам (см. табл. 2.4). Это объясняется тем, что экспериментальный состав во многом зависит от условий подрыва: материала и толщины оболочки заряда, объема металлического сосуда (бомбы Бихеля или Долгова), в котором производился подрыв, массы и диаметра заряда, размеров частиц и активности компонентов смесового ВВ, определяющих полноту химического превращения при взрыве, и др.

Перечисленные факторы имеют либо термодинамический, либо химический (неполнота превращения) характер. О химических причинах более подробно будет сказано ниже. Здесь рассмотрим влияние термодинамических факторов.

При большой скорости охлаждения газов, например вследствие теплообмена с раздробленным материалом металлической обо-

Таблица 2.7

Метод определения	Состав ПВ, моль/моль ВВ								
	CO ₂	CO	C	H ₂ O	H ₂	N ₂	CH ₄	NH ₃	
Тротил (КБ = -74 %, ρ ₀ = 1,64 г/см ³)									
Экспериментальный ряд без оболочки)	(за-	0,063	5,89	1,01	0,17	2,31	1,36	0,01	0,022
Расчетный		0,003	6,0	0,9	0,003	2,36	1,47	0,053	—
Экспериментальный ряд в оболочке)	(за-	1,25	1,98	3,65	1,60	0,46	1,32	0,1	0,162
Расчетный		1,39	1,58	3,80	1,64	0,40	1,5	0,23	—
Октоген (КБ = -21,6 %, ρ ₀ = 1,89 г/см ³)									
Экспериментальный ряд без оболочки)	(за-	1,44	2,65	—	2,50	1,53	4,0	—	—
Расчетный		1,49	2,52	—	2,52	1,48	4,0	—	—
Экспериментальный ряд в оболочке)	(за-	1,92	1,06	0,97	3,18	0,3	3,68	0,039	0,4
Расчетный		2,01	0,93	0,81	3,06	0,34	3,97	0,26	0,063

Примечание. Расчет выполнен при T = 1800 К.

лочки заряда, химический состав ПВ как бы «замораживается» в своем первоначальном виде и не отвечает теоретическому равновесному составу при зафиксированной конечной степени расширения и температуре (закалка ложного равновесия).

При подрыве тротила и октогена в массивной металлической (золотой) оболочке количество продуктов полного окисления (CO₂, H₂O) больше, чем при взрыве без оболочки (табл. 2.7) [40]. Соответственно большей будет и теплота взрыва. Причем отличия тем больше, чем меньше кислородный баланс ВВ. Из других опытов известно, что замораживанию состава продуктов взрыва способствует увеличение массы металлической оболочки, причем зависимость имеет характер насыщения. Это явление используется в экспериментальных методиках определения детонационной теплоты взрыва.

Сопоставление с расчетом показывает, что «замораживание» равновесия отвечает примерно температуре 1500—1800 К и давлению 0,5—5 ГПа [34]. Если воспользоваться экспериментальными данными табл. 2.7 о составе ПВ и рассчитать по ним фугасную (заряд без оболочки) и детонационную (заряд в оболочке) теплоты взрыва, то получим следующие их величины в ккал/кг (кДж/кг):

Заряд	Без оболочки	В оболочке
Тротил	650 (2720)	1090 (4565)
Октоген	1235 (5170)	1330 (5570)

Видно, что для тротила — ВВ с резко отрицательным кислородным балансом — детонационная теплота примерно в 1,7 раза больше, чем фугасная, а для октогена — ВВ с менее отрицательным балансом — только в 1,1 раза больше, чем фугасная теплота.

Применение оболочек из различных материалов и различной толщины является удобным методом физического моделирования взрывов с различной газодинамикой расширения ПВ при определении термохимических характеристик ВВ.

Для определения количества ядовитых газов, образующихся при взрыве, ВВ взрывают в оболочке из песка или измельченной горной породы. Для некоторых оценок производят взрывания в бетонных, базальтовых блоках.

Некоторые особенности расчета теплоты взрыва смесевых ВВ. Все смесевые ВВ можно условно разбить на три группы. К первой группе относятся смеси индивидуальных ВВ с равным по знаку кислородным балансом. Примером могут служить смеси тротила с гексогеном (ТГ) или тэном (пентолит), применяемые для изготовления шашек-детонаторов.

С достаточным приближением теплоту взрыва смесевых ВВ этой группы на всех стадиях расширения ПВ можно принимать равной аддитивной сумме теплот взрыва компонентов, т. е.

$$Q_{см} = \sum Q_i a_i \quad (2.8)$$

где a_i — массовая доля компонента. Для более точных расчетов необходимо принимать во внимание равновесные реакции между ПВ всех компонентов. В этом случае по элементному составу компонентов и их массовым долям в 1 кг смеси составляют условную формулу смесевых ВВ и далее расчет ведут на это условное ВВ.

Ко второй группе относятся смеси, в которых при взрыве тепло в сопоставимых количествах выделяется в две стадии: при разложении одного или нескольких взрывчатых компонентов и при взаимодействии продуктов их разложения между собой или с частицами (продуктами разложения, газификации) невзрывчатых компонентов. Иногда эти смеси называют смесями окислителей и горючих, но это — не точно, так как в качестве «окислителя» по отношению, например, к алюминию в составе алюмотола выступает тротил — ВВ с отрицательным кислородным балансом, не выделяющее при разложении свободного кислорода.

К смесям этого типа относится большинство промышленных ВВ — аммониты, аммоналы, динамоны, перхлоратные ВВ, динамиты и др.

К третьей группе относятся смеси, состоящие из невзрывчатых окислителей и горючих. Тепло у этих смесей выделяется в результате прямого взаимодействия между компонентами.

Непременным условием взрывчатости таких смесей является высокая степень их гомогенизации (равномерности смешивания), определяемая малостью размеров частиц и их перемешиванием.

От этой величины зависит поверхность контакта между реагирующими веществами. В наибольшей мере этому качеству отвечают взрывчатые газовые смеси и растворы, в которых перемешивание находится на молекулярном уровне. Достаточно высокую степень гомогенизации могут иметь суспензии, эмульсии, пористые вещества, пропитанные жидкостью. Теплота их взрыва может сильно колебаться в зависимости от полноты реакций окисления, определяемой степенью гомогенизации смеси.

Рассмотрим более подробно термохимические характеристики наиболее распространенных смесевых ВВ второй группы. Как отмечалось выше, главная особенность этих ВВ состоит в том, что тепло при взрыве выделяется в две стадии. Это обстоятельство может быть причиной существенного расхождения между расчетной теплотой взрыва и фактическими тепловыми эффектами из-за незавершенности вторичных реакций в газовой фазе. Характерным признаком неполноты вторичных реакций при взрыве аммиачно-селитренных смесей является бурый цвет ПВ, свидетельствующий о наличии в них окислов азота, и сугубо неравновесный состав ПВ, когда наряду с окислами азота — сильным окисляющим агентом — в ПВ содержатся продукты неполного окисления горючих элементов, например окись углерода.

Разница между полной теоретической теплотой и фактической теплотой взрыва составляет так называемые *химические или тепловые потери* при взрыве смесевых ВВ. А. Ф. Беляев к химическим потерям относил также потери тепла в результате разброса некоторого периферийного слоя ВВ при взрыве, так называемого слоя Харитона, что свойственно не только смесевым, но и индивидуальным ВВ.

Химические потери тепла могут быть отнесены к любым фиксируемому состояниям ПВ. Они, естественно, будут наибольшими при небольшой продолжительности расширения ПВ, в частности, относительно расчетных значений детонационных теплот.

Химические потери трудно поддаются расчету, так как зависят от многих факторов: химической активности реагирующих в газовой фазе веществ (кинетики соответствующих реакций), скорости охлаждения газов в процессе их расширения (газодинамических условий расширения ПВ) и в результате теплообмена с окружающей средой, процессов тепло-массообмена в самих ПВ, зависящих, в свою очередь, от гомогенности смешивания компонентов ВВ, и др.

Влияние химической активности реагентов можно проследить на примере алюмосодержащих ВВ — аммонала и алюмотола. При взрыве аммонала алюминий взаимодействует с химически высокоактивным свободным кислородом или окислами азота — продуктами разложения селитры. При взрыве алюмотола — с менее активными продуктами разложения тротила — парами воды и окислами углерода. Соответственно в первом случае реакция окисле-

ния алюминия успевает завершиться за короткое время и выделившееся тепло увеличивает детонационную теплоту. Во втором случае реакции протекают более медленно и выделившееся тепло реализуется только в фугасных формах работы взрыва. Наблюдения показывают, что при высоких давлениях взрыва наиболее быстро реагирует с алюминием свободный кислород, затем пары воды, затем углекислый газ, затем окись углерода. Последняя реакция вообще не доходит до конца. Этими наблюдениями пользуются при расчете теплот взрыва алюмосодержащих ВВ с отрицательным кислородным балансом. Причин указанной последовательности, видимо, несколько. Приоритет реакций с участием свободного кислорода и окислов азота объясняется, в частности, наиболее высокими тепловыми эффектами реакций (1847 кДж при образовании 1 г-моля окиси алюминия при взаимодействии алюминия с окисью азота и 1666 кДж при взаимодействии со свободным кислородом).

При взаимодействии с углекислым газом и водой соответствующие тепловые эффекты ниже (820 кДж при восстановлении CO_2 до CO и 943 кДж при восстановлении воды до водорода). Положительным фактором в реакции с кислородом при высоком давлении может быть и уменьшение объема продуктов, так как образуется только твердая фаза в виде окисла металла.

Другой пример влияния кинетики вторичных реакций на величину химических потерь относится к селективно-детонирующим предохранительным ВВ. Они состоят из мало реакционноспособной смеси хлористого аммония и натриевой селитры и высоко реакционноспособного нитроглицерина. При взрыве открытых зарядов этих ВВ теплота взрыва на всех стадиях расширения ПВ близка к теплоте взрыва содержащегося в них нитроглицерина. И только при взрыве в замкнутом объеме, например в шпуре с забойкой, благодаря длительному сохранению в зарядной камере высоких давления и температуры вступают во взаимодействие продукты распада солей с выделением дополнительного тепла.

Замечено также, что тепловые потери относительно детонационной теплоты меньше у тех смесей, у которых более близкими являются времена разложения компонентов в детонационной волне. С этой точки зрения смесь тротила с аммиачной селитрой более «выгодна», чем смесь гексогена с селитрой. По этой причине в скальных аммонитах содержится смесь всех трех перечисленных компонентов. Здесь тротил играет роль как бы «кинетического мостика» между гексогеном и селитрой.

Влияние скорости охлаждения ПВ на химические потери проявляется в виде зависимости их от диаметра заряда и физико-механических свойств материала оболочки или горных пород, в которых производят взрывы. С увеличением диаметра заряда потери уменьшаются. Такое же влияние оказывают прочные и массивные металлические оболочки и скальные горные породы. Напротив,

окружение заряда сыпучими материалами, например песком, приводит к увеличению потерь благодаря интенсивному теплообмену этих материалов с ПВ.

Сильное влияние на химические потери могут оказывать размеры частиц компонентов, особенно при малых диаметрах зарядов. Так, граммонит 79/21 имеет потери значительно больше, чем одинаковый по составу аммонит 6ЖВ. С увеличением диаметра заряда разница уменьшается.

Теоретические расчеты теплоты взрыва смесевых ВВ можно производить двумя способами: по первому из них выписывают условную химическую формулу смесевого ВВ, отнесенную к единице массы, и далее ведут расчет как для индивидуального ВВ; по второму — вначале аддитивно складывают теплоты взрыва компонентов, а затем рассчитывают тепловые эффекты вторичных реакций и прибавляют их к сумме теплот взрыва компонентов. Вторым способом применяют главным образом для расчета теплот взрыва алюмосодержащих смесей с отрицательным кислородным балансом, таких, как алюмотол, смеси гексогена с алюминием и т. п. Расчет в этом случае ведут по следующей схеме: вначале алюминий реагирует с водяными парами с восстановлением их до водорода, затем с углекислым газом с восстановлением его до окиси углерода. Взаимодействие с окисью углерода считается возможным только при крупномасштабных взрывах и при взрывах в акваториях на больших глубинах, т. е. при достаточно высоком гидростатическом давлении. При этом возможно восстановление лишь примерно половины от начальной окиси углерода.

Термохимические расчеты ВВ с инертными или малоактивными добавками. Многие промышленные ВВ содержат невзрывчатые добавки различной химической природы и различного служебного назначения, не реагирующие с продуктами разложения активной части ВВ. Это — соли-пламегасители в предохранительных ВВ, водные гели в водосодержащих ВВ, флегматизаторы в термостойких ВВ и ряд других.

В тепловом балансе взрыва они играют отрицательную роль, поглощая часть тепла на свой прогрев, фазовые переходы и эндотермическое разложение. Кроме того, они являются балластом, снижающим теплоту взрыва в расчете на единицу массы ВВ.

В общем виде уравнение для расчета теплоты взрыва ВВ с инертной добавкой записывается следующим образом:

$$Q_{\text{взр}} = Q'_{\text{взр}} (1 - \beta) - \beta [q_{\text{т.р}} + q_{\text{ф}} + c_{\text{д}}(T - T_0)], \quad (2.9)$$

где $Q'_{\text{взр}}$ — теплота взрыва ВВ без добавки; β — массовая доля добавки; $q_{\text{т.р}}$ — теплота термического разложения материала добавки; $q_{\text{ф}}$ — теплота фазового перехода добавки; $c_{\text{д}}$ — теплоемкость добавки; T и T_0 — начальная температура соответственно ПВ и добавки.

Анализируя уравнение (2.9), можно заметить следующее. Затраты тепла на прогрев добавки, на первый взгляд, не должны заметным образом сказываться на фугасных формах работы взрыва, так как при расширении ПВ тепло от нагретой добавки возвращается охлажденным газам. На самом деле благодаря температурному неравновесию между газовой и твердой фазами в ПВ возврат тепла запаздывает и не является полным.

Необратимыми являются потери тепла на термическое разложение вещества добавки. Что касается тепловых затрат на фазовые переходы вещества добавки, то они зависят от конечной температуры ПВ и могут быть возвратными и безвозвратными. Если к моменту завершения отбора энергии от ПВ их температура будет ниже температуры фазового перехода, то затраченное тепло возвращается в систему в результате обратного фазового перехода. В противном случае потери являются безвозвратными.

Поясним сказанное на примерах. Температура плавления солей-пламегасителей, входящих в состав предохранительных ВВ, находится в пределах 700—900 °С. Это значительно выше, чем температура ПВ после совершения ими работы разрушения и выброса горной породы. Поэтому тепло, затраченное на плавление солей, не теряется, а возвращается в систему при обратной кристаллизации. Иначе обстоит дело с водосодержащими ВВ. Тепло, затраченное на испарение воды, не возвращается в ПВ, так как температура конденсации водяных паров ниже конечной температуры ПВ.

Сказанное относится и к гранулированным ВВ, погруженным в воду. При термодинамических расчетах взрывов гранулированных ВВ в обводненных скважинах необходимо из теплоты взрыва заряда данной массы вычесть теплоту испарения воды, заполняющей межгранульное пространство. Для ВВ типа гранулола и алюмотола объем межгранульных пустот занимает около 1/3 объема заряда.

Если водосодержащее ВВ содержит алюминий (акваналы), то воду нельзя рассматривать как инертную добавку. Она способна реагировать в парах с алюминием. И при расчетах ее надо рассматривать как один из активных компонентов данного смесевого ВВ, а в тепловой баланс включать теплоту образования воды в жидком состоянии.

При термохимических расчетах флегматизированных ВВ, если неизвестны теплота и состав продуктов разложения флегматизатора, но известна теплота его образования, пользуются следующим приемом: включают вещество флегматизатора в материальный баланс смеси, выписывают условную химическую формулу смеси и далее расчет производят, как для индивидуального ВВ.

2.2. ПАРАМЕТРЫ СОСТОЯНИЯ ПРОДУКТОВ ВЗРЫВА

Основными термодинамическими характеристиками ПВ являются их удельный объем (v), температура (T) и давление (p). Они связаны общим уравнением состояния. Для идеальных газов — это уравнение Менделеева-Клапейрона

$$pv = nRT, \quad (2.10)$$

где n — количество молей газообразных ПВ; R — универсальная газовая постоянная.

Для реальных газов уравнением (2.10) можно пользоваться лишь при небольших давлениях, не превышающих нескольких десятков атмосфер. Такое начальное давление имеют только ПВ газовых взрывчатых смесей. Для расчета параметров состояния ПВ конденсированных ВВ при более высоких давлениях необходимо учитывать физический объем молекул, или несжимаемую часть газов, называемую коволюмом и обозначаемую обычно буквой α , например в виде уравнения состояния

$$p(v - \alpha) = nRT.$$

При очень высоких давлениях, отвечающих состоянию ПВ в детонационной волне высокоплотных конденсированных ВВ, необходимо учитывать не только тепловую, но и упругую составляющую давления, определяемую силами взаимодействия молекул газов. В этом случае уравнение состояния может быть записано в следующем виде:

$$p = f(v, T) + \varphi(v).$$

2.2.1. Температура продуктов взрыва

Температура ПВ при любой степени их расширения может быть определена исходя из общего термодинамического выражения, справедливого для изолированной системы:

$$-dE = dQ + pdv, \quad (2.11)$$

где $E = c_v T_{\text{взр}}$ — внутренняя энергия газов; Q — тепло, удаляемое из системы; pdv — работа расширения газов.

Начальная температура ПВ, отвечающая моменту их образования и условно называемая температурой взрыва, $T_{\text{взр}}$, рассчитывается исходя из условия $dv = 0$, т. е. предполагается, что ПВ образуются практически в объеме исходного ВВ. Тогда, приравняв нулю последний член уравнения (2.11), получим

$$-\Delta E = -\sum (E_i, T_{\text{взр}} - E_i, T_0) n_i = -\sum (c_{v,i}, T_{\text{взр}} - c_{v,i}, T_0) n_i = Q_{\text{взр}}, \quad (2.12)$$

где ΔE — изменение внутренней энергии ПВ в интервале температур от $T_{\text{взр}}$ до 291 К; n_i — число молей i -го компонента ПВ при

46

взрыве единицы массы ВВ; $c_{v,i}$ — молярная теплоемкость i -го компонента ПВ.

Для решения уравнения (2.12) относительно $T_{\text{взр}}$ необходимо знать химический состав ПВ и теплоту взрыва. Решение выполняется методом последовательного приближения. Задаются некоторой предполагаемой $T_{\text{взр}}$ и по справочным таблицам находят значение ΔE [8]. Сопоставляют эту величину с теплотой взрыва, и если расхождение велико, то задаются новой температурой. Так поступают до тех пор, пока расхождение не превосходит допустимой погрешности.

Возможен другой, прямой метод расчета, основанный на использовании температурной зависимости теплоемкости ПВ. Расчет производят по формуле

$$T_{\text{взр}} = Q_{\text{взр}} / (\sum c_{v,i}, T_{\text{взр}} n_i).$$

Функцию $c_v(T)$ или $c_p(T)$ обычно выражают некоторым полиномом вида

$$c = a + bT + eT^{-2} + \dots, \quad (2.13)$$

где a, b, e — эмпирические коэффициенты, T — абсолютная температура.

Если ограничиться первыми двумя членами полинома, то получим уравнение

$$T_{\text{взр}} = \frac{Q_{\text{взр}} 1000}{\sum n_i (a_i + b_i T_{\text{взр}})} = \frac{-A + \sqrt{A^2 + 4000 Q_{\text{взр}} B}}{2B},$$

где $Q_{\text{взр}}$ — теплота взрыва 1 кг ВВ; $A = \sum a_i n_i$; $B = \sum b_i n_i$.

В табл. 2.8 приведены значения коэффициентов в уравнении (2.13) для некоторых веществ, содержащихся в ПВ, при вычислении c_p в Дж/(г·К). Для газов $c_p - c_v + 8,29$ Дж/(моль·К), для твердых веществ $c_p - c_v$.

Полученные значения теплоемкостей могут быть проверены по таблице изменения внутренней энергии соответствующего вещества в заданном интервале измерения температуры.

Нередко требуется определить температуру ПВ при той или иной степени их расширения или после завершения ими механической работы.

Задачу можно приближенно решить, приняв следующие допущения: процесс расширения происходит по адиабатическому закону, т. е. без теплообмена с окружающей средой; в процессе расширения не меняется энтропия ПВ, т. е. не учитываются возможные тепловые эффекты за счет равновесных реакций в ПВ. При этих допущениях, если известна величина совершенной работы A , например работы выброса горной породы, конечную температуру ПВ T_2 можно рассчитать по уравнению

$$-\Delta E - Q_{\text{взр}} - A = -\sum (c_{v,i}, T_2 T_2 - c_{v,i}, T_0 T_0) n_i \quad (2.14)$$

47

Таблица 2.8

Химическая формула вещества	$a \cdot 10^3$	$b \cdot 10^3$	$-c \cdot 10^{-3}$	Интервал температур, °C
H ₂ O	167,44	62,79	—	100—1700
CO ₂	98,33	25,12	18,59	0—1100
CO	98,79	17,96	—	0—2200
C	93,35	91,25	40,73	0—1100
N ₂	99,63	14,99	—	0—2200
H ₂	1391,38	143,16	—	0—3200
Al ₂ O ₃	107,92	17,37	30,39	0—1500
NaCl	85,39	19,00	3,72	0—800
KCl	71,07	7,58	3,76	0—777
NH ₄ Cl	78,28	293,86	—	0—184

методом последовательного приближения, как это делалось при нахождении $T_{\text{взр}}$.

Если требуется более точное определение T_2 , то необходимо учесть равновесный состав ПВ при этой температуре, пересчитать тепловой эффект взрыва с учетом равновесного состава ПВ, далее вновь по уравнению (2.14) найти новую температуру T_2 , по ней — новый равновесный состав ПВ и т. д. Громоздкость таких расчетов методом двойной итерации очевидна.

Другая часто встречающаяся задача сводится к определению температуры ПВ, если известен какой-либо другой параметр состояния газов. Например, требуется определить температуру ПВ при их расширении до давления внешней среды (воздушной, горной, водной). Или задается некоторый конечный объем, например объем зарядной камеры, который должны заполнить ПВ, и нужно определить их температуру в этом состоянии. Для решения такой задачи, в предположении об изоэнтропическом характере расширения газов, примем, что до давления 100 МПа изменение состояния газов происходит вдоль некоторой политропы вида $p v^3 = \text{const}$, а от 100 МПа и ниже — вдоль адиабаты, описываемой уравнением $p v^\gamma = \text{const}$, где $\gamma = c_p/c_v$; c_p , c_v — средние значения теплоемкости ПВ в диапазоне температур изменения их состояния. Задача решается следующим образом. Пусть известны начальные параметры состояния ПВ и задается один из конечных параметров — v_2 или p_2 . С помощью уравнения изоэнтропы находится второй конечный параметр состояния ПВ (p_2 или v_2). Далее с применением того или иного уравнения состояния, например Ван-дер-Ваальса, находят искомую температуру T_2 .

Более сложные вычисления требуются, если ПВ расширяются от очень высоких до очень низких давлений, вначале по политропе, а затем по адиабате. В этом случае вначале надо найти параметры состояния, отвечающие точке сопряжения обеих кривых, ис-

пользуя уравнение политропы, а затем проводить расчет по уравнению адиабаты.

Для случая газовых взрывов расчет T_2 сильно упрощается, так как в качестве уравнения состояния можно принять уравнение Менделеева — Клапейрона. Тогда можно воспользоваться соотношениями параметров состояния при адиабатическом расширении идеальных газов:

$$T_2/T_1 = (v_1/v_2)^{\gamma-1} = (p_2/p_1)^{(1-\gamma)/\gamma}. \quad (2.15)$$

В этом случае искомая температура ПВ находится прямым решением, если известны начальные параметры состояния и задается какой-либо один конечный параметр:

$$T_2 = T_1 (v_1/v_2)^{\gamma-1} = T_1 (p_0/p_1)^{(1-\gamma)/\gamma}.$$

Ниже приведены значения температур (°C) взрыва некоторых веществ.

Тротил	3100
Гексоген	3400
Нитроглицерин	3700
Тэн	3900
Предохранительные аммониты	2100—2500
Аммоналы	3300—3700
Селективно-детонирующие предохранительные ВВ	900—1700

2.2.2. Давление продуктов взрыва

Для решения инженерных задач взрывного дела можно выделить следующие характерные величины давления ПВ: среднее давление ПВ в зарядной камере до начала ее разрушения $p_{\text{з.к}}$, давление ПВ в объеме самого заряда ВВ, или давление взрыва $p_{\text{взр}}$, отвечающее как бы мгновенному взрыву всей массы ВВ, и давление в детонационной волне, отвечающее точке Чепмена — Жуге, $p_{\text{ж}}$. В отдельных случаях требуется определить давление, отвечающее некоторой степени расширения ПВ, т. е. заданному отношению v_2/v_1 .

Детонационное давление будет рассмотрено в разделе 3, давление, отвечающее заданной степени расширения ПВ, находится из уравнения изоэнтропы расширения ПВ, как это было показано в подразделе 2.2.1. Расчеты $p_{\text{з.к}}$ и $p_{\text{взр}}$ основаны на тех или иных выбранных уравнениях состояния газов, справедливых для достаточно высоких давлений. Как указывалось выше, для взрыва газовых смесей, при которых давление не превышает нескольких десятков атмосфер, без большой погрешности можно пользоваться уравнением состояния для идеальных газов, т. е. уравнением Менделеева — Клапейрона. Начальное давление газов при взрыве конденсированных ВВ может достигать десятков и сотен тысяч атмосфер, и в этом случае необходимо использовать уравнения состояния, учитывающие несжимаемую часть объема газов.

В практике инженерных расчетов, особенно для не слишком высоких давлений, отвечающих $p_{з.к.}$ применяют уравнение Ван-дер-Ваальса. Пусть объем зарядной камеры равен V и в ней размещено m килограммов ВВ. Тогда

$$p(V-b) = \frac{m}{M} RT_{взр},$$

где b — несжимаемая часть объема газов в единицах объема; M — молекулярная масса ВВ в кг/моль; R — газовая постоянная.

Обозначив $m/V = \rho_3$ — плотность заряжения в кг/м³, $1/M = n$ — число молей ПВ в моль/кг, $b/m = a$ в м³/кг, получим выражение

$$p_{з.к.} = nRT_{взр} \frac{\rho_3}{1 - \rho_3 a}. \quad (2.16)$$

Выразив далее $R = p_0 V_0 / T_0$ и обозначив $V_0 n = V_{ок}$ — объем ПВ при атмосферном давлении и температуре $T_0 = 283$ К, равный $22,4 \times 10^{-3} n$, получим широко распространенное для расчетов уравнение Абеля-Нобля

$$p = \frac{\rho_0 V_{ок}}{T_0} T_{взр} \frac{\rho_3}{1 - \alpha \rho_3}, \quad (2.17)$$

где $\rho_0 = 0,1$ МПа.

Если плотность заряжения не очень высока и давление газов в камере не превышает нескольких сотен мегапаскалей, то приближенно можно принять $\alpha = 0,001 V_{ок}$.

Уравнение (2.17) можно применять и при расчете $p_{взр}$. В этом случае плотность заряжения равна собственной плотности ВВ или плотности заряда, что на практике может иметь место при зарядании зарядных емкостей жидкими, суспензионными, пластичными ВВ или при беспатронном пневмозарядании сыпучими ВВ.

Так как $T_{взр} = Q_{взр} / (c_v n)$, то анализ уравнений типа (2.16) показывает, что давление взрыва пропорционально теплоте взрыва и возрастает с уменьшением средней теплоемкости ПВ (c_v) и с увеличением плотности ВВ. c_v уменьшается с увеличением содержания в ПВ двухатомных газов (H_2, N_2, CO) и с уменьшением содержания твердых веществ ($C, Al_2O_3, NaCl$ и др.).

Для газовых взрывов, заменяя $R = c_v (\gamma - 1)$ и полагая $\alpha = 0$, получаем простое и удобное для вычислений выражение

$$p_{взр} = Q (\gamma - 1) A / v_0, \quad (2.18)$$

где v_0 — объем 1 кг газа; A — механический эквивалент тепла.

Давление взрыва $p_{взр}$ примерно в 2 раза меньше детонационного давления $p_{ж.}$

Наибольшие трудности при расчетах давления взрыва и давления ПВ при высоких плотностях заряжения представляет нахождение величины коволюма газообразных ПВ. Из сопоставле-

Таблица 2.9

Газ	Диаметр молекул, 10^{-8} см	Несжимаемый объем b' , 10^{-2} м ³ /моль	Газ	Диаметр молекул, 10^{-8} см	Несжимаемый объем b' , 10^{-2} м ³ /моль
Азот	31	13,8	Кислород	29	11,3
Оксид азота	29	11,3	Метан	31	13,8
Водород	23	5,6	Оксид углерода	32	15,2
Водяные пары	26	8,1	Двуокись углерода	32	15,2

ния расчетных и экспериментальных данных выявилось, что коволюм — величина не постоянная. При увеличении давления коволюм уменьшается. Это связано с силами отталкивания молекул или атомов при их сильном сближении.

Имеются несколько подходов к оценке величины коволюма. Обычно они исходят из сопоставления каких-либо расчетных величин, в которые входит коволюм, в том числе давления ПВ, с точными экспериментальными измерениями. Так, при давлении порядка нескольких тысяч атмосфер усредненно можно принять $\alpha = 0,001 V_{ок}$. При расчете давления взрыва или детонационного давления ВВ с плотностью 1,4—1,6 г/см³ О. Е. Власов рекомендовал принимать коволюм равным 1,47 объема молекул газов, что отвечает кубической укладке тел сферической формы. В этом случае несжимаемый объем (м³/кг), отнесенный к 1 г-молю газа, составит $1,47 \pi d^3 N / 6 = b'$, а отнесенный к 1 кг газа $\alpha = b' / M$, где d — диаметр молекул; N — число Авогадро ($6,06 \cdot 10^{23}$ молекул/моль); M — молекулярная масса газа, г. Величины b' для ряда газов приведены в табл. 2.9.

Если в ПВ содержатся твердые вещества, то коволюм складывается из несжимаемой части газов и объема твердых частиц. Удельные объемы некоторых твердых веществ при давлении и температуре взрыва (по Сарро) следующие: углерод аморфный — $0,008$, Al_2O_3 — $0,026 \cdot 10^{-3}$, $NaCl$ — $0,027 \cdot 10^{-3}$, KCl — $0,038 \cdot 10^{-3}$, K_2CO_3 — $0,026 \cdot 10^{-3}$, Na_2CO_3 — $0,043 \cdot 10^{-3}$ в м³/моль.

По расчетам О. Е. Власова, коволюм ПВ для некоторых индивидуальных ВВ с плотностью 1,5 г/см³ при детонационном давлении следующий: тротила — $5,8 \cdot 10^{-4}$, гексогена — $4,84 \cdot 10^{-4}$, тэна — $4,03 \cdot 10^{-4}$, в м³/кг.

М. А. Куком [37] предложена следующая эмпирическая зависимость коволюма от удельного объема ВВ v , справедливая в довольно широком интервале удельных объемов; $\alpha = v_k^0 e^{-v^0/v}$, где $v_k^0 = 1$ см³/г — размерный множитель; $v^0 = 0,4$ см³/г — размерный коэффициент.

Другой подход состоит в преобразовании уравнения Ван-дер-Ваальса в уравнение с вириальными коэффициентами. Для этого

уравнение Ван-дер-Ваальса записывается в виде $\frac{pv}{nRT} = \frac{1}{1 - b/v}$ и правая часть его разлагается в ряд:

$$\frac{pv}{nRT} = 1 + \frac{b_2}{v} + \left(\frac{b_2}{v}\right)^2 + \left(\frac{b_2}{v}\right)^3 + \dots, \quad (2.19)$$

где $b_2 = \sum n_i b_i$ — второй вириальный коэффициент, равный коволюму.

В качестве уравнения состояния с вириальными коэффициентами, учитывающего зависимость коволюма от удельного объема газов, обычно рекомендуют выражение, предложенное Хиршфельдом и Розвером:

$$\frac{pv}{nRT} = f(v) - 1 + \left(\frac{b_2}{v}\right) + 0,625 \left(\frac{b_2}{v}\right)^2 + 0,287 \left(\frac{b_2}{v}\right)^3. \quad (2.20)$$

В уравнении (2.20) применяются следующие значения вторых вириальных коэффициентов для некоторых газов при $T = 3500$ К:

Газ	CO ₂	N ₂	CO	H ₂	H ₂ O
$b_2, \text{ см}^3/\text{г}$	37	33	7,9	14	34

К уравнению, близкому по форме к уравнению (2.19), пришел Беккер путем следующего преобразования: $1 + (b_2/v) + (b_2/v)^2 \approx 1 + xe^x$, где $x = b_2/v$, и дополнив его членом, представляющим упругую составляющую давления:

$$p = nRT \left(1 + xe^x\right) \frac{1}{v} + f(v). \quad (2.21)$$

Кистяковским и Вильсоном уравнение (2.21) было модифицировано, в нем опущена $f(v)$, но все же эмпирический показатель степени β . Модифицированное выражение получило наименование уравнения состояния Беккера — Кистяковского — Вильсона. Оно широко используется при численных расчетах детонационного давления. В его современном виде оно записывается следующим образом [21]:

$$p = \frac{nRT}{v} (1 + xe^{\beta x}), \quad (2.22)$$

где $x = \frac{k \sum k_i n_i}{v(T + \theta) \alpha}$; k_i — коволюмный фактор i -го газообразного продукта взрыва; n — число килограмм-молей газов в 1 кг ПВ; n_i — число молей i -го продукта; T — температура ПВ; v — удельный объем газов в 1 кг ПВ; α, β, k, θ — эмпирические коэффициенты, полученные из сопоставления расчетных и измеренных величин параметров детонации ВВ.

В табл. 2.10 приведены значения коэффициентов и коволюмных факторов ПВ для индивидуальных ВВ общей формулы $C_a H_b N_c O_d$ по данным работ [17] и [21]. Некоторые отличия объясняются тем,

Таблица 2.10

Литературный источник	α	β	k	θ	Коволюмный фактор, k_i					
					CO	CO ₂	H ₂	H ₂ O	N ₂	O ₂
[17]	0,5	0,176	0,0118	1850	440	610	98	270	404	325
[21]	0,517	0,192	0,0126	1887	420	610	98	244	441	409

что в работе [17] для ВВ с отрицательным КБ свободный углерод в ПВ предполагается в форме графита, а в работе [21] — в форме и графита, и алмаза.

Имеются и другие уравнения состояния, которыми придают тот или иной вид функциям $f(v, T)$ и $\phi(v)$. Среди них отметим уравнения Ландау и Станюковича, Воскобойникова и Алина. Первое из них имеет вид

$$p = k_1 v^n + k_2 T_{\text{взр}}/v, \quad (2.23)$$

где n — показатель политропы ПВ; k_1 и k_2 — коэффициенты, зависящие от плотности ВВ. С увеличением плотности ВВ и, соответственно, давления взрыва доля упругой составляющей p_u растет, а тепловой p_T — уменьшается. Это видно на примере гексогена [61]:

Плотность ВВ, г/см ³	1,9	1,7	1,5	1,3	1,1	1,0
p_T/p_u при n :						
2,8	0,0	0,01	0,04	0,1	0,17	0,21
3	0,04	0,1	0,18	0,29	0,49	0,62

Уравнение Воскобойникова и Алина имеет вид

$$T_{\text{ж}} = 4,8 \cdot 10^{-9} p_{\text{ж}} v_{\text{ж}} (v_{\text{ж}} - 0,2) M, \quad (2.24)$$

где индекс «ж» относится к параметрам состояния ПВ в точке Жуге; M — средняя молекулярная масса ПВ.

2.3. РАБОТА ВЗРЫВА. РАБОТОСПОСОБНОСТЬ ВВ

Выделяющееся при взрыве тепло преобразуется в механическую работу, которую совершают ПВ в процессе своего расширения. Общий энергетический баланс системы описывается уравнением (2.11).

Если техническим назначением взрыва является только производство механической работы, то затраты на теплообмен ПВ с окружающей средой, отражаемые вторым слагаемым уравнения (2.11), являются энергетическими потерями. Эти потери принято называть термодинамическими.

Идеальным с точки зрения отсутствия термодинамических потерь является адиабатический процесс расширения ПВ, не соп-

ровождающийся теплообменом с окружающей средой. В этом случае изменение внутренней энергии ПВ равно количеству работы, совершенной газами, т. е. — $dU = pdv = dA$.

В реальных условиях взрывов наиболее близким к адиабатическому является взрыв ВВ в воздушной среде, сопровождающийся адиабатическим расширением ПВ и сжатием при этом воздуха с образованием впереди фронта расширяющихся газов ударной воздушной волны. При взрывах в плотных средах термодинамические потери могут быть существенными. Они возрастают в несвязанных пористых средах типа песка и в хрупких, легко дробимых горных породах и минимальны в пластичных средах типа глины и т. п.

Исходя из сказанного, мерой идеальной работоспособности ВВ может служить максимальная работа, которую совершают ПВ при своем адиабатическом расширении до давления окружающей среды (воздушной, горной, водной). Тогда идеальную работоспособность ВВ ($A_{и}$) можно определить как разность между внутренней энергией ПВ в момент их образования и к концу расширения:

$$A_{и} = \bar{c}_{v,1} T_{взр} - \bar{c}_{v,2} T_2 \approx Q_{взр} - \bar{c}_{v,2} T_2. \quad (2.25)$$

Обычно для единообразия расчетов в качестве конечного состояния принимают нормальное атмосферное давление воздуха (0,1 МПа) и соответствующую величину работоспособности обозначают $A_{и}^0$. Количественно ее можно определить, измерив энергию образования ударной воздушной волны, оторвавшейся от ПВ после их полного торможения, которое наступает при достижении в ПВ атмосферного давления.

Идеальная работоспособность является одной из важных расчетных энергетических характеристик ВВ. Она дополняет теплоту взрыва, показывая теоретическую возможность реализации энергетического потенциала ВВ в механическую работу. Как будет показано ниже, эта величина определяется не только теплотой взрыва, но зависит также от химического состава ПВ и от некоторых физических свойств ВВ.

Для вычисления $A_{и}^0$ по уравнению (2.25) необходимо знать теплоту взрыва, состав ПВ к концу их расширения для нахождения $\bar{c}_{v,2}$ и конечную температуру ПВ T_2 . Последнюю находят по методике, изложенной в подразделе 2.2.1.

Для газовых взрывчатых систем, расширение ПВ которых происходит вдоль изоэнтропы вида $pv^\gamma = \text{const}$, уравнению (2.25) можно придать более удобный для вычислений вид, используя уравнение (2.15) и приняв $\bar{c}_{v,1} = \bar{c}_{v,2}$. В этом случае получим

$$A_{и}^0 = Q_{взр} (1 - T_2/T_{взр}) = Q_{взр} [1 - (p_0/p_{взр})^{(\gamma-1)/\gamma}]. \quad (2.26)$$

Здесь, как и ранее, при расчете γ используют среднее интегральное или среднеарифметическое значение теплоемкостей ПВ в интервале температур от $T_{взр}$ до T_2 .

Выражение (2.26) позволяет выявить зависимость $A_{и}^0$ от химического состава ПВ через показатель степени изоэнтропы γ , который, в свою очередь, зависит от теплоемкости ПВ. Видно, что, как и в случае давления взрыва, при равной теплоте взрыва $A_{и}^0$ возрастает с увеличением содержания в ПВ легких двухатомных газов с минимальной теплоемкостью и уменьшается при наличии в продуктах твердых веществ, имеющих высокую теплоемкость.

Часто по аналогии с газовыми взрывами уравнение (2.26) используют и для оценки работоспособности конденсированных ВВ. Однако в данном случае оценки носят скорее качественный, чем количественный характер, так как на первых стадиях расширения ПВ конденсированных ВВ, находящиеся под очень высоким давлением — порядка десятков тысяч атмосфер, расширяются не по изоэнтропе вида $pv^\gamma = \text{const}$, а по политропе вида $pv^n = \text{const}$. Однако для качественных оценок уравнение, записанное в виде (2.26), удобно. Оно позволяет выявить ряд важных зависимостей. Адекватно ему и выражение

$$A_{и}^0 = Q_{взр} [1 - (v_0/v_{ок})^{\gamma-1}], \quad (2.27)$$

где v_0 — удельный объем или обратная плотность ВВ; $v_{ок} = 10^{-3} \times 22,4n$ — объем газообразных ПВ, приведенный к нормальным атмосферным условиям, м³/кг.

Из анализа уравнений (2.26) и (2.27) видно, что $A_{и}^0$ возрастает не только с уменьшением средней теплоемкости ПВ, но и с увеличением давления взрыва, плотности ВВ и объема газообразных ПВ.

Отношение $A_{и}^0/Q_{взр} = \eta_{и}$ можно определить как идеальный термодинамический коэффициент полезного действия (КПД) взрыва. Рассмотрим кратко, как он меняется в зависимости от химического состава ВВ.

Из зависимости (2.27) видно, что введение в состав алюминия, с одной стороны, повышает общую энергию ВВ (теплоту взрыва), но, с другой стороны, снижает показатель $\eta_{и}$. Это означает, что имеется некоторое оптимальное содержание алюминия, которое отвечает максимальной работоспособности ВВ. Благодаря наличию в составе предохранительных ВВ солей-пламегасителей, образующих при взрыве твердую фазу в ПВ, КПД взрыва ВВ этого класса всегда ниже, чем у предохранительных ВВ на той же активной основе.

Водонаполнение гранулированных водостойчивых ВВ, таких, как гранулотол и т. п., приводит к увеличению показателя $\eta_{и}$ из-за увеличения объема газообразных ПВ в расчете на единицу массы сухого ВВ. Это происходит потому, что находящаяся в межгранульном пространстве вода при взрыве испаряется. Таким образом, содержание влаги, с одной стороны, снижает теплоту взрыва за счет затрат тепла на испарение воды, а с другой стороны — по-

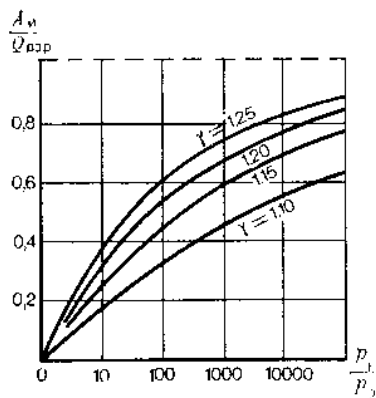


Рис. 2.1. Зависимость отношения идеальной работы ПВ к теплоте взрыва от степени расширения ПВ для тротила при разных значениях показателя изэнтропы расширения γ

нужные формы работы, например на рыхление и выброс горной породы.

К. К. Шведовым [64] предложена формула для приближенного вычисления работы, совершаемой ПВ при их расширении до не слишком малых давлений, когда еще возможно пользоваться политропой вида $p v^n = \text{const}$:

$$A = u_1^2 \frac{n}{n-1} [1 - (\rho_2 - \rho_1)^{n-1}], \quad (2.28)$$

где u_1 , u_1^2 , ρ_1 — соответственно массовая скорость, полная энергия единицы массы ПВ, плотность ПВ в точке Жуге; ρ_2 — плотность ПВ к концу расширения.

Расчеты показывают, что при двукратном расширении ($v_2/v_1 = 2$) работа $A_{0,5}$ составляет 60—70 % полной работы расширения (A_0). При этом давление ПД падает в 6—7 раз, а показатель по-

Таблица 2.11

Вещество	Плотность, г/см ³	$Q_{\text{взр}}$, кДж/кг	γ	$\eta_{\text{и}}$	$A_{\text{и}}^0$, кДж/кг
Гранулол сухой	1,0	3640	1,24	0,825	3000
Гранулол водосодержащий	1,3	3480	1,28	0,865	3020
Алюмотол сухой	1,1	4730	1,12	0,71	3360
Алюмотол водосодержащий	1,4	4910	1,164	0,77	3780
Аммонит 6ЖВ	1,0	4200	1,23	0,823	3460
Аммонал	1,0	6950	1,15	0,766	4900

вышает КПД взрыва за счет обогащения парами воды. В табл. 2.11 приведены приближенные расчетные энергетические характеристики некоторых веществ. Расчеты производились по формуле (2.27).

При меньших степенях расширения ПВ, когда конечное давление ПВ больше атмосферного, что может отвечать реальным взрывам в горных средах или под водой, коэффициент $\eta_{\text{и}}$ снижается, как это видно из рис. 2.1, при разных показателях изэнтропы γ .

Фактическая величина работы, совершаемой ПВ в плотных средах, всегда меньше, чем идеальная величина, из-за химических и термодинамических потерь энергии взрыва. Еще меньше та часть энергии взрыва, которая расходуется на

Таблица 2.12

ВВ	ρ_0 , г/см ³	$Q_{\text{взр}}$, ккал/кг	p_1 , Кбар	u_1^2 , (км/с) ²	n	$A_{0,5}$, кДж/г	A , $A_{\text{гекс}}$	$\Phi/\Phi_{\text{гекс}}$
Гексоген	1,0	1380	107	3,06	2,5	3,28	1	1
Аммонит 6ЖВ	1,0	1030	85	2,9	1,9	2,82	0,85	0,72—0,77
Граммонит 79/21	1,0	990	68	2,4	1,8	2,28	0,7	0,72—0,75
Аммонит скальный № 1	0,95	1290	89	3,24	1,8	3,08	0,94	0,91—0,97
Тротил порошкообразный	1,0	1000	71,5	1,96	2,6	2,12	0,65	0,57—0,62
Гранулол водонаполненный	1,29	994	115	2,12	3,1	2,37	0,72	0,65
Гранулол	1,0	1000	66,5	1,82	2,6	1,97	0,6	0,57—0,6
Аммонит ПЖВ-20	1,0	813	68	2,02	2,3	2,12	0,65	0,53—0,58
Угленит Э-6	1,0	640	17,5	0,49	2,6	0,53	0,16	0,26—0,34

литропы n уменьшается на 0,2—0,3, что позволяет без большой погрешности принимать его постоянным. С увеличением плотности ВВ прирост давления примерно в 2 раза больше, чем прирост работы ПВ.

Исходя из приведенных оценок, К. К. Шведов полагает, что величина $A_{0,5}$ может быть принята в качестве критерия работоспособности ВВ, она удовлетворительно согласуется с показателями работоспособности по пробе Трауцля Φ (см. раздел 9) и легче рассчитывается, чем идеальная работа взрыва $A_{\text{и}}$.

В табл. 2.12 приводятся расчетные значения $A_{0,5}$ для ряда промышленных ВВ в виде абсолютных и относительных величин.

Формула (2.28) дает менее точные результаты для алюмосодержащих ВВ, у которых значительная часть тепла выделяется на стадии расширения ПВ.

2.3.1. Тротильный эквивалент. Закон подобия взрывных волн

Широкое распространение получила оценка работоспособности (мощности) ВВ в виде тротильного эквивалента. Это — относительная величина, выражающая работоспособность данного ВВ через показатель работоспособности тротила. За эталон принимается тротил с плотностью 1,5 г/см³ и с теплотой взрыва 4186 кДж/кг (1000 ккал/кг), отвечающей данной плотности.

Исходя из определения, тротильный эквивалент можно выразить следующим уравнением:

$$\alpha_{\text{т}} = \frac{A_{\text{и}, \text{x}}^0}{A_{\text{и}, \text{т}}^0} = \frac{(\eta_{\text{и}} Q_{\text{взр}})_{\text{x}}}{4186 \eta_{\text{и}, \text{т}}}, \quad (2.29)$$

где $\alpha_{\text{т}}$ — эквивалент; индексы x и t относятся соответственно к исследуемому ВВ и к тротилу; $Q_{\text{взр}}$ — удельная теплота взрыва, кДж/кг.

В другой, адекватной по физическому смыслу трактовке тротильный эквивалент определяется как отношение массы тротила к массе данного ВВ, обладающих равной работоспособностью ($A_{и^0} = \text{const}$), и описывается выражением

$$\alpha_T = m_T/m_x. \quad (2.30)$$

Если мерой работоспособности служит величина энергии генерируемой в воздухе ударной волны, то исходя из уравнения (2.30) тротильный эквивалент может быть охарактеризован как отношение масс тротила и исследуемого ВВ, генерирующих ударные волны (УВ) равной интенсивности.

Иногда тротильный эквивалент относят не к ВВ, как таковому, а к его заряду определенной массы. В этом случае эквивалент выражают в массе тротила, адекватной по силе (мощности) взрыва, оцениваемой, например, по интенсивности возникающей УВ, данному заряду или взрывному устройству.

Экспериментально тротильный эквивалент чаще всего находят путем измерения параметров УВ в воздухе. Находят такие массы тротила, которые генерируют УВ такой же интенсивности, как единицы масс исследуемых ВВ. Выбор именно этого метода объясняется тем, что процесс формирования УВ в воздухе в наибольшей мере приближается к идеальному адиабатическому расширению ПВ, производящему уплотнение воздуха.

Параметры воздушных УВ рассчитываются по закону подобия взрывных волн, суть которого состоит в том, что при взрыве зарядов сферической формы параметры УВ являются функциями только массы ВВ или ее энергетического эквивалента и расстояния от геометрического центра взрыва и не зависят от детонационных параметров ВВ. Этот закон выведен из теории точечного взрыва при следующих допущениях: энергия при взрыве заряда выделяется мгновенно и сосредоточенно, а возникающие в воздухе сферические УВ распространяются без диссипативных потерь, их параметры уменьшаются с увеличением расстояния от центра взрыва только вследствие увеличения поверхности волны и соответствующего уменьшения в ней плотности энергии. На основании этих допущений выведены конкретные виды функций параметров УВ от массы заряда и расстояния:

избыточное давление в УВ

$$\Delta p = a_1 m^{1/3} / R; \quad (2.31)$$

импульс избыточного давления

$$I = a_2 m^{2/3} / R; \quad (2.32)$$

поток энергии на единицу поверхности УВ

$$E = a_3 m / R; \quad (2.33)$$

длительность фазы сжатия

$$\tau_+ = a_4 m^{1/6} / R^{-1/2}; \quad (2.34)$$

длина УВ

$$\lambda = r (0,5 + k \lg R/r), \quad (2.35)$$

где a — размерные коэффициенты; m — масса ВВ, кг; R — расстояние от центра заряда, м; r — радиус заряда, м. Заряды имеют сферическую форму.

В выражениях (2.31) — (2.34) коэффициенты a отражают энергетические эквиваленты единицы массы ВВ. Соответственно они являются индивидуальными характеристиками каждого ВВ. Численно они равны соответствующему параметру волны, измеренному при взрыве 1 кг ВВ на расстоянии 1 м от центра заряда. Если же массу ВВ в приведенных формулах заменить на ее энергетический эквивалент, например на величину $\eta_{\text{взр}} Q_{\text{взр}}$, т. е. на ту часть энергии взрыва, которая переходит в УВ, то коэффициенты a становятся постоянными величинами, не зависящими от вида ВВ. В таком виде формулы часто используют для решения обратной задачи: нахождения показателя $\eta_{\text{взр}}$ и величины идеальной работоспособности ВВ ($A_{и^0}$) по измеренным параметрам УВ.

Часто зависимости выражают через так называемые приведенные величины, например приведенные расстояния $R/m^{1/3} = \bar{R}$. Тогда параметры УВ становятся функциями приведенных расстояний.

Справедливость формул (2.31) и (2.32) была проверена М. А. Садовским для реальных зарядов тротила. Им было установлено, что зависимость для импульса УВ соблюдается с удовлетворительной точностью, а избыточное давление более точно описывается выражением типа полинома

$$\Delta p = \frac{a_1}{R} + \frac{a_2}{R^2} + \frac{a_3}{R^3}. \quad (2.36)$$

Установлено, что коэффициенты a для приповерхностного взрыва из-за взаимодействия УВ с поверхностью земли больше, чем для взрыва зарядов в воздухе. Их значения приведены ниже.

Коэффициент	a_1	a_2	a_3
Взрыв в воздухе	0,84	2,7	7,0
Взрыв на поверхности	1,06	4,3	14,0

При наземном взрыве зарядов тротила коэффициент a_1 в уравнении (2.32) принимается равным 20, для взрыва в воздухе — 14 при размерности m в килограммах и R в метрах.

С помощью формул (2.32) или (2.36) можно определить тротильный эквивалент исследуемого ВВ. На рис. 2.2 приведены кривые изменения давления в УВ в зависимости от приведенного расстояния при взрыве тротила на поверхности земли и в воздухе.

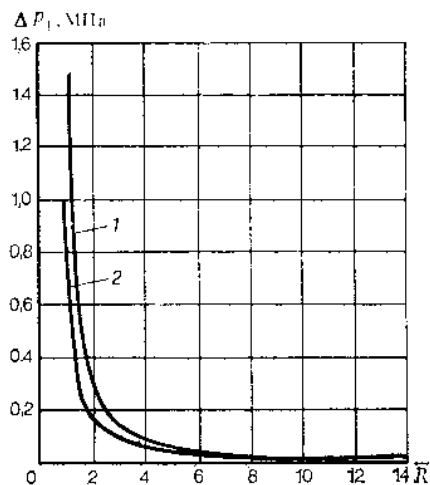


Рис. 2.2. Зависимость давления в воздушной ударной волне от приведенного расстояния:

1 — взрыв на поверхности земли; 2 — взрыв в воздухе

Он исходит из того, что уравнения (2.32) и (2.36) можно преобразовать, придав им вид

$$I = a_{1, \tau} (\alpha_{\tau} m)^{2/3} / R; \quad (2.37)$$

$$\Delta p = a_1 \frac{(\alpha_{\tau} m)^{1/3}}{R} + a_2 \frac{(\alpha_{\tau} m)^{2/3}}{R^2} + a_3 \frac{\alpha_{\tau} m}{R^3}. \quad (2.38)$$

В этом случае для нахождения α_{τ} достаточно измерить на любом произвольном расстоянии и при взрыве любой массы ВВ импульс или избыточное давление в УВ и подставить эти значения в уравнения (2.37) или (2.38). Затем решить эти уравнения относительно α_{τ} .

При экспериментальном определении тротилового эквивалента или idealной работоспособности ВВ через параметры воздушных УВ важно соблюдать следующее правило: измерения должны выполняться на расстояниях, где вступает в действие закон подобия взрывных волн. Дело в том, что в отличие от модели точечного взрыва при взрыве реального заряда ВВ ударная волна полностью формируется, отрывается от ПВ и начинает самостоятельное «существование», т. е. распространяется в среде со снижением поверхностной концентрации энергии, только после завершения процесса расширения ПВ, их полного торможения. И только начиная с этого расстояния от геометрического центра взрыва параметры УВ как функции расстояния и массы заряда определяются законом подобия волн. А до этого такой параметр, как давление в УВ,

Так как согласно определению тротилового эквивалента является отношением масс зарядов, генерирующих УВ одинаковой интенсивности, то, задавшись равенством импульсов УВ на равных расстояниях, получим

$$a_{1, \tau} m_{\tau}^{2/3} = a_{1, x} m_x^{2/3};$$

$$\alpha_{\tau} = \frac{m_{\tau}}{m_x} = \left(\frac{a_{1, x}}{a_{1, \tau}} \right)^{3/2}.$$

Так как для тротила $a_{1, \tau} \approx 20$, то для нахождения тротилового эквивалента исследуемого ВВ достаточно измерить импульс УВ при взрыве сферического заряда этого ВВ массой 1 кг на расстоянии 1 м от центра заряда, и далее найти α_{τ} расчетом.

Имеется другой прием нахождения тротилового эквивалента.

еще связан с давлением детонационной волны. Зона до отрыва УВ от ПВ называется зоной ближнего действия взрыва. Здесь понятие тротилового эквивалента как относительной энергетической характеристики ВВ лишено физического смысла, хотя на практике иногда производят сопоставительные измерения параметров УВ зарядов заданной массы в ближней зоне действия взрыва, чтобы сопоставить силу взрыва данного ВВ с силой взрыва тротила на интересующем расстоянии. В равной мере неправомерно оценивать работоспособность ВВ в ее идеальном выражении по параметрам УВ, измеренным в ближней зоне. Именно нарушение этого правила приводит к противоречивым сведениям о работоспособности ВВ.

Радиус ближней зоны взрыва зависит от кинетики тепловыделения в ПВ. Чем медленнее происходят вторичные экзотермические реакции в ПВ, тем больше радиус ближней зоны. Большая протяженность этой зоны характерна, в частности, для металлосодержащих ВВ (алюмотола, аммоналов и т. п.). Для индивидуальных ВВ радиус ближней зоны составляет примерно десять радиусов заряда. Для металлосодержащих ВВ радиус может зависеть от размера частиц металла. При очень растянутом или порционном выделении тепла при взрыве может быть и такое явление, когда от ПВ отрывается первичная (головная) УВ, а за ней следует вторая волна, а иногда и третья. Таким образом, УВ приобретает многоголовый профиль, но на больших относительных расстояниях (R/r) такая волна постепенно преобразуется в волну обычного профиля.

В отличие от дальней зоны взрыва, где тротилового эквивалента — величина постоянная, не зависящая от расстояния и массы заряда, а также от вида параметра УВ, который измеряется и служит основой для вычисления эквивалента, в ближней зоне величина, идентифицируемая как тротилового эквивалента, становится непостоянной и зависит от расстояния и вида измеряемого параметра УВ (определения по импульсу и давлению отличаются друг от друга).

Величина радиуса ближней зоны взрыва может дать косвенные оценки макрокинетики энерговыделения при взрыве ВВ различного химического состава.

Так как для прессованных ВВ трудно получить заряды сферической формы, то часто при испытаниях их заменяют короткими цилиндрами с отношением высоты заряда к диаметру, равным 1. Но в этом случае необходимо и эталонный заряд тротила изготовить той же геометрической формы и найти для него линейный коэффициент в уравнении (2.32).

В водной среде с некоторым приближением можно также пользоваться законом подобия взрывных волн, но в отличие от воздушной в водной среде появляется заметное пульсирование газового пузыря из ПВ после завершения их первичного расширения.

В результате этого в водную среду посылаются не одна, а последовательно несколько УВ падающей интенсивности. Основная энергия сосредоточена в первой волне, и обычно ею пользуются для различного рода оценок. По исследованиям Р. Коула, изменение избыточного давления в УВ при взрыве в воде тротила описывается выражением

$$\Delta p = 530 (m^{1/3}/R)^{1,13},$$

где m — масса заряда, кг; R — расстояние от центра заряда, м.

Для импульса избыточного давления вид зависимости близок к таковой для воздушной среды, но с иными значениями коэффициентов. При измерениях импульса ограничивают временной интервал записи прибора. В качестве временного масштаба принимают величину θ , в течение которой избыточное давление падает в e раз. Тогда импульс $I = \int_0^{\theta} p dt$, где $\theta = km^{1/3} (m^{1/3}/R)^{\delta}$, $k = 0,075 \div 0,105$, $\delta = 0,25$, $n = 4 \div 7$.

В горных породах и грунтах из-за сильных диссипативных потерь при ударном нагружении закон подобия взрывных волн сильно искажается, хотя сохраняются некоторые общие зависимости параметров волн напряжения от массы заряда и расстояния вида $P = f(m^a, 1/R^b)$, где a и b — показатели степени. Но на эту зависимость накладывает влияние параметров детонационной волны. В ближней зоне взрыва диссипативные потери возрастают с увеличением давления детонации.

3. ДЕТОНАЦИЯ ВВ

3.1. ЯВЛЕНИЕ ДЕТОНАЦИИ. ПАРАМЕТРЫ ДЕТОНАЦИОННОЙ ВОЛНЫ. ОСНОВНЫЕ СООТНОШЕНИЯ

Детонация представляет собой самоподдерживающийся процесс перемещения по ВВ со сверхзвуковой скоростью ударного фронта (скачка давления), сопровождающийся химическим превращением вещества. Химическая реакция возникает в результате адиабатического сжатия и разогрева вещества в ударном фронте. Комплекс из ударного фронта и зоны химической реакции называется *детонационной волной*. Давление на ударном фронте имеет порядок от десятков атмосфер (газы) до сотни тысяч атмосфер (мощные бризантные ВВ). Установившаяся (стационарная) детонационная волна распространяется по ВВ с постоянной скоростью (1—10 км/с). Постоянство параметров детонационной волны объясняется тем, что потери энергии, связанные со сжатием и вовлечением в движение вещества, компенсируются теплом, выделяющимся в ударно-сжатом ВВ при его химическом превращении.

Первую математическую модель детонационной волны в газах, опирающуюся на теорию ударных волн, в виде гидродинамической теории детонации разработали в конце прошлого века одновременно несколько ученых — В. А. Михельсон в России, Д. Л. Чепмен в Англии, Е. Жуге во Франции. Эта модель не рассматривает кинетики (пространственно-временных характеристик) химической реакции в детонационной волне, а представляет ударный фронт в ней формально в виде поверхности разрыва, отделяющей исходное вещество от продуктов его химического превращения. В подвижной системе координат процесс представляется таким образом, что в ударный фронт втекает вещество в исходном состоянии и вытекает из него в виде продуктов своего химического превращения. В этом случае, как и в теории ударных волн, но с учетом энергосодержания при детонации, основные соотношения между начальными и конечными параметрами состояния вещества, а также кинематическими параметрами детонации — скоростью перемещения фронта (скоростью детонации) D и массовой скоростью движения продуктов превращения за фронтом u находятся из законов сохранения массы, количества движения (импульса) и энергии в волне.

Развитие этой теории получила в работах Я. Б. Зельдовича [30], Д. Неймана, В. Дёринга, независимо предложивших модель детонационной волны, учитывающую физическую зону превращения

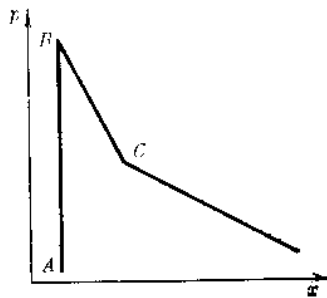


Рис. 3.1. Профиль детонационной волны

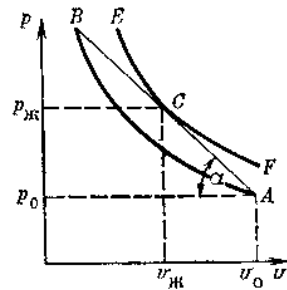


Рис. 3.2. $p-v$ — диаграмма детонационной волны

исходного ВВ в конечные продукты (зону «химпика»). Основные представления об этой модели дают рис. 3.1 и 3.2.

На рис. 3.1 схематично показан профиль детонационной волны в координатах давление — расстояние, на рис. 3.2 — $p-v$ — диаграмма волны.

Согласно данной модели исходное вещество с начальными параметрами $p_0 v_0$ (точка А на рис. 3.2) сжимается в ударном фронте до состояния, отвечающего точке В. В этом состоянии в результате адиабатического сжатия и разогрева в веществе возникает экзотермическая реакция взрывчатого превращения, заканчивающаяся в точке С, называемой точкой Жуге или Чепмена—Жуге и лежащей на адиабате продуктов детонации (адиабате Гюгонно). Процесс превращения сопровождается расширением нагретых газообразных ПД, поэтому давление ПД в точке Жуге $p_{ж}$ примерно в 2 раза ниже, чем в точке В. За точкой Жуге (плоскостью Чепмена — Жуге) происходит дальнейший спад давления в ПД вследствие их расширения (волна разгрузки). Прямую АВ, являющуюся касательной к адиабате Гюгонно в точке Жуге, называют прямой Михельсона.

На рис. 3.1 адиабатическому сжатию вещества отвечает прямая АВ с очень малым наклоном относительно оси абсцисс, что свидетельствует о крайне малом времени сжатия и малой толщине сжатого слоя. Зоне химпика отвечает участок ВС на кривой спада давления, точка излома С отвечает точке Жуге, участок за этой точкой характеризует спад давления в расширяющихся ПД.

Более поздние исследования структур детонационных волн показали, что описанная модель не является универсальной. Детонационный фронт в газах и во многих жидких ВВ не является гладким, в нем наблюдаются поперечные волны, ячеистая структура [23, 68]. Неустойчивость течения, по-видимому, имеет кинетическую природу и объясняется сильной зависимостью скорости химической реакции от меняющихся в волне параметров состояния

вещества. При детонации мощных твердых ВВ не всегда четко фиксируется точка излома (Жуге) на $p-x$ диаграмме. Так, с использованием лазерного интерферометра зафиксированы крайне малые времена химпика в высокоплотном флегматизированном гексогене, составляющие 25 ± 5 нс при максимальном давлении в волне 40 ГПа [60]. Наблюдения и расчеты показывают, что для этих ВВ значительное тепловыделение возможно непосредственно в процессе сжатия, и, следовательно, путь превращения вещества может стать более сложным, чем по линии АВС рис. 3.2. Тем не менее общие зависимости вписываются в гидродинамическую теорию путем пространственно-временного усреднения параметров детонационной волны с неоднородным фронтом [58].

Исходя из гидродинамической модели выпишем основные соотношения для детонационной волны, согласно законам сохранения:

$$\text{массы} \quad \frac{D}{v_0} = \frac{D-u}{v}; \quad (3.1)$$

$$\text{импульса} \quad p_0 D u = p - p_0 = \Delta p; \quad (3.2)$$

$$\text{энергии} \quad \frac{(p+p_0)(v_0-v)}{2} = E_2 - E_1 - Q_{\text{взр}}, \quad (3.3)$$

где E_1 и E_2 — внутренняя энергия ПД соответственно в начальном и конечном состоянии; $Q_{\text{взр}}$ — теплота взрыва; v_0 и p_0 — соответственно удельный объем и давление исходного вещества; p и v — соответственно давление и удельный объем ПД.

Совместное решение уравнений (3.1) и (3.2) дает формулы для расчета кинематических параметров детонации

$$D = v_0 \sqrt{(p-p_0)/(v_0-v)}; \quad (3.4)$$

$$u = \sqrt{(p-p_0)(v_0-v)}. \quad (3.5)$$

Выражение (3.3) является одной из форм записи уравнения ударной адиабаты Гюгонно для ПД.

Для полного решения задачи, т. е. нахождения трех параметров состояния ПД и двух кинематических параметров детонации, к трем уравнениям, вытекающим из законов сохранения массы, импульса и энергии, необходимо добавить еще два независимых уравнения.

Одним из них может быть уравнение состояния ПД, а другим — условие минимизации скорости детонации для установившегося детонационного процесса. Это условие впервые было постулировано основоположниками гидродинамической теории, а позже доказано Я. Б. Зельдовичем [30]. Суть его состоит в следующем. Из всех возможных состояний ПД на адиабате Гюгонно точка Жуге отвечает режиму детонации, происходящему с наименьшей скоростью. Это вытекает непосредственно из уравнения (3.4), так, на $p-v$ диаграмме, исходя из этого уравнения, $D = v_0 \sqrt{tg \alpha}$, а угол наклона касательной α (прямой Михель-

сока) наименьший по сравнению с любой другой прямой, пересекающей адиабату ПД в других точках на этой кривой.

Детонацию с конечным состоянием ПД в точке Жуге принято называть нормальной детонацией или «детонацией Жуге». Другие режимы, распространяющиеся с большей, чем у нормальной, скоростью, называемые «пересжатой» (состояние ПД выше точки Жуге на адиабате) и «недосжатой» (ниже точки Жуге) детонацией, как показал Я. Б. Зельдович, не могут устойчиво распространяться в ВВ без внешней поддержки. Пересжатая детонация трансформируется в нормальную, а недосжатая вообще не может возникнуть при обычном инициировании однородного ВВ, так как при изменении состояния сжатого и реагирующего вещества вдоль скачки сверху вниз полное химическое превращение вещества заканчивается уже в первой точке пересечения с адиабатой продуктов.

Стационарный «недосжатый» режим наблюдается для некоторых смесей с достаточно крупными частицами. В них детонация распространяется по частицам более мощного компонента и со скоростью, свойственной данному компоненту при плотности его кристаллов, и более высокой, чем расчетная скорость детонации, смеси при данной плотности.

Далее Я. Б. Зельдович доказал, что в точке касания, где адиабата ПД совпадает с их изоэнтропой, справедливо положение, постулировавшееся Жуге, что ударный фронт перемещается относительно ПД со скоростью, равной скорости звука в продуктах детонации

$$D = u + c. \quad (3.6)$$

Для взрывчатых газовых смесей, принимая во внимание низкое давление детонации, в качестве уравнения состояния можно воспользоваться уравнением Клапейрона, как для идеальных газов. Тогда, решая систему приведенных выше уравнений и принимая скорость звука в ПД $c = \sqrt{\gamma nRT}$, получим искомые параметры детонации, если известны химический состав газа и его плотность. Для этого по методике, изложенной в разделе 2, находят состав продуктов взрыва, их теплоемкость, теплоту взрыва, температуру ПД и далее искомые параметры по формулам:

$$v = v_0 \gamma / (\gamma + 1); \quad (3.7)$$

$$\rho_{ж} = \frac{2Q(\gamma - 1)}{v_0} = \rho_0 D u = \frac{\rho_0 D^2}{\gamma + 1}; \quad (3.8)$$

$$D = \sqrt{2Q(\gamma - 1)} = \frac{\gamma + 1}{\gamma} \sqrt{\gamma \frac{8310}{M} T_{взр}}; \quad (3.9)$$

$$u = \sqrt{2Q \frac{\gamma - 1}{\gamma + 1}} = \frac{D}{\gamma + 1}, \quad (3.10)$$

где M — средняя молекулярная масса ПВ.

Таблица 3.1

Газовая смесь	T_0, K	T, K	$p_{ж}, MPa$	$D, m/s$	
				Эксперимент	Расчет
$2H_2 + O_2$	283	4230	1,75	2800	2630
$2H_2 + O_2$	373	4253	1,29	2790	2615
$C_2H_2 + 2O_2$	283	5163	2,88	2220	2190
$CH_4 + 2O_2$	283	4353	2,45	1730	1850

В табл. 3.1 приведены расчетные и экспериментальные параметры детонации некоторых смесей горючих газов с кислородом (по Жуге).

Расчет параметров детонации конденсированных ВВ в принципе может быть основан на тех же исходных положениях. Трудности здесь возникают, главным образом, с выбором уравнения состояния для ПД и с определением скорости звука для реальных газов под высоким давлением.

А. Шмидт рекомендовал для расчета параметров детонации конденсированных ВВ использовать уравнение состояния Ван-дер-Ваальса с переменным значением коволюмов ПД, зависящим от плотности ВВ, а сами коволюмы подбирать из опытных данных для хорошо изученных ВВ, решая обратные задачи [8]. В этом случае получим следующие формулы для давления и скорости детонации ВВ:

$$D = \frac{v}{v_0 - \alpha} \frac{1 + \gamma}{\gamma} \sqrt{\gamma \frac{8310}{M} T} = \frac{v_0}{v_0 - \alpha} \sqrt{2Q(\gamma - 1)}; \\ \rho_{ж} = \frac{2Q(1 - \gamma)}{v_0 - \alpha}.$$

При плотности около 1 г/см^3 А. Шмидт рекомендовал принимать для ВВ следующие величины: коволюм ПД равен $0,58 - 0,59 \text{ см}^3/\text{г}$, а при плотности $1,6 - 1,73 \text{ г/см}^3$ — $0,44 - 0,45 \text{ см}^3/\text{г}$.

В современных программах расчета на ЭВМ чаще всего используются уравнение состояния Беккера-Кистяковского-Вильсона (см. подраздел 2.2.1), а при содержании в ПД твердой фазы, например графита или алмаза, дополнительно уравнением состояния для этого твердого вещества, например предложенным Кованом для графита вида

$$p = p(\rho) + a(\rho) T + b(\rho) T^2.$$

Так как точные расчеты нужны, главным образом, при априорной оценке или прогнозировании свойств вновь синтезируемых индивидуальных ВВ или разрабатываемых взрывчатых составов, то в инженерной практике чаще пользуются приближенными ме-

годами расчета или измеряют с достаточной точностью параметры детонации экспериментально (см. раздел 9).

Приближенные методы основаны либо на полуэмпирических уравнениях состояния ПД, либо на корреляционных зависимостях параметров детонации от каких-либо известных свойств ВВ (химического состава и др.), либо на экспериментальном определении одного или нескольких параметров с расчетом остальных.

Среди приближенных методов для расчета параметров детонации высокоплотных мощных ВВ часто используется методика с использованием уравнения состояния ПД в виде политропы $p v^n = \text{const}$, рекомендованная Л. Д. Ландау и К. П. Станюкевичем [61]. Если принять показатель политропы $n=3$, то получим выражения для параметров детонации в конденсированных ВВ такого же вида, что и для газов в виде уравнений (3.7)–(3.10), с одним только отличием: в них показатель адиабаты γ заменен на показатель политропы n . Это справедливо только для высокоплотных ВВ, для которых правомерно само выбранное политропное уравнение состояния, включающее только упругую составляющую давления (см. подраздел 2.2). Кроме того, сделано допущение о постоянном значении показателя политропы. На самом деле истинные значения величины n меняются с плотностью и зависят от химического состава ВВ. До сих пор имеются разноречивые сведения о значениях показателей политропы для разных ВВ, что вызвано различными методами их экспериментального определения. Соответственно приводятся и различные значения давления детонации, рассчитанные по формуле

$$\rho_{ж} = \rho_0 D^2 / (n + 1). \quad (3.11)$$

К. К. Шведов [64, 65] рекомендует при расчетах давления детонации пользоваться следующими значениями n для тротила: при плотности $\rho_0 = 1,59 \div 1,63 \text{ г/см}^3$, $n = 3,25 \div 3,3$. Для гексогена и октогена различные исследователи приводят значения величины n от 2,7 до 3,0.

Менее точные результаты получаются при расчетах скорости детонации по формуле

$$D = \sqrt{2Q_{взр} / (n^2 - 1)}. \quad (3.12)$$

Это видно хотя бы из того, что в ней вопреки экспериментальным определениям скорость детонации не зависит от плотности. Для более точных расчетов в этом случае следует пользоваться не постоянным значением показателя политропы n , а переменным, зависящим от плотности ВВ, $n(\rho_0)$. Либо же в формулу вводить дополнительный множитель, отражающий функцию $D(\rho_0)$.

Таблица 3.2

Вещество	A, км/с	B	$D_{1,0}$, км/с	$D_{1,6}$, км/с
Тротил	1,84	3,20	5,10	6,97
Гексоген	2,40	3,59	6,08	8,03
Гексоген флегматизирующийся	2,12	3,80	—	—
Октоген	2,56	3,48	6,09	8,08
Октоген флегматизирующийся	1,09	4,31	—	—
Тэн	2,25	3,41	5,90	7,85

Большинство исследователей пришли к выводу, что при $\rho_0 \gg 1 \text{ г/см}^3$ D может быть описана линейной зависимостью вида

$$D = A + B(\rho_0) \quad (3.13)$$

или, как это предложил М. А. Кук [37],

$$D_2 = D_1 + M(\rho_2 - \rho_1), \quad (3.14)$$

где D_2 и D_1 — скорость детонации при плотности соответственно ρ_2 и ρ_1 ; M — размерный коэффициент, Кук в качестве усредненного коэффициента M рекомендует величину 3500, И. Н. Айзенштадт — для ВВ общей формулы $C_a H_b N_c O_d$ при $d < a + b/2$ 3000, а при $a + b/2 < d < 2a + b/2$ 3500, при $d > 2a + b/2$ 4000. Это означает, что при увеличении плотности ВВ на $0,1 \text{ г/см}^3$ скорость детонации возрастает на 300–400 м/с. Значения коэффициентов A , B и величин $D_{1,0}$ и $D_{1,6}$ для некоторых веществ приведены в табл. 3.2.

Если нет никаких экспериментальных данных о скорости детонации данного ВВ, то для приближенного расчета скорости при интересующей плотности в формулу (3.14) можно подставить значение D_1 , рассчитанное по формуле (3.12), а в качестве ρ_1 принять максимальную плотность ВВ (плотность монокристалла).

Наиболее точное расчетное значение давления детонации получают по формуле (3.8), $p_{ж} = \rho_0 D u$, подставляя в нее экспериментальные значения ρ_0 , D и u . Последние две величины в одном опыте можно найти электромагнитным способом (см. раздел 9).

Г. А. Авакян предложил методику расчета параметров детонации высокоплотных ВВ с использованием уравнения (2.24). Путем соответствующих преобразований получим

$$D = f(\rho_0) \sqrt{T_x / M}, \quad (3.15)$$

где T_x — температура в детонационной волне.

Если аппроксимировать $f(\rho_0)$ как линейную зависимость и принять показатель политропы $n=3$, то из формулы (3.15) получим

$$D = 643 \sqrt{T_x / M} + k(\rho_0 - 1,6), \quad (3.16)$$

где M — средняя молекулярная масса ПВ.

При $\rho_0 = 1,6$, коэффициент $k = 3600$, а при $\rho_0 > 1,6$ — $k = 4000$.
Температура в детонационной волне

$$T_d = \frac{k_T Q_{\text{взр}}}{c_v} + 290 \text{ К}, \quad (3.17)$$

где k_T — эмпирический коэффициент, равный $0,773 + 7,75 \cdot 10^{-5} Q_{\text{взр}}$.

Известен ряд эмпирических формул, основанных на корреляционных зависимостях параметров детонации от химического состава ВВ, плотности, энтальпии образования ВВ и производных величин.

М. И. Камлет предложил следующие выражения для расчета скорости и давления детонации:

$$D = A(1 + B\rho_0)\psi^{1/2}, \quad (3.18)$$

$$\rho_{\text{ж}} = 15,58\rho_0^2\psi, \quad (3.19)$$

где $A = 1,01$; $B = 1,3$; $\psi = NM^{1/2}Q_{\text{max}}^{1/2}$; N — количество молей газообразных ПВ на 1 кг ВВ; Q_{max} — максимальная теплота взрыва при постоянном давлении, ккал/кг; M — средняя молекулярная масса ПД.

Близкие по форме выражения для скорости и давления детонации предложены в работе [47]:

$$D = 4,2 + 2\varphi\rho_0, \quad (3.20)$$

$$\rho_{\text{ж}} = 40 + 75\varphi\rho_0^2, \quad (3.21)$$

где $\varphi = nQ_{\text{взр}}^{1/2}$; n — число молей газообразных ПВ на 1 г ВВ; $Q_{\text{взр}}$ — детонационная теплота взрыва (ккал/кг), находится по формуле (2.7). Приведенное значение величины φ справедливо для ВВ с полным газообразованием. Если же при взрыве образуется твердый углерод, то $\varphi = n_{\text{эф}}Q_{\text{взр}}^{1/2} = K\rho_{\text{max}}^{1/2}Q_{\text{взр}}^{1/2}$, где ρ_{max} — максимальная плотность ВВ, а

$$k = [0,135a^2/(a+b) + 0,185b^2/(a+b) + 0,4(c+d)]/M,$$

где a , b , c , d — количество атомов соответственно углерода, водорода, азота и кислорода в молекуле ВВ; M — молекулярная масса ВВ.

В той же работе предложено выражение для относительного импульса взрыва (за 100 принят импульс смеси тротила с гексогеном в соотношении 1:1), определяемого обжатием крешеров по методике, предложенной в работе [33]: $I = 37,8 + 36,5\varphi\rho_0$.

В. В. Козмерчук предложил коэффициенты A и B в уравнении (3.13) определять исходя из химического состава ВВ и макси-

мальной теплоты взрыва. Путем корреляционного анализа им были найдены следующие выражения для этих коэффициентов:

$$A = 4,6310 + 4,0027 \cdot 10^{-2} [\text{H}_2\text{O}] - 1,311 \cdot 10^{-1} [\text{CO}_2] + 9,3125 \cdot 10^{-2} [\text{C}] - 4,7005 \cdot 10^{-3} [\text{H}_2\text{O}][\text{C}] + 1,6643 \cdot 10^{-2} [\text{H}_2] - 4,0852 \cdot 10^{-2} Q_{\text{max}}^{1/2};$$

$$B = 8,3939 \cdot 10^{-2} [\text{CO}_2] + 5,3 \cdot 10^{-2} [\text{N}_2] - 1,1189 \cdot 10^{-1} [\text{C}] + 3,5598 \cdot 10^{-3} [\text{CO}_2][\text{C}] + 3,6428 \cdot 10^{-3} [\text{H}_2\text{O}][\text{C}] + 5,861 \cdot 10^{-2} Q_{\text{max}}^{1/2},$$

где обозначения соединений в скобках — концентрация соответствующих продуктов взрыва в грамм-молях на 1 кг ВВ, Q_{max} — в ккал/кг. Состав ПВ отвечает Q_{max} (см. подразд. 2.1).

Предложенная методика нахождения коэффициентов A и B в уравнении (3.13) может быть использована и для расчета параметров детонации смесей, состоящих из нескольких индивидуальных ВВ, например смесей тротила с гексогеном или тэном. Для этого находят коэффициенты A и B для каждого из компонентов и рассчитывают его скорость детонации D_i по уравнению (3.13), подставляя в него плотность смеси. Если $\rho_{\text{см}} > \rho_{\text{max}}$ данного компонента, то в уравнение (3.13) подставляют величину ρ_{max} .

Затем вычисляют среднюю скорость детонации смешанного ВВ $D_{\text{см}}$:

$$D_{\text{см}} = \sqrt{\sum_{i=1}^N (D_i^2 \alpha_i)}. \quad (3.22)$$

Такая модель предполагает независимое разложение каждого из компонентов в детонационной волне и отсутствие взаимодействия между продуктами разложения различных компонентов. Если же предположить, что некоторая часть продуктов разложения в результате диффузии смешивается друг с другом и между ними устанавливается химическое равновесие, то формула (3.22) будет иметь вид

$$D_{\text{см}} = \sqrt{\beta D_m^2 + (1-\beta) \sum_{i=1}^N D_i^2 \alpha_i},$$

где D_m — скорость детонации смеси, рассчитанная по усредненному химическому составу 1 кг смеси ($C_a H_b N_c O_d$); β — массовая доля смешанного ВВ, продукты разложения которой смешиваются в детонационной волне с установлением химического равновесия; α_i — массовая доля компонента в смеси; N — количество компонентов.

В. В. Козмерчук рекомендует, исходя из расчетно-экспериментальных данных, приведенных в работе [41] для смесей тротила с аммиачной селитрой, принимать $\beta = 0,12$.

Скорость и другие параметры детонации могут быть выведены и на основании корреляционного анализа как функции химической структуры ВВ, его плотности и энтальпии образования [43].

3.2. КРИТИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ДЕТОНАЦИИ. ИДЕАЛЬНЫЙ И НЕИДЕАЛЬНЫЙ РЕЖИМЫ 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 — ее 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 за время химической реакции (участок BC на кривой рис. 3.2) 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 проникания волны разрежения обратно пропорциональна радиусу заряда, то относительные потери энергии в детонационной волне должны уменьшаться с увеличением радиуса заряда (рис. 3.3). Исходя из этих положений, Ю. Б. Харитон сформулировал свой принцип критического условия распространения детонации: детонация может устойчиво распространяться по заряду, если продолжительность реакции в волне τ меньше времени разброса вещества в радиальном направлении θ .

Исходя из этого условия, можно найти такой минимальный диаметр заряда $d_{кр}$, при котором еще возможно устойчивое распространение детонации. Этот диаметр называется критическим диаметром детонации. Его величину можно найти из условий устойчивости:

$$\tau = a/(D - u); \quad (3.23)$$

$$\theta = d_3/(2\omega); \quad (3.24)$$

$$d_{кр} = 2\omega\tau, \quad (3.25)$$

где a — ширина реакции; d_3 — диаметр заряда; ω — скорость волны разрежения, равная скорости звука в расширяющихся ПД; u — массовая скорость. Если принять $u = 1/4 D$ и $\omega = 1/2 D$, то $d_{кр} = 3/4 a$, т. е. близок по величине к ширине зоны химической реакции.

При $d_3 > d_{кр}$ потери энергии в детонационной волне должны уменьшаться, а параметры волны соответственно возрастать,

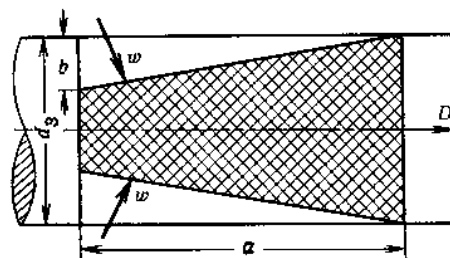


Рис. 3.3. Зона химической реакции в детонационной волне:

D — скорость детонации; ω — скорость волны разрежения; a — ширина зоны реакции; b — глубина проникания волны разрежения; d_3 — диаметр заряда

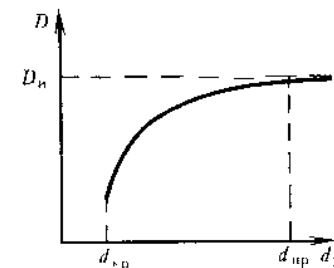


Рис. 3.4. Зависимость скорости детонации от диаметра заряда (D_n — идеальная скорость детонации)

асимптотически приближаясь к своему максимуму. Детонацию с максимальными для данного ВВ и данной плотности параметрами называют идеальной детонацией, или детонацией в идеальном режиме. Диаметр заряда, при котором параметры детонации близки к максимальным, как это показано на рис. 3.4, называют предельным диаметром детонации $d_{пр}$. Детонацию, протекающую в зарядах с $d_{кр} < d_3 < d_{пр}$, называют неидеальной, или детонацией в неидеальном режиме.

Для оценки параметров неидеальной детонации Л. В. Дубновым предложена упрощенная схема, основанная на пропорциональности тепловых потерь массе m_p или объему V_p вещества в зоне реакции, охваченной волной разрежения (на рис. 3.3 заштрихованная область). 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 согласно формуле (3.12)

$$D \sim \sqrt{2Q_э(n^2 - 1)}.$$

Согласно принятой схеме

$$\frac{Q_э}{Q_{взр}} = \frac{V_3 - V_p}{V_3} = \eta_d, \quad (3.26)$$

где $Q_{взр}$ — полная расчетная теплота взрыва, соответствующая идеальной скорости детонации D_n ; V_3 — объем заряда.

Скорость детонации

$$D \cong D_n \sqrt{\eta_d}. \quad (3.27)$$

Подставив значения объемов в уравнение (3.26), получим

$$\eta_d = 1 - \frac{2b}{d_3} + \frac{1}{3} \frac{4b^2}{d_3^2}. \quad (3.28)$$

Уравнение (3.28) справедливо при $b \leq d_3/2$. Далее принимаем

$$b = \omega\tau = \omega \frac{a}{D - u}. \quad (3.29)$$

Но так как ω и u пропорциональны скорости детонации, то в общем виде выражение (3.29) можно представить как

$$b = ka,$$

где $k = 2/3$ при $\omega = 1/2 D$ и $u = 1/4 D$.

Подставив значение b в выражение (3.28), получим

$$\eta_d = 1 - \frac{2ak}{d_3} + \frac{1}{3} \left(\frac{2a}{d_3} \right)^2 k^2,$$

$$D = D_u \sqrt{1 - \frac{2ak}{d_3} + \frac{1}{3} \left(\frac{2a}{d_3} \right)^2 k^2}.$$

Разложив подкоренное выражение в ряд Тейлора и взяв его первые два члена, получим достаточно простую и подтверждаемую экспериментом зависимость между скоростью неидеальной детонации, шириной зоны реакции и диаметром заряда

$$D = D_u (1 - a/d_3). \quad (3.30)$$

К аналогичным видам зависимости, но иными путями пришли Л. Рот [$D = D_u (1 - 4ka/d_3)$], Г. Эйринг, Г. Джонс, Г. Г. Ремпель [$a = 3/4 d_3 (1 - D^2/D_u^2)$].

Иная модель критического диаметра для твердых неоднородных ВВ предложена К. М. Михайлюком и В. С. Трофимовым. Она 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.

D_u и $D_{кр}$ при заданной плотности ВВ (и постоянстве состава ПВ) являются величинами постоянными. Напротив, $d_{пр}$ и $d_{кр}$ не могут рассматриваться независимо от среды, в которой взрывается ВВ, ибо сопротивление среды радиальному разлету ПВ определяет время этого разлета и соответственно глубину проникания волны разрежения в зону реакции. При этом не рассматриваются переходные режимы детонации, способные в некото-

рых условиях устойчиво распространяться с дозвуковой, околозвуковой или сверхзвуковой скоростью, но меньшей $D_{кр}$.

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:

$$\Delta d = 2\Delta\rho_m/\rho_0,$$

где Δ — толщина оболочки; ρ_m — плотность материала оболочки. Г. Эйринг предложил следующее соотношение, учитывающее массу оболочки:

$$\frac{D}{D_u} = 1 - 2,17 \frac{\rho_0 a^2}{g_m d_3},$$

где g_m — масса оболочки, приходящейся на единицу ее площади.

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 величину $d_{кр}$ и $d_{пр}$.

В пластичных, легко деформируемых грунтах (глинистых и др.) критический диаметр 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 индивидуальных ВВ с увеличением плотности величина $d_{кр}$ уменьшается (рис. 3.5) вплоть до области, близкой к плотности монокристалла, где, как показал А. Я. Апин, может наблюдаться некоторое увеличение $d_{кр}$. Подобный вид зависимости объясняется тем, что с увеличением плотности ВВ увеличивается давление в детонационной волне, соответственно ускоряется химическая реакция, уменьшаются время реакции и ширина зоны. Некоторые данные о параметрах детонации индивидуальных ВВ различной плотности в зарядах диаметром 40 мм, определенные на электромагнитной установке, приведены в табл. 3.3 [23]. Влияние диаметра заряда на параметры детонации литого ($\rho_0 = 1,6 \text{ г/см}^3$)

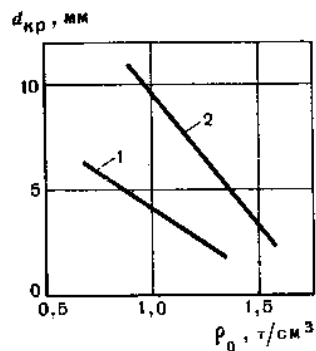


Рис. 3.5. Зависимость критического диаметра заряда тротила от плотности при размерах частиц:
1 — 0,01—0,05 мм; 2 — 0,07—0,2 мм

и порошкообразного ($\rho_0=1$ г/см³, $\sigma=1$ мм) тротила приведено в табл. 3.4 [23].

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.

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:

$$d_{кр} = aS/(1 + bS),$$

Таблица 3.3

Начальная плотность, г/см ³	Скорость детонации, км/с	Массовая скорость, км/с	Давление в точке Жуге, ГПа	Плотность в точке Жуге, г/см ³	Показатель политропы	Время реакции, мкс	Ширина зоны реакции, 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	2,00	26,0	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
Тэн флегматизированный							
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 3.4

Диаметр заряда, мм	Скорость детонации, км/с	Массовая скорость, км/с	Давление в точке Жуге, ГПа	Плотность в точке Жуге, г/см ³	Показатель политропы	Время реакции, мкс	Ширина зоны реакции, мм
Тротил 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	6,7	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
Тротил 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

где a и b — коэффициенты; S — характерный линейный размер частицы. В качестве примера можно указать, что для тротила крупной фракции при насыпной плотности $d_{кр}=20$ мм, а для очень мелкой $d_{кр}=10$ мм.

Критический диаметр уменьшается с увеличением реакционной способности ВВ, которая зависит от природы вещества, его физического состояния — размеров частиц, пористости (плотности) заряда, для смесевых ВВ — от равномерности смешивания. Замечено, что $d_{кр}$ уменьшается с увеличением теплоты взрыва и температуры детонации.

Критические диаметры детонации (в мм) в стеклянных трубках для некоторых веществ при их плотности около 1,0 г/см³ и размере частиц 0,05—0,20 мм приведены ниже.

Азид свинца	0,01—0,02
Тэн	1,0—1,5
Гексоген	1,0—1,5
Тротил	8—10
Нитроглицерин	1—2
Аммонит 6ЖВ	10—12

Для жидких и газообразных ВВ имеются другие объяснения критических условий распространения детонации [23, 59]. Они основываются на механизме срыва реакции на стенке. Соответственно $d_{кр}$ определяется не временем собственно реакции в детонационной волне, а временем индукции этой реакции, развивающейся по законам теплового взрыва. При диаметре меньше критического теплового взрыва не происходит. Такой механизм позволяет объяснить очень малый диапазон между $d_{кр}$ и $d_{пр}$ для жидких ВВ.

Механизм реакции взрывчатого превращения вещества в детонационной волне оказывает существенное влияние на критические

размеры зарядов, условия возбуждения и распространения детонации. Можно выделить два характерных режима детонационного превращения.

Первый режим характерен для физически однородных, или гомогенных ВВ, например, жидких ВВ или монокристаллов. По А. Н. Дремину, химическая реакция в детонационной волне в этих системах происходит в форме теплового взрыва за ударным фронтом. Характерным для данного режима является то, что основное время падает на период индукции (вспышки), или подготовки вещества к реакции, а собственно 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 $d_{пр}$. Последнее объясняется тем, что за малый период собственно химической реакции образующиеся газы не успевают значительно расшириться и, следовательно, потери вследствие влияния боковой волны разрежения невелики. Поэтому поперечный размер заряда при $d_0 > d_{кр}$ мало влияет на параметры детонации.

Второй режим характерен для насыпных ВВ, имеющих значительную пористость. Здесь реакция начинается в «горячих точках», например, в результате адиабатического сжатия и разогрева воздушных включений («пузырьковый» механизм), схлопывания пор, поверхностного трения частиц при смещениях в процессе ударного сжатия, вязкого трения при течении вещества и т. п. Из возникающих очагов реакция в форме горения распространяется сначала по поверхности, а затем в глубь частиц (зерен) вещества. Такой механизм принято называть механизмом взрывного горения в детонационной волне. Представления о нем впервые были сформулированы А. Я. Апиным.

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, $p_{кр}$ возбуждения детонации в порошкообразном тротиле составляет 0,7—0,8 ГПа, а в нитроглицерине 12 ГПа. Реакция, сопровождаемая газообразованием, начинается непосредственно за ударным фронтом, протекает сравнительно медленно в виде послойного 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 $d_0 < d_{пр}$.

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 увеличением пористости заряда, максимум на кривой $\bar{D}(p_0)$ для некоторых ВВ и другие явления. Вме-

сте с тем некоторые явления на первый взгляд противоречат этой теории. Одно из них состоит в том, что на диаграмме p — t 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 времен связано с растрескиванием крупных зерен при горении в детонационной волне, сопровождающимся увеличением поверхности горения. Кроме того, порошки в детонационной волне должны уплотняться и по этой причине первоначальные размеры не должны влиять на процесс детонации. Необратимое уплотнение порошков в ударных волнах подтверждается наблюдениями В. А. Веретенникова. О явлениях 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 двухстадийным процессом: первая стадия — гомогенизация вещества, вторая — ударное сжатие сплошного вещества. Другое объяснение (уплотнение порошков) менее очевидно, 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 могут быть промежуточные, характерные, например, для литых или прессованных зарядов с малой пористостью. При этом, чем больше отношение периода индукции реакции к времени собственно реакции, тем ближе процесс отвечает тепловому взрыву, т. е. режиму детонации однородных ВВ.

По влиянию диаметра заряда на скорость детонации в неидеальном режиме прессованные и литые ВВ занимают промежуточное положение между жидкими и порошкообразными ВВ.

Таким образом, $d_{кр}$ во многом зависит от структуры заряда, наличия и плотности различного рода неоднородностей (пор, пузырьков в жидкостях и др.), служащих очагами разложения и определяющих начальную скорость разложения вещества за ударным фронтом.

3.3. ВОЗБУЖДЕНИЕ ДЕТОНАЦИИ

В принципе возбуждение детонации в ВВ возможно любым внешним воздействием достаточной интенсивности, вызывающим быструю химическую реакцию в веществе и сопровождающуюся возникновением в нем незатухающей ударной волны. Однако временные и масштабные параметры развития детонации могут быть

различными в зависимости от вида и интенсивности воздействия, внешних условий, массы и геометрии заряда ВВ, физико-химических свойств самих ВВ. Так, простые виды воздействия, такие как 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, например при поджигании, нагреве или интенсивном ударе, однако 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. (см. раздел 5).

При механических формах воздействия механическая энергия преобразуется в тепловую, что приводит к разогреву вещества в зоне нагружения.

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, например искровым разрядом, ударом быстро летящего тела (пластины) и др.

Механизм инициирования детонации в ВВ при ударно-волновом воздействии схематически можно описать следующим образом.

Первой стадией воздействия ударных волн на ВВ является адиабатическое сжатие и разогрев некоторого слоя вещества до температуры самовоспламенения. Второй стадией является формирование ударного фронта самоподдерживающейся детонации. В принципе характер воспламенения может быть сплошным (гомогенным) и очаговым. Но первый ввиду малой сжимаемости конденсированных веществ требует огромных давлений — порядка сотен тысяч атмосфер, второй — на 1—2 порядка меньших. На это впервые указал Ю. Б. Харитон. Поэтому для газов гомогенный механизм возбуждения детонации является обычным, а для конденсированных ВВ в практических условиях наиболее распространены являются очаговый механизм. Для его реализации заряд ВВ должен иметь неоднородности той или иной природы и с достаточной пространственной плотностью, чтобы совокупность возникающих очагов разогрева («горячих точек») в своем развитии обеспечивала создание ударного фронта. Наличие таких очагов при динамическом нагружении экспериментально обнаружено в ряде работ [7].

В качестве неоднородностей могут быть поры и полости в зарядах твердых ВВ, различные инородные включения, пузырьки воздуха или паров в жидких ВВ. Не исключена активная роль дефектов кристаллов в возникновении очагов воспламенения. При этом диссипация механической энергии, приложенной к ВВ, может проявляться в различных механизмах разогрева: за счет вязкого течения вещества, сухого трения при сдвиге, сжатии пузырьков газов, схлопывания полостей и др.

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 $T_{всп}$, которая находится в сравнительно слабой зависимости от давления. 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, т. е. чтобы время сжатия вещества в волне было больше периода задержки вспышки. Если же зона реакции до вспышки будет захвачена волной разгрузки, то вспышка может не реализоваться. Речь идет о критических параметрах волны в веществе. При необходимости они могут быть пересчитаны на параметры падающей волны, для чего необходимо знать ударную сжимаемость среды, в которой распространяется волна до встречи с ВВ, и самого ВВ.

Второе условие можно выразить через импульс ударной волны:

$$I_{кр} = \int_0^{\tau} p_{кр} dt.$$

Итак, инициирующая способность ударных волн определяется давлением на ее фронте и длительностью фазы сжатия τ . 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 ВВ (см. раздел 9). В качестве критерия часто используются величины критического давления инициирующей волны $p_{кр}$ при постоянной длительности ее фазы сжатия, определяемой, например, массой инициирующего заряда или метаемой пластины. Значения $p_{кр}$ для некоторых веществ, по данным А. Н. Афанасенкова, приведены ниже.

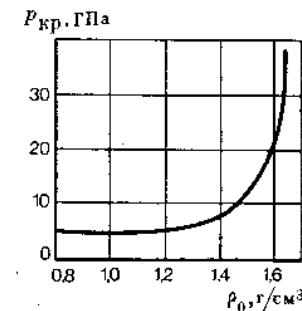


Рис. 3.6. Зависимость критического давления инициирования от плотности заряда (для тротила)

Вещество	Плотность, г/см ³	$\rho_{кр}$, ГПа
Тротил	1,6	1,96
Тротил	1,34	0,77
Гексоген	1,74	1,76
Тетрил	1,7	2,55
Аммонит ПЖВ-20	1,34	0,7
Нитроэфирсодержащее ПВВ	1,34	0,56

С увеличением плотности ВВ $\rho_{кр}$ возрастает (рис. 3.6).

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 ее суммарный импульс фазы сжатия. Минимальную массу инициирующего ВВ, обеспечивающую возбуждение детонации в испытываемом ВВ, часто называют *минимальным инициирующим импульсом* и выражают в граммах. Для большинства индивидуальных и тонкодисперсных смесевых ВВ при насыпной плотности минимальный инициирующий импульс составляет от 0,1 до 0,2 г гремучей ртути. Для низкочувствительных гранулированных и водосодержащих промышленных ВВ эта величина на 2—3 порядка выше.

А. И. Романовым предложен приближенный метод расчета минимальных размеров детонаторов. Он основан на предположении, что энергия инициирующей волны должна быть не меньше, чем минимальная энергия самораспространяющейся детонационной волны в возбуждаемом ВВ, т. е. энергии детонационной волны при $d_{кр}$. Исходя из этого предположения было получено выражение

$$d_6 = d_{кр} \rho_6^{1/3} D_{кр}^{2/3} / (\rho^{1/3} D_6^{2/3}), \quad (3.31)$$

где d_6 , ρ_6 , D_6 — соответственно минимальный диаметр, плотность и скорость детонации патрона-боевика; ρ_0 и $D_{кр}$ — соответственно плотность и скорость детонации инициируемого ВВ при его критическом диаметре.

Выражение (3.31) справедливо при соотношении $h_6/d_6 > 2,25$, где h_6 — высота шашки-детонатора. При $h_6/d_6 = 1,5$ полученную величину необходимо помножить на поправочный коэффициент 1,02.

Экспериментальные определения d_6 удовлетворительно совпадают с расчетными; расхождение не превышает 14%, а в некоторых случаях совпадение еще большее.

Как и $\rho_{кр}$, минимальный инициирующий импульс возрастает с увеличением плотности ВВ.

3.4. ОСОБЕННОСТИ ДЕТОНАЦИИ СМЕСЕВЫХ ПРОМЫШЛЕННЫХ ВВ

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. В них могут содержаться и высокоактивные индивидуальные ВВ, разлагающиеся в детонационной волне с большой скоростью (нитроглицерин, гексоген, тэн и др.), и менее активные, но с сильно выраженными взрывчатыми свойствами вещества типа тротила; вещества со слабо выраженными взрывчатыми свойствами — аммиачная селитра, динитронафталин и другие, разлагающиеся при детонации со скоростью, на порядок меньшей, чем мощные индивидуальные ВВ; горючие материалы, не обладающие взрывчатыми свойствами (алюминий, древесная мука, парафин и др.); и, наконец, совершенно инертные, не принимающие участия в химических реакциях при взрыве и могущие претерпевать лишь фазовые переходы вещества, такие как минеральные соли — пламегасители, вода и другие. С этой точки зрения промышленные ВВ являются и кинетически неоднородными системами.

В отличие от индивидуальных ВВ или их смесей с близкими кинетическими характеристиками компонентов, для которых свойствен преимущественно одностадийный переход исходного вещества в ПВ, химические реакции при взрыве промышленных смесевых ВВ происходят в несколько стадий. Типичной для них 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. (вторичные реакции).

Взрывчатое превращение индивидуальных ВВ, строго говоря, также не является одностадийным. Оно может быть достаточно сложным, начинается с разрыва наиболее слабых связей в молекуле, разрушения ее на «осколки», которые взаимодействуют между собой с образованием новых связей и конечных валентно-насыщенных продуктов. Но эти процессы происходят крайне быстро и мало влияют на общую кинетику реакции при взрыве.

Многостадийность приводит к усилению по сравнению с индивидуальными порошковыми ВВ зависимости критических условий распространения ($d_{кр}$, 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 соотношения между размерами частиц разных компонентов.

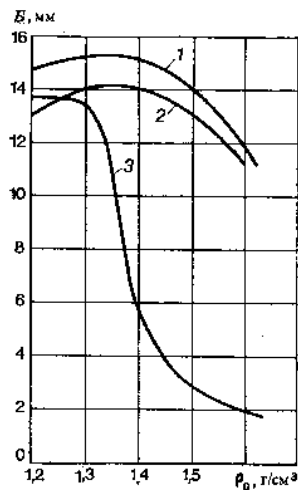
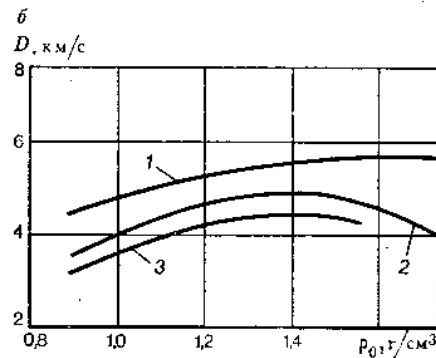
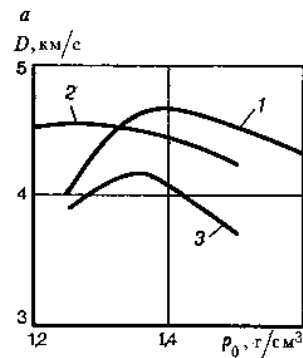


Рис. 3.7. Зависимость скорости детонации D от плотности ВВ ρ_0 :

a — 1 — нитроэфирсодержащее ВВ IV класса; 2 — предохранительный аммонит IV класса; 3 — нитроэфирсодержащее ВВ III класса; b — предохранительный аммонит IV класса в зарядах разряженного диаметра: 1 — 100 мм; 2 — 40 мм; 3 — 20 мм

Рис. 3.8. Зависимость брызгантности B от плотности ВВ ρ_0 :

1 — нитроэфирсодержащее ВВ III класса; 2 — нитроэфирсодержащее ВВ IV класса; 3 — предохранительный аммонит IV класса

На детонационную способность промышленных ВВ может влиять равномерность смешивания компонентов. Сильное влияние размеров частиц и равномерности смешивания 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, смешивания 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; как правило, большой интервал между $d_{кр}$ и $d_{пр}$; сильная зависимость этих характеристик от технологии изготовления; экстремальная зависимость скорости детонации (рис. 3.7) или брызгантности (рис. 3.8) от плотности заряда при $d_3 < d_{пр}$ и ряд других.

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 закономерностей, вытекающих из гидродинамической теории. Кроме того, увеличивается скорость сгорания частиц, подчиняющаяся закону горения: $u = a + bp^v$. 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 брызгантности 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 $\rho_{кр}$.

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. Они меняются с изменением физических характеристик ВВ (размеров частиц, равномерности распределения частиц компонентов в массе вещества и др.), поперечных размеров зарядов; определяются наличием оболочки заряда и ее свойствами, что связано с механизмом потерь энергии в детонационной волне (см. подраздел 3.2).

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 или толщины оболочки удлиняется время проникания волны разрежения в заряд. Соответственно точка максимума на кривой $D = f(\rho_0)$ сдвигается вправо, в область более высоких плотностей. 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.

Таблица 3.5

Плотность ВВ, г/см ³	$d_{кр}$, мм	D , км/с	Минимальный инициирующий импульс, г гремучей ртуть
Аммонит ПЖВ-20			
1,2	11	2,6	0,23
1,3	13	3,5	0,5
1,4	20	3,94	1,5
1,5	22	4,3	1,5
1,6	28	4,35	1,5
Предохранительное нитроэфиросодержащее ВВ			
1,2	5	—	0,17
1,3	10	2,51	0,17
1,4	14	2,48	0,19
1,5	17	3	0,3
1,6	21,5	3,1	0,4

С увеличением содержания сенсibilизатора в составе, например тротила в аммоните, точка максимума сдвигается вправо при меньших диаметрах заряда.

По наблюдениям В. К. Боболева, уже при содержании 50 % 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, хотя функция в отличие от индивидуальных ВВ может быть и нелинейной: вначале прирост скорости детонации с увеличением плотности больше, чем в области высоких плотностей. На линейном участке он примерно в 2 раза меньше, чем для индивидуальных ВВ, и составляет 150—200 м/с на 0,1 г/см³.

В отличие от индивидуальных ВВ с увеличением плотности смесевых ВВ $d_{кр}$ и $d_{пр}$ увеличиваются. Влияние плотности на $d_{кр}$ и минимальный инициирующий импульс может быть проиллюстрировано на примере предохранительных ВВ (табл. 3.5).

Сильное влияние на $d_{кр}$ оказывает размер частиц компонентов. Для аммонита грубого измельчения влияние степени измельчения тротила несколько сильнее, чем селитры (табл. 3.6). Для тонких смесей влияние измельчения обоих компонентов равнозначно.

Таблица 3.6

Степень измельчения компонентов, мкм		Начальная плотность заряда, г/см ³	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

Рис. 3.9. Зависимость скорости детонации гранулированных и водосодержащих ВВ от диаметра заряда:

1 — гранулит АС-4; 2 — граммонит 79/21; 3 — аммонит 6ЖВ; 4 — граммонит 30/70; 5 — гранулотол; 6 — акватол с 35 % тротила (в скважине)

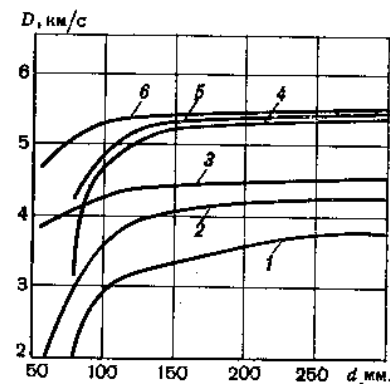


Таблица 3.7

ВВ	Скорость детонации, км/с		Критический диаметр, мм	
	сухих	водосодержащих	сухих	водосодержащих
Гранулотол	4,6	5,6	32—34	44—48
Граммониты:				
30/70	4,35	5,1	—	—
50/50	4,15	4,7	38—42	52—54

Примечание. Опыты по измерению скорости детонации и критического диаметра выполнялись в стеклянных трубах. При определении скорости диаметр трубы 140 мм, толщина стенок 5 мм, размер гранул 3—5 мм.

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 М на пористой селитре составляет 60—70 мм, а в стальной трубе — 20—25 мм; открытого заряда того же ВВ на непористой гранулированной селитре составляет 120—150 мм, а в стальной трубе — 30—35 мм.

Для твердых промышленных ВВ характерен большой разрыв между величинами $d_{кр}$ и $d_{пр}$, их отношение может достигать 10. Так, например, $d_{кр}$ тонкодисперсных аммонитов в открытых зарядах при рабочей плотности составляет 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, а максимальная скорость детонации фиксируется в зарядах диаметром более 200—300 мм (рис. 3.9). В прочных оболочках этот разрыв сужается.

Водосодержащие ВВ и гранулированные ВВ, взрывающиеся в водной среде, по некоторым свойствам приближаются к жидким ВВ: малый интервал между величинами $d_{кр}$ и $d_{пр}$, D и $D_{л}$, высокое критическое давление инициирования детонации $p_{кр}$. Вместе с тем вследствие значительной неоднородности водосодержащих ВВ по структуре детонационной волны отличаются от жидких ВВ. По некоторым признакам они приближаются к литым или прессованным ВВ. При водоуполнении скорость детонации гранулолита и граммонитов повышается (табл. 3.7), а критический диаметр увеличивается. С уменьшением размеров гранул $d_{кр}$ для сухих ВВ уменьшается. Так, например, для гранулолита при уменьшении размера гранул до 2 мм $d_{кр}$ уменьшается до 20 мм. В водоуполненном 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 инициирования, т. е. в глубине заряда. Записи профиля детонационной волны в водосодержащих гранулированных ВВ на электромагнитной установке показывают отчетливую фиксацию химического пика. Величины τ и a для ВВ в водоуполненном состоянии значительно меньше, чем 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 возрастать в открытых зарядах с увеличением их диаметра до 300 мм (см. рис. 3.9), причем с увеличением содержания тротила $d_{пр}$ уменьшается. Скорость детонации открытых зарядов гранулитов возрастает при увеличении диаметра зарядов свыше 300 мм. Водосодержащие 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 выполнил И. Т. Колесниченко. В табл. 3.8 приведены результаты измерения скорости детонации в различных средах. Испытания в стальной трубе полностью моделируют взрывание в крепком известняке в шпурах одинакового 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 не достигается идеальный режим детонации гранулированных ВВ. Для водосодержащих ВВ различия скоростей детонации при взрывании в трубе и скважине

Таблица 3.8

ВВ	Скорость детонации, км/с				Открытый заряд $d = 150$ мм
	В стальной трубе с толщиной стенок 3 мм	В шпурах $d = 50$ мм		В скважинах $d = 150$ мм (крепкий известняк)	
		в крепком известняке	в мягком глинистом грунте		
Граммониты:					
79/21	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	2,98	—	—
Игданит	—	—	—	3,76	1,54
Гранулолит водосодержащий	5,28	5,3	—	5,39	—
Аммонит 6ЖВ	4,45	4,5	4,43	4,5	4,42

меньше. Аммониты детонируют в трубе диаметром 50 мм в идеальном режиме.

В мягких грунтах гранулированные ВВ детонируют с меньшей скоростью, чем в крепких горных породах; водосодержащие ВВ при недостаточном диаметре скважины могут давать отказы; аммониты, имеющие малый критический диаметр, детонируют примерно с одинаковой, близкой к идеальной скорости в шпурах диаметром 50 мм, как в скальных породах, так и в грунтах.

Из данных табл. 3.7 и 3.8, а также из рис. 3.9 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 взрывании этих ВВ в шпурах скорость не достигает максимума, т. е. детонация протекает не в идеальном режиме. Параметры детонационной волны для ряда промышленных ВВ определены в ИХФ АН СССР на электромагнитной установке и приведены в табл. 3.9 [67].

Различие параметров детонации ВВ, полученных разными исследователями или в разное время для одних и тех же промышленных ВВ, объясняется, возможно, неостоятельностью свойств самих ВВ, характерным для смесевых, особенно аммиачно-селитренных смесей. Несмотря на это, прослеживаются некоторые общие закономерности: время реакции τ в волне уменьшается с увеличением плотности заряда, как у индивидуальных ВВ. При изменении диаметра заряда одинаковой плотности заметного изменения величины τ не наблюдается. При больших плотностях ВВ ($1,7$ г/см³) получаются аномально большие значения показателя колитропы (4—5) для гранулированных ВВ, при насыпных плотностях 0,9—1,0 — очень малые значения (менее 2). Абсолютные

Таблица 3.9

Плотность заряда, г/см ³	Диаметр заряда, мм	Скорость детонации, км/с	Массовая скорость, км/с	Давление в точке Жуге, ГПа	Показатель политроны	Время реакции, мкс	Ширина зоны реакции, мм
Аммонит ПЖВ-20							
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
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	8,50	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	10,5	3,9	0,37	—
Аммонит 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	—	—
1,0	120	4,9	1,7	8,5	1,88	—	—
1,45	120	5,7	1,27	10,5	3,55	—	—
1,7	120	5,65	1,27	12,3	3,52	—	—
Граммонит 79/21							
1,0	100	4,3	1,55	6,8	1,8	—	—
Граулит АС-8							
1,0	100	4,1	1,6	6,7	1,6	—	—
Аммонит скальный № 1							
0,95	100	5,11	1,8	8,9	1,8	—	—
Аммонал							
0,92	100	4,6	1,68	7,3	1,7	—	—

значения ширины зоны и времени реакции порошкообразных смесевых ВВ, в том числе предохранительных, близки к тем же величинам порошкообразного тротила.

Для аммонитов отмечается сравнительно малое увеличение скорости детонации с увеличением плотности ВВ, особенно в области высоких плотностей. Для аммонита ПЖВ-20 с увеличением плотности на 0,1 г/см³ скорость в среднем возросла на 140 м/с, для аммонита 6ЖВ в интервале плотностей 1,0—1,45 г/см³ — на 180 м/с.

Таблица 3.10

ВВ	Давление детонации, ГПа	Давление на границе раздела ВВ — порода, ГПа					Коэффициенты ударной адиабаты ПД		
		Дунит	Гранит	Базальт	Известняк	Глинистый сланец	a	b	c
Аммонит 6ЖВ	8,5	14,9	12,2	12,5	11,4	9,2	43	2	0,8
Граммонит 79/21	6,8	12,3	10,4	10,0	9,3	7,5	40	1,5	0,8
Граулит АС-8	6,7	12,3	10,4	10,0	9,3	7,5	38	2,5	0,8
Скальный аммонит № 1	8,9	14,1	12,0	11,8	10,9	8,9	42	2	0,8
Гранулол водосодержащий	11,5	16,8	13,5	13,1	12,0	9,2	72	2	2

Для расчета параметров ударных волн, созданных детонацией зарядов ВВ на границе раздела с различными средами, необходимо, кроме давления детонации, знать ударную адиабату 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 вида $p = A(\rho_0/\rho_1)^n$. В координатах p — u ударную адиабату ПД можно записать в виде полинома

$$p = au + bu^2 + cu^3. \quad (3.32)$$

Значения коэффициентов, a , b и c в уравнении (3.32) и давления на границе раздела ВВ — горная порода приведены в табл. 3.10.

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 Чемпена — 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 $d_{пр}$ и $d_{пр}$), чем для индивидуальных ВВ. К такого рода смесевым системам, как показывают измерения, можно отнести тонкодисперсные аммониты, которые на профиле массовой скорости в детонационной волне, получаемой на электромагнитной установке, имеют достаточно четко обозначенный излом, отвечающий плоскости Чемпена — Жуге. Поэтому для них при расчете параметров детонации можно пользоваться величиной полной теплоты взрыва, складывающейся из теплот разложения нитросоединения (тротила и др.) 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 удается 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 являются до настоящего времени одним из наименее разработанных разделов теории ВВ. Отсюда сложность и недостаточная достоверность расчетов.

В детонационной волне смесевых ВВ возможна целая гамма ситуаций. В зависимости от кинетических характеристик компонентов, их количественного соотношения в составе, размера частиц, пористости заряда, диаметра заряда и ряда других факторов могут по-разному протекать химические и физические процессы в детонационной волне.

Если скорости разложения компонентов, определяемые их кинетическими константами (энергией активации реакции распада) и размером частиц, более или менее близки, 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. При этом регулированием соотношения размеров частиц компонентов в известных пределах можно сближать времена полного разложения компонентов с различными кинетическими характеристиками, т. е. как бы увеличивать степень «кинетической однородности» смеси.

Если в кинетическом отношении смесь существенно неоднородна, то в детонационной волне реализуется лишь часть потенциальной энергии ВВ и детонация распространяется с пониженными параметрами (скоростью и др.). В пределе детонация может поддерживаться лишь теплотой разложения одного компонента, если его концентрация достаточна для стационарного распространения детонации, а малоактивные компоненты ведут себя в этом случае как балластные материалы. Типичными представителями таких систем являются смеси высокобризантных ВВ с алюминиевым порошком [10], селективно-детонирующие предохранительные ВВ, содержащие высокоактивный нитроглицерин и смесь малоактивных минеральных солей.

В этих смесях «детонационная» теплота определяется теплотой разложения активного компонента, и лишь на стадии расширения ПВ реализуется полная потенциальная энергия ВВ.

Расчет параметров детонации смесей с неполным тепловыделением в детонационной волне затруднен, так как для этого требуется знание кинетики разложения компонентов и вторичных реакций в волне.

Один из путей расчета состоит в том, что из экспериментальных определений скорости детонации, каких-либо форм работы взрыва, решением обратной задачи находят эффективную теплоту детонации Q , и затем этой величиной пользуются для расчета других параметров детонации.

Большую определенность получили расчеты параметров детонации ВВ с инертными добавками, под которыми понимают любые вещества, не вступающие во взаимодействие с ПД в самой детонационной волне, т. е. до плоскости Чепмена—Жуге. Некоторые из них (металлы, органические вещества) способны реагировать с ПД за плоскостью Чепмена—Жуге, но энергия их не подпитывает детонационный фронт, другие—как минеральные соли в предохранительных ВВ—являются абсолютно инертными.

Одни и те же горючие вещества (алюминий, воски и т. п.) могут вести себя и как «инертные» материалы, например, в смеси с индивидуальными ВВ, и как активные материалы, например в смеси с аммиачной селитрой, т. е. в зависимости от кислородного коэффициента взрывчатой основы смесевых ВВ.

При расчете таких смесей исходят из модели, что инертная добавка поглощает часть энергии, выделяющейся в детонационной волне, на сжатие, прогрев и разгон частиц. Степень энергообмена определяется размерами частиц инертного материала, его теплофизическими и механическими свойствами. Как правило, полное теплового и кинетического равновесия в системе не достигается и при расчетах задается теми или иными допущениями.

Имеются точные и приближенные методики расчета ВВ с инертными добавками [18, 63].

Учитывая затраты тепла только на сжатие и разгон частиц инертного материала, В. Д. Лютовым, И. М. Воскобойниковым и др. была предложена следующая формула для расчета давления детонации:

$$p = \frac{\rho_0 D^2}{n+1} \left(1 - \beta \frac{\rho_0}{\rho_d} \right), \quad (3.33)$$

где ρ_0 —плотность смесевых ВВ; D —скорость детонации смеси; n —показатель политропы ПВ; β —массовая доля добавки; ρ_d —плотность добавки.

А. А. Котомин предложил схему расчета параметров детонации ВВ с инертными добавками, основанную на ряде эмпирических зависимостей [18].

Таблица 3.11

Материал добавки	$a, \text{ м}^2/(\text{кг} \cdot \text{с})$	$b, 10^{-3} \text{ кг/м}^3$
Металлы, окислы, силициды с размером частиц, мкм:		
менее 10	1,125	4,0
более 10	0,575	9,1
Неорганические и органические соли	1,76	3,6

Смесевое ВВ рассматривается как система, состоящая из зерен базового ВВ, промежутки между которыми заполнены невзрывчатым компонентом. Исходным является уравнение, в котором влияние инертной добавки выражается через некоторое приращение скорости детонации ΔD . Последнее может иметь как отрицательный, так и положительный знак:

$$D_{\text{max}} = D_{\text{ВВ}} + \Delta D,$$

где D_{max} — скорость детонации смеси при полном заполнении пор; $D_{\text{ВВ}}$ — скорость детонации базового ВВ при парциальной плотности $\rho_d = m_{\text{ВВ}}/v_d = \alpha \rho_{\text{max}}$; α — доля ВВ; ρ_{max} — плотность заряда при полном заполнении пор. $D_{\text{ВВ}}$ рассчитывается по формуле (3.14).

Для ВВ, содержащих металлы, органические и неорганические соли и другие малосжимаемые материалы,

$$\Delta D = a(b - \rho_d)\beta\rho_{\text{max}}/\rho_d,$$

где a и b — коэффициенты, зависящие от природы материала добавки и ее дисперсности (табл. 3.11).

Если ВВ содержит органическую добавку или воду, то

$$\Delta D = A\beta\rho_{\text{max}}/\rho_d,$$

где A — параметр, коррелирующий со скоростью ударной волны в материале добавки.

Если в ВВ содержится несколько добавок, то их влияние на скорость детонации суммируется $(\Delta D = \sum_{i=1}^N \Delta D_i)$.

По найденному значению D_{max} , пользуясь той же линейной зависимостью $D = f(\rho_0)$, можно найти скорость детонации при любой заданной плотности ВВ

$$D_{\rho_0} = D_{\text{max}} - M(\rho_{\text{max}} - \rho_0),$$

где M — линейный коэффициент для ВВ, с которым смешана добавка.

Для расчета давления детонации по формуле (3.11) необходимо найти показатель политропы ВВ с добавкой. А. А. Кото-

мин рекомендует следующие эмпирические формулы для определения показателя политропы ВВ n :

$$\text{при } 0,4 \leq \rho_0/\rho_{\text{max}} \leq 0,9 \quad n = 1,85 + 1,15\rho/\rho_{\text{max}} + 2,85\beta;$$

$$\text{при } \rho_0/\rho_{\text{max}} > 0,9 \quad n = n_n + 2,58\beta,$$

где n_n — показатель политропы базового ВВ (для тротила $n_n = 2,8$, для гексогена $n_n = 2,7$).

Для смеси индивидуальных ВВ с углеродородами парафинового ряда, часто применяемыми в качестве флегматизаторов, многие авторы рекомендуют пользоваться эмпирической формулой

$$D_{\text{см}} = D_0 + 1,67C_0,$$

где C_0 — скорость звука в добавке; D_0 — эмпирическая величина, зависящая от природы базового ВВ и плотности смеси (для гексогена при плотности $1,6 \text{ г/см}^3$ она равна $4,91 \text{ км/с}$).

В. Ю. Давыдов [45] для приближенных расчетов параметров детонации металлосодержащих ВВ рекомендует следующую формулу:

$$D_{\text{см}} = (1 - \beta)D_{\rho_n} + \beta C_{\text{пр}},$$

где D_{ρ_n} — скорость детонации ВВ, отвечающая его номинальной плотности (плотности, при которой ВВ запрессовано между частицами металла); $C_{\text{пр}}$ — скорость ударной волны в металле; β — доля добавки.

В. Г. Хотин [63] предлагает методику расчета параметров детонации ВВ с инертными добавками, основанную на нахождении эффективной плотности смесевое ВВ, зависящей от плотности смеси, содержания добавки и ее физических характеристик, с использованием выражений гидродинамической теории. При этом учитываются удельные потери энергии в детонационной волне на сжатие и разгон инертной добавки и оцениваются возможные потери на ее прогрев.

Если зерна ВВ являются достаточно крупными, а степень разбавления ВВ инертным веществом не слишком велика, то, как показано в работах А. Я. Алина, детонация может распространяться по такой смеси, например по водосодержащему гранулолу, от зерна к зерну почти без потерь и со скоростью, близкой к скорости детонации чистого ВВ при его номинальной плотности.

4. ФОРМЫ РАБОТЫ ВЗРЫВА. ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРОМЫШЛЕННЫХ ВВ

4.1. МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ТЕХНИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОМЫШЛЕННЫХ ВВ

Значительная часть энергии взрыва тратится на ненужные, а иногда и вредные виды работы — пластическую деформацию и сильное дробление горной породы в ближней зоне взрыва, на образование сейсмических волн и т. п. Часть энергии теряется и при неправильном расчете зарядов, когда неиспользованное тепло уносится с ПВ в атмосферу или затрачивается на чрезмерный разброс раздробленной породы и т. п. Все это снижает долю полезно используемой потенциальной энергии ВВ.

Если отбросить потери энергии, связанные с неправильным расчетом зарядов и носящие субъективный характер, то получим расчетный КПД взрыва, равный отношению полезной работы взрыва к энергетическому потенциалу ВВ или к его идеальной работоспособности. В зависимости от характера взрывных работ КПД, или коэффициент реализации энергии ВВ, колеблется в широких пределах — от единиц до десятков процентов. Он уменьшается с уменьшением времени отбора энергии от ПВ. Наиболее низкий КПД у таких форм работы взрыва, как дробление негабаритных кусков породы накладными зарядами, многие виды взрывной обработки металлов, при которых ПВ свободно расширяется в атмосферу. Здесь доля отбора энергии от ПВ на производство требуемой механической работы невелика. Она определяется так называемой *активной массой* заряда, прилегающей к поверхности разрушаемого тела, энергия которой расходуется на заданный вид работы взрыва.

Наибольший КПД присущ камуфлетному взрыву в пластичных грунтах, например при взрывном способе образования подземных емкостей-хранилищ, когда почти вся энергия, выделившаяся при взрыве, расходуется на необходимую работу пластической деформации и уплотнения грунта.

Понятие об активной массе заряда было впервые введено О. Е. Власовым и Г. И. Покровским исходя из предпосылки разлета ПВ в направлении, перпендикулярном к поверхности заряда, со скоростью, отвечающей местной скорости звука в ПВ c . Эта скорость примерно равна половине скорости детонации данного ВВ (D). Тогда для цилиндрического заряда поток ПВ в сторону поверхности контакта с разрушаемым телом определится конусом с основанием $2r_3$ и высотой h_a . Последняя определяется из

условия равенства времени пробега волны детонации до поверхности контакта и проникновения волны разрежения от боковой поверхности до оси заряда, как это показано на рис. 4.1. Тогда $h_a = r_3 D / c$. Этим выражением дано максимальное значение h_a при неограниченной высоте заряда h_3 и свободном расширении ПВ с боковой поверхности заряда. Если высота заряда $h_3 < 9/2 r_3$, то активная масса из-за разлета ПВ с торца заряда определяется объемом усеченного конуса, высота которого равна $4/9 h_3$. При наличии оболочки заряда из-за ее инерционности скорость радиального расширения ПВ уменьшается и пропорционально увеличивается h_a , а вместе с ней и объем активной массы. Исходя из сказанного, активная масса.

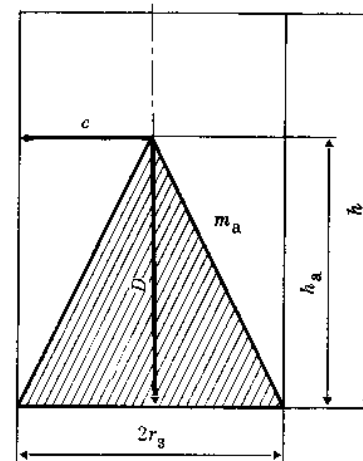


Рис. 4.1. Схема активной части заряда

$$m_a = \frac{1}{3} \pi r_3^2 h_a \rho_0, \quad (4.1)$$

где ρ_0 — плотность ВВ. При $c = D/2$ и $h_a = 2r_3$ выражение (4.1) принимает вид $m_a = 2/3 \pi r_3^3 \rho_0$. Импульс отраженной от поверхности тела детонационной волны равен

$$I = \int_{h_a/D}^{\infty} p dt = \frac{32}{27} r_3 p_ж S \frac{h_a}{D} = \frac{8}{27} m_a D, \quad (4.2)$$

где S — площадь поперечного сечения; m_a — активная масса заряда.

В общем случае КПД взрыва зависит не только от характера работы взрыва, но и от физико-механических свойств горных пород или других объектов взрывного воздействия и от свойств ВВ, в их взаимосвязи [31, 55, 62].

Рассмотрим типовой случай дробления и выброса горной породы при взрыве углубленного заряда. Схематически работу взрыва в этом случае можно описать следующим образом.

Возникающая впереди фронта расширяющихся ПВ волна сжатия (ударная волна) сжимает массив горных пород и вызывает в нем тангенциальные напряжения, приводящие к образованию радиальных трещин, как это показано на рис. 4.2. При отражении волны от свободной поверхности возникают растягивающие усилия, приводящие к образованию кольцевых трещин, а вблизи от поверхности — откольные явления. Таким образом,

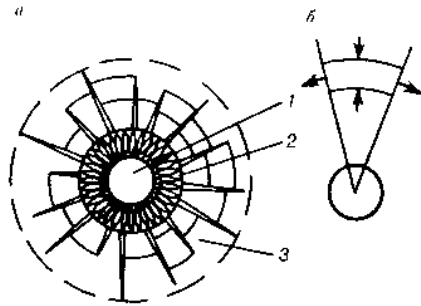


Рис. 4.2. Схема действия взрыва (а) и образования радиальных трещин (б):

1 — зона вытеснения; 2 — зона раздробления; 3 — зона трещин

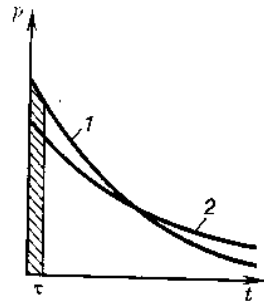


Рис. 4.3. Диаграмма $p-t$ для импульса взрыва

в результате ударно-волновой составляющей действия взрыва в массиве, в дополнение к естественным трещинам, образуется объемная сетка трещин, которая намечает контуры отдельных частей, т. е. форму и размеры кусков породы. Работу разрушения завершают расширяющиеся ПВ, которые сдвигают горную массу с частично нарушенными связями. При этом трещины расширяются и окончательно формируются куски раздробленной породы. При последующем выбросе горной массы куски дополнительно дробятся в результате соударения.

Описанная схематически картина дробления, сдвига и выброса горной массы указывает на две основные формы работы, совершаемой продуктами взрыва: работу дробления и работу перемещения горной массы. Первую называют *бризантным, или дробящим действием взрыва*, вторую — *фугасным, или метательным действием*.

Бризантное действие взрыва осуществляется за очень короткий интервал времени (порядка 10^{-6} — 10^{-5} с) и пропорционально головной части импульса взрыва (заштрихованный участок на рис. 4.3). Фугасное действие пропорционально полному импульсу

$$I = \int_0^{t_k} p dt = m \sqrt{Q_{\text{взр}}}, \text{ где } m \text{ — масса заряда; } t_k \text{ — время достижения}$$

ПВ давления окружающей среды (горного давления), и совершается в течение миллисекунд.

А. Ф. Беляев и М. А. Садовский предложил несколько иную классификацию форм работы взрыва в горной среде, подразделив их на *местное* и *общее действие взрыва*. Местное действие осуществляется в ближней зоне, по размерам сопоставимой с радиусом сферического или цилиндрического заряда, общее действие — на больших относительных расстояниях.

Чисто бризантные или чисто фугасные формы работы взрыва на практике встречаются сравнительно редко. К первым можно отнести дробление негабаритных кусков породы накладными плоскими или кумулятивными зарядами, перфорацию обсадки нефтяных скважин кумулятивными зарядами, упрочнение и резку металлов взрывом и некоторые другие виды работ. К типично фугасным формам относятся камуфлетные взрывы в пластичных грунтах, выброс грунтов взрывом при образовании канав, насыпей и т. п. В большинстве же случаев работа взрыва носит комбинированный характер с полной реализацией импульса взрыва или промежуточный характер, когда время совершения работы (время отбора энергии от ПВ) больше, чем при чисто бризантном действии взрыва, но меньше, чем t_k . Естественно, что КПД фугасного взрыва всегда больше, чем бризантного, а для промежуточных форм — возрастает с увеличением времени отбора энергии.

Для наиболее рационального использования энергии ВВ важно выяснить, какие свойства ВВ в наибольшей мере ответственны за соответствующие виды действия взрыва.

Так как бризантное (местное) действие взрыва определяется головной частью импульса, т. е. лишь небольшой частью от общей энергии, высвобождающейся при взрыве ВВ, то оно достаточно полно характеризуется начальным давлением ПВ или давлением детонации $p_{\text{ж}} = \rho_0 D^2 / (n + 1)$. Соответственно, на него сильное влияние оказывают скорость детонации ВВ и его плотность. Определенное влияние оказывает и химический состав продуктов взрыва через показатель политропы n . Наиболее благоприятный для бризантного действия состав ПВ отвечает кислородному балансу ВВ около — 15%. Общая энергия ВВ для данной формы работы взрыва как характеристика эффективности ВВ менее представительна потому, что при равной энергии и одинаковых величинах полного импульса головные части импульса могут существенно отличаться, как это показано на рис. 4.3.

Были предложены и другие критерии бризантного действия взрыва, например в виде давления отраженной от поверхности разрушаемого тела детонационной волны, равной приблизительно $2,4 p_{\text{ж}}$ — давления на границе раздела ПВ — горная среда, зависящего от ударной сжимаемости среды. Рюденбергом был предложен критерий в виде так называемой импульсной силы

$$p_{\text{имп}} = \Delta p + \rho_1 u^2, \quad (4.3)$$

где Δp — избыточное давление в детонационной волне; ρ_1 — начальная плотность ПД; u — массовая скорость ПД. Второй член правой части уравнения (4.3) представляет собой динамический напор ПД. Если принять $n=3$, то получим

$$p_{\text{имп}} = p_{\text{ж}} \frac{n+1}{n} = \frac{4}{3} p_{\text{ж}}$$

Критерий, близкий к рюденберговскому, получен при решении задачи в упругой постановке о динамических напряжениях σ_d , возникающих в нагружаемом взрывом теле:

$$\sigma_d = \rho_{ж} + \sqrt{\rho_{ж}^2 + m_a u^2 \frac{E}{Sh}},$$

где m_a — активная масса заряда; E — модуль упругости материала; S — площадь поперечного сечения тела; h — его высота. По этому критерию бризантное действие взрыва также определяется давлением детонации и динамическим напором ПВ. Оно зависит от геометрических параметров заряда (через m_a) и от физико-механических свойств разрушаемого тела.

Фугасное действие, описываемое полным импульсом взрыва, определяется общей энергией взрыва или производными от нее величинами, например, идеальной работоспособностью ВВ.

В общем случае, когда работа взрыва носит сложный характер, показатель технической эффективности ВВ удобно выразить через некоторое уравнение, типа уравнения регрессии, в котором эффективность ВВ связывается с основными энергетическими, детонационными и физическими свойствами вещества общего вида

$$Э_{т} = k_1 a_1 f(\rho_{ж}) + k_2 a_2 F(Q_{взр} \rho_0), \quad (4.4)$$

где a_1 и a_2 — размерные коэффициенты пропорциональности, учитывающие физико-механические свойства разрушаемой горной породы; k_1 и k_2 — доли составляющих в общем показателе эффективности ВВ при заданной сложной форме работы взрыва. В качестве функций детонационных и энергетических характеристик ВВ могут быть использованы любые из вышеприведенных критериев бризантного и фугасного действия или иные, близкие по физическому смыслу.

В качестве показателя эффективности могут быть выбраны различные применяемые на практике величины: удельный расход ВВ при нормированных показателях степени дробления породы, показатели степени дробления, КИШ при проходке горной выработки и др. Сам показатель эффективности может быть выражен в абсолютных или относительных величинах, т. е. по сравнению с эффективностью какого-либо эталонного ВВ. В качестве такового часто принимают аммонит 6ЖВ или равный по теплоте взрыва граммонт 79/21.

Коэффициенты, входящие в уравнение (4.4), находят опытным путем для типовых по горно-геологическим и технологическим параметрам видов взрывных работ или путем статистической обработки данных производственных взрывов. Такие исследования были выполнены рядом специалистов взрывного дела.

Б. Я. Светлов [51] предложил следующий критерий оценки технической эффективности промышленных ВВ:

$$q_x^{AF} = (q^A + kq^F)/(1 + k),$$

где q_x^{AF} — масса заряда исследуемого ВВ, эквивалентная по эффективности 1 кг эталонного ВВ; q^A — эквивалентная масса, определенная по энергетическому критерию; q^F — эквивалентная масса, определенная по параметрам детонации (силе детонации); k — коэффициент пропорциональности.

$$q^A = A_{эТ}/A_x; \quad q^F = F_{эТ}/F_x \cong D_{эТ}^2/D_x^2,$$

где $A_{эТ}$ и A_x — идеальная работа взрыва эталонного и исследуемого ВВ; F — сила детонации, равная произведению давления детонации на поверхность заряда; D — скорость детонации.

Анализируя технические данные по проведению штольни сечением $1,8 \times 1,2$ м² в крепком граните с использованием разных ВВ с теплотой взрыва от 4300 до 5400 кДж/кг и скоростью детонации 4,2—6,2 км/с, Б. Я. Светлов подсчитал, что в описанных условиях k близок к 1, что свидетельствует о примерно равных вкладах энергетических и детонационных параметров в общее действие взрыва. В мягких грунтах коэффициент k приобрел отрицательное значение, что говорит о вредном влиянии высоких параметров детонации на эффективность работы взрывного выброса грунта. А. Е. Азаркович и А. П. Тихомиров определяли коэффициенты корреляции показателей действия взрыва со свойствами ВВ в опытах на моделях и в производственных условиях. В табл. 4.1 приведены результаты их исследований. Результаты, приведенные в табл. 4.1, довольно противоречивые. Общий анализ корреляционных зависимостей, полученных в работах разных

Таблица 4.1

Показатель действия взрыва	Коэффициент корреляции			
	Теплота взрыва	Работоспособность по Траудло	Бризантность по Гессу	Скорость детонации
Выход дробленого продукта:				
в базальтовом блоке	0,49±0,12	0,45±0,13	—	—
в песчано-цементном блоке	0,55±0,11	0,82±0,005	—	—
на одиночный шпур	0,21±0,2	0,41±0,15	0,07±0,24	0,14±0,2
Объем воронки взрыва	0,45±0,15	0,34±0,18	0,08±0,24	0,58±0,1
Эффективность по дроблению горной массы	0,78±0,06	0,83±0,05	0,76±0,08	0,16±0,2
КИШ при проведении выработок	0,92±0,04	0,88±0,05	0,19±0,13	0,39±0,27

Примечание. Определение бризантности производилось при взрыве зарядов в стальных кольцах.

исследователей, говорит о том, что значимость детонационных параметров ВВ, как правило, возрастает с уменьшением масштаба взрыва, с увеличением крепости пород и других физико-механических характеристик, затрудняющих взрывное дробление, при проходке горных выработок и в других «зажатых» условиях взрывания. Значимость общеэнергетических характеристик ВВ возрастает при массовых взрывах, при уступной отбойке горных пород, взрывах камерных зарядов и т. п. Так, среднестатистические данные показывают, что удельный расход ягданита при скважинной отбойке горных пород на карьерах на 11—12% выше, чем расход граммонита 79/21, при одинаковых качественных показателях полученной горной массы, что примерно отвечает отношению теплот взрыва указанных ВВ.

4.2. КРИТЕРИИ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВВ

Техническую эффективность ВВ обычно определяют по результатам испытаний в производственных условиях применительно к тем или иным горно-геологическим условиям и способам ведения взрывных работ. Результаты могут быть усреднены в масштабе одного горного предприятия, бассейна, отрасли горной промышленности, в целом по горнодобывающей промышленности. Мерой оценки могут быть как абсолютные, так и относительные показатели (отнесенные к эталонному ВВ). В качестве оценочных показателей используют такие величины, как удельный расход ВВ на единицу массы или объема взрываваемой горной породы, КИШ или подвигание забоя за один подрыв при заданной массе взрываемых зарядов, степень дробления горной массы и др.

Для получения наиболее объективных показателей предусматривается их оценивать при таких параметрах взрывания, которые отвечают наиболее высокой эффективности для данного ВВ. Эти параметры отыскиваются в процессе предварительных опытов.

Показатели технической эффективности могут быть пересчитаны на более универсальные показатели экономической эффективности отнесением первых к сумме всех затрат по взрыванию.

Наряду с экспериментальными имеются приближенные расчетные методы оценки эффективности, особенно полезные на стадии разработки новых ВВ.

Л. В. Дубнов и И. Т. Колесниченко предложили метод расчета, основанный на энергетическом критерии эффективности, согласно которому экономическая эффективность ВВ выражается в стоимостных показателях полезно используемой энергии ВВ.

В общем виде показатель эффективности

$$\mathcal{E} = \eta Q_{\text{взр}} / (\Sigma C), \quad (4.5)$$

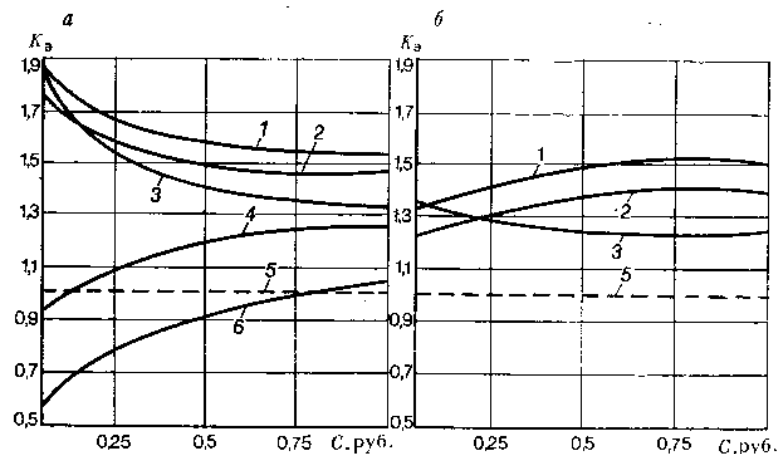


Рис. 4.4. Зависимость относительного показателя эффективности K_a от стоимости бурения 1 дм³ породы C в подземных выработках (а) и на открытых разработках (б):

1 — гранулит АС-4; 2 — граммонит 79/21; 3 — гранулит М; 4 — детонит М; 5 — аммонит БЖВ (эталон); 6 — аммонит скальный № 1

где η — КПД взрыва; $Q_{\text{взр}}$ — теплота взрыва ВВ, Дж/кг; ΣC — сумма затрат на изготовление, доставку, размещение в горной породе, зарядание и взрывание ВВ, руб/кг. Величина η учитывает как термодинамические потери энергии при преобразовании тепловой энергии взрыва в механическую работу, совершаемую расширяющимися ПВ (см. подраздел 4.1), так и потери на неполезные формы работы взрыва.

Преобразуем уравнение (4.5) к виду

$$\mathcal{E} = \eta \left(\frac{C_{\text{ВВ}}}{Q} + \frac{C_6}{Q\phi\Delta} + \frac{C_3}{Q\Delta} + \frac{C_{\text{взр}}}{Q} \right), \quad (4.6)$$

где $C_{\text{ВВ}}$ — стоимость ВВ, включая доставку, руб/кг; C_6 — стоимость бурения, руб/м³; C_3 — стоимость зарядания, включая забойку, руб/м³; $C_{\text{взр}}$ — стоимость взрывания (средства инициирования и т. п.), руб/кг; ϕ — коэффициент зарядания; Δ — плотность зарядания. Из выражения (4.6) видно, что экономическая эффективность ВВ не является абсолютной характеристикой ВВ и зависит, в частности, от условий применения ВВ, механических свойств взрываемых пород, определяющих затраты на бурение, отнесенные к энергии единицы массы ВВ, $[C_6 / (Q\phi\Delta)]$. Поэтому увеличение удельной стоимости энергии ВВ еще не означает снижение экономичности ВВ, если оно сопровождается повышением энергии ВВ, так как пропорционально величине энергии снижаются относительные расходы на бурение, причем в тем большей степени, чем крепче порода. Это означает, что может быть

найденно такое значение крепости пород (стоимости бурения), когда дорогостоящее, но мощное ВВ будет более экономичным, чем дешевое, но маломощное ВВ. И наоборот, для любого ВВ с заданной удельной стоимостью энергии может быть найдена наиболее экономичная область его применения (рис. 4.4).

На показатель эффективности ВВ, кроме удельной стоимости ВВ, влияют такие характеристики ВВ, как его плотность или уплотняемость, определяющие плотность заряжения, пригодность к более дешевым механизированным способам заряжения.

Расчет эффективности по формуле (4.5) сложен из-за трудностей, связанных с определением величины η . Поэтому чаще пользуются относительным показателем эффективности

$$K_э = Э/Э_{эт},$$

где $Э_{эт}$ — эффективность эталонного ВВ (аммонит 6ЖВ и граммонт 79/21). При расчете $K_э$ либо принимают $\eta = \text{const}$ и тогда

$$K_э = \frac{Q/\Sigma C}{(Q/\Sigma C)_{эт}},$$

либо, что более точно, учитывают термодинамический КПД взрыва $\eta_{и}$, зависящий только от химического состава ВВ и степени расширения ПВ:

$$\eta_{и} = A_{и}/Q_{взр}.$$

Тогда относительный показатель эффективности выражается через идеальную работоспособность

$$K_э = \frac{A_{и}/\Sigma C}{(A_{и}/\Sigma C)_{эт}}.$$

5. БЕЗОПАСНОСТЬ ПРИ ПЕРЕВОЗКЕ, ХРАНЕНИИ И ОБРАЩЕНИИ С ВВ

5.1. ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ ВВ К МЕХАНИЧЕСКИМ ВОЗДЕЙСТВИЯМ

Способность ВВ взрываться при механических воздействиях (удар, трение и др.) называется чувствительностью к механическим воздействиям.

В результате длительного применения различных ВВ выявлена их относительная опасность при механических воздействиях. Практикой установлен опорный ряд ВВ, в котором в порядке перечисления ВВ опасность при его изготовлении и применении возрастает. Различные методы оценки чувствительности к механическим воздействиям приводят к различным рядам чувствительности, не всегда совпадающим с опорным, установленным практикой. Это объясняется тем, что по лабораторным методикам оценивается чувствительность к конкретным видам и условиям воздействия, в то время как опорный ряд дает усредненную оценку, характеризующую опасность в обращении с данным ВВ.

Для сравнения ВВ по чувствительности к механическим воздействиям применяются различные приборы, отличающиеся условиями соударения, геометрией и размерами взаимодействующих элементов, а также способами приложения нагрузки.

Подробное описание методов оценки чувствительности ВВ к механическим воздействиям приведено в разделе 9.

Процесс возникновения взрыва при механических воздействиях имеет сложную природу, конкретный механизм возбуждения может меняться в зависимости от структуры вещества, вида нагрузки и условий деформирования вещества под нагрузкой. Во всех случаях, по современным представлениям, он имеет очаговый характер и связан со сдвиговыми процессами, сопутствующими динамическому нагружению. Исследования П. В. Бриджмена показали, что ВВ выдерживают статические нагрузки до 10 ГПа, но взрываются при значительно меньших динамических нагрузках, таких как удар и т. п.

Очаговый механизм состоит по крайней мере из двух стадий: возникновения интенсивных очагов разложения (вспышки) ВВ и развития взрыва из одного или некоторой совокупности очагов на всю массу подвергнутого воздействию ВВ. Предполагается, что стадия развития проходит через горение, переходящее в детонацию (взрыв), чему способствует сохранение повышенного давления вещества под грузом (см. подраздел 5.2). Критические размеры очагов («горячих точек»), по разным оценкам, составляют 10^{-5} — 10^{-7} м.

Большинство специалистов придерживаются тепловой теории возникновения взрыва при механических воздействиях на ВВ, но существуют и взгляды, согласно которым этот процесс обуславливается механической сдвиговой деформацией кристаллической решетки и активацией молекул ВВ. В ряде работ возникновение первичных очагов разложения связывают с дислокациями (линейными дефектами) кристаллов ВВ, а критические разогревы в них — с высвобождением свободной энергии при аннигиляции отдельных пар дислокаций на плоскостях скольжения или схлопывании полостей при интенсивных сдвигах вещества [13].

В основе тепловой теории лежат представления о возникновении локальных очагов разогрева на неоднородностях вещества в результате диссипации энергии механического воздействия. Впервые на такую возможность указал Ю. Б. Харитон. Конкретный механизм разогрева зависит от структуры ВВ. В жидких ВВ очаги возникают при адиабатическом сжатии пузырьков воздуха или паров самого ВВ, находящихся в жидкости, или схлопывании полостей, возникших вследствие кавитации жидкости или по другим причинам [24]. В пластичных высоковязких ВВ очаги возникают в результате вязкого течения, сопровождающегося тепловым саморазупрочнением под нагрузкой [26], в твердых ВВ — в результате сухого трения или вязкого разогрева на плоскостях скольжения, возникающих в уплотненной массе ВВ при динамических нагрузках [6, 26]. Впервые такие плоскости с очагами разложения были обнаружены В. А. Сухих.

По данным В. К. Боболва и Г. Т. Афанасьева, локальный разогрев твердых ВВ при ударе возникает в результате прочностного разрушения заряда. Сначала происходит практически изотермическая упругая, а затем пластическая деформация заряда. Разрушение происходит под действием касательных напряжений (неупругая неизотермическая деформация). Это разрушение сопровождается выбросом части вещества 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, который ограничен температурой плавления вещества при соответствующем давлении. Взрыв в локальном очаге может возникнуть, если температура в нем достигнет критической величины $T_{кр}$.

При инициировании взрыва низкоскоростным ударом период индукции по порядку величины не превосходит 10^{-5} с. Так как он близок к адиабатическому периоду индукции, то с помощью выражения

$$\left(\frac{c_p R T_{кр}^2}{Q E z} \right) e^{E/(R T_{кр})} \leq 10^{-5}$$

можно оценить критическую температуру очага, которая составляет $500-700$ °С (z — предэкспонента).

Из сравнения величин $T_{кр}$ с температурой плавления $T_{пл}$ органических ВВ следует, что $T_{пл}$ при обычном давлении меньше критической температуры. Между тем температура плавления ограничивает разогрев вещества при механическом воздействии. Очевидно, что для взрыва в очаге необходимо, чтобы среднее давление всестороннего сжатия в образце, подвергнутом динамическому воздействию, достигло некоторого критического значения $p_{кр}$, при котором температура плавления не меньше критической температуры возбуждения взрыва в очаге. Это условие ($p > p_{кр}$) названо условием критических напряжений. Используя предложенную Л. Г. Болховитиновым линейную аппроксимацию зависимости температуры плавления от давления можно оценить

$$T_{пл}(p) = T_{пл,н} + k p,$$

критическое напряжение, которое для большинства органических ВВ составляет $(1 \div 2,5) \cdot 10$ ГПа (коэффициент $k = 2 \cdot 10^7$ °С · м²/Н, $T_{пл,н}$ — температура плавления при нормальном давлении).

Зависимость средних значений давления, при котором происходит разрушение образцов, удовлетворительно описывается зависимостью, полученной в результате рассмотрения деформации тонкого слоя ВВ при ударе:

$$\bar{p}_{пр} = \sigma_{пр} \left(1 + \frac{d}{3 \sqrt{3} h} \right), \quad (5.1)$$

где $\bar{p}_{пр}$ — среднее предельное давление, при котором происходит разрушение образца; $\sigma_{пр} = \tau_{пр} \sqrt{3}$ — предел прочности ВВ при сжатии; $\tau_{пр}$ — предел прочности при сдвиге; d и h — соответственно диаметр и толщина образца. В. К. Боболев и Г. Т. Афанасьев назвали это критическое условие условием прочности. При $\bar{p}_{пр} < p_{кр}$ среднее давление достигает только давления разрушения образца без взрыва, так как температура разогрева не может превышать температуру плавления, которая при $p_{пр} < p_{кр}$ ниже критической температуры воспламенения. При $p_{пр} > p_{кр}$ среднее давление настолько велико, что температура плавления, а следовательно, и возможный разогрев при прочностном разрушении достигают критической температуры, и происходит взрыв.

Таким образом, ВВ взрывается при ударе, если реализуются одновременно условия критических напряжений и прочности.

Согласно данной модели при постоянстве условий опыта (параметров прибора) $p_{кр}$ может быть относительным критерием чувствительности ВВ.

На том же принципе, т. е. нахождении $p_{кр}$, основан метод оценки чувствительности, предложенный В. Г. Щетинным, хотя и в другом исполнении. ВВ помещается в трубку из органического

стекла определенной толщины стенок и с известной прочностью на разрыв и подвергается статическому давлению. Находится то давление, при котором разрушение трубки приводит к взрыву ВВ. Оно и отвечает $p_{кр}$. Часто в качестве критериев чувствительности выбирают энергию падающего груза, вызывающую взрыв в условиях копровых испытаний, или частоту (вероятность) взрывов при постоянной массе груза и высоте его падения.

Для жидких ВВ, учитывая особенности механизма возбуждения в них взрыва, копровые испытания модифицированы таким образом, что осуществляется так называемый дробный удар. При первом отскоке груза в жидкости возникают кавитационные полости, а второй удар действует на возмущенную жидкость.

Существует некоторый минимальный (критический) размер очага разогрева (горячей точки), при котором выделившаяся в очаге энергия рассеивается в массе ВВ без возбуждения самораспространяющейся реакции. В этой связи оценку чувствительности ВВ к удару выполняют таким образом, что массу ВВ, подвергаемую механической нагрузке, окружают дополнительной массой ВВ и о результатах воздействия судят по распространению реакции на всю массу ВВ.

С учетом вероятности распространения Г. Т. Афанасьев предложил обобщенный критерий чувствительности ВВ к удару, в основу которого положено уравнение вида

$$D_{min} = 3\sqrt{3}(\rho_{кр}/\sigma_{кр} - 1)\Delta_{кр},$$

где D_{min} — минимальный диаметр бойка (поршня) прибора, при котором происходит возбуждение очагов и развитие взрыва; $\Delta_{кр} \approx d_{кр}/2$ — критическая толщина слоя ВВ, при котором еще возможно распространение детонации.

Приведенные критерии чувствительности основаны на экспериментальных определениях входящих в них величин. Дальнейшее развитие теории требует чисто расчетных (априорных) обобщенных оценок чувствительности, не связанных жестко с методом испытаний. Если оценки будут в критериальной форме, то критерии должны включать основные физико-химические характеристики ВВ: энергетические, кинетические, физико-механические, теплофизические. Такие критерии полезны для оценки относительной чувствительности ВВ при их создании и эксплуатации, при поиске методов и средств снижения их чувствительности (флегматизации). Имеется необходимость и в расчетах, связанных с технологической безопасностью производства или применения ВВ. В этом случае в методиках расчета должны учитываться не только перечисленные свойства ВВ, но и конкретный характер возможных механических воздействий на вещество в соответствующей технологической, транспортной, заряжающей аппаратуре.

Что касается способов флегматизации ВВ, то в настоящее время для твердых ВВ они в основном сводятся к добавкам типа

парафина, стеарина, церезина, природных восков и т. п. Их флегматизирующее действие имеет комбинированный характер: они снижают коэффициент внутреннего трения, повышают пластичность ВВ; кроме того, часть выделяющегося при разогреве тепла уходит на плавление флегматизатора. Флегматизация жидких, а также твердых ВВ может быть основана на разбавлении их инертными веществами. Для промышленных ВВ в этом отношении особенно эффективной является вода. Водосодержащие ВВ типа акватолов и аквапитов отличаются наиболее низкой чувствительностью ко всем видам механического воздействия.

5.2. ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ ВВ К ТЕПЛОВЫМ ФОРМАМ ВОЗДЕЙСТВИЯ. ТЕПЛОВОЙ ВЗРЫВ. ГОРЕНИЕ ВВ. ПЕРЕХОД ГОРЕНИЯ ВО ВЗРЫВ

При нагреве жидких и твердых ВВ взрыв может развиваться по цепному или тепловому механизму. Однако, по-видимому, наиболее важное значение имеет тепловой механизм, изложенный в теории теплового взрыва [42]. Основная идея теплового взрыва высказана Я. Х. Вант-Гоффом и развита Н. Н. Семеповым. Она заключается в том, что ускорение реакции разложения ВВ возможно, если теплоприход в результате реакции превышает теплоотвод в окружающую среду.

Для установления изменения температуры ВВ во времени необходимо решить нестационарное уравнение теплопроводности с учетом тепловыделения в результате химической реакции при заданных начальных и граничных условиях. Уравнение теплопроводности имеет вид

$$c\rho\partial T/\partial t = \lambda\nabla^2 T + Qze^{-E/(RT)}, \quad (5.2)$$

где c , ρ , λ — соответственно теплоемкость, плотность и коэффициент теплопроводности ВВ; t — текущее время; ∇^2 — оператор Лапласа; T — температура взрыва; Q — теплота химической реакции, отнесенная к единице объема ВВ; $ze^{-E/(RT)}$ — константа скорости реакции.

В уравнении (5.2) левая часть выражает собой разогрев ВВ, первый член правой части — потери тепла вследствие теплопроводности и второй член — тепловыделение при химической реакции. Приведенное уравнение не имеет аналитического решения.

В условиях стационарного состояния, когда рассматривается только распределение температуры по координатам, а не изменение ее во времени, $\partial T/\partial t = 0$. Условие, при котором стационарное состояние становится невозможным, является критическим условием для возникновения взрыва. В таком виде задача решена Д. А. Фрапк-Каменецким:

$$\delta = \frac{rQ}{\lambda} \cdot \frac{E}{RT_0^2} r_0^2 z e^{-E/(RT_0)},$$

где δ — критерий теплового взрыва; r — размер сосуда (например, радиус сферического сосуда).

Д. А. Франк-Каменецкий показал, что устойчивое равновесие между теплопритоком и теплоотводом становится невозможным, если $\delta > \delta_{кр}$.

Значения $\delta_{кр}$ зависят от формы сосуда и составляют: 0,88 для сосуда с бесконечными плоскопараллельными стенками, 2,0 для цилиндра и 3,32 для сферы.

Стационарная теория теплового взрыва подтверждается экспериментами. Однако она не дает ответа на вопрос о задержке воспламенения, что не менее важно, чем определение самих условий воспламенения. Вопрос о задержках воспламенения рассмотрен О. М. Тодесом в разработанной им нестационарной теории теплового воспламенения. По этой теории применительно к газовым смесям рассматривается тепловой баланс всего реакционного сосуда, при этом температура во всех точках его принимается одинаковой. Уравнение теплового баланса в этом случае имеет вид

$$dT/dt = \frac{Q}{c_p} z e^{-E/(RT)} - (T - T_0) \frac{\alpha_m S}{c_p V}, \quad (5.3)$$

где α_m — коэффициент теплоотдачи; S — площадь сосуда; V — объем сосуда.

Численным интегрированием уравнения (5.3) можно найти время, через которое температура газа достигнет критического значения:

$$T_{кр} - T_0 + \Delta T - T_0 + RT_0^2/E. \quad (5.4)$$

Аналитическое решение уравнения теплового баланса может быть получено лишь для адиабатических условий, т. е. при $\alpha_m = 0$, путем несложных преобразований и перехода к безразмерной температуре

$$\theta = (T - T_0) \frac{E}{RT_0}$$

можно привести выражение (5.3) к виду

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{Q}{c_p} \frac{E}{RT_0^2} z e^{-E/(RT_0)} e^{-\theta} - \frac{\alpha_m S}{c_p V} \theta.$$

Уравнение (5.4) содержит две комбинации величин, могущих служить масштабам времени:

$$\tau_1 = \left[\frac{QE}{c_p RT_0^2} \right] / \left(z e^{-E/(RT_0)} \right)^{-1};$$

$$\tau_2 = [\alpha_m S / (c_p V)]^{-1}$$

и может быть приведено к виду

$$d\theta/dt = e^{\theta/\tau_1} - \theta/\tau_2. \quad (5.5)$$

Очевидно, что зависимость (5.5) безразмерной температуры от безразмерного времени содержит один безразмерный параметр τ_2/τ_1 . Воспламенение должно происходить при критическом значении этого параметра. Таким образом, первое критическое условие воспламенения должно иметь вид

$$\tau_2/\tau_1 = \delta_{кр} = \text{const}$$

или

$$\delta_{кр} = [QE / (\alpha_m S R T_0^2)] z e^{-E/(RT_0)}.$$

Этот критерий с точностью до постоянного множителя совпадает с критериями воспламенения, полученными Н. Н. Семеновым и Д. А. Франк-Каменецким, что можно установить, используя зависимость α_m от числа Нуссельта:

$$\alpha_m = \text{Nu} \lambda / d,$$

где d — диаметр сосуда.

Для адиабатического теплового взрыва

$$\frac{d\theta}{dt} = e^{\theta/\tau_1}, \quad (5.6)$$

так как по определению $\alpha_m = 0$. Проинтегрировав уравнение (5.6) в пределах от 0 до t и от 0 до θ , получим

$$\theta = \ln \left(\frac{1}{1 - t/\tau_1} \right).$$

Если принять для предвзрывного разогрева величину

$$\Delta T = T_{кр} - T_0 = RT_0^2/E,$$

что соответствует $\theta_{кр} = 1$, то время достижения критического разогрева

$$t_{кр} = \frac{e-1}{e} \tau_1 = 0,633 \tau_1.$$

Если под временем задержки t_3 воспламенения подразумевать время саморазогрева смеси до максимальной температуры, то

$$t_3 = \tau_1 = [c_p R T_0^2 / (QzE)] e^{E/(RT_0)}.$$

Н. Н. Семенов экспериментально установил, что в сравнительно нешироком интервале температур

$$t_3 = B e^{E/(RT_0)}, \quad (5.7)$$

где $B = 10^{-8} \div 10^{-13}$ с — коэффициент, зависящий от характеристик ВВ и условий опыта.

Второе условие, необходимое для теплового воспламенения,— это малая величина предвзрывного разогрева, т. е. условие

$$\Delta T = T_{кр} - T_0 = \frac{RT_0^2}{E} \ll T_0 \text{ или } \frac{E}{RT_0} \gg 1.$$

В практике чувствительность ВВ к тепловому импульсу характеризуют так называемой температурой вспышки, под которой понимают температуру стенок металлического сосуда (гильзы), в контакте с которым находится ВВ, вспыхивающее через определенное время после начала нагревания. Экспериментальные методы оценки температуры вспышки приведены в разделе 9. Определяемая экспериментально температура вспышки ВВ дает представление о возможных температурных пределах безопасного обращения с ВВ. Однако при длительном температурном воздействии вспышка может произойти при значительно более низкой температуре, особенно если имеются условия для местного накопления тепла.

Связь между периодом задержки и температурой вспышки во многих случаях удовлетворительно аппроксимируется зависимостью (5.7). Однако следует иметь в виду, что при фиксированной температуре T_0 время задержки вспышки не является постоянным для данного ВВ, оно будет меняться в зависимости от массы ВВ, формы заряда, его плотности и других условий. Очень малые количества ВВ могут вообще не вспыхивать при нагреве до заданной температуры, а будут медленно разлагаться.

Так как критические условия теплового взрыва определяются кинетикой экзотермической реакции разложения ВВ, то наиболее общими характеристиками термической стойкости ВВ являются его кинетические константы — энергия активации E и предэкспонента B , входящие в уравнение Аррениуса, связывающее скорость реакции с температурой нагрева вещества.

Кинетические константы находят либо из экспериментальной зависимости скорости разложения ВВ W (например, по скорости газовыделения dv/dt) от температуры, либо по задержке воспламенения при заданной температуре t_s . Для этого строят график в системе координат $\ln \frac{dv}{dt}$; $\frac{1}{T}$ или $\ln t_s$; $\frac{1}{T}$ и по углу наклона получаемых прямых находят величину E , имея в виду, что из уравнения Аррениуса вытекает:

$$\ln W = \ln B - \frac{E}{R} \frac{1}{T}$$

и (с известным приближением)

$$\ln t_s = \ln B + E/(RT).$$

Энергия активации реакций разложения большинства индивидуальных ВВ составляет 125—210 кДж/моль.

Если известны кинетические константы реакции разложения ВВ, то время разложения некоторой задаваемой доли вещества C_m при средней температуре хранения может быть рассчитано по формуле

$$\ln \tau = C_m - n \ln \frac{d}{T_0} + \frac{n+2}{2} E/R \frac{1}{T_0},$$

где τ — время развития теплового взрыва при заданных значениях температуры нагрева T_0 и диаметра заряда ВВ d . Коэффициент n находится из критических условий теплового взрыва:

$$\tau = t_{кр} \left(\frac{d}{d_{кр}} \right)^{-n};$$

$$d_{кр} = AT_0 e^{E/(2RT_0)}; \quad t_{кр} = B e^{E/(RT_0)},$$

где A и B — коэффициенты.

При тепловом воздействии на ВВ в режиме поджигания процесс термического разложения вещества близок к описанному выше механизму теплового взрыва [6]. Их различие состоит в том, что при гомогенном прогреве вещества теплоотвод происходит в окружающую среду и в период развития взрыва температура с небольшим градиентом убывает от глубинных слоев вещества к периферии, в то время как при местном контактом нагреве тепло отводится в глубь холодного вещества с образованием соответствующего температурного поля, а вспышка происходит в контактном слое ВВ. В первом случае взрыв имеет объемный характер, он охватывает всю массу ВВ. Во втором случае он имеет локальный характер, охватывает небольшую массу (слой) ВВ.

Условием нормального воспламенения ВВ от внешнего источника можно считать образование прогретого слоя ВВ с распределением температуры в соответствии с выражением

$$T = T_0 + (T_k - T_0) e^{-ux/\chi},$$

где T_k — температура на поверхности ВВ; u — скорость горения; χ — температуропроводность.

Запас тепла Q , который надо сообщить ВВ для создания такого прогретого слоя, может служить мерой воспламеняемости ВВ. Этот запас может быть рассчитан по уравнению

$$Q = \lambda (T_k - T_0) / u,$$

где λ — коэффициент теплопроводности ВВ.

Экспериментальные методы оценки воспламеняемости ВВ подробно изложены в разделе 9.

Чувствительность ВВ к локальному нагреву (воспламеняе-

мость) определяется кинетическими и теплофизическими характеристиками ВВ. Способность ВВ к распространению горения возрастает с увеличением поперечного размера (диаметра) заряда, внешнего давления и температуры вещества и падает с увеличением теплопроводности ВВ. Какой-либо из перечисленных факторов выбирается в качестве критерия для оценки способности к горению, или горючести ВВ. Чаще других в качестве критерия выбирается диаметр заряда или давление. Находятся такие критические значения этих параметров ($d_{кр}$, $p_{кр}$), которые при прочих постоянных условиях опыта отделяют область возможности распространения горения по заряду ВВ от области, в которой стационарное горение невозможно.

При изготовлении и применении ВВ возможно их воспламенение, которое во многих случаях является причиной пожаров и взрывов с тяжелыми последствиями. Переход горения ВВ в детонацию наиболее опасен. Опыт показывает, что послойное горение порошкообразных ВВ нарушается при повышении давления. Начиная с некоторого давления, зависящего от свойств ВВ, горение резко ускоряется и может перейти в детонацию.

В больших массах и в закрытых помещениях резко возрастает опасность перехода горения в детонацию. Замкнутость помещения способствует нарастанию давления в зоне горения, что, в свою очередь, благоприятствует проникновению горения в глубь массы ВВ. Переход горения ВВ в детонацию происходит следующим образом. После воспламенения ВВ происходит ускоренное горение его в условиях нарастающего давления. Под действием перепада давления между зоной горения и исходным веществом продукты сгорания проникают в глубь последнего, в результате чего резко увеличивается поверхность горения и скорость нарастания давления. Параллельно идет процесс подпрессовки вещества в волне сжатия, распространяющейся из зоны горения. Крутизна фронта волны по мере распространения ее из зоны горения увеличивается вплоть до ударного разрыва и возбуждения детонации.

Условием перехода горения в детонацию является некоторая минимальная длина заряда, при которой может формироваться мощная ударная волна, наличие прочной и инерционной оболочки, обеспечивающей быстрое нарастание давления в зоне горения до критической величины (при медленном нарастании давления волна сжатия может распространяться вдоль заряда, не успевая преобразоваться в ударную).

Основные особенности перехода горения в детонацию промышленных ВВ заключаются в более трудном по сравнению с индивидуальными веществами (гексоген, тэн, тетрил) возбуждении детонации. Эти особенности определяются, видимо, сложностью и неоднородностью состава ВВ, обуславливающих медленное протекание реакции, особенно на начальной стадии в зоне горения,

а также снижением реакционной способности промышленных ВВ при уплотнении вещества в волне сжатия (у индивидуальных ВВ она повышается).

Оценить способность различных промышленных ВВ к переходу горения в детонацию по тем или иным критериям (обычно это критическое давление перехода, длина преддетонационного участка, динамика нарастания давления и др.) значительно труднее, чем индивидуальных ВВ.

По совокупности разных оценок А. В. Соколовым установлено, что аммониты, содержащие гексоген (скальные), имеют большую способность к переходу горения во взрыв, чем составы, содержащие тротил, а последние более склонны к такому переходу, чем динамоны. Добавка алюминия несколько пассивирует ВВ, несмотря на повышение температуры горения. Сильное пассивирующее действие оказывает вода, поэтому водосодержащие ВВ — аквазолы, ифзаниты, аквапиты и др. — имеют пониженную склонность к переходу горения во взрыв. Гранулированные ВВ характеризуются меньшей способностью к такому переходу, чем порошкообразные ВВ того же состава. Относительно нитроэфиросодержащих ВВ известно, что они более опасны при загорании, чем аммониты, особенно пластичные динамиты, содержащие более 30 % нитроэфиров. Были случаи, когда горение даже единичных патронов динамита заканчивалось взрывом.

5.3. ВЫГОРАНИЕ (ДЕФЛАГРАЦИЯ) ВВ

В практике применения промышленных ВВ встречаются случаи нестабильного взрывного горения со скоростями в десятки и сотни метров в секунду. Такое взрывчатое превращение называют *выгоранием*, или *дефлаграцией ВВ*. Оно особенно опасно для шахт, опасных по газу или пыли, так как может вызвать подземные газовые и пылевые взрывы.

Горение предохранительных ВВ опасно по той причине, что более медленное по сравнению с детонацией взаимодействие продуктов горения (пламени) со взрывоопасной средой при достаточно высокой их температуре (800—1000 °С) создает условия воспламенения среды.

Первые случаи выгорания зарядов предохранительных ВВ в угольных шахтах зафиксированы еще в 1905 г. во Франции. Г. Дотриш и Ж. Таффанель предположили, что выгорания вызываются слабым начальным импульсом и смешиванием ВВ с угольной пылью. Нормальной передаче детонации от патрона к патрону препятствует также присутствие буровой муки между патронами заряда. А. Дуэ, Е. Одибер, Л. Дельма отмечали влияние на вероятность выгорания гранулометрического состава, плотности, детонационной способности и других свойств ВВ, а также условий взрывания.

В нашей стране на угольных шахтах выгорания случались на протяжении всей истории взрывных работ. Учащение случаев выгорания ВВ совпало с началом массового внедрения короткозамедленного взрывания на угольных шахтах (50-е годы). При выяснении причин и механизма выгораний шпуровых зарядов удалось показать, что это совпадение не было случайным. Изменение параметров и технологии буровзрывных работ, а также свойств применяемых предохранительных ВВ позволило резко уменьшить число выгораний. Выгорания происходят преимущественно в угольных забоях и учащаются с уменьшением расстояния между шпурами, с пониженным детонационной способностью ВВ и повышением их горючести.

Первые правильные представления об условиях возникновения горения ВВ при взрывном импульсе получены Сарториусом на основании экспериментов, выполненных в условиях, имитирующих единственный шпур, — в стальной mortar с массивной глиняной забойкой. Показано, что когда расстояние между патронами ВВ больше предельного для передачи детонации, в пассивном возникает и развивается горение.

Подобные опыты, но на более высоком экспериментальном уровне, с измерением скоростей различных режимов взрывчатого превращения в ВВ пассивного патрона воспроизведены Ф. М. Галаджием (1960 г.). В зависимости от типа ВВ, расстояния между патронами, физических свойств среды, разделяющей патроны (воздух, песок, угольная мелочь и др.), получены скорости горения от нескольких миллиметров до сотен метров в секунду. Было замечено, что горение в пассивном патроне распространяется только в случае сохранения забойки в канале mortar или при очень медленном ее выталкивании при взрыве, т. е. в том случае, когда в канале mortar поддерживается относительно высокое давление, создаваемое продуктами детонации активного заряда.

Дальнейшие исследования показали, что замкнутость взрывной камеры не является обязательным условием возникновения и развития горения ВВ пассивного заряда (воспринимающего импульс взрывной волны от активного заряда). Например, в гексогене горение возбуждается и на открытом воздухе, если расстояние между активным и пассивным зарядами превышает предельное по передаче детонации. Установлено также, что поджигание и горение бризантных ВВ под действием взрывного импульса — явление столь же закономерное, как и детонация.

Характер возникающего режима превращения ВВ зависит от величины импульса, а возможность его устойчивого распространения — от диаметра заряда (для каждого режима имеется свой критический диаметр, зависящий от химической природы ВВ и его физического состояния, а также от свойств и размеров оболочки заряда или окружающей среды). Помимо этого на горение в большей степени, а на детонацию в меньшей влияют давление

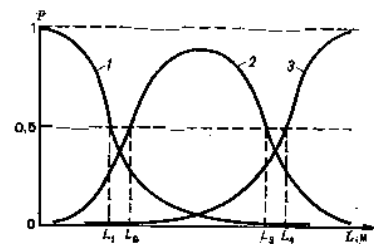


Рис. 5.1. Кривые вероятности возбуждения p детонации (1), горения (2) или отказа (3) в пассивном заряде в зависимости от расстояния между зарядами L

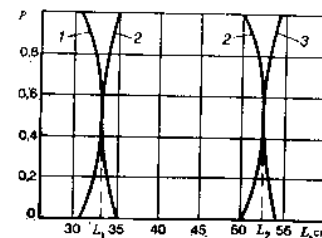


Рис. 5.2. Экспериментальные кривые вероятности возбуждения детонации (1), горения (2) и отказа (3) в пассивном заряде из гексогена в зависимости от расстояния до активного заряда

окружающей среды и температура ВВ. С увеличением этих параметров способность к устойчивому горению при заданном диаметре возрастает, уменьшается критический диаметр цилиндрического заряда, способного к горению. Вот почему обычные предохранительные ВВ в патронах диаметром 32—36 мм при температуре, не превышающей нескольких десятков градусов, не способны загораться от взрывной волны и устойчиво гореть на открытом воздухе. Для загорания этих ВВ необходимо внешнее давление, что реализуется при взрывании зарядов в замкнутой камере.

Если пассивный заряд способен и к детонации, и к горению, то на каждом фиксированном расстоянии между ним и активным зарядом с некоторой вероятностью возможно одно из трех событий: возбуждение в пассивном заряде детонации, поджигание или отказ. Причем с увеличением расстояния вероятность детонации уменьшается и возрастает вероятность горения и отказа, а с некоторого расстояния уменьшается также и вероятность горения.

На кривых зависимости $p=f(L)$ (рис. 5.1) точки L_1, L_2, L_3, L_4 характеризуют соответствующие расстояния: L_1 — возбуждения детонации в пассивном заряде с вероятностью, равной 0,5; L_2 и L_3 — в пассивном заряде с той же вероятностью возбуждается горение; L_4 — в пассивном заряде фиксируется 50% отказов. Однако в реальных условиях вероятность отказов около точек L_1 и L_2 весьма мала, так же как вероятность детонации у точек L_3 и L_4 . Поэтому практически кривые 1 и 2 пересекаются в точке, соответствующей вероятности детонации и горения, равной 0,5 (см. рис. 5.1). Аналогично кривые 2 и 3 пересекаются в точке, соответствующей такой же вероятности горения и отказов.

Кривые вида $p=f(L)$ различны для разных ВВ и могут меняться в зависимости от свойств среды между зарядами, давления в зарядной камере и других факторов, определяющих усло-

вия распространения ударных волн и потока ПВ или иных факторов, влияющих на условия протекания детонации или горения. Так, например, расстояние, отвечающее достаточно высокой вероятности возбуждения детонации, возрастает с увеличением диаметра зарядов при канализации взрыва и уменьшается с повышением плотности ВВ пассивного заряда. Расстояния возбуждения горения также возрастают с увеличением диаметра пассивного заряда, а также с увеличением давления окружающей среды и температуры вещества. При этом следует иметь в виду вероятность не только возникновения очага возбуждения того или иного режима превращения, но и распространения данного режима из начального очага по заряду ВВ. Поэтому вероятность возникновения детонации или горения определяется не только чувствительностью вещества к импульсу взрывной волны, но и достаточными размерами очага. Для развития процесса необходимо, чтобы заряд данного диаметра при заданных внешних условиях был способен к устойчивому распространению детонации или горения. В качестве примера можно указать, что минимальный инициирующий импульс взрывной волны для возбуждения детонации уменьшается, если ВВ пассивного заряда поместить в прочную и массивную оболочку, а для возбуждения горения — в оболочку из материала с высокими теплоизоляционными свойствами.

В некоторых условиях (например, для предохранительных ВВ на открытом воздухе) вероятность возбуждения горения практически близка к нулю и наблюдается только возбуждение детонации или отказ в пассивном заряде. Напротив, если опыты поставлены в условиях замкнутой, неразрушаемой камеры, где давление ПД сохраняется достаточно длительное время, возбуждение горения в пассивном заряде имеет регулярный и закономерный характер.

Для построения экспериментальных кривых вероятности возбуждения детонации (рис. 5.2) в гексогене (диаметр патрона 35 мм, плотность 1,2 г/см³) в функции расстояния от активного заряда — тротила (диаметр патрона 35 мм, плотность 1 г/см³) патроны укладывали на открытом грунте. Опыты с другими ВВ выполняли в стальной мортире (рис. 5.3) с каналом длиной 2,4 м и диаметром 55 мм с песчано-глиняной забойкой длиной 0,9—1 м. В качестве активного заряда применяли патрон аммонита ПЖВ-20 массой 40 г и диаметром 36 мм. Пассивные заряды изолировались с боковой поверхности дюралем или алебастром. Результаты определения средних расстояний возбуждения горения и детонации в некоторых предохранительных ВВ приведены в табл. 5.1, из которых следует, что в условиях замкнутого канала расстояние возбуждения горения в 5—10 раз больше расстояния возбуждения детонации. Предохранительные ВВ, содержащие нитроглицерин, более восприимчивы к импульсу взрывной волны, чем аммонит без нитроглицерина, хотя возбуждение горе-

Таблица 5.1

ВВ пассивного заряда	Среднее (50% вероятности) расстояние возбуждения, см	
	детонации	горения
Нитроэфирсодержащее ВВ	7,5	60
Угленит Э-6	6,0	32
Аммонит ПЖВ-20	3,3	46

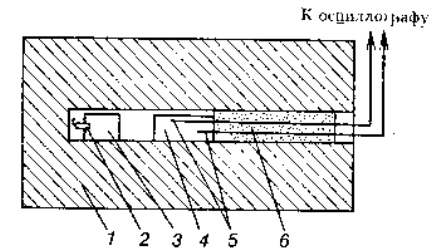


Рис. 5.3. Схема испытаний в стальной мортире:
1 — мортира; 2 — ЭД; 3 — активный заряд; 4 — пассивный заряд; 5 — изоляционные датчики; 6 — забойка

ния в аммоните ПЖВ-20 происходит на больших расстояниях, чем в высокопредохранительном углените Э-6, содержащем обменную пару солей.

Предполагается, что при возбуждении горения ВВ в замкнутой камере (шпуре, канале мортиры с забойкой) отказавшая часть заряда поджигается нагретыми до высокой температуры ПВ сдетонировавшей части заряда. Такой механизм поджигания возможен, если сдетонировавшая часть заряда сравнительно велика и взрыв ее существенно не нарушил целостности зарядной камеры. В этом случае падение давления нагретых ПВ вследствие диффузии через разрыхленный слой угля (породы) медленное, и газы контактируют с невзорвавшейся частью заряда при относительно высоком давлении. По этому механизму вероятность поджигания предохранительных ВВ зависит от начальной температуры газов, их давления, изменения этих параметров во времени и горючести ВВ. Однако поджигание ВВ пассивного заряда (в опытах по передаче детонации) или отказавшей части шпурового заряда (в естественных условиях) продуктами взрыва активного заряда или патрона боевика нельзя рассматривать как единственно возможный механизм. Ряд наблюдений свидетельствует о возможности поджигания ВВ ударными волнами. Так, например, в мортире удавалось поджечь ВВ пассивного заряда и в тех случаях, когда между зарядами помещена перемычка из плотных материалов — пластилина, дюралюминия, прессованного угля и т. п. В отдельных опытах перемычка перекрывала все сечение канала, т. е. создавались такие условия, когда контактное поджигание пассивного заряда продуктами взрыва активного заряда если не полностью исключалось, то во всяком случае сильно затруднялось. Предохранительный аммонит ПЖВ-20 удавалось поджечь взрывом КД в манометрической бомбе в тех опытах, когда заряд и детонатор разделялись латунной пластиной толщиной до 10 мм, а давление газа в бомбе было не менее 8 МПа.

На теоретическую возможность поджигания ВВ ударными волнами указывает и сам механизм ударного возбуждения, первой стадией которого является адиабатический разогрев и воспламенение некоторого пограничного слоя независимо от последующего развития детонации или горения с различными скоростями. Теоретически граничные условия, разделяющие развитие одного из двух указанных характерных режимов, до сих пор не определены. Однако качественно картина развития двух режимов может быть описана (см. подраздел 3.3).

Для возбуждения устойчивого горения в заряде необходимо и достаточно, чтобы первичная зона воспламенения, созданная ударной волной, была не меньше прогретого слоя Δ , отвечающего стационарному горению, размер которого определяется из выражения

$$\Delta = \frac{\lambda}{c_p \rho_0 u_r},$$

где λ — коэффициент теплопроводности; c_p — теплоемкость; ρ_0 — плотность ВВ; u_r — скорость горения.

Для возбуждения детонации параметры инициирующей волны должны быть выше, чем для возбуждения горения, и обеспечивать такую скорость выделения тепла за фронтом в зоне химической реакции, чтобы энергия поступала на ударный фронт и поддерживала его параметры на уровне, отвечающем стационарной детонации данного ВВ.

Описанная модель возбуждения горения динамическим сжатием ВВ в ударной волне относится к случаю, когда волна входит в вещество из плотной малосжимаемой среды. Если же волна набежит на ВВ в малоплотной среде, например в воздухе, то механизм поджигания становится иным. В этом случае превалирующее значение приобретает поджигание ВВ разогретым воздухом в отраженной от поверхности заряда волне, а глубина прогрева вещества выводится из условий теплопередачи от воздуха к ВВ и теплопроводности ВВ.

Для поджигания требуются более низкие параметры падающей волны, чем при адиабатическом сжатии и разогреве самого ВВ. Это объясняется прежде всего высокой сжимаемостью воздуха, благодаря чему даже относительно слабые волны вызывают его сильный разогрев. Кроме того, из-за различия плотностей воздуха и ВВ давление в отраженной волне примерно в 8 раз превышает давление падающей волны.

Температура воздуха рассчитывается по следующим уравнениям: в проходящей волне

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{\left[\gamma_1 M_s^2 - \frac{\gamma_1 - 1}{2} \right] \left[\frac{\gamma_1 - 1}{2} M_s^2 + 1 \right]}{\left(\frac{\gamma_1 + 1}{2} \right)^2 M_s^2};$$

Таблица 5.2

Плотность ВВ, г/см ³	Газ в камере низкого давления	Скорость падающей ударной волны, поджигающей ВВ, м/с	Давление в ударной волне, МПа		Температура газа в отраженной волне, °С
			падающей	отраженной	
Гексоген*					
1,3	Воздух	1124	1,15	6,7	1207
1,3	Азот	1284	1,7	9,4	1515
1,3	Смесь воздуха с 3 % метана	985	0,9	4,4	887
1,3	Смесь воздуха с 5 % метана	757	0,41	2,0	572
1,5	Воздух	1168	1,27	7,5	1277
Тэп					
1,2	То же	936	0,71	4,0	835
1,2	Смесь воздуха с 9 % метана	773	0,43	2,1	567
Аммонит ПЖ В-20					
1,1	То же	788	0,45	2,2	587

* Задержка воспламенения составляет 96 мкс.

в отраженной волне

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{[(3\gamma_1 - 1) M_s^2 - 2(\gamma_1 - 1)] [2(\gamma_1 - 1) M_s^2 + (3 - \gamma_1)]}{(\gamma_1 + 1)^2 M_s^2},$$

где T_1 и T_2 — температуры газа соответственно перед фронтом падающей ударной волны и за ним; $\gamma_1 = c_p/c_v$ — отношение удельных теплоемкостей газа; $M_s = u_1/c_1$ — число Маха падающей ударной волны; u_1 — скорость падающей ударной волны; c_1 — скорость звука в газе перед падающей ударной волной; T_3 — температура газа за отраженной ударной волной.

Представление о параметрах поджигающей волны дают опыты в ударной трубе, где волна возникает в камере низкого давления в результате разрыва мембраны, разделяющей камеры высокого и низкого давлений. Давление газа в отраженной ударной волне, поджигающей ВВ, температура разогрева газа и задержка воспламенения приведены в табл. 5.2.

В ударной трубе при добавлении к воздуху 3—5 % метана критическое давление в инициирующей волне при поджигании гексогена плотностью 1,3 г/см³ снизилось до 0,41 МПа. Это можно объяснить повышением температуры в отраженной волне за счет теплоты реакции окисления метана.

Таблица 5.3

Активный заряд	Скорость детонации активного заряда, км/с	Кислородный баланс ВВ, активного заряда, %	Среднее (50%) расстояние, см	
			передачи детонации	возбуждения горения
Тротил — алюминий 70/30	2,81	-78,5	14,5	45,2
Тротил — алюминий 85/15	4,12	-76,3	27	52,3
Тротил — хлористый аммоний 70/30	3,73	-74	16	46,5
Гексоген	6,1	-21,6	31,5	36,7
Тротил	5,01	-74	36,3	60
Тротил — селитра:				
90/10	5,03	-64	27,3	43,1
80/20	4,78	-55	31,2	42,4
70/30	4,91	-45,8	29,4	43,5
60/40	4,49	-36	27,2	40,5
50/50	4,59	-27	28,5	34,5
40/60	4,49	-18	25,7	29,5
30/70	4,5	-8	27	—
Аммонит 6ЖВ	4,5	+0,26	29,8	—
Порох	—	-12,1	—	6,9

Итак, воспламенение ВВ взрывной волной возможно: в результате контакта с ПВ активного заряда, поверхностным поджиганием воздухом, разогретым в отраженной ударной волне, адиабатическим сжатием и разогревом ударной волной самого вещества.

Результаты опытов по возбуждению горения и детонации в пассивном заряде импульсом взрывной волны активного заряда, расположенного на некотором расстоянии от него, приведены в табл. 5.3. Под взрывной волной в данном случае подразумевается совокупность ударной воздушной волны и примыкающих к ней расширяющихся газообразных ПВ. В опытах менялось вещество активного заряда; в качестве пассивного заряда во всех случаях использовали гексоген насыпной плотности. Видно, что в то время как расстояние передачи детонации закономерно возрастает с увеличением энергетических характеристик ВВ активного заряда, поджигающая способность мало зависит от энергии, но в сильной степени — от химического состава ВВ активного заряда. Наибольшую поджигающую способность имеют ВВ с отрицательным кислородным балансом и с большой величиной пламени — тротил, смесь его с алюминием; наименьшую — ВВ с нулевым кислородным балансом. Особенно наглядно эти закономерности проявляются на примере смесей тротила с селитрой. При близких теплотах взрыва поджигающая способность возрастает с увеличением содержания в смеси тротила, т. е. с уменьшением ее кислородного баланса. Аммонит 6ЖВ, имеющий близкий к нуле-

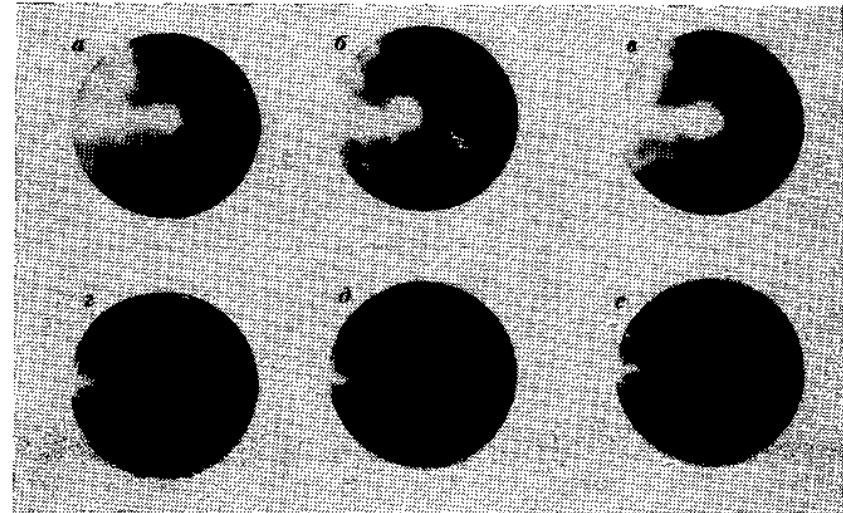


Рис. 5.4. Фотографии пламени ВВ при различных соотношениях тротила и аммиачной селитры: а — 100 % тротила; б — 90 и 10 %; в — 80 и 20 %; г — 40 и 60 %; д — 30 и 70 %; е — 21 и 79 %

вому кислородный баланс, вообще не возбуждал горения в гексогене.

Можно полагать, что в описанных условиях опыта основным воспламеняющим агентом является вторичное пламя, возникающее при смешивании с воздухом ПВ с отрицательным кислородным балансом, содержащих водород, окись углерода, метан, а также сажу, алюминий и другие твердые вещества (рис. 5.4). Роль ударной волны в процессе поджигания в данном случае, по всей вероятности, вспомогательная, о чем можно судить по следующим фактам: гексоген загорался от взрыва черного пороха, генерирующего лишь слабую ударную волну в воздухе, но горение возбуждалось на значительно меньшем расстоянии, чем от детонации тротила, хотя у пороха пламя большее. Это свидетельствует о том, что ударная волна прогревает вещество, благодаря чему облегчается его поджигание движущимися вслед за волной горячими газами. В опытах с тротилом торец пассивного патрона из гексогена прикрывали металлической фольгой толщиной 0,4—0,5 мм, в результате чего зона возбуждения горения исчезала. На близких расстояниях возбуждалась детонация, а с увеличением расстояния фиксировались только отказы.

Под горючестью ВВ понимают их способность к горению. Аналогично распространению детонации устойчивое распространение

горения по ВВ возможно, начиная с некоторого диаметра заряда, который называют критическим диаметром горения.

Критический диаметр горения связан с отводом тепла из зоны горения в окружающую среду вследствие теплопроводности.

Устойчивость, горения, т. е. равномерное распространение пламени по ВВ, определяется динамическим равновесием теплового потока. Количество тепла, передаваемого из зоны горения впереди лежащим слоям, должно быть достаточным для нагрева этих слоев до температуры воспламенения или испарения (газификации). Большинство компонентов промышленных ВВ, такие как аммиачная селитра, тротил, нитроглицерин и др., при нагреве первоначально испаряются или газифицируются, а затем реагируют в газовой фазе. Реакции в газовой фазе могут быть мономолекулярные ($n=1$) и бимолекулярные ($n=2$), так что для brutto-реакции в целом $n > 1$. Количество тепла может быть подсчитано из общего динамического баланса тепла системы

$$q_0 = q_1 + q_2 + q_3$$

или через массовую скорость

$$q_0 = u_r Q_r,$$

где q_0 — скорость выделения тепла при реакции горения; q_1 — скорость теплового потока в глубь вещества; $q_2 = dS(T_r - T_b)$ — скорость отвода тепла в окружающую среду через боковую поверхность; q_3 — скорость теплоотвода продуктами горения; u_r — массовая скорость горения; Q_r — теплота горения; α_r — коэффициент теплопередачи от зоны горения к окружающей среде; S — поверхность теплоотдачи; T_r — температура горения; T_b — температура окружающей среды.

Так как значительная доля тепловыделения относится к реакции в продуктах газификации или испарения ВВ, скорость горения становится некоторой функцией от давления

$$u_r = A + Bp^\nu, \quad (5.8)$$

где A и B — эмпирические коэффициенты. Для не слишком больших давлений степень ν близка к единице. Скорость горения зависит также от начальной температуры ВВ

$$u_r = \frac{1}{A_1 - B_1 T_0}. \quad (5.9)$$

В общем виде Я. Б. Зельдовичем (1944 г.) предложено выражение для массовой скорости горения ВВ с высокой летучестью

$$u_r = \sqrt{\frac{2\lambda}{Q} \left(\frac{RT_r^2}{E} \right)^{n+1} (T_r - T_0)^{-n} W_r},$$

где λ — теплопроводность газов; n — порядок реакции; E — энергия активации реакции; W_r — скорость реакции в газах,

$$W_r = kp^n.$$

Из условия теплового динамического баланса следует, что (при постоянстве q_3) доля тепла, поступающего в вещество и обеспечивающего распространение горения, тем больше, чем больше разность $q_0 - q_2$. Это тепло пропорционально квадрату диаметра, а отвод тепла в окружающую среду с единицы боковой поверхности заряда — диаметру в первой степени. Отсюда следует, что, начиная с некоторого диаметра заряда, при постоянстве прочих условий, влияющих на закономерности горения, оно устойчиво распространяется по ВВ при поджигании его с торца заряда. Вместе с тем очевидно, что критический диаметр горения $d_{кр.г}$ может меняться с изменением характеристик, влияющих на горение. Среди них особое значение имеют давление окружающей среды p_0 и начальная температура ВВ T_0 . С увеличением этих характеристик возрастает скорость тепловыделения, как это следует из уравнений (5.8) и (5.9), и уменьшается величина $d_{кр.г}$.

Таким образом, между величинами $d_{кр.г}$, p_0 и T_0 можно установить определенную связь. При заданных p_0 и T_0 (и прочих постоянных условиях) определится величина $d_{кр.г}$. И наоборот, при постоянном диаметре заряда может быть найдено такое значение давления или температуры вещества, начиная с которого возможно устойчивое распространение горения. Эти величины принято называть критическим давлением $p_{кр}$ и критической температурой $T_{кр}$ горения. Любая из этих величин может быть принята в качестве критерия горючести ВВ. Чем меньше $d_{кр.г}$ или $p_{кр.г}$, или $T_{кр}$, тем больше горючесть ВВ. На этом принципе основаны различные методики экспериментальной оценки горючести ВВ.

По данным А. И. Романова, критическое давление горения для аммонитов 6ЖВ, ПЖВ и угленита Э-6 соответственно составляет (в МПа): 1,4; 1,3; 1,6. Минимальная навеска (г) воспламенителя, по данным Б. Н. Кондрикова и В. П. Лушкина, для аммонитов 6ЖВ, скального № 1 и ПЖВ-20 соответственно равна 1; 0,6 и 0,8—1. В качестве поджигающего состава применяли пироксидин в смеси с аммиачной селитрой — состав с большим газообразованием. Поэтому с увеличением его навески возрастает давление в замкнутом сосуде (манометрической бомбе). Таким образом, величина навески косвенно связана с $p_{кр}$. Данная методика удобна своей простотой.

Большинство промышленных ВВ обладает сравнительно невысокой горючестью. Выгорание возможно только в том случае, если нарушается нормальный режим детонации в шпуровом заряде и взрыв получается неполным. Поэтому изучение причин выгорания должно быть тесно связано с исследованием детонации.

онной способности (надежности детонации) предохранительных ВВ. Надежность детонации многопатронного заряда ВВ в основном определяется тремя факторами: восприимчивостью к импульсу КД, детонационной способностью ВВ в заряде и способностью передавать детонацию от патрона к патрону. Мерой оценки этих показателей является минимальный инициирующий импульс, например, в виде параметров инициирующей ударной волны или навески инициирующего заряда; критический диаметр детонации и расстояние передачи детонации. Эти показатели зависят от физического состояния ВВ и поэтому должны определяться с учетом возможного изменения состояния ВВ в шпурах перед взрыванием или в процессе взрывания — плотности ВВ, формы заряда, его целостности и сплошности.

Падение детонационной способности предохранительных ВВ возможно вследствие слеживания, увлажнения и других физико-химических процессов (см. раздел 7). Однако неблагоприятные изменения в свойствах ВВ могут возникнуть и в процессе самого взрывания. Хотя при испытании на полигоне ВВ надежно детонируют в удлиненном заряде и передают детонацию от патрона к патрону на расстояние 5—10 см, нередкие остатки ВВ в стаканах объясняются тем, что при взрывании в шпурах могут происходить изменения в заряде, отрицательно влияющие на его способность к детонации. Специальные исследования подтвердили это предположение.

Причиной неполных взрывов многопатронных зарядов ВВ может быть образование перемычек из буровой муки и штыба между патронами при плохой очистке шпуров. В табл. 5.4 приведены расстояния передачи детонации через некоторые среды для патронов массой 100 г и диаметром 31 см.

Причиной отказов и неполных взрывов может быть также замокание ВВ в обводненных шпурах, особенно при высоком давлении рудничного газа в зарядной полости (до 6 МПа). По действующим нормам патроны водостойчивых предохранительных ВВ должны выдерживать столб воды высотой 1 м в течение 1 ч, что отвечает гидростатическому давлению 0,01 МПа и что в сотни раз меньше гидростатического давления, которое может возникнуть в обводненных шпурах при высоком газовом давлении. Высокое давление газа в заряженных шпурах может способствовать также выталкиванию забойки и образованию больших промежутков между патронами.

Более сложные причины связаны с динамикой взрыва, особенно многозарядного, в течение которого в зарядах могут происходить сильное уплотнение ВВ или нарушение его формы и целостности, отрицательно влияющие на способность к нормальной детонации по всей длине заряда.

Канальный эффект. При зарядании шпуров между стенками шпура и патронами всегда имеется некоторый кольцевой зазор

Таблица 5.4

Вещество	Расстояние передачи детонации между патронами через различные среды, см		
	Воздух	Вода	Песок
Тэн	38/31	4/3	3/2
Нитроэфирсодержащее ПВВ	30/12	2/2	2/0
Гексоген	28/30	3/4	2/2
ПВВ, содержащее гексоген	28/14	3/2	2/2
Динамит 62 %-ный	25/11	4/3	3/2
Аммонал	24/6	2/2	1/1
Тетрил	23/24	4/3	3/2
Тротил	20/9	2/1	1/1
Аммонит 6ЖВ	20/10	3/2	1/1
Аммонит скальный	17/9	3/3	2/1

Примечание. В числителе приведены значения для активного заряда — прессованной тротиловой шашки массой 50 г, в знаменателе — для активного заряда, вялого, пассивного.

величиной 10—15 мм, который влияет на режим детонации различных ВВ. В мощных порошкообразных ВВ типа гексогена при взрывании в трубах с радиальным зазором детонация распространяется с большей скоростью, чем на открытом воздухе; во многих промышленных ВВ, особенно предохранительных, отличающихся невысокой детонационной способностью, детонация затухает; в пластичных ВВ типа динамитов возникает пульсирующая детонация. Такое влияние радиального зазора на режим детонации называют канальным эффектом.

Л. В. Дубнов и Л. Д. Хотина, А. И. Гольбиндер и В. Ф. Тышевич, А. Н. Дремин и Р. Ванденберг показали, что канальный эффект зависит от свойств ВВ, усиливается с увеличением массы и прочности трубы, длины заряда, наличия перемычек из инертного материала между частями заряда. Он достигает максимума при некотором оптимальном зазоре и исчезает при очень больших и очень малых зазорах. Шероховатость стенок трубы и поверхности заряда, так же как и перекрытие зазора бумажными, картонными перегородками, ослабляет канальный эффект. Мощный дополнительный детонатор в отличие от взрывания на открытом воздухе ускоряет затухание детонации ВВ типа аммонитов. Чем меньше диаметр заряда, тем вероятнее затухание детонации вследствие канального эффекта.

Эксперименты по изучению канального эффекта проводились Л. В. Дубновым и Л. Д. Хотиной с применением высокоскоростного фоторегистра и импульсной рентгенографии. Для получения достаточно контрастных рентгенограмм в состав ВВ вводили соли свинца или поверхность заряда покрывали свинцовой фольгой.

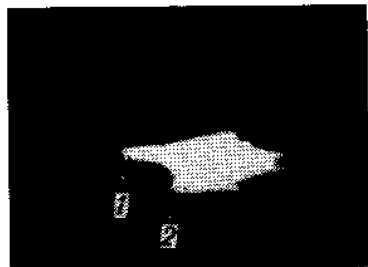


Рис. 5.5. Фотография канального эффекта:

1 — фронт ударной волны в зазоре;
2 — фронт детонации

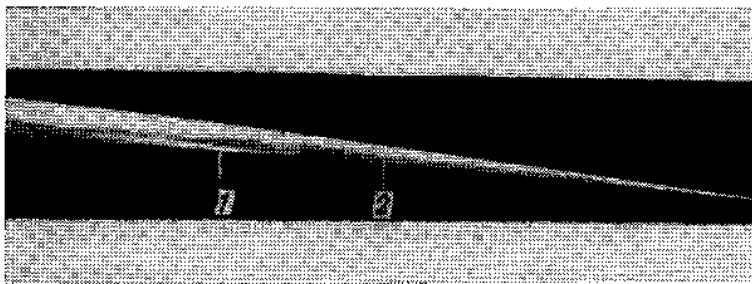


Рис. 5.6. Фотохронограмма канального эффекта аммонита ПЖВ-20:
1 — свечение ударной волны в зазоре; 2 — свечение детонации в заряде ВВ

Заряды аммонита ПЖВ-20, порошкообразного тротила и гексогена взрывали в трубах прямоугольного сечения из плексигласа.

На фотографиях процессов, протекающих в зарядах под действием канального эффекта (рис. 5.5), видно, что в случае взрыва аммонита ПЖВ-20 фиксируются зона свечения в ВВ, соответствующая детонационной волне, и зона свечения в канале, которая постепенно расширяется. При этом ее передний фронт удаляется от фронта детонации. Это свидетельствует о том, что граница раздела светящейся среды в канале и невозмущенного воздуха перемещается по каналу с большей скоростью, чем скорость детонации ВВ. Отличие взрывов аммонита и тротила состоит в том, что при выбранных условиях опыта зона свечения в канале для аммонита непрерывно расширяется, в то время как для тротила примерно через 90 мс от момента инициирования остается неизменной. При взрыве гексогена разделение зон свечения не столь отчетливо, периодически фиксируются своеобразные вспышки.

На основании снимков, выполненных в режиме временной развертки (рис. 5.6), выявлены следующие особенности детонации ВВ в условиях канального эффекта:

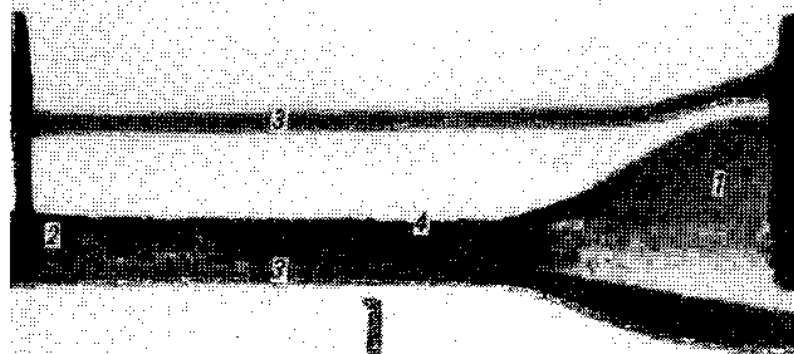


Рис. 5.7. Рентгенограмма взрыва заряда ВВ в трубке с зазором:
1 — ПД; 2 — исходное ВВ; 3 — оболочка заряда; 4 — уплотненная зона

при взрыве аммонита ПЖВ-20 скорость детонации монотонно падает, вплоть до полного затухания. Скорость светящейся волны в зазоре также постепенно убывает, но медленнее, в результате чего разность между скоростью волны в зазоре ω и скоростью детонационного фронта D растет со временем;

при взрывании порошкообразного тротила обе скорости вначале возрастают, но приращение D больше, чем приращение ω . На некотором расстоянии от места инициирования обе скорости становятся равными, и весь комплекс со смещенными друг относительно друга передними фронтами перемещается дальше с практически постоянной скоростью, превышающей скорость детонации аналогичного заряда тротила на открытом воздухе. Конечная скорость в данном случае соответствует скорости детонации тротила при плотности порядка $1,3 \text{ г/см}^3$;

для флегматизированного порошкообразного гексогена детонация протекает аналогично, но с несколько меньшей длиной участка выравнивания скоростей. Стабилизированная скорость детонации равна $6,83 \text{ км/с}$, что соответствует скорости детонации гексогена при плотности $1,23 \text{ г/см}^3$;

для прессованного тротила участок и время выравнивания скоростей меньше, чем для порошкообразного. Прирост скорости детонации составляет около 400 м/с .

Исследования канального эффекта с помощью рентгеноимпульсной съемки показали, что впереди фронта детонации вещество уплотнено, а сечение заряда уменьшено (рис. 5.7). Уплотнение неравномерно по поперечному сечению заряда и по длине. Рентгенограмма позволяет заключить, что по зазору распространяется ударно-воздушная волна, причем во всех случаях на начальном участке ее $\omega > D$, а затем в зависимости от влияния уплотнения на детонационные свойства ВВ скорости могут выравниваться.

Для подтверждения гипотезы о том, что в зазоре со скоростью ω движутся не продукты детонации, а ударная волна, выполнены опыты в разреженной атмосфере. При уменьшении давления воздуха в трубе до 1,33 кПа в аммоните ПЖВ-20 детонация затухала на участке, примерно вдвое большем, чем в опытах при атмосферном давлении. Это является следствием снижения давления в канале, обуславливающего уплотнение ВВ впереди фронта детонации, что связано с уменьшением амплитуды волны, распространяющейся по разреженной атмосфере.

Таким образом, в зазоре между зарядом и стенками трубы распространяется ударная воздушная волна прямоугольного профиля, опережающая фронт детонации. Она возникает в результате сжатия воздуха в канале продуктами взрыва. Передний фронт продуктов образует своеобразный газовый поршень, примыкающий к фронту детонации и перемещающийся по каналу со скоростью D . Возникающая в канале ударная волна по общим законам газодинамики должна характеризоваться большей скоростью, чем скорость газового поршня.

К моменту завершения формирования ударного фронта скорость волны ω может быть выражена как функция D , исходя из общих газодинамических зависимостей:

$$\omega = u_d \frac{\rho}{\rho - \rho_0}; \quad \frac{\rho}{\rho_0} = \frac{(k+1)p + (k-1)p_0}{(k-1)p + (k+1)p_0},$$

где k — показатель изэнтропы воздуха.

В данном случае величина u_d — скорость газового поршня, равная скорости детонации, а давление на границе раздела ПВ — воздух можно принять приближенно равным среднему давлению ПВ в зарядной камере (см. подраздел 2.2.2):

$$p_{ПВ} = RT_{всп} \rho_3 / (1 - \alpha \rho_3),$$

где ρ_3 — плотность заряжания в трубе; α — коэфф. ПВ. Тогда

$$\omega = D \frac{(k+1)p + (k-1)p_0}{(k-1)p + (k+1)p_0}.$$

При высокой плотности заряжания, т. е. при малом отношении площади сечения зазора к площади сечения трубы, $p \gg p_0$ и предельная скорость ударной волны $\omega = D(k+1)/2$.

Приняв для воздуха $k=1,4$, получим равенство $\omega = 1,2D$, справедливое при допущении постоянства скорости вдоль всей образующей «поршня». Вследствие трения сжатого воздуха о стенку на поверхности раздела ПВ — воздух образуется градиент скорости и возникает «завал», хорошо видимый на снимках. Этот «завал» тем больший, чем больше сечение зазора. Условие $u=D$ сохраняется только в угловой точке А (рис. 5.8), а среднее значение $u < D$.

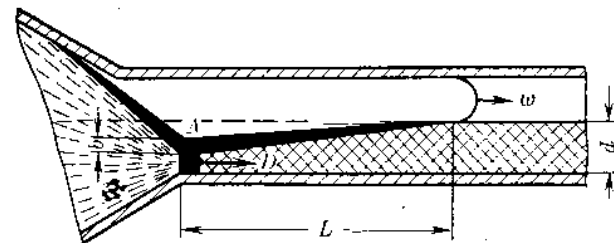


Рис. 5.8. Схема деформации заряда при канальном эффекте:

ω — фронт воздушной волны в зазоре; D — фронт детонации; d — диаметр исходного заряда; b — толщина уплотненной зоны ВВ; L — длина зоны уплотненного ВВ

Вследствие возникновения канальной ударной волны заряд впереди фронта детонации уплотняется, особенно из ВВ с малой плотностью. В результате распространения волны сжатия по веществу от поверхности контакта с ударной волной в заряде возникает коническая область уплотнения, примыкающая своим основанием к фронту детонационной волны. Степень деформации заряда помимо физических свойств ВВ зависит от длины и давления ударной волны.

В свою очередь, изменение площади сечения заряда, а также возникновение в нем зоны повышенной плотности могут повлиять на процесс детонации.

Максимальная глубина динамического сжатия определяется из уравнения

$$\sigma = u' \tau_k = u' Z / \omega,$$

где τ_k — максимальное время действия канальной ударной волны на материальную точку поверхности заряда до подхода к ней фронта детонации, определяемое как частное от деления длины ударной волны на ее скорость; u' — скорость волны сжатия, распространяющейся по ВВ. Конечная плотность сжатого слоя определяется адиабатой ударного сжатия ВВ.

В общем виде длина ударной волны находится из выражения

$$Z = \int_{\tau_0}^t [\omega(t) - D'(t)] dt,$$

где τ_0 — время образования первичного ударного фронта.

Анализ приведенной функции показывает, что длина волны не может неограниченно расти со временем прежде всего потому, что с ее увеличением возрастает поверхность трения между сжатым в волне воздухом, стенками трубы и поверхностью заряда, а также увеличиваются потери энергии в волне. В результате этого скорость ударной волны уменьшается с увеличением ее длины; соответственно при постоянной D уменьшаются разность

$\omega-D$ и отношение dL/dt . В конечном итоге ударная волна фиксированной и максимальной для данных условий длины распространяется по каналу со скоростью детонации ВВ. Такое равновесие быстро наступает для прессованных и медленнее для порошкообразных индивидуальных, не слишком чувствительных ВВ, у которых в результате уплотнения вещества скорость детонации растет, а возрастающие потери в ударной волне до некоторой степени компенсируются ускорением движения толкающего газового «поршня».

При взрывании высокочувствительных ВВ (гексоген) канальная ударная волна не успевает развиться на значительную глубину, так как она сравнительно быстро инициирует ВВ с поверхности заряда впереди первичного фронта детонации. В результате этого возникает пульсирующая детонация, вызываемая периодическими канальными ударными волнами. Средняя скорость детонации заряда в этих условиях выше скорости детонации такого же заряда в трубе без зазора, причем для порошкообразного гексогена она возрастает как следствие уплотнения ВВ впереди фронта детонации, так и вследствие инициирования обгоняющими канальными ударными волнами.

При уменьшении скорости детонации с увеличением плотности ВВ (в аммоните) процесс можно уподобить движению поршня с замедлением. При этом длина волны может расти, несмотря на увеличение потерь энергии на трение и снижение ω вследствие прогрессирующего снижения D и соответствующего увеличения разности $\omega-D$. Однако, как показывает фоторегистрация, и в этом случае устанавливается равновесие, характеризующее постоянством длины волны, хотя и на более длинных участках заряда, если только детонация не затухнет. Затухание детонации зарядов аммонита, некоторых слабых индивидуальных ВВ (например, динитросоединений) при взрывании в трубах (шпурах) с зазором может быть объяснено уменьшением эффективного сечения заряда (скорость детонации падает с уменьшением диаметра заряда). Причем энергии, выделяемой в детонационной волне, видимо, не хватает для инициирования слоя ВВ, уплотненного канальной ударной волной, и этот слой можно рассматривать в грубом приближении как инертное вещество.

Заряд впереди детонационного фронта может быть уплотнен также ударной волной, распространяющейся по оболочке. На рентгенограмме детонации заряда ВВ со скоростью 4,5 км/с, помещенного на металлическую пластину (рис. 5.9), видно, что впереди детонационного фронта волна, распространяющаяся по металлу и входящая в ВВ, уплотняет его и отрывает от пластины. Такое уплотнение ВВ возможно в тех случаях, когда скорость звука в оболочке в 1,5—2 раза превышает скорость детонации ВВ.

Таким образом, канальный эффект является одной из причин затухания детонации предохранительных ВВ в шпурах и как след-

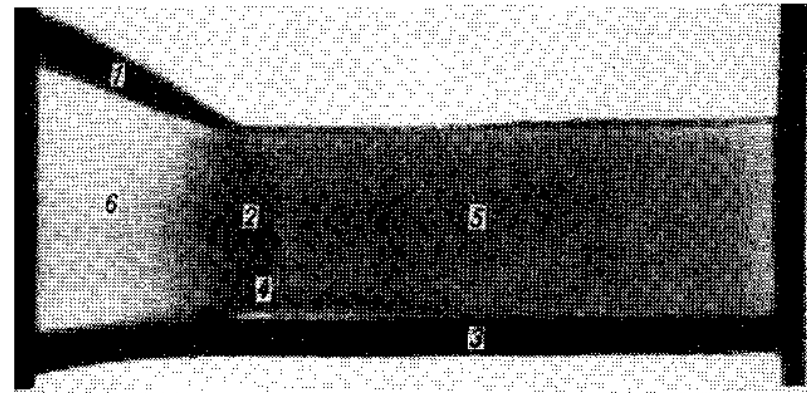


Рис. 5.9. Рентгенограмма детонации заряда ВВ на металлической пластине: 1 — фронт разлета ПД; 2 — фронт детонации; 3 — металлическая пластина; 4 — зона уплотнения ударной волной ВВ; 5 — исходное ВВ; 6 — продукты детонации

ствие выгорания отказавшей части заряда. Канальный эффект возможен в диапазоне величин радиального зазора от 0,1 до 3 диаметров заряда. Однако наиболее опасными являются зазоры порядка 0,2 диаметра заряда, когда детонация предохранительных ВВ затухает на самом коротком участке. Это обстоятельство имеет большое практическое значение, и для предотвращения канального эффекта следует полностью исключить радиальный зазор в шпурах.

Уплотнение ВВ при групповом одновременном взрывании. Механизм уплотнения соседних шпуровых зарядов при их взаимодействии исследован И. И. Поповым и Ф. М. Галаджием (МакНИИ). При одновременном взрывании вследствие разброса во времени срабатывания ЭД мгновенного действия или применения короткозамедленного взрывания с минимальным интервалом замедления 15—25 мс шпуровые заряды предохранительных ВВ, ранее взорвавшиеся, продуцируют во взрываемом угольном массиве волны сжатия. Эти волны распространяются по угольному массиву со скоростью, определяемой его физико-механическими свойствами. Волна сжатия, достигнув невзорвавшегося шпура на границе раздела с углем, отражается в виде волны растяжения, вызывая откольные явления на границе раздела сред. Откольные частицы, двигаясь со скоростью порядка 5—20 м/с, заполняют свободное пространство шпура и уплотняют заряд предохранительного ВВ. Угольная мелочь может проникнуть также между торцами натронов ВВ и образовать инертные перемычки между ними. Схема уплотнения зарядов предохранительных ВВ показана на рис. 5.10.

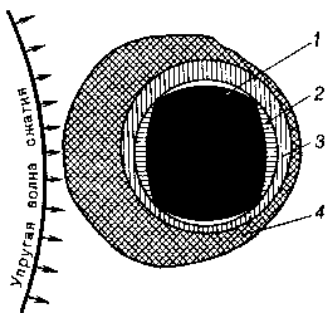


Рис. 5.10. Схема уплотнения заряда предохранительного ВВ при групповом взрывании: 1 — сечение заряда после уплотнения; 2 — первоначальное сечение заряда шпура; 3 — первоначальное сечение шпура; 4 — разрушающая и уплотняющая порода

В ходе исследований, выполненных МакНИИ в шахтных условиях, замечено, что на степень уплотнения зарядов предохранительных ВВ сильно влияет время между взрывами в соседних шпурах. Поэтому наиболее опасным по уплотнению следует считать интервал времени 15—25 мс. Таким образом, заряды предохранительных ВВ уплотняются не только в результате откольных явлений (заканчивающихся примерно через 3—6 мс после взрыва уплотняющего заряда), но и в результате сдвига массива под воздействием предшествующего взрыва соседних шпуровых зарядов. По данным Ф. М. Гельфанда, подвижка угольного массива в районе исследуемого шпура начинается в среднем через 16—20 мс после взрыва уплотняющего заряда. Опытами Н. Л. Россинского показано, что при одновременном взрывании смежных зарядов на расстояниях 0,3—0,35 м один от другого ВВ не только сильно уплотняется, но и частично теряет детонационную способность из-за воздействия избыточного давления (до 30 МПа) в течение 3—30 мс.

Опытами В. И. Зенина показано, что патроны предохранительного ВВ, например аммонита ПЖВ-20, уплотненные до 1,5—1,68 г/см³, остаются детонационноспособными только без разрыва сплошности заряда. Если в каком-то месте уплотненного заряда появится зазор, заполненный инертным материалом (например, на торцах патронов, где имеются небольшие парафиновые пробки), то произойдет обрыв детонации и отказ.

Кроме того, существует различие в детонационной способности предохранительных ВВ, уплотненных статически, например на прессе, и динамически, в забое, до одних и тех же плотностей. Так, по данным Б. И. Вайнштейна и В. И. Зенина, аммонит ПЖВ-20, спрессованный до плотности 1,7 г/см³, устойчиво детонирует в патроне диаметром 30 мм от достаточно мощного импульса, а такие же заряды плотностью 1,58—1,6 г/см³, извлеченные из угольного массива, дают отказы. Ухудшение детонационной способности динамически уплотненных предохранительных ВВ объясняется неравномерной плотностью по диаметру заряда.

Уплотнение зарядов предохранительных ВВ под воздействием продуктов взрыва. Третьей возможной причиной выгорания зарядов предохранительных ВВ рядом исследователей выдвигается воздействие ПВ взорвавшегося заряда, распространяющихся по трещинам и достигающих еще не взорвавшихся зарядов.

Ф. М. Гельфанд при исследовании карагандинских угольных месторождений установил сравнительно высокую вероятность пересечения двух соседних шпуров трещиной, существовавшей в угольном массиве:

Расстояния между шпурами, м	0,5	0,6	0,7	0,8
Частота пересечения шпуров трещиной	0,357—0,437	0,105—0,167	0,136	0,041

Частота вскрытия соседнего шпура трещиной, образовавшейся в результате взрыва заряда в одном из шпуров, в зависимости от вида ВВ и расстояний между шпурами, приведена ниже.

Расстояние между шпурами, м	0,6	0,7	0,9	1	1,3
Аммонит ПЖВ-20	0,162	—	—	0,11	0,045
Угленит Э-6	0,104	0,069	0,032	0	0

При длине трещины, соединяющей два соседних шпура, 0,35 м воздействие ПВ на соседний заряд начинается через 330—375 мкс после завершения детонации заряда. ПВ ранее взорвавшегося шпурового заряда, распространяясь по трещинам, могут достигнуть соседнего шпура, уплотнить заряд, нарушить его сплошность, а в отдельных случаях поджечь.

Под воздействием прорывающихся по трещинам ПВ соседнего заряда деформация заряда завершается через 1—2 мс, что несколько меньше разброса по времени срабатывания электродетонаторов мгновенного действия.

Экспериментальные методы оценки склонности предохранительных ВВ к выгоранию описаны в разделе 9.

5.4. ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ ВВ К РАЗРЯДАМ СТАТИЧЕСКОГО ЭЛЕКТРИЧЕСТВА

Многие производственные процессы, особенно с применением диэлектрических материалов, сопровождаются образованием и накоплением электростатических зарядов. Статическая электризация чаще всего наблюдается при трении или скольжении поверхностей диэлектриков друг относительно друга или по поверхности металлов, при механическом разрушении диэлектриков, отрыве поверхностей одна от другой, распылении твердых и жидких аэрозолей, движении частиц в газовом потоке и пр.

Пневматическое транспортирование промышленных ВВ и зарядание ими взрывных полостей сопровождается электризацией. Уровень электризации в основном определяется состоянием тру-

щихся поверхностей и зависит от многочисленных факторов, в том числе от состава, дисперсности и влажности ВВ, скорости пневмотранспортирования, материала и электрического сопротивления трубопровода, влажности транспортирующего и окружающего воздуха и т. д.

Повышение скорости пневмотранспортирования в связи с возрастанием пылеобразования приводит к увеличению электризации. Электростатические разряды и разряды в электрических цепях могут стать источниками воспламенения пылей, особенно при пневмозарядки, когда образование пылевоздушных смесей возможно и вне трубопроводов.

Различные ВВ и входящие в их состав компоненты имеют различную склонность к электризации и пылеобразованию в одинаковых условиях их подготовки и применения, а также различную минимальную энергию воспламенения W_{min} от электронскрового разряда. Наибольшей чувствительностью (наименьшей величиной W_{min}) к электронскровым разрядам отличаются пылевоздушные смеси, они же отличаются и высокой электризуемостью, особенно пыли диэлектриков. Такие пыли способны электризоваться до высоких потенциалов как при пневмотранспортировании их по металлическим трубопроводам, так и при распылении в воздухе. Пыль, образующаяся из гидрофобного материала, например, тротиловая пыль, плохо увлажняется, что затрудняет пылеподавление и борьбу с ее электризацией.

ВВ в гранулированном состоянии имеют более высокую энергию воспламенения, реализация которой в электростатических искровых разрядах при пневмозарядки в определенных условиях может оказаться маловероятной, однако при измельчении их в процессе транспортирования и образования пыли возможно возникновение аварийных ситуаций.

Одно из основных условий обеспечения безопасности при пневмотранспортировании промышленных ВВ состоит в недопущении образования взрывоопасных концентраций пыли, представляющих наиболее вероятный объект воздействия для электронскровых разрядов, в том числе и электростатических разрядов.

Для оценки электризуемости ВВ наиболее важными характеристиками являются их удельное объемное и поверхностное сопротивление. Установлено, что материалы и продукты способны электризоваться в том случае, если удельное объемное сопротивление их превышает 10^6 Ом·см. При оценке сравнительной электризации различных ВВ обычно используют установки, основанные на принципе образования электростатических зарядов при ударе пылевоздушной струи о наклонную пластину, выполненную из различных материалов. Электризуемость выражают потенциалом или удельным зарядом вещества, находящегося в металлической емкости. Электрические характеристики и сравнительная способность к электризации некоторых веществ приведены в табл. 5.5.

Таблица 5.5

Вещество	Влажность, %	Электрические характеристики		Электризуемость при ударе о пластину, В	
		Удельное объемное сопротивление, Ом·см	Удельное поверхностное сопротивление, Ом	латунную	алюминиевую
Гексоген	0,01	10^{15}	10^{15}	5000—7000	—
Гексоген флегматизированный	—	10^{15}	10^{15}	2000—3000	—
Тротил	0,01	$2 \cdot 10^{13}$	$1 \cdot 10^{11}$	4000	—
Аммонит 6ЖВ	0,04	$5,7 \cdot 10^{10}$	$7,5 \cdot 10^{10}$	650	1000
	0,03	$9,6 \cdot 10^8$	$2,1 \cdot 10^7$	900	1500
Аммонал	0,16	$1,2 \cdot 10^8$	$1 \cdot 10^8$	900	1100
	0,47	$1,5 \cdot 10^6$	$2 \cdot 10^7$	500	800
Аммонит скальный № 1	0,05	$1,7 \cdot 10^7$	$1,5 \cdot 10^7$	2000	1900
Гранулит АС-8	0,33	$3,5 \cdot 10^8$	$2,7 \cdot 10^8$	50	50
	0,77	$2,8 \cdot 10^7$	$1,6 \cdot 10^7$	0	0
Гранулит М	0,08	$2,1 \cdot 10^7$	$1,5 \cdot 10^7$	90	—
	0,5	$1,1 \cdot 10^6$	$1,3 \cdot 10^6$	0	—

Наиболее высокую электризуемость имеют гексоген и тротил. Существенно меньше электризуется аммиачная селитра, особенно в гранулированном виде. Диэлектрические свойства и соответственно электризуемость промышленных ВВ, основным компонентом которых является гигроскопичная аммиачная селитра, как правило, снижаются при повышении их влажности и увеличении размеров частиц. Присутствие масла и нефтепродуктов способствует повышению их электризуемости. На электризуемость ВВ влияют следующие факторы: относительная влажность воздуха, используемого при пневмотранспортировании, концентрация ВВ и скорость его перемещения в пневмопотоке, профиль пневмотранспортной линии (число поворотов и крутизна) и состояние ее внутренней поверхности. Интенсивность электризации в пневмотранспортных магистралях пропорциональна скорости потока в степени 1,8. Наибольшая степень электризации при пневмотранспортировании наблюдается в периоды неустойчившегося режима движения потока: в начальный его период при разгоне транспортируемого материала, на поворотах и искривлениях пневмолинии, где имеют место повышенное трение, расслоение материала и турбулентность потока, а также в моменты образования пробок транспортируемого продукта в линии и их прорыва. Большие электростатические заряды могут образовываться в потоке ВВ, исходящего из пневмопровода в приемный бункер или зарядную полость, а также в облаке пыли, выходящем с отработанным воздухом из устья шпура или скважины.

Таблица 5.6

Вещество	Дисперсность, мкм	Минимальная энергия воспламенения аэрозвеси, мДж
Гексоген	150	3
Тротил	100—300	2,8—3
Алюминиевая пудра	50—100	9,6—60
Аммонит 6ЖВ	125	1500
Гранулит АС-8	200—300	1600
Игданит	200—300	1900
Аммиачная селитра	100—300	2000

При определении чувствительности различных ВВ к искровым разрядам обычно применяют установки с искровым промежутком. Искру создают с помощью заряженного высоковольтного конденсатора. Обычно проводят не менее 10 опытов и чувствительность вещества к искровому разряду оценивают минимальным значением энергии, выделившейся в искровом промежутке во время пробоя, или энергии, запасенной конденсатором, при которой происходит хотя бы один взрыв или загорание испытываемого образца. В связи с тем что в различных схемах приборов энергия, выделившаяся в искровом промежутке, по различным оценкам, колеблется от 3 до 70 % энергии, запасенной накопительным конденсатором, необходимо осциллографом измерить напряжение и силу тока в искровом промежутке.

Чувствительность ВВ к искровому разряду зависит от физического состояния их и может колебаться в широких пределах при изменении влажности, плотности, дисперсности порошков, размера и формы кристаллов и др. Чувствительность промышленных ВВ и их компонентов к искровым разрядам принято определять в виде наиболее опасной аэрозвеси.

Отсутствие в настоящее время общепринятой методики оценки минимальной энергии воспламенения искровым разрядом объясняется практической невозможностью учета и стандартизации множества факторов, влияющих на процесс воспламенения аэрозвесей ВВ искрой.

Значения минимальных энергий воспламенения аэрозвесей некоторых веществ приведены в табл. 5.6 [44].

Присутствие малочувствительной аммиачной селитры в промышленных ВВ в качестве основного компонента обуславливает сравнительно низкую чувствительность их к искровому разряду. Однако в случае расслоения ВВ, например, при пневмотранспортировании на большие расстояния или пневмозарядании, возможность воспламенения или взрыва определяется наиболее чувствительным компонентом.

Из компонентов промышленных ВВ наибольшей чувствительностью характеризуются гексоген, тротил и алюминиевая пудра.

Минимальная энергия воспламенения не может быть принята без ограничений в качестве критерия воспламеняющей способности электростатических разрядов любого вида (скользящий разряд, пробой диэлектрической стенки, разряд с поверхности сплошного и дисперсного диэлектрика), так как эти разряды отличаются своими параметрами от конденсаторной искры, которая используется для оценки. Наиболее объективными методами оценки воспламеняющей способности разрядов статического электричества могли бы быть методы, в которых определялась чувствительность горючих веществ в условиях, максимально приближенных к реальным производственным условиям.

5.5. ТОКСИЧНОСТЬ ВВ И ПРОДУКТОВ ВЗРЫВА

Важной мерой промышленной санитарии при буровзрывных работах является защита людей от токсичного действия ВВ и продуктов их взрыва. Контакт с ВВ и их компонентами, как и с многими другими химическими соединениями, при отсутствии защитных мер оказывает вредное воздействие на организм человека. При кратковременном их воздействии симптомы отравления могут проявляться в головокружении, головных болях, тошноте, при длительном воздействии малых концентраций развиваются хронические заболевания печени, легких и других органов.

В большинстве случаев вредное вещество попадает в организм в виде пыли или паров через дыхательные пути, реже — через пищеварительный тракт или кожные покровы.

О сравнительной токсичности различных ВВ судят по величине предельно допустимой концентрации (ПДК) их паров или пыли в воздухе, значения которых приведены в табл. 5.7.

Опасность отравления пылью и парами ВВ возрастает при выполнении операций с непатронированными ВВ и особенно при механизированных способах их растаривания, транспортирования и зарядания.

Помимо пыли и паров ВВ вредное действие на человека оказывают некоторые продукты взрыва — окислы азота, окись углерода, сернистые соединения и др. Первоначально образующаяся бесцветная окись азота NO , соединяясь с кислородом воздуха, переходит в двуокись NO_2 , окрашенную в бурый цвет, которая легко адсорбируется разрыхленной горной массой, а в процессе погрузочных работ выделяется из нее. Она медленно действует на организм (скрытый период 4—6 ч), вызывая отек легких.

Окись углерода (угарный газ) — бесцветный газ, несколько легче воздуха, плохо растворимый в воде. Легко адсорбируется разрыхленной породой. При непродолжительном вдыхании вызывает головные боли, тошноту, сонливость. При длительном вдыхании или вдыхании большой дозы наступает потеря сознания, удушье. Первая помощь при отравлении угарным

Таблица 5.7

Вещество	ПДК, мг/м ³	Вещество	ПДК, мг/м ³
Тротил	1	Окислы азота	5
Нитроглицерин	2	Окись углерода	20—30
Гексоген	1	Сероводород	10—15
Алюминий	2	Пары ртути	0,01
Индустриальные масла:		Пары свинца	10
в парах	10	Аммиачная селитра	10
в тумане	300		

газом — вынос пострадавшего на свежий воздух и искусственное дыхание.

Ядовитые газы в больших или меньших количествах образуются при взрыве всех промышленных ВВ. Как показано в работах Б. Д. Росси, Б. Я. Светлова и других исследователей, их количество зависит от химического состава ВВ, его детонационной способности и других факторов, определяющих полноту химических реакций при взрывчатом превращении. Определенное влияние могут оказывать химические, физико-механические и теплофизические свойства взрывааемых горных пород. Состав продуктов взрыва в сильной степени зависит от кислородного баланса ВВ (см. раздел 2). Промышленные ВВ с положительным кислородным балансом образуют при взрыве окислы азота, причем их количество возрастает с увеличением избытка кислорода в составе ВВ. При отрицательном балансе образуется токсичная окись углерода и в тем большем количестве, чем меньше кислородный баланс ВВ.

Опытные данные по составу продуктов взрыва смесей с различным кислородным балансом, определенные в лабораторных и производственных условиях, приведены соответственно в табл. 5.8 и 5.9.

При взрывании в лабораторных условиях в вакуумированном сосуде (бомбе Бихеля) образуется бесцветная моноокись азота

Таблица 5.8

Состав смеси, %		Кислородный баланс, %	Содержание газов в ПВ, %					
Аммиачная селитра	Тротил		СО ₂	СО	NO	H ₂	СН ₄	N ₂
95	5	-18	16,6	4,55	—	0,55	1,2	76,1
88	12	+8,7	27,9	4,9	3,2	0,5	1,6	61,9
83	17	+4	32,1	5,3	2,4	1,7	1,6	57
79	21	+0,3	32,3	5,7	2,7	1,9	1,8	55,6
70	30	-8,2	26,6	13,9	0,7	2,3	2,2	54,4

Примечание. Определялся состав осушенных ПВ, т. е. без паров воды.

Таблица 5.9

Состав смесей, %			Кислородный баланс, %	Количество ядовитых газов, л/кг		
Тротил	Аммиачная селитра	Калиевая селитра		СО	Окислы азота	Сумма в пересчете на СО
37,6	62,4	—	-15,3	125	2,7	142,6
22	78	—	-0,7	30,4	5,5	66
17,6	82,4	—	+3,5	20	13,3	106,5
17,6	62,4	20	+7,4	16,6	5,3	51,1

Примечание. В связи с более высокой токсичностью окислов азота при расчете суммарного количества ядовитых газов, выраженного в условной окиси углерода, количество окислов азота умножается на переводной коэффициент 6,5.

(NO), которая при контакте с воздухом переходит в окрашенные окислы: азотистый ангидрид, двуокись азота, четырехокись азота (N₂O₃, NO₂, N₂O₄). В шахтных условиях образуются одновременно и примерно в равных количествах NO₂ и NO. Последняя в течение довольно долгого времени может сохраняться в разрыхленной породе и лишь постепенно переходит в двуокись. Двуокись азота легко растворяется в воде, и поэтому ее концентрация в атмосфере влажных забоев быстро падает. Окись углерода в воде растворяется плохо.

В связи с сильным влиянием кислородного баланса на образование ядовитых газов при взрыве в подземных условиях применяют ВВ с кислородным балансом, близким к нулевому.

Исследования влияния горючей оболочки патронов на образование ядовитых газов показали, что степень такого взаимодействия зависит от кислородного баланса ВВ и температуры взрыва. С увеличением этих параметров доля сгоревшей оболочки возрастает и соответственно увеличивается образование окиси углерода. Для ВВ с нулевым кислородным балансом влияние оболочки патронов невелико. Так, по опытным данным, увеличение массы парафинового покрытия на патронах аммонита 6ЖВ с 2,3 до 4,8 г на 100 г ВВ привело к увеличению содержания СО в продуктах взрыва: от 30,1 до 34,1 л на 1 кг ВВ. Тем не менее нормативными документами на патронированные ВВ ограничивается масса бумаги до 2 г и масса гидроизолирующего покрытия на патронах до 2,5 г на 100 г ВВ.

Таким образом, одной из причин образования токсичных газов — окиси углерода и окислов азота — является избыток или недостаток кислорода в составе ВВ. Однако и ВВ с близким к нулевому кислородным балансом образуют при взрыве некоторое количество ядовитых газов. Так, хорошо изготовленный аммонит 6ЖВ в патронах диаметром 32—36 мм образует при взрыве около 30 л/кг окиси углерода и до 5 л/кг окислов азота. Наличие этих

газов в продуктах взрыва ВВ с нулевым кислородным балансом является следствием закалки ложного равновесия газов, не отвечающего температуре охлажденных ПВ. Окислы азота, первоначально образовавшиеся при взрывном разложении селитры, и окись углерода, образовавшаяся при разложении тротила или других нитросоединений, при быстром охлаждении ПВ не успевают полностью прореагировать между собой с образованием нетоксичной двуокиси углерода. Часть их остается в первоначальном виде.

Описанный механизм образования ядовитых газов позволяет объяснить зависимость этого процесса от качества изготовления смесового ВВ, диаметра патронов, величины инициирующего импульса, дисперсности ВВ и других факторов, влияющих на полноту химических реакций при взрыве, а также зависимость образования продуктов взрыва от свойств взрываемых горных пород. Так, по данным Б. Я. Светлова, в лабораторных условиях крупнодисперсный аммонит 6ЖВ (размер частиц 0,2—0,5 мм) образовывал почти в 5 раз больше окислов азота, чем тонкодисперсный (размер частиц меньше 0,2 мм). Им же установлено, что некоторые вещества способны снижать образование ядовитых газов при взрыве ВВ, каталитически воздействуя на вторичные реакции в ПВ с участием окислов азота. К таким веществам, в частности, относятся соли или окислы щелочных металлов. Из табл. 5.9 видно, что в составе, содержащем нитрат калия, несмотря на положительный кислородный баланс образуется окислов азота значительно меньше, чем в составе без калиевой соли. Полагают, что одной из причин уменьшенного образования ядовитых газов при взрыве предохранительных ВВ является наличие в их составе в качестве пламегасителей хлоридов натрия или калия. Эти ВВ в производственных условиях выделяют при взрыве обычно 10—30 л/кг окиси углерода и около 2 л/кг окислов азота.

Свойства горных пород могут влиять на конечный состав ПВ в результате химического воздействия вещества породы на продукты реакции, связывания или растворения их (грунтовыми водами), физического воздействия на процесс охлаждения газов, закалку и установление ложного равновесия в охлажденных газах. В этой связи Б. Д. Росси предложил классифицировать горные породы по признаку их влияния на образование ядовитых газов при взрыве ВВ. К группе I отнесены апатиты, нефелины, калийные руды, молибденовые руды, некоторые медные и полиметаллические руды, при взрывании в которых аммонита 6ЖВ количество ядовитых газов в пересчете на условную окись углерода (для окислов азота переводной коэффициент равен 6,5) составляет менее 40 л на 1 кг ВВ. К группе II отнесены угли и вмещающие породы, свинцово-цинковые, маргитовые железные и золотоносные руды, в которых аммонит 6ЖВ образует при взрыве 40—100 л/кг ядовитых газов. К группе III отнесены джеспилито-

вые железные руды, в которых образуется более 100 л/кг ядовитых газов.

В связи с сильным влиянием свойств горных пород на образование ядовитых газов при взрывах нет единой нормы по этому показателю для различных ВВ, но соблюдается правило, что в одинаковых условиях взрывания каждое новое ВВ, предназначенное для работ в подземных условиях, должно выделять при взрыве ядовитых газов в расчете на 1 кг не больше, чем аммонит 6ЖВ, принятый за эталон.

5.6. БЕЗОПАСНЫЕ РАССТОЯНИЯ ПО ДЕЙСТВИЮ ВОЗДУШНОЙ УДАРНОЙ ВОЛНЫ И ПЕРЕДАЧЕ ДЕТОНАЦИИ

Безопасные расстояния по действию воздушной ударной волны от взрыва заряда ВВ на земной поверхности регламентируются Едиными правилами безопасности [28] и могут быть вычислены по формулам

$$r_b = k_b \sqrt{Q} \quad \text{или} \quad r_b = K_b \sqrt[3]{Q}, \quad (5.10)$$

где k_b и K_b — коэффициенты пропорциональности, определяемые местоположением заряда и характером повреждений сооружений; Q — масса заряда, кг (табл. 5.10).

Формулой (5.10) пользуются для открытых зарядов массой более 10^4 кг при 1-й, 2-й и 3-й степенях безопасности и зарядов массой свыше $2 \cdot 10^4$ кг, заглубленных на свою высоту или находящихся за земляным валом, при 1-й и 2-й степенях безопасности.

Радиус зоны безопасности по действию воздушной ударной волны на человека

$$r_{\min} = 14 \sqrt[3]{Q}.$$

При наличии блиндажа r_{\min} может быть уменьшен в 1,5 раза.

Изложенный выше расчет позволяет определить предельную величину заряда при ведении взрывных работ вблизи зданий и сооружений по формуле

$$Q_{\text{кр}} = (r_{\text{ф}}/k_b)^2,$$

где $r_{\text{ф}}$ — фактическое расстояние от места взрыва до охраняемого объекта, м.

При подземных массовых взрывах опасные расстояния по действию воздушной ударной волны могут быть определены в зависимости от величины давления в ней [49]:

$$\Delta p = \left(3270 \frac{Q m_y}{R \Sigma s} + 780 \right) \sqrt{\frac{Q m_y}{R \Sigma s} e^{-\frac{BR}{d_b}}}, \quad (5.11)$$

где Q — масса заряда, кг; m_y — коэффициент перехода энергии взрыва в воздушную ударную волну (табл. 5.11); R — длина вы-

Таблица 5.10

Степень безопасности	Возможные повреждения	Открытый заряд			Заряд, заглубленный на свою высоту		
		Q-10 ³ , кг	k _B	K _B	Q-10 ³ , кг	k _B	K _B
1	Отсутствие повреждений	10	50—150	—	20	20—50	—
2	Случайные повреждения застекления	10	—	400	20	—	200
		10	10—30	—	20	5—12	—
		10	—	100	20	—	50
3	Полное разрушение остекления, частичные повреждения рам, дверей, нарушение штукатурки и внутренних легких перегородок	10	5—8	—	—	—	—
		10	—	30—50	—	2—4	—
4	Разрушение внутренних перегородок, рам, дверей барачков, сараев в т. п.	—	2—4	—	—	1—2	—
5	Разрушение малостойких каменных и деревянных зданий, опрокидывание железнодорожных составов, повреждение линий электропередач	—	1,5—2	—	—	0,5—1	—
6	Пролет прочных кирпичных стен, полное разрушение коммунальных и промышленных сооружений, повреждение железнодорожных мостов и полотна	—	1,4	—	Разрушения в пределах воронки взрыва		

работки, м; Σs — суммарная площадь сечения выработок, сообщающихся с выработкой, в которой размещен заряд, м²; β — коэффициент сопротивления выработки; $d_B = \sqrt{4s/n}$ — приведенный диаметр выработки; n — показатель действия взрыва.

Значения коэффициента β для выработок приведены ниже.

Незакрепленных:	
проведенных по простиранию	0,016—0,02
проведенных вкост простирания при движении волны:	
по восстанию	0,033—0,038
по падению	0,022—0,028
с неровностями и люками для выпуска руды	0,05—0,065
Закрепленных:	
бетоном	0,02—0,015
неполными дверными окладами	0,025—0,034
арочной крепью	0,025—0,06
неполными дверными окладами с люками для выпуска руды	0,03—0,05

Формула (5.11) справедлива для промышленных ВВ с удельной энергией взрыва около 4300 кДж/кг (аммонит 6ЖВ). Для других ВВ массу заряда следует умножить на отношение удельных энергий используемого ВВ и аммонита 6ЖВ.

Таблица 5.11

Условия взрывания	m_y	Условия взрывания	m_y
Скважинные заряды		Шпуровые заряды	
Простреливание скважин	0,1—0,2	Прямое инициирование: с забойкой без забойки	0,07—0,1 0,01—0,15
Одиночные заряды: без забойки с забойкой	0,02—0,025 0,015—0,02		
Отбойка руды в очистном пространстве: без забойки с забойкой	0,012—1,015 0,08—0,012	Обратное инициирование: с забойкой без забойки	0,05—0,07 0,07—0,1
Обрушение кровли и междукамерных целиков, подверженных сильному горному давлению	0,005—0,008	Камерные заряды	
		При объеме полости, м ³ : менее 30 000 более 30 000	0,05—0,01 0,02—0,05
		Открытые заряды:	
		без забойки с забойкой	0,3—0,4 0,2—0,3

Если принять максимально допустимую для человека величину давления воздушной ударной волны равной 20 кПа, то из выражения (5.11) может быть найдено минимальное безопасное расстояние по действию ее на человека. Номограммы безопасных расстояний приведены в работе [55].

Зоны, опасные для людей по разлету отдельных кусков взорванной породы, в зависимости от показателя взрыва и ЛНС приведены в табл. 5.12.

Безопасные расстояния по передаче детонации между зарядами ВВ согласно Единым правилам безопасности при взрывных работах [28] рассчитывают по формуле, предложенной И. И. Тамм и М. А. Садовским:

$$r_d = K_d \sqrt[3]{2Q} \sqrt[4]{D_s},$$

где K_d — коэффициент, зависящий от типов ВВ активного и пассивного зарядов (для тротила $K_d=1,5$, для аммонита 6ЖВ $K_d=0,65$); Q — масса активного заряда, кг; D_s — эффективный размер пассивного заряда (м), принимаемый равным его ширине при удвоенной высоте.

При определении безопасных расстояний по передаче детонации для складов ВВ необходимо приравнять: обвалованные хранилища — к зарядам, углубленным в грунт (У), и необвалованные, расположенные на поверхности хранилища и площадки ВМ, — к открытым зарядам (О). В табл. 5.13 приведены значения K_d .

Таблица 5.12

ЛНС	Радиус опасной зоны (м) при значении показателя действия взрыва λ							
	для людей				для механизмов и сооружений			
	1,0	1,5	2,0	2,5	1,0	1,5	2,0	2,5—3,0
1,5	200	300	350	400	100	150	250	300
2	200	400	500	600	100	200	350	400
4	300	500	700	800	150	250	500	550
6	300	600	800	1000	150	300	550	650
8	400	600	800	1000	200	300	600	700
10	500	700	900	1000	250	400	600	700
12	500	700	900	1200	250	400	700	800
15	600	800	1000	1200	300	400	700	800
20	700	800	1200	1500	350	400	800	1000
25	800	1000	1500	1800	400	500	1000	1000
30	800	1000	1700	2000	400	500	1000	1200

Для расчета толщины перегородки между ячейками подземного склада взрывчатых материалов, обеспечивающей передачу детонации между взрывчатыми веществами, хранящимися в соседних ячейках, В. Г. Агеевым и Б. Н. Кутузовым предложена формула

$$m_6 = 93Q_{\text{взр}}^{1/3} \delta C_0^{-1/3},$$

где m_6 — толщина перегородки, м; δ — плотность заполнения ячейки склада ВВ; C_0 — объемная скорость звука в материале перегородки.

В. Р. Воронцовым исследованы безопасные расстояния по передаче детонации через трубы применительно к работе пнев-

Таблица 5.13

Активный заряд		Пассивный заряд					
ВВ	Расположение зарядов	Аммиачно-селитренные смеси и ВВ с содержанием нитроэфиров до 40%		ВВ с содержанием нитроэфиров 40% и более		Тротил	
		О	У	О	У	О	У
Аммиачно-селитренные смеси и ВВ с содержанием нитроэфиров до 40%	О	0,65	0,4	0,9	0,65	1,0	0,8
	У	0,4	0,25	0,65	0,4	0,8	0,5
ВВ с содержанием нитроэфиров 40% и более	О	1,3	0,8	1,8	1,3	2,0	1,6
	У	0,8	0,5	1,3	0,8	1,6	1,0
Тротил	О	1,0	0,75	1,3	1,0	1,5	1,1
	У	0,75	0,5	1,0	0,7	1,1	0,5

мотранспортных устройств. Установлено что детонация по незаполненным ВВ трубам передается на значительно большие расстояния, чем на открытом воздухе, что объясняется более медленным процессом затухания ударной воздушной волны в трубе. Степенной вид зависимости расстояния передачи от массы активного заряда сохраняется лишь до определенного предела (по величине массы), после которого расстояние передачи сохраняется постоянным независимо от массы активного заряда. Это объясняется тем, что в передаче детонации через примыкающую к активному заряду трубу участвует лишь часть заряда — его «активная масса», имеющая копьевидную форму при диаметре заряда, большем диаметра трубы. Величина активной массы зависит от соотношения указанных диаметров.

В исследованиях В. Ю. Вершинина и В. Е. Клаповского показано, что взрыв несферического заряда ВВ (куб, цилиндр и др.) обладает резко выраженным направленным действием, причем в ближней зоне взрыва максимальные параметры продуктов детонации (ПД) и воздушных ударных волн наблюдаются против плоских поверхностей заряда (торцы цилиндров, грани параллелепипедов), а минимальные — против сильно искривленных поверхностей и в особенности против углов заряда [9].

В условиях передачи детонации через воздушный промежуток такая анизотропия поля взрыва несферических зарядов приводит к тому, что передача детонации в различных направлениях от таких зарядов происходит на различных расстояниях и расстояние передачи детонации с торцевой поверхности сосредоточенного цилиндрического заряда превосходит расстояние передачи с цилиндрической поверхности. Проведенные исследования по определению минимальных безопасных расстояний для различных схем расположения цилиндрических зарядов аммонита 6ЖВ диаметром 90 мм показали, что для расчета минимальных безопасных расстояний R_0 между торцами цилиндрических зарядов, расположенных на подложке, могут быть использованы формулы

$$R_0 = 0,48 \sqrt{m} \text{ и } R_0 = 0,65 \sqrt[3]{2m \sqrt{d}},$$

где d — диаметр заряда; $m = m_a$ при $l/d \geq 2,25$; m_a — активная масса заряда; l — длина заряда.

Применительно к расчету безопасных расстояний между зарядами или группами зарядов на конвейерной ленте от автоматов патронирования В. Ю. Вершининим и В. Е. Клаповским предложена формула для расчета скорости движения конвейера

$$v_N \geq N [1,1 (m_0/l)^{1/3} d^{7/12} + l] \tau^{-1},$$

где v_N — скорость движения ленточного конвейера, м/с; N — число одновременно работающих автоматов патронирования; m_0 — масса ВВ в одном патроне, кг; d — диаметр патрона, м; l — длина патрона, м; τ — цикл работы автомата патронирования, с.

6. ОСНОВЫ ТЕОРИИ ПРЕДОХРАНИТЕЛЬНЫХ ВВ

В атмосферу многих подземных горных выработок выделяются горючие газы и пыль, которые в определенных соотношениях образуют с воздухом взрывчатые смеси. Такие шахты относятся к категории опасных по газу или пыли. В шахтах, разрабатывающих полезные ископаемые органического происхождения (уголь, нефть, озокерит), в наибольших количествах выделяются метан и его гомологи. Иногда метан и другие газообразные углеводороды содержатся в атмосфере подземных рудников, что связано с близостью к рудному телу залежей угля, нефти или природного газа. Так, метан в значительных количествах выделяется в некоторых подземных рудниках Полиметаллического комбината. Различные горючие газы встречаются также в атмосфере шахт, разрабатывающих некоторые полезные ископаемые неорганического происхождения (природную серу, калийные минералы, сульфидные руды и др.).

Кроме горючих газов взрывчатую смесь с воздухом образует пыль многих полезных ископаемых. Особенно взрывоопасна пыль некоторых углей (с большим содержанием летучих), серы, сульфидов, озокерита. Во многих случаях (в угольных, серных шахтах) в рудничной атмосфере одновременно содержатся горючие газы и пыль.

Рассмотрение механизма воспламенения взрывчатых газовых и пылегазовых смесей при взрыве ВВ, выявление связи между свойствами ВВ и их воспламеняющей способностью являются предметом теории антигрязности. ВВ, применяемые в шахтах с пылегазовым режимом, называют предохранительными ВВ.

6.1. ГОРЮЧИЕ ГАЗЫ И ПЫЛЬ В ШАХТНОЙ АТМОСФЕРЕ

Угольные шахты. Для атмосферы угольных шахт наиболее характерно присутствие метана и угольной пыли. Природный газ, выделяющийся в угольных шахтах, содержит 80—83 % метана, 1—4 % его более тяжелых гомологов, около 10 % азота, 5 % углекислого газа и менее 1 % других газов.

Различают свободное и связанное состояния газов в горной породе. Связанный газ — это газ, адсорбированный породой. Свободный газ скапливается в пустотах, трещинах и порах породы. Из-за высокой сорбционной способности угольных пластов, обусловленной высокоразвитой поверхностью, достигающей до 200 м² на 1 г, около 3/4 газа находится в связанном состоянии, 1 т ископаемых углей может поглотить до 100 м³ метана.

Метан выделяется в атмосферу угольных шахт из массива, а также из разрыхленного взрывом или механическим способом угля. Различают три вида выделения газа из массива: обыкновенное — из пор и трещин, не видимых глазом, суффлярное — из трещин, видимых глазом, внезапное, когда происходит выброс газа из толщи массива, обычно в течение короткого времени, с одновременным выбросом породы (угля). Давление газа в угольных пластах достигает 5,9 МПа и зависит от глубины залегания.

Ископаемые угли подразделяют по газоносности, которую определяет содержание газа (м³) на 1 т или 1 м³ угля. Наиболее газоносны антрациты и коксующиеся угли, наименее газоносны угли с высоким содержанием летучих.

Газообильность зависит от количества газа, выделяющегося в атмосферу в единицу времени. Обычно газообильность выражают в относительных единицах — количеством выделяемого в сутки газа, отнесенного к 1 т суточной добычи угля. По газообильности угольные шахты классифицируют на следующие категории: I категория — относительная газообильность не более 5 м³/т; II категория — от 5 до 10 м³/т; III категория — от 10 до 15 м³/т; сверхкатегорные шахты, относительная газообильность которых более 15 м³/т, а также шахты, разрабатывающие пласты, опасные по выбросам угля и газа и по суффлярным выделениям.

Угольная пыль особенно интенсивно образуется при работе машин и механизмов в процессе обуривания забоев и механизированной отбойке угля, при взрывных работах, при транспортировании отбитого угля. Пыль оседает и скапливается в больших количествах на стенках и почве выработок.

Взрывоопасность угольной пыли обычно оценивают по содержанию в угле летучих веществ — продуктов газификации, образующихся нагревом угля без доступа кислорода при температуре 850 °С. Их выражают в процентах по массе, отнесенных к высушенному углю, за вычетом золы. В составе летучих обычно содержатся метан, окись углерода, водород и некоторые другие газы. Согласно Единым правилам безопасности при взрывных работах, угольные шахты относятся к опасным по пыли, если содержание летучих веществ в угле превышает 10 % [28].

Калийные рудники. В их шахтной атмосфере содержатся водород и метан, являющиеся составной частью природного газа. Соотношение между водородом и метаном в природном газе колеблется от 3:1 до 8:1. Например, газ, выделяющийся из карналлитовых пластов Соликамского месторождения, содержит 20—45 % водорода, 15 % метана и 40—65 % азота. Предполагают, что метан образовался в результате разложения растительных и животных остатков, занесенных в высушенный водоем при образовании солей. Образование водорода связывают с процессами разложения воды под воздействием радиоактивных со-

лей, кристаллизовавшихся одновременно с соляными минералами. Наиболее интенсивно газовыделение при взрывных работах. Объем горючих газов достигает 70 м³ (в пересчете на метан), а относительная газообильность — 2 м³ на 1 м³ горной массы, отбитой за одно взрывание.

Серные и колчеданные рудники. Серные шахты относятся к наиболее опасным по возникновению взрывов пыли, загоранию серы в пласте и подземным пожарам. Это объясняется особенно высокой взрывоопасностью серных аэрозолей, усугубляемой содержащимися в атмосфере рудников горючими и легко воспламеняемыми сероводородом, метаном, этаном, мышьяковистым водородом, органическими соединениями селена, фосфора, мышьяка, окиси углерода и др.

Рудники, разрабатывающие колчеданы и другие сульфидные руды, менее опасны по подземным взрывам пыли и пожарам, чем серные шахты, ввиду меньшей взрывчатости сульфидных аэрозолей. Их газовая атмосфера в качественном отношении близка к атмосфере серных шахт.

Нефтяные и озокеритовые шахты. Во многих странах нефть добывают шахтным способом. Атмосфера нефтяных, а также озокеритовых шахт содержит метан и другие предельные и непредельные углеводороды в виде газов и паров. В меньших количествах встречаются водород, сероводород, углекислый газ. Горючие газы и пары выделяются как из пород, так и при испарении легких фракций нефти (бензинов и др.), стекающих на почву выработок с вышележащих горизонтов. Особую опасность представляют пары бензина.

6.2. ВЗРЫВЫ ГАЗА И ПЫЛИ В ШАХТАХ

Наличие в атмосфере шахт горючих газов и пыли создает опасность взрывов их. Взрыв может произойти от различных источников воспламенения: электрической или фрикционной искры, от луча огня, от высокотемпературных продуктов взрыва ВВ и др. Статистический анализ показывает, что примерно 40 % случаев воспламенения и взрывов газа и пыли в угольных шахтах происходит при взрывных работах, около 50 % — в результате искрения электрооборудования и фрикционного искрения механизмов и остальные 10 % — по прочим причинам. При взрывных работах 30—50 % случаев происходит при поджигании взрывоопасной среды продуктами детонации 18—33 % являются следствием выгорания ВМ [15].

Горючие газы или пыль могут содержаться в атмосфере выработок во взрывоопасных концентрациях до начала взрывных работ или выделяться при одновременном взрывании зарядов. В этой связи правилами безопасности устанавливаются ограничения по максимальному интервалу времени между первой и по-

Таблица 6.1

Газ, пары жидкого горючего	Концентрационные пределы взрывчатости в смеси с воздухом, %		Газ, пары жидкого горючего	Концентрационные пределы взрывчатости в смеси с воздухом, %	
	нижний предел	верхний предел		нижний предел	верхний предел
Метан	5	15	Бензол	1,41	6,75
Этан	3,22	12,45	Толуол	1,27	6,75
Пропан	2,37	7,35	Этиловый спирт	3,28	18,95
Бутан	1,86	8,41	Ацетилен	2,5	80
Пентан	1,4	6	Водород	4	74,2
Гексан	1,25	6,9	Аммиак	15,5	27
Гептан	1	6	Сероводород	4,3	45,5
Бензины	0,3—1,3	7	Окись углерода	12,5	74,2

следней серией при короткозамедленном взрывании, гарантирующие выделение газа в призабойное пространство в количестве, не превышающем нижнего концентрационного предела. В СССР этот интервал составляет 135—195 мс, в других странах 120—500 мс.

Концентрационные пределы взрывчатости некоторых горючих газов и жидкостей (паров) приведены в табл. 6.1.

Различают понятия пределов горючести и пределов взрывчатости. Первые означают концентрации горючего, в пределах которых возможно устойчивое распространение горения в смеси, вторые — устойчивое распространение взрыва. Как правило, пределы горючести шире, чем пределы взрывчатости.

Если с воздухом смешан не один, а несколько горючих газов и известны индивидуальные пределы взрывчатости, то суммарные ее пределы C (%) могут быть рассчитаны по формуле Ле-Шателье

$$C = \frac{100}{\frac{K_1}{n_1} + \frac{K_2}{n_2} + \dots + \frac{K_i}{n_i}}$$

где K — объемная доля каждого из горючих газов в общем объеме горючих газов, %; n — индивидуальный предел взрывчатости (нижний или верхний) для каждого газа.

Пределы взрывчатости C зависят от температуры и давления газов. По данным А. Н. Баратова и М. Г. Гаджелло, с повышением температуры газов от 20 до 120 °С нижний предел в среднем снижается на 8—10 %, а верхний повышается на 12—16 %. Общая зависимость имеет вид

$$C = 1/(a + bT),$$

где a и b — эмпирические коэффициенты; T — температура нагрева газа.

Для расчета пределов горючести предложен ряд эмпирических формул. И. М. Губкин рекомендовал для расчета нижнего предела углеводородов в смеси с воздухом пользоваться выражением

$$m_k = m + (n - 2),$$

где m_k — число молей кислорода в предельной смеси, приходящиеся на 1 моль углеводородного газа; m — число атомов углерода; n — число атомов водорода в молекуле углеводорода. А. Н. Баратов и М. Г. Гаджелло рекомендуют следующие расчетные формулы для обоих пределов:

$$C_n = \frac{100}{1 + (N - 1) 4,76}; \quad C_b = \frac{4 \cdot 100}{4 + 4,76N},$$

где N — число атомов кислорода, соответствующее стехиометрическому соотношению в реакции окисления горючего.

В пределах гомологического ряда А. Н. Баратовым предложена зависимость нижнего и верхнего пределов от числа атомов углерода m в молекуле газа (пара):

$$C_n = \frac{1}{a(m-1)+b}; \quad C_b = kn^{-p},$$

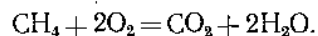
где a , b , k и p — константы.

Качественные зависимости состоят в следующем: с увеличением молекулярной массы гомолога уменьшаются значения обоих пределов, а в целом пределы сужаются. Разветвление структуры молекулы горючего несколько сужает пределы горючести.

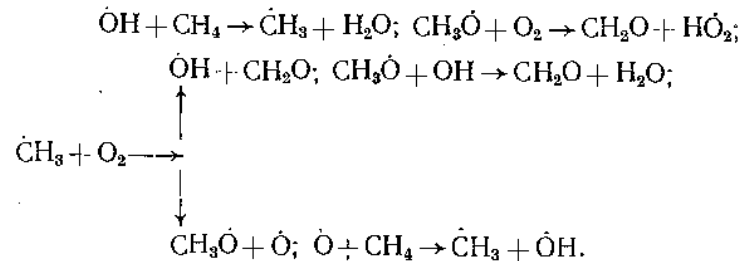
Механизм возбуждения и развития взрывов газа и пыли может иметь тепловую, цепную и смешанную природу. Тепловому механизму отвечает условие преобладания тепловыделения в результате химической реакции над отводом тепла в окружающую среду. Основные соотношения для теплового взрыва приведены в разделе 5. Цепной взрыв может развиваться и в изотермических условиях. Его условием является преобладание разветвления над обрывом цепей.

Суть цепных реакций состоит в том, что конечные продукты образуются не в результате непосредственного взаимодействия между молекулами компонентов смеси, например, горючего и кислорода, а в результате многостадийного процесса, с участием валентно-непосыщенных соединений и атомов (радикалов), с образованием вначале промежуточных, а затем конечных продуктов. Таким образом, общий процесс состоит из цепочки элементарных актов реакции.

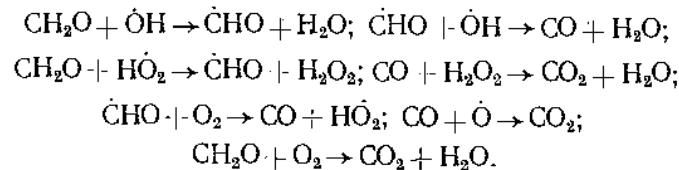
Рассмотрим подробнее цепную реакцию окисления метана. В общем виде она имеет вид



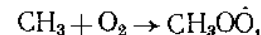
Ее тепловой эффект составляет 800 кДж/моль. Истинный ход реакции имеет цепной характер, причем, судя по обнаруженным промежуточным продуктам, параллельно действует несколько цепных реакций с участием различных радикалов. Преобладание той или иной из них определяется внешними условиями — температурой нагрева, давлением и др. При температуре выше 1000°C зарождение цепей, видимо, начинается через расщепление (крекинг) молекулы метана. Основная цепочка, по В. Н. Кондратьеву, представляет собой преимущественно бимолекулярные реакции с участием углеводородных и гидроксильного радикалов, а также атомарного кислорода:



Как следует из приведенной схемы, конечными продуктами реакции являются вода и формальдегид. Регенерируемые гидроксильные радикалы являются основными активными центрами цепной реакции. Промежуточное соединение — формальдегид подвергается последующему распаду и окислению с образованием в качестве конечных продуктов CO , CO_2 , H_2O , H_2O_2 по одной из следующих реакций:



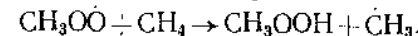
В реальных условиях реакции происходят по различным схемам. Возможно взаимодействие метильного радикала с молекулярным кислородом с образованием перекисного соединения



которое превращается в нестойкую гидроперекись метилена с последующим распадом на формальдегид и гидроксил:



либо взаимодействует с молекулой метана, образуя нестойкую гидроперекись метила и метильный радикал:



Усредненная (эффективная) энергия активации реакции окисления метана кислородом воздуха при стехиометрическом соотношении компонентов составляет около 250 кДж/моль. Для метано-кислородных смесей она снижается до 58 кДж/моль. Температура пламени метано-воздушной смеси составляет 1877 °С, метано-кислородной смеси — 2777 °С.

Эффективная энергия активации цепных реакций определяется элементарным актом, происходящим с участием наименее активного радикала. В пределах одного гомологического ряда активность радикала тем выше, чем большую энергию пришлось затратить на разрыв связи в молекуле для его образования. Энергия разрыва связи С—Н в алифатических углеводородах составляет: в метане — 423—431 кДж/моль, в этане — 408 кДж/моль, в изобутане — 361 кДж/моль. Разрыв одной из двойных связей С—С в ненасыщенных углеводородах требует затраты энергии 323 кДж/моль. Таким образом, радикалы низкомолекулярных и насыщенных углеводородов более активны, чем высокомолекулярных и ненасыщенных. С другой стороны, в последних легче зарождаются цепные реакции, так как требуется меньше энергии для образования радикалов, или так называемых активных центров реакции.

Скорость разветвляющейся цепной реакции описывается выражением

$$W = A e^{\varphi t},$$

где A — предэкспоненциальный множитель; φ — коэффициент ускорения; t — время.

Коэффициент ускорения φ определяется соотношением вероятности разветвления и вероятности обрыва цепи. Его зависимость от температуры и давления имеет обычный для кинетических констант вид

$$\varphi = k_1 e^{-E/(RT)} p^n,$$

где E — эффективная энергия активации реакции; k_1 и n — коэффициенты, связанные с материалом стенки сосуда, порядком реакции и прочими факторами; T — температура; p — давление.

При некотором времени τ , называемом периодом индукции или задержкой вспышки, скорость реакции достигает значения, отвечающего взрыву (вспышке, воспламенению).

С некоторым приближением можно считать $\varphi\tau = \text{const}$. В таком случае τ обратно пропорционально φ и описывается выражением

$$\tau = k_2 e^{E/(RT)} p^{-n}. \quad (6.1)$$

Для метано-воздушной смеси коэффициенты в формуле (6.1), полученные в лабораторных условиях, равны $n = 1,8$, $k_2 = 1 \div 10$.

Если цепное ускорение сочетается с тепловым, то взрыв при-

обретает смешанный цепно-тепловой характер. Такой механизм взрыва характерен для большинства горючих шахтных сред, в том числе для метано-воздушной смеси.

Чувствительность взрывчатых газоздушных смесей к тепловому импульсу и другим видам воздействия определяется двумя основными факторами: энергией активации реакции окисления и тепловым эффектом реакции. Чем больше $E_{эф}$ и меньше Q , тем больший импульс требуется для возбуждения взрыва. Таким образом, критерием чувствительности (возбудимости) может быть некоторая функция $F(E, Q)$, в простейшем виде — это отношение E/Q . Это вытекает из физической модели критического очага возбуждения, необходимого для развития самораспространяющейся реакции в экзотермических системах.

Рассмотрим критические условия возбуждения самораспространяющегося процесса со сферическим фронтом, характерным для случая, когда размер очага возбуждения значительно меньше объема, занимаемого газом. При сферическом фронте ПВ движутся расходящимся потоком, вследствие чего происходит рассеивание энергии. С увеличением размеров очага кривизна фронта уменьшается, интенсивность рассеивания энергии падает.

Под воздействием внешнего источника энергии в некоторой массе газа возникает экзотермическая реакция. Выделившееся тепло тем или иным механизмом будет передаваться прилегающим невозмущенным слоям газа.

Если с учетом расходящегося фронта величина теплового потока, отнесенная к единице поверхности, будет достаточной для нагрева и воспламенения прилегающих слоев газа, то процесс станет самораспространяющимся. Очевидно, что определяющей возможностью распространения фронта реакции величиной будет поверхностная концентрация энергии на фронте. Так как количество выделяющейся энергии пропорционально массе, или кубу радиуса охваченного реакцией газа, а поверхность сферического фронта пропорциональна квадрату радиуса, то поверхностная концентрация энергии пропорциональна радиусу очага. Следовательно, независимо от абсолютного значения критической величины поверхностной концентрации энергии, необходимой для самораспространения и зависящей от кинетических и теплофизических свойств газа $(q/s)_{кр}$, всегда может быть найден такой радиус очага возбуждения $r_{кр}$, начиная с которого обеспечивается самораспространение процесса. Можно принять, что $r_{кр} \sim 1/Q$.

Исходя из этих отправных положений, величина инициирующего импульса e_i , необходимого для возбуждения самораспространяющегося процесса, должна быть равной энергии активации массы газа, отвечающей $r_{кр}$. Количественные расчеты e_i затруднены, так как сложно определить $(q/s)_{кр}$, причем эта величина для одного и того же газа различна для разных режимов процесса — горения, взрывного горения и детонации.

Таблица 6.2

Газ или распыленное горючее	Плотность в г/см ³ (для твердых веществ) и в относительных единицах* (для газов)	Температура вспышки смеси с воздухом, °С	Минимальная энергия электрической искры для воспламенения, мДж
Метан	0,55	545—730	0,28
Этан	1,04	472—594	—
Пропан	1,52	466—588	0,26
Бутан	2,01	450—569	0,25
Пентан	2,49	545	—
Гексан	2,98	470	—
Гептан	3,46	430	0,24
Пары бензина	—	380—430	—
Водород	0,07	510—560	0,019
Аммиак	0,6	650	—
Оксид углерода	0,97	500—610	8
Сероводород	1,19	290—300	7
Ацетилен	0,91	335	0,19
Нефтяной газ	—	356	—
Уголь	1,2—1,9	750—1100	40
Сера	1,93—2,07	275—340	15
Колчеданы (сульфиды металлов)	3,56—7,6	330—460	—
Древесина	0,6—0,9	430	20
Магний	1,74	520	20
Алюминий	2,7	550	50
Цинк	7,14	600	100
Стеарат алюминия	—	—	15

* По отношению к воздуху.

К аналогичным по физическому смыслу критериям возбудимости газовых смесей пришли С. М. Қоғарко, В. В. Адушкин и А. Г. Лямин. Ими введены такие величины, как критический диаметр сферической детонации в газах и отношение энергии инициатора к теплоте взрыва газозвушной смеси.

Величину e_i для различных режимов процесса чаще всего определяют экспериментально. В табл. 6.2 приведены минимальные энергии электрической искры, необходимые для воспламенения смесей различных горючих с воздухом. Там же приведены температуры вспышки этих смесей. Температура вспышки природного газа состава (%): метан 97,6, этан 0,25, пропан 0,15, углекислый газ 0,5, азот 1,5, равна 537 °С.

В табл. 6.3, по данным С. М. Қоғарко с сотрудниками, приведены значения масс тротильных зарядов, достаточных для возбуждения детонации в некоторых газозвушных смесях (в полиэтиленовых оболочках вместимостью 3—15 м³) и расчетные критерии возбудимости. Смесей взяты в стехиометрическом соотноше-

Таблица 6.3

Показатели	Горючий газ в смеси с воздухом		
	Метан	Пропан	Ацетилен
Масса тротила, вызывающая детонацию газа, г	1000	155	1,5
Скорость сферической детонации, км/с	1,54	1,73	1,87
Максимальное давление на фронте детонационной волны, МПа	1,57	1,87	2,04
Плотность смеси, г/дм ³	1,17	1,25	1,21
Объемная плотность энергии смеси, кДж/м ³	3230	3500	4080
Теплота взрыва, кДж/кг	2760	2800	3410
Критический диаметр инициирующей ударной волны, м	1,3	0,61	0,12
Отношение энергии инициатора к теплоте взрыва смеси	13—8	2—1	0,5—0,01

нии горючего и окислителя. Иницирование выполнялось в центре объема.

Температура вспышки $T_{всп}$, как и задержка вспышки τ , также характеризует чувствительность газовых смесей и аэрозолей к нагреву. $T_{всп}$ можно обозначить ту минимальную температуру нагрева смеси, при которой вспышка происходит за конечное время τ . Она зависит от условий теплоотвода из нагретой реагирующей смеси и от давления в ней.

С ростом давления $T_{всп}$ уменьшается, причем зависимость имеет вид

$$\lg p_k = A/(T + B),$$

где $A = E/(nR) \lg e$; n — порядок реакции.

При повышении давления метано-воздушной смеси до 0,69 МПа температура вспышки уменьшается на 100 °С.

Разбавление реагирующей газовой смеси инертными газами приводит к повышению $T_{всп}$ или увеличению задержки вспышки τ при заданной температуре нагрева. Так, $T_{всп}$ водородо-кислородной смеси составляет 450 °С, а водородо-воздушной — 510 °С; минимальная энергия воспламеняющей электрической искры возрастает в 100 раз.

Влияние инертного газа на $T_{всп}$ определяется его теплоемкостью; гелий повышает $T_{всп}$ метановых смесей на большую величину, чем азот и аргон. При достаточно высоком содержании инертных газов смеси горючих газов с кислородом становятся невзрывоопасными. В табл. 6.4 приведены количества объемов инертного газа на один объем горючего газа, которые подавляют способность к воспламенению и распространению пламени в смесях этих горючих с любым содержанием воздуха.

В зависимости от химического состава газовой смеси или аэрозоля, внешних условий, характера и интенсивности внешнего

Таблица 6.4

Горючий газ	Инертный газ				
	Азот	Аргон	Гелий	CO ₂	CCl ₄
Метан	6	10,3	6,3	3,3	1,4
Этан	12,8	—	—	7,3	—
Водород	16,5	—	—	10,2	—
Окись углерода	4,1	—	—	2,2	—

воздействия (формы и величины инициирующего импульса) процесс окисления может протекать в форме нормального горения с малой скоростью распространения пламени, в виде взрывного горения с большими и нестационарными, но дозвуковыми скоростями и в форме детонации, причем при известных условиях горение может переходить в детонацию, аналогично тому, как это происходит в конденсированных ВВ (см. раздел 5). Этому переходу должно предшествовать образование волны сжатия перед пламенем с постепенным возрастанием крутизны ее фронта. Этому благоприятствует искривление фронта пламени в силу действия турбулентных потоков или вследствие шероховатости стенок трубы, увеличением поверхности и массовой скорости горения. Самоускоряющееся горение переходит в детонацию в том случае, когда давление в волне сжатия (ударной волне) достигает значения, при котором температура сжатого газа становится равной температуре вспышки, а время сжатия не превышает периода индукции вспышки при достигнутой температуре. При малых начальных скоростях пламени давление в волне сжатия не превышает нескольких атмосфер. Переход горения в детонацию облегчается с уменьшением диаметра трубы. Фундаментальные исследования нестационарного горения газов выполнены К. И. Щёлкиным и Я. К. Трошиным [68].

Одно из важных положений теории состоит в том, что начиная с некоторой начальной скорости перемещения пламени стационарное горение взрывчатых газовых смесей становится вообще невозможным, процесс самоускоряется. Предельные значения скорости (м/с) горения для некоторых смесей следующие: водорода — 267, ацетилена — 131, этилена — 63, пропилена — 43,5, метана — 37.

В табл. 6.5 приведены расчетные значения параметров взрыва некоторых смесей горючих газов с воздухом. Смесей с кислородом обладают более высокими параметрами детонации, чем с воздухом. Так, смесь водорода с кислородом имеет скорость детонации 2,82 км/с, а с воздухом — 1,94 км/с.

Режимы взрыва рудничного газа в подземных горных выработках могут быть различными в зависимости от концентрации

Таблица 6.5

Газ	Содержание в смеси, % по объему	Теплота взрыва, кДж/кг	Скорость детонации, км/с	Давление детонации, МПа
Метан	8,5	2660	1,8	1,79
Пропан	4	2740	1,84	1,94
Гексан	2	2650	1,8	1,97
Этилен	6,35	2940	1,91	2,0
Ацетилен	7,4	3120	1,98	2,2
Водород	28,6	3240	1,94	1,65

горючего газа в шахтной атмосфере, величины и характера источника поджигания, сечения выработки и других внешних условий. Для метано-воздушной смеси при поджигании искрой, открытым пламенем или высокотемпературными продуктами детонации ВВ наиболее характерным является режим нестационарного взрывного горения при распространении пламени по газу со скоростью от десятков до сотен метров в секунду. При этом режиме давление и разрушительное действие взрыва ниже, чем при детонации, и зависит от интенсивности горения. При взрыве в форме вспышки (тепловой взрыв) без формирования детонационной волны давление взрыва примерно вдвое ниже детонационного для данной газовой смеси.

О характере взрывов газа и пыли в угольных шахтах известное представление дают статистические данные их классификации, приведенные в работе [15].

Разрушительное действие взрыва газа и пыли в горных выработках может проявляться непосредственно в зоне взрыва и за ее пределами в результате образования и распространения по выработкам ударных волн. Интенсивность разрушений в зоне взрыва зависит от давления ПД, вне зоны — от параметров ударных волн.

Расчеты (см. раздел 3) показывают, что из-за малой степени расширения ПД при газовом взрыве ($p_2/p_1 = 15 \div 20$), сравнительно с взрывом конденсированных ВВ ($p_2/p_1 = 10^4 \div 10^5$), передача энергии взрыва в ударную волну составляет около 40 %, при взрыве конденсированных ВВ — 75—80 %. Такие же показатели получены при экспериментальных измерениях: передача энергии в волну составляет 38—40 % общей энергии взрыва при детонации газов. При горении в различных режимах эта доля уменьшается до 2—12 %. При медленном горении (1—10 м/с) внутри объема газовой смеси давление в волне сжатия не превышало 0,005—0,008 МПа, а вне объема — 0,001—0,005 МПа.

Закон затухания сферических ударных волн при газовых взрывах подобен закону их затухания при взрыве конденсированных ВВ. В работе [1] приведены следующие выражения для парамет-

ров ударных волн как функции энергии взрыва газовой смеси E (в ккал) и расстояния R (в м) от центра взрыва:

$$\Delta p = 0,6 \cdot 10^{-1} \frac{E^{1/3}}{R} + 1,4 \cdot 10^{-2} \frac{E^{2/3}}{R^2} + 2,5 \cdot 10^{-3} \frac{E}{R^3} \quad (6.2)$$

Выражение (6.2) справедливо начиная с приведенного расстояния $R^0 = R/E^{1/3} > 0,3$ ($\Delta p < 0,05$ МПа). В границах $0,08 \leq R^0 \leq 0,3$ можно пользоваться упрощенной формулой

$$\Delta p = 0,052/(R^0)^{1,7}$$

Приведенный импульс $I^0 = I/E^{1/3} = 9,5 \cdot 10^{-2}/R^0$.

Приведенное время действия фазы сжатия $\tau_+^0 = 0,35 (R^0)^{1,2}$.

Длина ударной волны в атмосфере определяется из выражения

$$\frac{\lambda}{r_0} = 0,5 + 1,6 \lg R/r_0,$$

где r_0 — радиус полости, занимаемой газовой смесью. Выражения для I^0 , τ_+^0 и λ справедливы на расстояниях $R > r_0$.

Параметры отражения ударных волн зависят от угла их падения на поверхности преграды. Для углов менее 40° (в случае сильных волн) имеет место регулярное (нормальное) отражение и избыточное давление в отраженной ударной волне

$$\Delta p_{отр} = 2\Delta p + \frac{6_1(\Delta p)^2}{\Delta p + 7},$$

где Δp — избыточное давление в падающей волне.

При углах больше критических имеет место нерегулярное отражение. Образуется головная ударная волна Маха с параметрами

$$\Delta p = 0,75 \cdot 10^{-1} \frac{E^{1/3}}{R-H} + 2,2 \cdot 10^{-2} \frac{E^{2/3}}{R^2-H^2} + 5,7 \cdot 10^{-3} \frac{E}{R^3-H^3}, \quad (6.3)$$

где H — высота подрыва.

Формула (6.3) справедлива в диапазоне $10H > R > 2H$.

Давление в ударных волнах может быть измерено с помощью соответствующих датчиков либо определено расчетом по результатам измерения скорости волны

$$\Delta p = \frac{2\rho_в}{k+1} (D^2 - C_в^2),$$

где $\rho_в$ и $C_в$ — соответственно плотность и скорость звука в воздухе; k — показатель адиабаты воздуха; D — скорость ударной волны.

В. П. Кочегаровым и И. П. Гадакчином получены зависимости параметров ударных волн от энергии, перешедшей в волну,

$E_{у.в} = \eta E$, где η — коэффициент преобразования энергии взрыва в энергию ударных волн, определяемый разницей между внутренней энергией ПВ в начальный момент их образования и к концу их расширения, т. е. к моменту отрыва воздушных ударных волн от ПВ [19]. В результате исследований ими были получены следующие выражения: при $0,083 \leq \bar{R} \leq 3$ $I = 0,184 E_{у.в}^{1/3}/R$, где $\bar{R} = \frac{R}{E_{у.в}^{1/3}}$;

$$\text{при } \bar{R} \geq 0,5 \quad \Delta p = \frac{81,5 \cdot 10^{-3}}{R} + \frac{25,8 \cdot 10^{-3}}{\bar{R}^2} + \frac{6,25 \cdot 10^{-3}}{\bar{R}^3};$$

$$\text{при } 0,0835 \leq \bar{R} \leq 0,11 \quad \Delta p = 13 \left(\frac{0,0835}{\bar{R}} \right)^{4,68} + 0,5;$$

$$\text{при } 0,11 \leq \bar{R} \leq 0,5 \quad \Delta p = 9,54 \cdot 10^{-2} / \bar{R}^{1,7};$$

$$\text{при } 0,0835 \leq \bar{R} \leq 0,7 \quad \tau_+ = 0,41 \sqrt{R} \sqrt[6]{E_{у.в}}.$$

Приведенные зависимости параметров ударных волн от величины $E_{у.в}$ более точны, чем от полной энергии взрыва газовой смеси E , так как показатель η может заметно меняться с изменением концентрации горючего в смеси и его химического состава, например соотношения количества атомов водорода и углерода в молекуле.

Приведенные значения для законов затухания ударных волн относятся к свободному объему, т. е. к распространению сферических ударных волн. В случае если взрыв произошел в условиях ограниченного расширения ПД, например в горной выработке, ударные волны затухают по другим закономерностям, параметры ударных волн уменьшаются с увеличением расстояния от центра взрыва медленнее, чем по гиперболическому или близкому к нему закону, справедливому для сферических ударных волн [49].

Особенности взрывов пыли. Пылевоздушные смеси (аэрозоли) отличаются от газовой смеси прежде всего размером частиц горючего. Взрывчатыми могут быть аэрозоли с размером частиц горючего до нескольких сотен микрометров. Это на четыре-пять порядков больше размеров молекул окислителя. Поэтому такие смеси можно рассматривать как неоднородные, а процесс их горения и взрыва — гетерогенным. Особенности гетерогенной детонации пылевоздушных смесей приведены в работе [50].

Благодаря относительно большим размерам частиц горючего в аэрозолях время их полного сгорания значительно больше времени сгорания газообразного горючего. Соответственно удлиняется зона химической реакции в пламени или взрывной волне, усложняется механизм сгорания и профиль давления (конфигурация) взрывной волны; возможно образование волн с несколькими пиками давлений, горбообразного профиля по давлению и др.

В большинстве случаев при попадании частицы в высокотемпературный поток она газифицируется или испаряется, а ос-

новая реакция окисления происходит в газовой или парогазовой фазе. Таким образом, процесс распадается на две или три стадии: газификацию или испарение твердой частицы, воспламенение смеси горючих газов с воздухом, догорание твердого остатка после газификации. Догорание может происходить непосредственно в пламени (взрывной волне) и в расширяющихся продуктах взрыва. К трехстадийному процессу с догоранием твердого остатка можно отнести взрыв взвешенной угольной пыли, к двухстадийному — серной пыли.

Отмеченные особенности пылевоздушных смесей обуславливают сильную зависимость критических условий возникновения и развития взрывов пыли, а также их параметров от размеров частиц горючего и его способности к газификации или испарению. В частности, сильно меняются концентрационные пределы взрывчатости, в особенности нижний концентрационный предел, а также величина минимального инициирующего импульса в зависимости от размеров частиц горючего. Существенное значение имеют также содержание летучих (газифицируемых) веществ в горючем материале и их химический состав.

Для некоторых видов пыли природных ископаемых установлены следующие пределы взрывчатости (г/м³): угольная пыль — 10—2500; серная пыль — 5—1000; пыль колчеданов — 250—1800; пыль сланцев — нижний предел до 6.

Присадка пыли инертных материалов сужает концентрационные пределы взрывчатости пыли горючих материалов. Аналогичным образом действует увлажнение горючей пыли.

Высокие значения верхнего концентрационного предела для пыли, которые могут в несколько раз превосходить расчетное значение стехиометрической концентрации, объясняются тем, что в зоне взрыва пыль сгорает не полностью. Чем крупнее частицы пыли, тем выше верхний концентрационный предел. По той же причине максимальные параметры взрыва могут быть сдвинуты в область «богатых» по горючему смесей, т. е. имеющих концентрацию горючего выше расчетной стехиометрической ($\alpha < 1$), отвечающей нулевому кислородному балансу.

Нижний концентрационный предел уменьшается с уменьшением размеров частиц пыли.

Как и для газовоздушных смесей, в зависимости от размера частиц пыли, характера и интенсивности источника воспламенения, сечения выработки и других факторов взрыв пыли может происходить в различных режимах (взрывное горение, детонация). Процесс горения может самоускоряться и переходить во взрыв. Взрывное горение происходит с дозвуковыми скоростями, пламя распространяется со скоростью сотен метров в секунду, детонация — со скоростью нескольких километров в секунду. Наиболее характерной формой взрывчатого превращения пылевоздушных смесей в шахтных условиях является взрывное

горение (дефлаграция). При этом давление составляет 600—800 кПа, что намного ниже детонационного давления.

В шахтах часто взрывы газа переходят во взрыв пыли. При этом во взрыв вовлекается не только та пыль, которая уже находилась во взвешенном состоянии в атмосфере выработок, но и осевшая и скопившаяся на почве, кровле и стенках выработок. Механизм взвихрения этой пыли под воздействием ударных воздушных волн, генерированных взрывами ВВ или газовым взрывом, по результатам исследований А. А. Борисова и В. П. Козенко состоит в следующем. При распространении скользящей ударной воздушной волны над слоем пыли, лежащем, например, на почве выработки, в слое за время порядка 10 мкс формируется система волн сжатия и разрежения, вызывающая периодические возмущения конечной амплитуды на поверхности. Эти возмущения взаимодействуют с газовым потоком за фронтом ударной волны, в результате чего растут их амплитуда и общая гидродинамическая неустойчивость поверхности. Частицы пыли отрываются от поверхности и уносятся газовым потоком. Интенсивность образования аэрозвеси по описанному механизму зависит от параметров ударной волны и физических свойств пыли. Она возрастает с увеличением дисперсности пыли и уменьшением толщины слоя. Присадка к угольной пыли более тяжелых измельченных материалов снижает ее аэродинамические характеристики и затрудняет их взвихрение ударными волнами.

Ударные волны, генерируемые взрывом пыли, имеют некоторые отличия от волн, образующихся взрывом газа. Гетерогенный характер детонации в пылевоздушной смеси, явление догорания твердых частиц вне зоны детонации приводят к увеличению времени выделения энергии, к образованию сложной конфигурации ударной волны на начальном участке ее распространения, к увеличению длины волны и продолжительности фазы сжатия (τ_+), которая может быть в несколько раз больше, чем при взрыве газа. При взрыве пыли плохо соблюдается закон подобия взрывных волн. На начальном участке параметры волн ниже расчетных, но процесс их затухания более медленный, чем для взрывов газа. Тритиловый эквивалент на довольно больших относительных расстояниях является переменной величиной и постепенно возрастает с увеличением расстояния.

Из пыли горючих полезных ископаемых в наибольшей мере изучена пыль углей. Первой стадией воспламенения аэрозоля угольной пыли является ее газификация. Продуктами газификации являются метан, окись углерода, водород и некоторые другие газы. Пределы взрываемости этих газов с воздухом приведены в табл. 6.6.

Скорость газификации зависит от удельной поверхности пыли. Температура воспламенения пыли различных сортов угля находится в пределах 750—1100 °С.

Таблица 6.6

Состав смеси горючих газов (по объему), %			Концентрационные пределы (по объему), %	
Водород	Оксид углерода	Метан	Нижний	Верхний
50	50	—	6,05	71,8
—	50	50	7,7	22,8
33,33	33,33	33,33	5,7	29,9

Взрывчатость пыли зависит от размера ее частиц. Согласно опытным данным, наиболее взрывчаты аэрозоли пыли с размером частиц 45—75 мкм. Более тонкая пыль агломерируется и ее взрывчатость несколько снижается. Пыль каменного угля с размерами частиц более 150 мкм в смеси с воздухом не взрывается, но частицы пыли этого размера могут участвовать во взрыве полидисперсной пыли, содержащей более мелкие фракции. Для бурых углей и сланцев критический размер составляет 150 мкм. Не участвуют во взрыве частицы с размером более 360 мкм. Способность к взрыву резко падает при содержании более 30 % частиц размером свыше 200 мкм.

Взрывчатость угольной пыли в сильной степени зависит и от содержания летучих в самом угле. Жирные и коксовые угли содержат до 32 %, антрациты и тощие угли — менее 15 % летучих. К опасным по пыли отнесены забой по угольным пластам с содержанием летучих более 15 %. Пыль, содержащая менее 10 % летучих (на сухую беззольную массу), маловзрывчата и не подлежит осланцеванию. Помимо содержания летучих, на взрывчатость пыли большое влияние оказывает их химический состав.

Наибольшую опасность представляет жирный уголь, который при нагревании до относительно низкой температуры выделяет водород и метан. Газовые угли менее опасны, они выделяют в основном углекислоту и водяной пар. Газ тощих углей имеет очень опасный газовый состав, но содержание летучих невелико и поэтому в целом пыль этих углей малоопасна.

Взрывчатость угольной пыли падает с увеличением ее зольности. Для угля с содержанием 18—20 % летучих достаточно 25 % золы, чтобы его пыль стала взрывобезопасна. На этом основании для предотвращения взрывов пыли вводят обработку осевшей в выработках пыли измельченными инертными материалами (осланцевание). Нормы осланцевания установлены в зависимости от содержания летучих в угле:

Выход летучих, %	15—20	20—25	25—30	30—35	>35
Доля инертной пыли, %	50	75	80	90	95

В качестве инертной присадки применяют измельченный мел, доломит, известняк. По эффективности им несколько уступает

глинистый сланец. В лабораторных условиях особо высокую эффективность показали йодистый натрий и калий. Воспламенение пыли подавлялось при концентрации этих веществ порядка нескольких десятков миллиграммов на литр пылевоздушной смеси. Увлажнение пыли орошением также снижает ее взрывчатость.

Метан, содержащийся в шахтной атмосфере, повышает взрывоопасность взвешенной угольной пыли. В результате добавок 0,3—0,5 % метана взвеси, не способные в чистом виде взрываться, становятся взрывчатыми.

Сила взрыва пылевоздушной смеси зависит от концентрации горючего. Наибольшей силой характеризуются взрывы смеси, содержащей 300—400 г пыли на 1 м³ (стехиометрическая концентрация 112 г/м³). Возможны два режима взрыва взвешенной в воздухе угольной пыли: дефлаграционный и детонационный. Первый, по расчету, может распространяться со скоростью до 1,16 км/с и иметь давление на фронте ударных волн 1—1,3 МПа, температуру за фронтом пламени 2700—2200 °С, второй 1,35—2,3 км/с и давление 3,3—4,3 МПа. Дефлаграционный режим, видимо, является наиболее вероятным при взрывах угольной пыли в шахте. Однако возможен и детонационный режим, который впервые в 1971 г. получен В. Цибульским в опытной шахте «Барбара». Взвешенную пыль в штреке (85 % ее составляли частицы размером менее 75 мкм) поджигали черным порохом из мортиры. Пламя постепенно разогналось и на расстоянии 160—180 м от места инициирования приобрело скорость (по разным измерениям) 1,875—2,0 км/с. Давление составило около 4 МПа.

На основании экспериментальных данных, полученных в опытных штреках и в опытной шахте, получена эмпирическая зависимость давления p (Па) на фронте ударной волны от скорости распространения пламени u_r (м/с) [50]:

$$p = (u_r - 53,6)/65,3.$$

Установлена минимальная скорость распространения пламени 25—30 м/с, которой соответствует давление 10—12 кПа. При меньших скоростях и давлении взрыв затухает, так как интенсивность ударной волны недостаточна для перевода осевшей пыли во взвешенное состояние.

В опытах на ударных трубах получены режимы горения, распространяющиеся со скоростью 400—500 м/с и более медленно — со скоростью 20—60 м/с. Взвесь пыли с размером частиц менее 80 мкм воспламенялась падающей ударной волной при числе Маха 2,3—2,4 для карагандинских углей (пласты K_{12} и K_{18}) и 2,9—3 для антрацитов. Минимальная температура адиабатического разогрева, при которой воспламеняется взвесь, составляет 577—677 °С. Высокоскоростной режим возбуждался ударной волной с числом Маха 3,3.

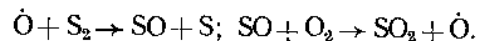
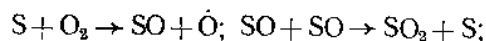
Таблица 6.7

Пыль сульфидных руд	Содержание серы, %	Концентрация в воздухе, г/л	Температура вспышки, °С
Сера курильская	98—99	0,289	260
Пирит (FeS ₂)	53,4	0,39	400
Дегтярского рудника*	50,9	0,4	400
Пирротин Fe _(1-x) S	3,95	0,428	510
Аурипигмент (As ₂ S ₃)	39	0,488	350
Халькопирит (CuFeS ₂)	34,9	0,505	400
Сфалерит (ZnS)	32,9	0,581	510

* Состав руды, %: S — 50,8; Zn — 0,47; Al₂O₃ — 0,96;
CaO — 0,8; Pb — 0,08; TiO₂ — 0,05;
Mg — 0,16; Cu — 0,48;
Fe — 43,6; SiO₂ — 0,7;

Высокой взрывчатостью характеризуется серная пыль. Температура вспышки ее аэрозоля составляет 260—290 °С и зависит от происхождения серы и размера частиц пыли. Нижний концентрационный предел, определенный при пропускании взвеси над раскаленной спиралью в «штольне Алисона», для серы комовой составил 5 г/м³, для серы кристаллической — 15 г/м³, верхний предел достигал 1000 г/м³ (стехиометрическая концентрация 286 г/м³). Для подавления взрывчатости к серной пыли необходимо добавить 92—96 % инертного измельченного материала (глинистого сланца).

Воспламенению взвеси серной пыли предшествует явно выраженный период индукции, в течение которого сера испаряется и окисляется в парах. Спектральный анализ пламени серы, в котором обнаружены моноокись SO, атомарная сера S и другие промежуточные продукты, свидетельствует о цепном механизме реакции окисления, протекающей по схеме:



Пыль сульфидных руд по взрывоопасности занимает промежуточное положение между угольной и серной пылью. Температура

Таблица 6.8

Пыль сульфидных руд	Температура вспышки (°С) для частиц размером, мкм					
	50	50—63	63—100	100—160	160—250	250—315
Дегтярского рудника	390	410	400	420	440	470
Сфалерит	—	510	520	520	540	550

вспышки аэрозвесей сульфидной пыли различного химического состава с различными размерами частиц приведена в табл. 6.7 и 6.8.

Увлажнение пыли приводит к повышению температуры вспышки. При влажности 3 % температура вспышки пыли руды Дегтярского рудника повысилась до 420 °С.

При взрывах взвеси полидисперсной пыли сгорают частицы размером до 1000 мкм.

Нижний концентрационный предел воспламеняемости руды Дегтярского рудника составил, по опытным определениям, 380 г/м³.

6.3. КАТАЛИЗ И ИНГИБИРОВАНИЕ ВЗРЫВНЫХ РЕАКЦИЙ ОКИСЛЕНИЯ ГОРЮЧИХ ГАЗОВ

Многие вещества влияют на кинетику цепных реакций, ускоряя или замедляя их. Одни из них (положительные катализаторы) способствуют зарождению или разветвлению цепей. Это могут быть валентно-насыщенные (молекулы) или ненасыщенные соединения (радикалы) и атомы. К ним, в частности, относятся легко отщепляющие атомарный кислород перекись водорода, двуокись азота и другие перекисные соединения или соединения типа формальдегида, вступающие в реакцию с радикалами, например $CH_2O + OH \rightarrow CHO + H_2O$ (энергия активации 4,82 кДж/моль) легче, чем при взаимодействии того же радикала с молекулой горючего: $OH + CH_4 \rightarrow \dot{C}H_3 + H_2O$ (энергия активации 33,5 кДж/моль). Можно предположить, что действие двуокиси азота сводится к реакции распада с выделением атомарного кислорода: $NO_2 \rightarrow NO + \dot{O}$. Моноокись азота вповь легко окисляется молекулярным кислородом, и таким образом катализатор регенерируется.

Другие вещества (отрицательные катализаторы, или ингибиторы) разрушают (рекомбинируют) или связывают активные центры, чем способствуют обрыву цепей. Типичные отрицательные катализаторы в реакции окисления углеводорода — галоиды и их соединения, а также органические соединения тяжелых металлов. В табл. 6.9 приведены данные о действии некоторых ингибиторов на параметры вспышки метано-воздушной смеси.

Каталитически активная добавка интенсивнее тормозит цепную реакцию окисления по сравнению с инертным газом благодаря тому, что вероятность гибели активных центров при соударении с ингибитором более высокая.

В практике помимо гомогенного катализа, проходящего целиком в газовой фазе, широко используется гетерогенный катализ (положительный и отрицательный), осуществляемый на границе раздела фаз, в частности, на поверхности твердых тел. Гетерогенно-каталитические реакции протекают преимущественно на

Таблица 6.9

Ингибитор	Концентрация, %	Температура вспышки, °С	Индукционный период, с
Отсутствует	—	632	18,5
Пары йода	0,2	749	3,6
Этилийодид	0,03	760	2,8
Четыреххлористый углерод	0,23	639	3
Тетраэтиллат свинца	Следы	707	55,0

кристаллических телах. Каталитические свойства последних проявляются через электронные свойства (свободные валентности) поверхности кристалла. Активность катализатора можно оценивать по изменению константы скорости реакции в газе, отнесенной к единице поверхности катализатора. Каталитические свойства поверхности определяются ее способностью образовывать связи с радикалами или молекулами газа механизмом хемосорбции, или «прилипания». Многие тела характеризуются избирательной сорбционной способностью относительно различных газов и радикалов и различной каталитической активностью по отношению к соответствующим газовым реакциям.

Хемосорбция свободных радикалов на поверхности, сопровождаемая достаточно прочными донорными или акцепторными связями, приводит к их дезактивации. Однако и при менее прочных связях с поверхностью при взаимодействии двух мигрирующих по поверхности радикалов с образованием валентно-насыщенного соединения либо при взаимодействии адсорбированного радикала со свободными радикалами из газовой фазы возможна рекомбинация радикалов в сорбционном слое. В обоих случаях выделившееся при реакции тепло отводится в твердое тело, а образованные молекулы десорбируются с поверхности.

Гидроксильные радикалы с большой вероятностью рекомбинируются на поверхности солей щелочных металлов. Вероятность их рекомбинации ϵ_0 на KCl несколько больше 0,1, в то время как на пирексовом стекле ϵ_0 составляет 10^{-4} . Так как радикал OH является одним из ведущих активных центров реакции окисления метана и других углеводородов, то его рекомбинация на поверхности солей щелочных металлов приводит к увеличению температуры вспышки T_v . В опытах с покрытием стенок кварцевого сосуда солями металлов получены следующие результаты:

Соль на стенках сосуда	—	CaCO ₃	VaCl ₂	NaCl	KF
T_v , °С	670	710	720	730	730
Соль на стенках сосуда	Na ₂ SO ₄	K ₂ SO ₄	LiCl	KCl	CsCl
T_v , °С	740	760	790	800	810

В присутствии солей щелочных металлов температура вспышки метано-воздушной смеси возрастает на 60—140°С.

Существуют и другие объяснения ингибирующего действия солей металлов. Так, Б. Льюис и Г. Эльбе действие солей связывали с выводом из зоны реакции молекул формальдегида и окислением их на поверхности солей в адсорбционном слое до CO₂ и H₂O, т. е. до конечных продуктов. Е. Одибер полагал, что на поверхности солей происходит распад метилгидроперекиси по реакции $CH_3OOH \rightarrow CH_2O + H_2O$, благодаря чему тормозится реакция распада этого соединения в объеме с разветвлением цепей: $CH_3OOH \rightarrow CO + 2H_2 + O$. К близкому выводу пришла А. П. Глазкова, которая считает, что механизм ингибирования сводится к ускорению реакций, приводящих к образованию конечных валентно-насыщенных соединений [20]. По ее мнению, катализирующим действием характеризуются атомарные металлы или окислы металлов, которые образуются в результате термического разложения солей. Соответственно активность ингибитора возрастает с увеличением массовой доли металла в соли.

Действие ингибиторов сильнее, если они вводятся в холодную, еще не нагретую газовую смесь. Это свидетельствует о том, что ингибирование более эффективно на стадии зарождения цепей, а не на стадии их развития.

В результате исследований Иорисена была определена минимальная концентрация дисперсных солей с размером частиц от 0,075 до 0,105 мм, предотвращающая вспышку метано-воздушной смеси при вдувании газа совместно с порошком соли в нагретый сосуд. Активность пламегасящего действия солей в порядке убывания выражена следующим рядом:

Соль	LiF	NaF	KF	NaCl	CaF ₂	NaBr
Пламегасящая концентрация, мг/л	1	1,5	1—2	2	2—3	4—6
Соль	NaI	KCl	KI	BaO	BaCl ₂	Ba(NO ₃) ₂
Пламегасящая концентрация, мг/л	5—7	8—9	9—10	23—25	25—35	35—38

Л. Долан и П. Демпстер вдуванием порошков в нагретый сосуд с газом определяли пламегасящую способность ряда солей по отношению к метано-воздушной смеси. Получен следующий ряд по убыванию пламегасящей способности: KF, KI, NaAlF₃, KCl, Na₂SiF₄, NaCl. Малоэффективными или вовсе неэффективными пламегасителями оказались углекислые соли кальция, магния и меди, ацетат свинца, сульфаты бария, магния, цинка, квасцы, окиси кремния и свинца. Пламегасящая способность солей повышается с понижением температуры их плавления и увеличением дисперсности. Эффективные соли подавляют вспышку, если поверхность порошка составляет не менее 1,84 см² на 1 см³ газа.

В. А. Лигай и Ф. М. Гельфанд определяли ингибирующее действие некоторых солей в ударной трубе. При введении в метано-

Таблица 6.10

Соль	Теплоемкость, Дж/(г·°С)	Частота воспламенения газа, %	Соль	Теплоемкость, Дж/(г·°С)	Частота воспламенения газа, %
Калий фтористый	0,84	0	Калий сернистый	0,75	40
Калий фосфорнокислый	0,87	20	Калий азотнокислый	0,93	60
Калий хлористый в смеси (50 : 50) с:			Натрий хлористый	0,86	60
натрием хлористым	0,78	40	Натрий углекислый	1,15	70
кальцием фтористым	0,79	20	Кальций фтористый	0,90	80
аммонием хлористым	1,10	70	Кальций углекислый	0,79	100
Калий хлористый	0,68	40	Аммоний хлористый	1,52	100
			Свинец уксуснокислый	0,56	100

воздушную смесь йодистого калия, йодистого натрия и бромистого натрия в количестве 10 мг/л воспламенение газа стабильно подавлялось.

В ряде работ ингибирующее действие различных материалов исследовалось в процессе поджигания метано-воздушной смеси взрывом заряда ВВ. Пламегасители вводились либо в состав ВВ, либо диспергировались в объеме газа каким-либо другим способом. Результаты опытов по воспламенению газа взрывом зарядов аммонита 6ЖВ, в который вводилось 10 % солей-пламегасителей, приведены в табл. 6.10. ВВ взрывали в мортире опытного штрека. Все соли характеризовались одинаковым фракционным составом (200—390 мкм). Масса заряда 200 г.

Видно, что различия в пламегасящей способности солей не связаны с их теплоемкостью, а определяются химической природой соли. Особенно активны фтористые, фосфорнокислые и хлористые соли калия.

Т. Мурата установил следующий ряд по эффективности пламегасителей (в порядке убывания): KCl, NaCl, K₂CO₃, Na₂CO₃, CaCl₂, NH₄Cl, тальк, Na₂HPO₄ · 12H₂O, H₂O.

Некоторыми исследователями отмечена высокая пламегасящая способность ряда органических солей щелочных металлов (оксалатов, вишиокислых солей). Г. А. Басс экспериментально подтвердил повышенную эффективность промотированных и модифицированных пламегасителей, изготовленных, например, сплавлением и последующей кристаллизацией нескольких солей (хлористого натрия с фтористым натрием или фтористым литием и др.).

Таким образом, по результатам опытов с внесением порошков-ингибиторов в газовую смесь наиболее эффективными ингибиторами относительно реакции окисления метана и других углеводородов следует считать соли щелочных металлов, причем соли калия активнее, чем однозначные по аниону соли натрия. По другим легким металлам сведения менее полные, но можно

Таблица 6.11

Соль	η	ξ	k_0^*
NaCl	1,325	1,28	1
KCl	1,335	—	9
KF	2,25	—	3,2
Na ₂ SO ₄	—	1,28	0,7

* Относительная величина линейного коэффициента катализа.

ожидать высокую активность солей лития и, напротив, подтвержденную опытами Г. А. Басса пониженную активность солей цезия и рубидия.

По аниону наиболее активны галоидные соли, а в пределах этой группы наиболее активны фториды, затем хлориды и далее йодиды и бромиды. Сернистые соли активнее карбонатов и бикарбонатов, но последние в определенных условиях благодаря меньшей термической стабильности при разложении поглощают тепло и охлаждают реагирующий газ.

Соли органических кислот, как и бикарбонаты, при высоких температурах могут быть высокоэффективными, так как сгорают или разлагаются с образованием ультрадисперсных твердых соединений металла с большой удельной поверхностью. Однако каталитическое действие этих соединений может быть ниже, чем «готовых» кристаллов известных пламегасителей.

Для удобства количественной оценки ингибирующей способности веществ, зависящей только от их химической природы и кристаллических свойств, в выражение (6.1) для периода индукции введены коэффициенты отрицательного катализа η , ξ и k :

$$\tau = k \left[\exp \left(\frac{E\eta}{RT} \right) \right] p^{-n\xi} \quad (6.3)$$

Численные значения коэффициентов в уравнении (6.3) для некоторых солей относительно метано-воздушной смеси приведены в табл. 6.11.

В зависимости $\tau = f(T)$ для бензино-воздушной смеси получены следующие значения температурного коэффициента $A = E/RT$: в чистом кварцевом сосуде — 4940; обработанном раствором NaCl или KCl — соответственно 6840 и 8550.

По отношению к водородо-воздушным смесям определенным ингибирующим действием обладают соли щелочных металлов, хромит цинка (ZnO; Cr₂O₃), хлористый калий и фтористый калий, повышающие температуру вспышки смесей от 550—610 до 590—690 °С.

На основании изложенного при оценке пламегасящего действия диспергированных ингибиторов необходимо учитывать следующие их характеристики:

каталитические свойства, определяемые их сорбционной способностью к ведущим активным центрам цепной реакции;

удельную поверхность диспергированного ингибитора ($\text{см}^2/\text{г}$), которая чем больше, тем сильнее должен быть каталитический эффект. Соответствующая зависимость выведена Н. Н. Семеновым, исходя из критического условия нестационарной реакции:

$$K_c = \frac{3\alpha_d G_T \delta p}{760 d^2 \pi \rho}, \quad (6.4)$$

где K_c — вероятность обрыва цепи на поверхности соли; α_d — коэффициент диффузии активных центров; G_T — процент соли в массе газа; δ — плотность газа; p — давление газа; d — диаметр твердой частицы; ρ — плотность соли.

Из выражения (6.4) следует, что скорость обрыва цепи на поверхности диспергированных в газе твердых частиц, а следовательно, и ингибирующее действие прямо пропорциональны их массовой концентрации и обратно пропорциональны квадрату размера частиц и плотности ингибитора. Исходя из этой зависимости, более легкие вещества, например фториды, при диспергировании могут оказаться активнее, чем хлориды, хотя это не следует из их собственно каталитической активности, определенной по изменению периода индукции вспышки газа. При введении пламегасителей в состав ВВ ингибирующая способность может зависеть также от их физико-механических свойств (дробимости);

теплоемкость и теплопроводность ингибитора, влияние которых тем больше, чем длительнее период индукции вспышки газа, т. е. при низких температурах и давлениях. При больших скоростях процесса, отвечающих высокой температуре нагрева газа, отвод тепла в твердые частицы будет незначительным.

6.4. ВОСПЛАМЕНЕНИЕ ГОРЮЧИХ ШАХТНЫХ СРЕД ВЗРЫВНЫМ ИМПУЛЬСОМ

Механизм возбуждения газовых и пылевых взрывов при детонации зарядов ВВ имеет сложный характер. При оценке форм и условий передачи энергии, высвобождающейся при взрыве ВВ, горючим шахтным средам следует кроме нагретых ПВ учитывать и такие переносчики энергии, как ударно-воздушные волны, раскаленные или горячие твердые частицы, излучение.

Воспламенение шахтной среды определяется количеством и формой энергии, сообщаемой среде при взрыве, природой и условиями взаимодействия переносчиков энергии с самой средой. Эта энергия должна быть достаточной для преодоления термодинамического барьера в некотором объеме среды и начала само-

ускоряющейся реакции окисления, заканчивающейся взрывом (вспышкой). Первоначальный очаг, в котором возникает вспышка, должен быть достаточен для распространения взрыва (пламени) по среде. Так как взрывное окисление имеет цепно-тепловой характер и развивается во времени, на его ход влияют кинетические характеристики самой смеси, каталитические свойства газообразных и твердых ПД, смешивающихся со средой, газодинамические условия смешивания газов, условия отражения ударных волн, режим горения дефлагрирующих частиц и ряд других факторов.

Критическая величина взрывного импульса, т. е. минимальное количество энергии, выделяемое при взрыве ВВ и достаточное для воспламенения горючей среды, может быть рассчитана только в связи с конкретными условиями взаимодействия взрыва со средой. Любой из перечисленных поджигающих агентов (газообразные ПВ, дефлагрирующие и раскаленные твердые частицы, ударные волны и пр.) в принципе может воспламенить горючую среду.

О механизме воспламенения горючих шахтных сред под воздействием взрыва ВВ Е. Одибером, С. Бейлингом, Г. Шульце-Ронгофом, Б. Льюисом и Г. Эльбе, У. Шеффердом и другими высказаны гипотезы главным образом качественного характера. Между тем имеются предпосылки для количественного подхода к оценке воспламеняющей способности различных агентов, основанного на сопоставлении времени воздействия t_k поджигающего агента на воспламеняемую среду с периодом индукции вспышки среды τ в создаваемых условиях воздействия (T, p). Воспламенение происходит при условии

$$t_k \geq \tau. \quad (6.5)$$

Если температура или давление газов уменьшается в процессе расширения газов или их смешивания и соответственно возрастает период индукции вспышки, зависящей от параметров состояния газа, $\tau(T, p)$, то условие (6.5) можно выразить в следующей форме:

$$d\tau(T, p)/dt \leq 1. \quad (6.6)$$

Выражение (6.6) в конечном итоге сводится к условию конечности периода индукции при изменяющихся во времени параметрах состояния газа. Если $d\tau/dt \geq 1$, то период индукции стремится к бесконечности и вспышка становится невозможной. Такой случай возможен, например, при диффузионном смешивании горючей среды с расширяющимися высокотемпературными продуктами детонации ВВ. В такой динамичной системе конкурируют два процесса: самоускорение реакции окисления горючего вследствие тепловыделения и разогрева и замедление реакции в результате теплообмена с подмешиваемыми свежими порциями холодных газов и охлаждения. Если первый процесс преобладает над вторым, то выполняется условие (6.5), и произойдет воспламенение.

ние смеси, но с задержкой, превышающей период индукции, отвечающий стационарным условиям нагрева смеси до той же начальной температуры. При преобладании второго процесса самовоспламенения не будет.

Критерий (6.6) впервые предложен одним из авторов в книге «Предохранительные ВВ в горной промышленности» (1953 г.) и имеет универсальный характер. Он определяет условие самовоспламенения в любой экзотермической системе с меняющимися во времени параметрами состояния и справедлив как для газообразных, так и для конденсирующихся веществ.

Если в горючую среду тем или иным способом внесен ингибитор, например совместно с ПВ, то при расчете периода индукции вспышки следует пользоваться уравнением (6.3), в которое введены коэффициенты отрицательного катализа.

Для случая поджигания газа раскаленной твердой частицей условие (6.5) дает следующий принципиальный путь решения задачи.

Время нагрева газа (длительность контакта) может быть найдено из выражения $t = l/u_m$, где l — размер частицы; u_m — скорость частицы. Сопоставив эту величину с периодом индукции вспышки t , определяемым температурой нагрева газа при контакте с частицей, можно оценить, произойдет ли воспламенение газа.

Близким к вышеописанному может быть решение для случая поджигания газа ударной волной. Здесь l_v в выражении $t = l_v/u_v$ соответствует ширине зоны сжатия в волне, а u_v — скорости волны.

Температуру газа, сжатого в ударной волне, с известным приближением можно рассчитать по формуле

$$T_2 = T_1 \frac{\gamma - 1}{\gamma + 1} \frac{p_2}{p_1},$$

где γ — показатель адиабаты горючей газовой смеси; T_1 и p_1 — начальные, T_2 и p_2 — конечные величины соответственно температуры и давления сжатого газа.

При оценке воспламеняющего действия твердых частиц ввиду его прерывистого характера условие (6.5) должно быть дополнено условием, связанным с критическими размерами поверхности частицы и возникшего очага воспламенения, достаточного для распространения пламени по газу:

$$r \geq \sqrt{\frac{\lambda}{2Q} \frac{(T_s - T_0)^2}{W(T_s)} \frac{E}{RT_s^2}}, \quad (6.7)$$

где r — радиус очага; λ — коэффициент теплопроводности газа; Q — теплота реакции окисления газа; T_s — температура частицы; T_0 — температура невозмущенного газа; $W(T_s) = Bc_a^\nu e^{-E/(RT_s)}$ — скорость реакции; B — предэкспонента; c_a — концентрация газа; ν — порядок реакции.

Условия воспламенения в этом случае находятся путем совместного решения уравнений (6.5) и (6.7). При решении только по уравнению (6.5) необходима последующая проверка соблюдения условия (6.7).

Приближенные расчеты показывают, что в определенных условиях раскаленные твердые частицы с температурой около 2000 °С способны воспламенить метано-воздушную смесь.

Подробно воспламенение метано-воздушной смеси ударными волнами описано в работах [5, 15, 38], в которых общей является модель адиабатического сжатия горючей смеси сферической ударной волной с переменными убывающими параметрами и использование критерия воспламенения в виде условия (6.6). При несоблюдении этого критерия при чисто ударном механизме разогрева горючей смеси рассматривается смешанный механизм поджигания, когда нагретая за фронтом ударной волны метано-воздушная смесь получает дополнительное тепло в результате диффузионного смешивания с продуктами детонации.

Так как речь идет о воспламенении ударной волной в ближней зоне действия взрыва ВВ, где начальное давление в волне количественно связано с давлением детонации ВВ, то авторы указанных работ для случая взрыва открытого заряда в качестве наиболее значимого параметра воспламеняющей способности ВВ выбирают скорость детонации ВВ. Но так как сама скорость детонации является функцией теплоты взрыва ($D \sim Q^{1/2}$), а другие параметры, которые могут влиять на величину D , — плотность ВВ и показатель изэнтропии ПД — мало меняются для разных предохранительных ВВ, то данный критерий в принципе мало отличается от более общего энергетического критерия.

В работе [15] приведены эмпирические зависимости воспламеняющей способности ВВ от его энергетических и детонационных характеристик при близком химическом составе:

— для открытых зарядов масса предельного заряда $m_{пр} = 0,6m_{50} = 1,52 \cdot 10^7 D^{-3} Q_{взр}^{-1}$, границы применения $D = 1,6 \div 4,0$ км/с; $Q_{взр} = 1470 \div 3570$ кДж/кг;

— для зарядов в углоковой mortar, моделирующих полуоткрытый заряд, $m_{пр} = 0,6m_{50} = 4,19 \cdot 10^7 D^{-3} Q_{взр}^{-1}$, границы применения $D = 1,5 \div 3,0$ км/с; $Q_{взр} = 1470 \div 3570$ кДж/кг;

— для зарядов в канале mortar без забойки, моделирующих шпуровой заряд, предельный заряд (r), еще не воспламеняющий метано-воздушную смесь:

$$m_{пр} = 0,6m_{50} = 1,42 \cdot 10^{16} Q_{взр}^{-5} \left[\frac{0,14 \sqrt{Q_{взр}}}{D} - 0,435 \left(\frac{0,14 \sqrt{Q_{взр}}}{D} \right)^2 \right]^{-3}$$

где m_{50} — масса зарядов, при взрыве которых наблюдается 50 % воспламенений газа.

Поджигающее действие ударных волн экспериментально исследовано В. В. Воеводским и Р. И. Солоухиным, которые получили линейную зависимость $\lg \tau - 1/T$ воспламенения метано-кислородных смесей при температурах 977—2227 °С. Ж. А. Ибраев и А. В. Любимов, проведя опыты по воспламенению метано-воздушной смеси в ударной трубе, получили зависимость

$$\tau = Ap^n \exp [E/(RT)].$$

Они наблюдали две характерные температурные области воспламенения, различающиеся величинами энергии активации и входящих в уравнение коэффициентов. При температуре разогрева в волне $T < 1407$ °С получены значения $E = 357$ кДж/моль, $A = 2 \cdot 10^{-16}$, $n = 0,6$, а при $T > 1407$ °С $E = 109$ кДж/моль, $A = 2 \cdot 10^{-8}$, $n = 0,6$. Приведенные величины проверены в диапазоне давлений отраженной ударной волны от 0,3 до 9 МПа. Устойчивое воспламенение смеси наблюдалось при температуре 827—987 °С и $\tau = 0,15 \div 0,3$ мс.

Сложнее определить критические условия воспламенения горючей среды газообразными продуктами взрыва. Наиболее вероятной моделью тепло- и массообмена можно считать диффузионное смешивание газов в потоке расширяющихся ПВ, как это впервые предложил Е. Одибер. В результате подсоса метана и кислорода, содержащихся в среде, через некоторый промежуток времени в головной части потока образуется горючая смесь этих газов с ПВ. Если при этом температура смеси выше температуры вспышки и в процессе дальнейшего расширения ПВ сохраняется условие (6.6), то смесь воспламеняется и пламя из образовавшегося очага распространяется на весь объем горючего газа. Очаговый механизм воспламенения подтверждается фоторегистрацией процесса поджигания газа в опытном штреке при взрывании заряда ВВ в мортيره, а также в опытах на ударных трубах, выполненных А. И. Сербицовым и С. М. Когарко. Численное решение задачи возможно с использованием уравнений теплового взрыва и газодинамики процесса смешивания газов.

Если в ПВ содержатся ингибирующие вещества (диспергированные пламегасители), то горючая смесь меняет свои кинетические характеристики: удлиняется период индукции вспышки, возрастает эффективная энергия активации. В результате этого область воспламенения сдвигается в сторону более высоких температур и давлений.

Приведенные выше оценки показывают, что горючая шахтная среда может воспламеняться различными путями и под воздействием различных поджигающих агентов в зависимости от условий энерго- и массообмена между ПВ и средой. Количественные расчеты воспламеняющей способности ВВ по этой причине сильно

затруднены. Поэтому пользуются либо приближенными методами оценки, часто основанными на эмпирических зависимостях, либо определяют ее опытным путем в условиях, моделирующих взрывание в шахтах (см. раздел 9). Вместе с тем, имея правильные представления о природе химических реакций и процессов, предшествующих взрыву метано-воздушной смеси, можно обоснованно выбрать рецептуру предохранительных ВВ.

6.5. СОВРЕМЕННЫЕ ПРИНЦИПЫ СОЗДАНИЯ ПРЕДОХРАНИТЕЛЬНЫХ ВВ

Изложенные выше представления о возможных механизмах поджигания горючих шахтных сред при взрывных работах и факторах, влияющих на этот процесс, позволяют определить основные принципы создания предохранительных ВВ, обеспечивающие сочетание высокого уровня антигризутности с необходимой работоспособностью ВВ.

Воспламеняющая способность ВВ связана с его энергетическими характеристиками. Чем больше теплота взрыва ВВ, тем при прочих равных условиях меньшее количество ВВ потребуется для воспламенения горючей шахтной среды.

В табл. 6.12 приведены результаты опытов по взрыванию смесей с различной теплотой взрыва $Q_{\text{взр}}$, которую регулировали введением в смесь различного количества инертного кварцевого песка. Определялись частоты воспламенения метано-воздушной смеси при взрывании 100-граммовых патронов в среде газа и предельный заряд, не воспламеняющий газ, при взрывании ВВ в мортيره опытного штрека.

На рис. 6.1 приведены значения частоты воспламенения ω при взрывании смесей, содержащих соли-пламегасители. В обоих случаях взрыв открытого заряда в среде газа опаснее взрыва в мортيره. Если при взрывании в мортيره метано-воздушная смесь не

Таблица 6.12

Состав смеси, %		Теплота взрыва, $Q_{\text{взр}}$, кДж/кг	Температура взрыва, °С	Работоспособность, см ²	Бризантность, мм	Частота воспламенения газа, %	Предельный заряд, г
Нитроглицерин	Кварцевый песок						
10	90	622	834	19	4,6	20	—
11	89	684	878	25	4,8	20	—
12	88	746	922	27,5	6	35	—
13	87	808	968	30	6	90	—
14	86	871	1010	32,5	7,2	95	—
15	85	931	1080	—	—	—	600
17,5	82,5	1088	1310	—	—	—	450
20	80	1243	1475	—	—	—	200
25	75	1553	1750	—	—	—	100

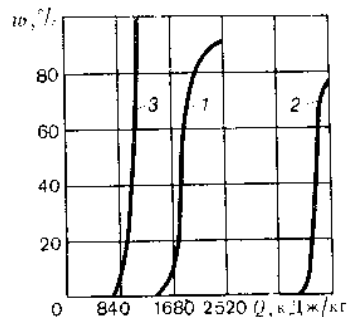


Рис. 6.1. Зависимость воспламеняющего действия ВВ от его энергетических характеристик:
1 — открытый заряд; 2 — заряд в мортире; 3 — заряд в песчаной оболочке

воспламеняется от 100-граммового заряда ВВ с теплотой взрыва 1550 кДж/кг и начальной температурой ПВ 1750 °С, то при взрывании открытого заряда той же массы газ воспламеняется при теплоте взрыва 630 кДж/кг и температуре взрыва 834 °С. И сама зависимость воспламеняющей способности взрыва от энергетических характеристик ВВ для открытого заряда сильнее, чем для заряда, помещенного в мортиру.

Причину указанных различий следует искать в газодинамических особенностях смешивания газов при взрыве в обоих случаях и вытекающих отличиях в процессах массо- и теплообмена.

Зависимость воспламеняющей способности взрыва от различных условий взрывания зарядов ВВ обнаруживали многие исследователи. Так, С. Бейлинг и Е. Одигер указывали на повышение опасности (вероятности) воспламенения метано-воздушной смеси при наличии отражательных стенок (щитов) на пути распространяющихся ПВ. Известно также, что взрывание зарядов в желобах (в угловых мортирах) с отражательными стенками, в выступах рельсов, в искусственных щелях, образованных параллельными листами металла, помещенными в газовую камеру, опаснее, чем взрывание открытого заряда, подвешенного в центре газовой камеры. При взрывании в мортире инициирование со дна мортиры (обратное) более опасно, чем со стороны устья мортиры (прямое). На воспламеняющую способность ВВ могут влиять также размеры канала мортиры, расположенные в ней заряда и другие условия. Эти явления связывают с отражением ударных воздушных волн от стенок, с форсированным режимом горения дефлагирующих частиц, выбрасываемых взрывом, в зоне повышенного давления у стенки, с условиями обтекания преград продуктами и волнами, с газодинамикой расширения и смешивания газов, с условиями догорания частиц в канале мортиры и др.

Критические значения энергетических характеристик ВВ или заряда зависят от условий взрывания и расхода энергии взрыва на механическую работу. Чем больше энергии затрачивается на механическую работу разрушения и выброс горной породы, тем

меньше ее вносится в горючую шахтную среду продуктами детонации. Поэтому нормально работающий шпуровой заряд, снабженный внутренней забойкой, менее опасен, чем заряд частично или полностью открытый, непосредственно контактирующий с шахтной средой. Согласно исследованиям А. И. Селсзнева и М. А. Магойченкова, выполненными в опытной шахте, нормально работающие шпуровые заряды не воспламеняют метано-воздушную смесь даже в том случае, если они состоят из непригодных ВВ, например, аммонита 6ЖВ с теплотой взрыва 4186 кДж/кг. И напротив, газ воспламеняется при взрыве открытого заряда массой 100 г, состоящего из предохранительного ВВ IV класса с теплотой взрыва 3350 кДж/кг. Частичное раскрытие зарядов может произойти при пересечении шпуров трещинами, при оседании вруба, при подбойке взрывами соседних зарядов при короткозамедленном взрывании, при отсутствии внутренней забойки в шпуре.

Опасность взрывания возрастает также при неправильном расчете зарядов, неоправданно завышенном удельном расходе ВВ, когда коэффициент преобразования тепловой энергии взрыва в механическую работу мал.

Так как возникновение опасных ситуаций имеет вероятностный характер, то предохранительные ВВ во всех странах подразделяют на классы с различной степенью предохранительности, причем чем более вероятно возникновение опасной ситуации, тем выше класс предохранительных ВВ, допускаемых к применению в данных условиях. С увеличением класса предохранительных ВВ снижаются их энергетические характеристики. Тем самым находится оптимальное соотношение между эффективностью ВВ и безопасностью их применения. Сам же допустимый уровень энергетических характеристик определяется с учетом состава ВВ, в частности, содержания и активности солей-пламегасителей.

При введении в состав предохранительных ВВ каталитически активных солей-пламегасителей (солей щелочных металлов и др.) зависимость воспламеняющей способности ВВ от их энергетических характеристик сохраняется, но область воспламенения сдвигается в сторону более высоких теплот (температур) взрыва (см. рис. 6.1). Таким образом, введение активных солей-пламегасителей в состав предохранительных ВВ является эффективным средством повышения допустимого уровня их энергии. Чем выше каталитическая (ингибирующая) способность солей, тем выше допустимый уровень энергии ВВ. Это — фундаментальное положение, на которое опирается современная теория предохранительных ВВ классического типа. Расчет ингибирующей способности солей-пламегасителей может производиться по уравнениям (6.3) и (6.4).

Влияние дисперсности пламегасителя при взрывании открытого заряда в газовой камере показано в табл. 6.13. С уменьшением размеров частиц пламегасителя частота воспламенения газа

Таблица 6.13

Показатели	Средний размер частиц пламегасителя, мм			
	1,38	1,16	0,7	0,14
Содержание пламегасителя в ВВ, %	35	35	35	35
Работоспособность ВВ, см ³	221	219	210	192
Частота воспламенения газа, %	100	100	75	10

заметно падает. Объясняется это двумя причинами: увеличением суммарной поверхности ингибирования и усилением охлаждающего действия солей по отношению к ПВ. Чем меньше размер частиц, тем глубже они прогреваются в процессе расширения ПВ. Вместе с тем с уменьшением размеров частиц падает работоспособность ВВ.

Сравнительная оценка эффективности пламегасителей возможна на основе следующей методики. Пусть имеется некоторое предохранительное ВВ с индексом 1, принятое за эталон, содержащее ингибитор А и с теплотой взрыва Q_1 . ПВ этого вещества смешиваются с метаном и воздухом в некотором объемном соотношении m и образуют горючую смесь с температурой T_1 и периодом индукции вспышки τ_1 . Горючестью обладают смеси продуктов взрыва ВВ с нулевым кислородным балансом, если на один объем ПВ приходится не менее 0,29—0,32 объема метана и 2,8—3 объема воздуха. Если ингибитор А заменить на более активный ингибитор В, то тому же τ_1 соответствует более высокая температура T_2 , определяемая отношениями коэффициентов отрицательного катализа для ингибиторов А и В. Отсюда может быть найдена искомая величина Q_2 для предохранительного ВВ с индексом 2, содержащего ингибитор В и по уровню антигризутности адекватного эталонному ВВ. Исходя из этих предположений производят расчет. Определяют температуру нагрева смеси газов в первом случае

$$T_1 = \frac{Q_1 m + T_m c_m}{m c_{ПВ} + c_m}, \quad (6.8)$$

где T_m — начальная температура метано-воздушной смеси; c_m — теплоемкость метано-воздушной смеси при начальной температуре; \bar{c}_m — средняя теплоемкость метано-воздушной смеси в интервале температур от T_m до T_1 ; $c_{ПВ}$ — средняя теплоемкость ПВ в интервале температур от $T_{взр}$ до T_1 .

Затем определяют период индукции вспышки при этой температуре

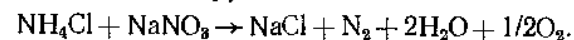
$$\tau_1 = k_1 \exp\left(\frac{\eta_1 E}{RT_1}\right), \quad (6.9)$$

где k_1 , η_1 — коэффициенты отрицательного катализа.

Далее при найденном τ_1 в уравнение (6.9) подставляются коэффициенты отрицательного катализа k_2 и η_2 , свойственные ингибитору В, и оно решается относительно температуры смеси T_2 .

По найденному значению T_2 с помощью уравнения (6.8) определяется искомая величина Q_2 при условии постоянства величин m и $c_{ПВ}$. Величина m находится из опытных данных. Эти допущения, особенно постоянства величины $c_{ПВ}$, огрубляют расчет, однако он может быть уточнен методом последовательного приближения. Для этого по величине Q_2 рассчитывается и подбирается химический состав ВВ с индексом (2), рассчитывается средняя теплоемкость его ПВ $c_{ПВ,2}$, значение которой подставляется в уравнение (6.8), и определяется, насколько полученная величина T_2 отличается от ранее найденной. Если расхождение значительно, то корректируется в нужную сторону химический состав и уточняются значения Q_2 и $c_{ПВ,2}$. И так поступают до тех пор, пока совпадение будет сочтено достаточно близким.

Наиболее активными ингибиторами относительно реакции окисления метана и других углеводородов являются соли щелочных металлов. Ингибиторы могут вводиться в состав предохранительных ВВ в виде невзрывчатых и негорючих материалов, например минеральных солей, таких как NaCl, KCl, Na₂SO₄, K₂CO₃ и др., или образовываться в процессе химических реакций, происходящих при взрыве. Например, если в состав ВВ входят такие соединения, как NH₄Cl и NaNO₃, то между ними при взрыве происходит реакция взаимодействия с образованием продукта NaCl, обладающего ингибирующими свойствами:



Достоинство второго метода в том, что ингибитор в этом случае образуется в тонкодисперсном состоянии и обладает повышенной активностью.

Такие же результаты могут быть получены при введении в состав ВВ металлических солей органических кислот, в том числе взрывчатых, которые, с одной стороны, являются горючими, а с другой — поставщиками ингибитора. Аналогичную роль могут выполнять минеральные окислители, содержащие ионы щелочных металлов, такие, например, как KNO₃, NaNO₃, KClO₄.

Если ингибитор вводится в виде невзрывчатых солей, то он должен быть тонко измельчен для усиления его эффективности. Эффективным является также введение пламегасителя в состав ВВ в виде раствора. В этом случае при взрыве образуется тончайший аэрозоль ингибитора.

При изучении влияния скорости детонации и бризантности на воспламеняющую способность ВВ постоянного состава (предохранительного аммонита с содержанием поваренной соли 25 %) эти параметры увеличивали путем более интенсивной обработки ВВ в шаровой мельнице. При этом работоспособность составов оста-

валась практически неизменной. При взрывании открытых свободно подвешенных зарядов патроны ВВ помещали в песчаную оболочку массой 200 г. С повышением бризантности увеличивалась частота воспламенения при взрывании зарядов непосредственно в газовой камере. В то же время не обнаруживалось существенной разницы при взрыве ВВ с различной скоростью детонации и бризантностью в мортире. Результаты исследований приведены ниже.

Время обработки аммонита (без соли) в шаровой мельнице, мин	0	5	40	80	160	240
Бризантность*, мм	10,7	11,4	13,5	15,3	15,6	15,7
	11,9	12,3	14	14,4	15	15,3
Частота воспламенения при взрыве открытых зарядов*, %	60	60	70	70	100	100
	10	30	70	80	90	100

* В числителе даны величины для фракционного состава соли 900—1750 мкм, в знаменателе — для 400—710 мкм

О малом влиянии параметров детонации на частоту воспламенения газа при взрывании в мортире говорят среднестатистические данные испытаний заводских партий предохранительного аммонита, выполненных в опытном штреке ВостНИИ.

Скорость детонации, км/с	2,95	3,6	3,75	3,99	4,2	4,3	4,6
Бризантность, мм	13	14	14,4	14,5	15,6	16,7	19
Частота воспламенения газа, %	0	20	20	30	20	5	0

Из механизма воспламенения горючей среды смешиванием с газообразными ПВ следует эвентуальная возможность влияния состава ПВ на воспламеняющую способность ВВ. На такую возможность впервые указал Е. Одибер, связав ее с изменением нижнего концентрационного предела горючего в смеси, если в ПВ содержатся свободный кислород или окись углерода. Взгляды Е. Одибера позже были развиты К. К. Андреевым и А. И. Гольбиндером, которые полагали, что помимо свободного кислорода и окиси углерода на воспламеняющее действие взрыва могут влиять некоторые другие валентно-насыщенные соединения (NO₂, перекиси) и свободные радикалы в составе ПВ, ускоряющие реакцию окисления метана. В этой связи предъявляются специальные требования к составу предохранительных ВВ (близкий к нулевому кислородный баланс) и полноте его взрыва.

В связи с большим практическим значением данного вопроса было детально исследовано влияние состава ПВ на воспламеняющую способность предохранительных ВВ.

Состав ПВ может быть изменен путем изменения соотношения компонентов во взрывчатой смеси или технологии изготовления ВВ. По первому варианту изготавливали смеси из тротила и ам-

миачной селитры в разных соотношениях, к которым добавляли кварцевый песок или хлористый натрий в таких количествах, чтобы образцы имели близкую работоспособность. Таким способом были получены составы с близкой работоспособностью, но с разным кислородным балансом и составом ПВ. Составы взрывали в газовой камере штрека и в мортире. В первом случае заряды помещали в оболочки из песка. Для анализа состава ПВ те же заряды взрывали в бомбе Бихеля, в вакууме (остаточное давление воздуха 20 мм) и при атмосферном давлении. В табл. 6.14 приведены результаты этих опытов и характеристики ПВ.

Из приведенных в табл. 6.14 данных следует, что с увеличением кислородного баланса ВВ воспламеняющая способность ВВ имеет тенденцию к снижению, что связано с уменьшением энергетических характеристик ВВ. Исключение составляет серия опытов, в которой повышение кислородного баланса ВВ достигалось за счет увеличения содержания окислителя (аммиачной селитры) и соответствующего уменьшения содержания соли-пламегасителя. Повышение в этом случае воспламеняющей способности ВВ следует объяснять уменьшением суммарной поверхности ингибитора.

В другой серии опытов испытывались образцы ВВ постоянного химического состава (смесь селитры, тротила и хлористого натрия), но разной технологии изготовления (кислородный баланс ВВ +0,43%). В зависимости от длительности обработки состава в шаровой мельнице менялся состав ПВ, что определялось при взрывании в бомбе Бихеля (в вакууме). Заряды массой 100 г взрывали в газовой камере опытного штрека. Результаты определения воспламеняющего действия взрыва ВВ с различным составом ПВ приведены в табл. 6.15.

С увеличением времени обработки взрывчатой части состава уменьшается образование окиси азота при взрыве. В то же время частота воспламенения метано-воздушной смеси при взрыве не только не уменьшается, но даже имеет тенденцию к некоторому возрастанию. По-видимому, другие факторы, связанные с технологией изготовления составов, оказывают большее влияние на воспламеняющее действие взрыва, чем состав ПВ.

На основании выполненных опытов можно сделать вывод, что на воспламеняющее действие взрыва состав газообразных ПВ влияет в меньшей степени, чем энергетические характеристики ВВ, вид и поверхность пламегасителей.

Изложенные выше закономерности воспламенения горючих шахтных сред при взрывных работах позволяют сформулировать следующие основные принципы создания предохранительных ВВ.

1. Предохранительные ВВ должны иметь ограничения по энергии взрыва. Допустимый уровень энергии определяется условиями применения и является основой классификации предохранительных ВВ.

Таблица 6.14

Показатели	Результаты опытов в зависимости от кислородного баланса, %					
	-0,2	+4,5	+9,25	-0,2	+4,5	+9,25
Состав ВВ, %: аммиачная селитра тропил кварцевый песок хлористый натрий Работоспособность, см ³ Бризантность, мм Масса заряда*, г Масса оболочки, г Число опытов* Частота воспламенения газа, %: открытого заряда при взрывании в мортيره Объем газообразных ПВ**, л/кг Состав ПВ (средние данные из двух определений)**, л/кг:	59	69,5	80	59	69,5	80
	16	12,5	9	16	12,5	9
	25	18	11	25	18	11
	250	267	267	25	277	260
	13,5	14,1	11,5	13,3	13,4	11,5
	100/600	100/600	100/600	200	200	200
	110	110	110	220	220	220
	24/10	24/10	24/10	19	19	19
	54	54	29	42,1	52,6	68,5
	100	100	50	—	—	—
358/500	367/523	358,5/516	355/516,5	365/523,5	357,5/534	
87,4/123,2	94/138	82,5/131,5	93,6/135	99,5/140	96,5/147	
51,5/82,7	33,2/11,3	31,2/1,8	49,6/18,8	25,2/19,1	24/1,86	
184/323,3	193/349	192/332	203/352	207/342	200/360	
13,4/3,05	23,7/19,2	51,3/88,3	4,2/1,5	13,95/8,5	27,7/30,8	
13,4/7,25	7,15/0,5	0,4/0	0,9/1,55	13,3/7,05	5/0	
7,9/10	7,35/7,85	5/4,4	1,8/9	8,2/7,3	5,1/4,1	

* В числителе — открытый заряд, в знаменателе — в мортيره.

** В числителе! — при взрывании в вакууме, в знаменателе — в воздухе.

Таблица 6.15

Время обработки в мельнице, мин	Бризантность, мм	Состав ПВ, м ³ /кг · 10 ⁻⁴				Частота воспламенения газа, %
		CO ₂	CO	NO	N ₂	
0	10,3	78,9	74,9	17,9	159,2	10
5	11,9	81,4	66,9	13,8	165	60
40	12,9	84,6	61,9	12,1	167	60
80	13,4	85	61	11,4	171,2	80
160	13,7	91,8	64,9	9,1	172,7	50
240	14,3	85,2	68	1,3	185	80

Ввиду отсутствия надежных аналитических и численных методов расчета, связывающих воспламеняющую способность ВВ относительно метапо-воздушной и других взрывчатых газоздушных или пылевоздушных смесей с энергетическими характеристиками ВВ, воспламеняющую способность ВВ оценивают экспериментально в опытных штреках, моделирующих шахтные условия.

Каждому классу предохранительных ВВ отвечает своя методика испытаний.

2. Допустимый уровень энергии предохранительных ВВ зависит от их химического состава. При наличии в составе ВВ материалов, обладающих ингибирующим действием относительно реакций окисления горючих, образующих с воздухом взрывчатую смесь, допустимый уровень энергетических характеристик ВВ повышается. Эффективность ингибиторов («пламегасителей») определяется их химической активностью и суммарной поверхностью или концентрацией во взрывчатой газовой смеси. Чем более активен ингибитор и больше его удельная поверхность, тем выше может быть уровень энергии предохранительных ВВ.

Количество вводимого в предохранительные ВВ ингибитора определяется заданным уровнем энергии ВВ с учетом активности ингибитора.

Другие показатели химического состава предохранительных ВВ в меньшей мере влияют на его воспламеняющую способность. Однако следует избегать таких композиций, которые при взрыве образуют соединения, активирующие реакцию окисления метана и других углеводородов, или выбрасывают нагретые до высокой температуры (горящие) твердые частицы.

3. Регулирование энергетических характеристик ВВ возможно двумя способами: подбором такой взрывчатой композиции, которая отвечает заданному уровню удельной теплоты взрыва или иного энергетического показателя ВВ (температуры взрыва, работоспособности ВВ и др.); снижением первоначально высоких энергетических характеристик ВВ невзрывчатыми материалами

до требуемого уровня. Вторым способом проще в течение многих лет был основным. Например, в качестве взрывчатой основы выбиралась стехиометрическая смесь аммиачной селитры и тротила (типа аммонита 6ЖВ) с теплотой взрыва около 4185 кДж/кг и в нее вводилось то или иное расчетное количество солей-пламегасителей типа NaCl. Таким образом, при однотипной технологии и одинаковой номенклатуре исходных компонентов создавались предохранительные ВВ нескольких классов. Точно так же в качестве исходной стандартной взрывчатой основы часто использовался тот или иной нитроглицериновый состав, удовлетворяющий заданным эксплуатационным качествам.

Первый способ регулирования энергетических характеристик исторически предшествовал второму (см. раздел 1), а в последнее время широко используется во многих странах при создании так называемых селективно-детонирующих предохранительных ВВ (см. раздел 8).

7. ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПРОМЫШЛЕННЫХ ВВ И МЕТОДЫ ИХ ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Эффективность и безопасность применения промышленных ВВ зависит не только от их взрывчатых характеристик, но и от физико-химических свойств, таких как химическая и физическая стабильность, водоустойчивость, увлажняемость, пластичность, текучесть, сыпучесть и ряд других.

Химическая и физическая стабильность определяют сохранность взрывчатых и эксплуатационных характеристик ВВ в течение гарантийного срока их использования, а также температурные режимы безопасной переработки, хранения и применения ВВ; реологические и физико-механические свойства — пригодность данного вида ВВ к механическим способам транспортирования и заряжания; увлажняемость — требования к укупорке; водоустойчивость — возможность применения ВВ в обводненных забоях и т. д.

7.1. ВОДОУСТОЙЧИВОСТЬ

Водоустойчивостью называют способность промышленного ВВ сохранять свои взрывчатые свойства при погружении в воду. С некоторыми ВВ или их компонентами вода может взаимодействовать, растворяя их или вступая в химическую реакцию, с другими — вода не взаимодействует, но способна проникать между частицами вещества, что приводит к флегматизации ВВ, снижению или полной потере детонационной способности.

Мерой водоустойчивости (степени водоустойчивости) в общем случае служит время пребывания заряда ВВ в воде, в течение которого взрывчатые характеристики не должны снижаться ниже некоторой установленной нормы. Оценка может производиться либо прямыми способами, т. е. путем взрыва заряда, помещенного в воду, с измерением тех или иных нормируемых параметров, либо косвенными методами, например, по вымыванию водорастворимых компонентов из состава ВВ за заданный промежуток времени или по скорости проникания воды в глубь заряда. При этом оговариваются условия испытания: глубина погружения заряда, его размеры, скорость потока воды и др. Особое значение имеет скорость водообмена (проточность) в скважине или емкости, моделирующей скважину при испытании. Этот показатель оказывает сильное влияние на практическую водоустойчивость промышленных ВВ, содержащих аммиачную селитру. В скважине с непроточной водой вымываемая из ВВ селитра в растворенном виде сохраняется в объеме заряда и участвует

в реакции взрывчатого превращения, так что энергетические параметры взрыва мало изменяются. В проточной воде вымывание селитры приводит к безвозвратным потерям энергии.

В некоторых случаях водоустойчивость выражают максимально допустимым количеством воды, которое может содержать ВВ без потери способности к детонации. По этому показателю, например, не содержащие тротила гранулированные ВВ типа игданита, гранулитов, для которых максимально допустимое содержание воды не превышает 5 %, квалифицируются как неводоустойчивые, а граммочит 79/21, способный детонировать при содержании воды до 20 %, — как ограниченно или условно водоустойчивый.

Низкая водоустойчивость была причиной ограниченного применения аммиачно-селитренных смесей в течение длительного времени после их изобретения, так как заряды из них требовали внешней гидроизоляции. Лишь в 50-х годах советскими исследователям удалось создать водоустойчивые аммониты за счет применения специального гидрофобизированного сорта аммиачной селитры.

В настоящее время для защиты ВВ от действия воды используют два способа: внешнюю гидроизоляцию зарядов, например, с помощью пластикатных (полиэтиленовых и др.) оболочек или покрытий из гидрофобных материалов (парафина, петролатума, гудрона и др.) и придание водоустойчивости самим ВВ за счет введения в их состав гидрофобных добавок или структурирование ВВ, т. е. создание мало- или беспористых структур, в которые затруднено проникание воды.

Часто оба способа применяются совместно. Так, например, в порошкообразные аммиачно-селитренные взрывчатые смеси вводят гидрофобные добавки и, кроме того, патроны этих ВВ покрывают пленкой из водозащитных материалов или помещают в запаянные полиэтиленовые рукава.

Простейший из методов создания собственно водоустойчивых ВВ состоит в том, что ВВ содержат только нерастворимые в воде и не взаимодействующие с ней материалы, например, тротил, нитроглицерин, гексоген, тэн, нитроклетчатку и т. п. Некоторые из перечисленных нитросоединений слабо растворимы в воде, но процесс идет столь медленно, что им можно полностью пренебречь. К таким материалам можно практически отнести и металлы, вводимые в состав промышленных ВВ: алюминий, ферросилиций и др., которые крайне медленно реагируют с водой на холоде. Кроме того, их реакционная способность ослаблена тем, что на поверхности обычно имеется пленка из гидрофобного материала. Детонационная способность ВВ данного типа, погруженного в воду, зависит, главным образом, от размера и формы частиц, их удельной поверхности. С увеличением последней флегматизирующее действие воды, заполняющей свободное пространство между час-

тицами ВВ, возрастает. По этой причине на взрывных работах при зарядании обводненных скважин засыпкой применяют только гранулированные ВВ с размером гранул 3—5 мм (гранулотол, алюмотол). Аналогично тому, как частицы алюминия в алюмотоле изолируются от химического взаимодействия с водой пленкой застывшего на их поверхности тротила, могут быть также гидроизолированы частицы водорастворимых компонентов, например аммиачной селитры. Для этого смешивают водорастворимые материалы с расплавленным тротилом или другими легкоплавкими нитросоединениями и затем массу охлаждают. С увеличением содержания тротила в составе ВВ водоустойчивость повышается. Оценить ее можно по количеству вымываемой селитры за некоторый интервал времени в заданных условиях опыта (при неподвижной воде, при перемешивании, в проточной воде и т. п.). К водоустойчивым ВВ такого типа относится ряд гранитолов и граммочитов, содержащих около 50 % тротила.

Другой метод гидроизоляции аммиачной селитры и других водорастворимых нитратов состоит в получении так называемых обратных эмульсий. В них за счет интенсивного перемешивания концентрированных водных растворов нитратов и минеральных масел или других жидких или легкоплавких гидрофобных веществ (парафинов, восков и т. п.) в присутствии эмульгатора создаются мельчайшие капли раствора, покрытие (закапслюлированные) тонкой пленкой гидрофобного вещества. На этом принципе построена технология получения водоустойчивых эмульсионных ВВ (эмулитов, отечественного порэмита и др.).

Возможно также сочетание обоих методов, т. е. распределение полученной обратной эмульсии в расплавленном тротиле. По этой технологии получают особо водоустойчивые гранитолы, способные выдерживать пребывание в воде до 12 сут.

Известны методы защиты ВВ от действия воды, основанные на предотвращении проникания воды в глубь заряда заполнением свободного пространства (пор) между твердыми частицами ВВ высоковязкой жидкостью. При этом, чем выше вязкость жидкого наполнителя, тем большие усилия требуются для его вытеснения водой и тем выше водоустойчивость ВВ. Аналогичным образом влияют адгезионные свойства жидкости по отношению к поверхности твердых компонентов ВВ.

В качестве жидкого наполнителя до недавнего времени в основном применяли нитроглицерин, нитроглицоли, вязкость которых повышали растворением в них нитроклетчатки. Такие ВВ известны под названием динамитов. Степень их водоустойчивости зависит от соотношения твердой и жидкой фаз в составе и от вязкости самого динамитного желатина, определяемой количеством и качеством загустителя — нитроклетчатки, полнотой его растворения в нитроэфирах. В последнее время в качестве жидкого наполнителя широко используют водные гели. И в данном

случае степень водоустойчивости ВВ зависит от количества наполнителя и его вязкости, адгезионных свойств, а также физической стабильности геля.

Такие пластифицированные непористые ВВ, сформованные в виде компактных зарядов, взаимодействуют с водой только с поверхности. Поэтому вымывание водорастворимых компонентов происходит медленно, поскольку, по оно может усилиться в турбулентном водном потоке. Лишь при очень высоком гидростатическом давлении воды, например при погружении зарядов на большие глубины, возможно вытеснение загущенного наполнителя, особенно недостаточно вязкого, из заряда и проникание воды в глубь заряда.

При зарядании низковязких текучих водосодержащих ВВ (акватолов, аквапалов) через столб воды в скважины поверхность контакта вещества с водой резко возрастает и вымывание аммиачной селитры и других нитратов увеличивается. Такие вещества рекомендуется подавать по шлангу на дно скважины с постепенным подъемом шланга по мере заполнения скважины ВВ. Высоковязкие акватола можно загружать в скважину через столб воды, не опасаясь их расслаивания и вымывания селитры.

Еще один широко распространенный способ придания водоустойчивых свойств сформованным зарядам из порошкообразных ВВ, содержащих растворимые в воде компоненты, состоит в том, что в массу ВВ равномерно распределяют высокогидрофобные добавки. Тем самым создается пространственная гидрофобная решетка, препятствующая прониканию воды в глубь заряда по капиллярам. В этом случае замокание заряда определяется соотношением двух основных, противоположно направленных сил: капиллярного и гидростатического давлений. Результирующая этих сил определяет скорость замокания, которая меняется во времени. Механизм замокания в этом случае заключается в постепенном смачивании гистерезисно-гидрофобной поверхности пор и в разрушении пористой структуры и гидрофобной решетки из-за растворения аммиачной селитры и других растворимых в воде компонентов, поверхность которых полностью не защищена. Замокание усиливается с ростом гидростатического давления воды, в частности, с увеличением глубины погружения патрона. Известное влияние оказывает также разность давлений между верхней и нижней поверхностями патрона, так как вода вытесняет из пор воздух, находящийся под давлением столба воды над верхней поверхностью патрона. Поэтому, например, патроны, находящиеся в воде в вертикальном положении, замкают быстрее, чем патроны, находящиеся в горизонтальном положении, и замокание их усиливается с увеличением длины патронов. С уменьшением пор, т. е. с увеличением плотности ВВ, замокание замедляется, так как в этом случае капиллярное противодействие гидрофобизированной поверхности пор возрастает. На водоустойчивость

сильно влияют содержание в ВВ гидрофобного вещества и его удельная поверхность. К ВВ данного типа относятся водоустойчивые аммоциты и аммоналы.

Водоустойчивые свойства почти полностью теряются, когда порошкообразные ВВ с гидрофобными добавками заряжаются в обводненные скважины россыпью: капиллярные силы утрачивают свое значение и ВВ быстро замкает. При этом аммиачная селитра и другие водорастворимые компоненты растворяются.

Гидрофобные добавки можно вносить в порошкообразные ВВ на стадии смешивания компонентов или вносить их на частицы отдельных компонентов до смешивания. Их гидрофобизирующее действие определяется собственной гидрофобностью и ее стабильностью, а также степенью диспергирования гидрофобного вещества. Высокая дисперсность и адгезионные свойства гидрофобной добавки необходимы для закрепления ее частиц на гидрофобизируемой поверхности.

Стеараты многовалентных металлов, характеризующиеся как наиболее эффективные гидрофобизаторы для порошков аммонитов, сочетают в себе высокую истинную гидрофобность, связанную с химической природой вещества, с достаточно высокой гистерезисной гидрофобностью, которая является следствием высокой дисперсности порошков и особой структуры их частиц, способствующих закреплению на поверхности порошка аммонита. Некоторые технические порошки стеаратов имеют размер частиц 5—20 мкм. Размер частиц аммоцитов составляет 70—120 мкм. Таким образом, для покрытия гидрофобным слоем большей части гидрофобизируемой поверхности достаточно небольших количеств стеаратов. Собственную гидрофобность добавок можно оценить по краевому углу смачивания, но чаще их действие оценивают непосредственно в составе аммонитов. Оценку производят также с помощью гидродинамического прибора. В этом случае степень водоустойчивости выражают величиной гидростатического давления столба воды, необходимого для проникновения ее внутрь заряда, или по времени, в течение которого патроны ВВ, погруженные в воду, не размокают и не теряют способность детонировать.

Широко распространен метод определения водоустойчивости порошкообразных ВВ по ГОСТ 14839.13—69. Для этого 10 г ВВ распределяют равномерным слоем в специальной сборке, по центру которой снизу поступает вода со скоростью подъема в барометрической трубке 20 ± 2 см/мин. Показателем степени водоустойчивости испытываемого ВВ является высота столба воды в барометрической трубке, при которой на верхней поверхности слоя появляются первые следы воды.

Результаты такой оценки составов, состоящих из аммиачной селитры (80%), тротила (19%) и гидрофобных материалов (1%), на гидродинамическом приборе приведены в табл. 7.1.

Таблица 7.1

Гидрофобная добавка	Водоустойчивость аммонита, см	Гидрофобная добавка	Водоустойчивость аммонита, см
Стеарат кальция	90	Резинат кальция	36
Стеарат цинка	88	Канифоль	35
Парафин — мазут (4 : 1)	85	Асфальтит печорский	33
Асфальтит — парафин (2 : 1)	82	Динитронафталин	28
Стеарат железа	78	Синтетические жирные кислоты фракции (C ₁₇ — C ₂₁)	28
Парафин	70	Стеарин	27
Лигниц-парафин (2 : 1)	70	Идитол	70
Парафин — канифоль	68	Сажа термическая	16
Сажа — парафин (2 : 1)	67	Сажа ламповая	14
Графит — парафин (2 : 1)	67	Петролатум	14
Парафин — канифоль (3 : 1)	66	Сажа канальная	13
Динитронафталин — парафин (2 : 1)	64	Карбоксиметилцеллюлоза	8
Канифоль — парафин (4 : 1)	43		

Одним из недостатков способа введения гидрофобизирующей добавки непосредственно в ВВ на стадии смешивания компонентов является трудность ее равномерного распределения в массе вещества. С этой точки зрения выгодно введение гидрофобного вещества в ВВ с каким-либо носителем, например, одним из компонентов ВВ — аммиачной селитрой. В этом случае количество гидрофобной добавки может быть заметно снижено. Н. М. Шестиковым предложен эффективный метод гидрофобизации аммиачной селитры, пригодной для промышленного использования в аммонитах. По предложенному методу на стадии кристаллизации в аммиачную селитру вводят сернистое окисное железо из расчета 0,5 % массы соли и жирные кислоты в количестве 0,25 %. При этом образуется железная соль жирных кислот на поверхности аммиачной селитры. Такое содержание жирного компонента не оказывает заметного флегматизирующего действия на аммонит и, напротив, стабилизирует его, снижая, кроме того, склонность к слеживанию.

Патронированные аммониты, изготовленные на основе водоустойчивой селитры (получившие индекс ЖВ), сохраняют свои взрывчатые свойства после пребывания в воде в течение 1 ч на глубине 1 м, так как вода крайне медленно проникает в глубь патрона по порам, стенки которых имеют гидрофобные включения. Промышленный выпуск водоустойчивой селитры позволил создать широкий ассортимент водоустойчивых аммонитов и других ВВ на основе аммиачной селитры различного химического состава и назначения.

В процессе хранения водоустойчивость ВВ на основе аммиачной селитры снижается, что объясняется тем, что при увлаж-

нении ВВ и последующем его подсыхании на гидрофобной поверхности осаждаются из раствора кристаллы селитры и водоотталкивающие свойства гидрофобной добавки ослабевают.

Гидрофобизированные ВВ на основе аммиачной селитры увлажняются парами воды примерно с такой же скоростью, как и обычные неводоустойчивые аммониты, но распределение влаги иное. Если неводоустойчивые аммониты увлажняются равномерно по всей массе, так как конденсируемая на поверхности влага по капиллярам с гидрофильной поверхностью быстро впитывается в глубь вещества, то в водоустойчивых составах из-за водоотталкивающих свойств поверхности капилляров конденсированная вода в виде капелек скапливается преимущественно в периферийных слоях вещества и лишь медленно проникает в глубь него.

Аммониты 6ЖВ, Т-19, ПЖВ-20 и аммонал, изготовленные длительной шаровой обработкой в мельницах, выдерживают гидростатическое давление столба воды высотой 80—90 см, а их патроны допускают многочасовое пребывание в обводненных шпурах и скважинах без утраты взрывчатых свойств. Еще большую водоустойчивость имеет прессованный скальный аммонит. Предохранительные нитроэфирсодержащие ВВ имеют относительно невысокую степень водоустойчивости.

7.2. ФИЗИЧЕСКАЯ СТАБИЛЬНОСТЬ

Физическую стабильность ВВ определяют следующие характеристики: увлажняемость, слеживаемость, уплотняемость, расслаивание, летучесть.

Увлажняемость — способность гидрофильных материалов поглощать влагу из окружающей атмосферы (гигроскопичность). Гигроскопичность определяется величиной гигроскопической точки, т. е. отношением упругости водяных паров над насыщенным раствором данного вещества к упругости водяных паров, насыщающих воздух при той же температуре. Гигроскопическая точка выражается в процентах относительной влажности и характеризует такое состояние вещества, при котором оно не подсыхает и не увлажняется. Чем выше гигроскопическая точка вещества, тем оно менее гигроскопично. Из солей, применяемых в производстве промышленных ВВ, к сильно гигроскопичным относятся кальциевая селитра (гигроскопическая точка при 25 °С 44 %) и аммиачная селитра (62,7 %); к умеренно гигроскопичным — натриевая селитра (74,5 %), хлористый натрий (75,5 %), хлористый аммоний (78,5 %), к малогигроскопичным — калиевая селитра (92 %), хлористый калий (83,4 %). Они обуславливают в основном гигроскопичность самого смесового ВВ. Гигроскопическая точка большинства ВВ на основе аммиачной селитры при температуре 15—20 °С составляет 60—68 %. Поэтому в большинстве клима-

тических районов СССР они способны при отсутствии влагозащитной упаковки увлажняться. Увлажнение нарушает физическую стабильность ВВ; способствует слеживанию, снижает сыпучесть, водоустойчивость и ухудшает детонационную способность.

Различные способы покрытия кристаллов аммиачной селитры влагонепроницаемой пленкой или изменения кристаллической решетки не дали положительных результатов в отношении снижения увлажняемости. Поэтому основной мерой предотвращения увлажнения ВВ на основе аммиачной селитры является внешняя защита зарядов различными влагонепроницаемыми материалами.

В ряде стран гигроскопичные химические материалы, в том числе и аммиачную селитру, упаковывают в пакеты и мешки, изготовленные из различных пластикатных пленочных материалов, в основном полиэтилена. Пленка полиэтилена сохраняет эластичность при температуре до -60°C , обладает водо- и влагонепроницаемостью, т. е. непроницаема как для жидкой, так и паровой воды.

Исследованиями защитных свойств пленочных материалов установлено, что пакеты из полиэтиленового рукава с толщиной пленки порядка 50 мкм предохраняют ВВ от увлажнения в течение полугода лет при переменных температурах и высокой влажности. Пакеты из полихлорвиниловой упаковочной пленки толщиной 190—200 мкм, выпускаемой в рулонах под маркой В-118, легко свариваются, но при температуре ниже -25°C теряют пластичность и ломаются. Полиамидная пленка ПК-4 более влагопроницаема. Из характеристики влагонепроницаемых упаковочных материалов, использованных в качестве мягкой тары, по результатам экспериментальной проверки (хранение в течение одного года в условиях 100 %-ной относительной влажности) следует, что наибольшей влагозащитной способностью обладает полиэтиленовая пленка. Процент увлажнения аммиачной селитры в различном влагонепроницаемом упаковочном материале приведен ниже.

Полиэтиленовая пленка толщиной 50 мкм	0,03
Бумага, покрытая полиэтиленовой пленкой	0,04
Обрезиненная бумага:	
в два слоя	0,3
в один слой	0,7
Бумага, покрытая слоем парафина-петролатума	0,7
Полихлорвиниловая пленка В-118 толщиной 150 мкм	0,9
Бумага, покрытая полихлорвиниловой пленкой	0,94
Бумага, пропитанная петролатумом	1,4
Полиамидная пленка ПК-4 толщиной 50 мкм	2,5
Бумага, покрытая слоем парафина	3,0
Дублирующая бумага с битумной прослойкой	Полное растворение
Стандартный битумированный мешок	То же

При отсутствии влагозащитной упаковки в большинстве климатических районов СССР ВВ на основе аммиачной селитры способны в течение года увлажняться. Увлажнение нарушает физическую стабильность и ухудшает детонационную способность ВВ.

Полиэтиленовые пакеты изготовляют из пленки рукавного типа толщиной 80—100 мкм. Иногда бумажные пачки влагоизолируют парафин-петролатумной смесью. Влагоизолированные пачки и полиэтиленовые пакеты с патронами, а также влагоизолированные патроны упаковывают либо в дощатые ящики, либо в ящики из древесно-волоконистой плиты.

Дощатые ящики перед упаковкой в них патронов плотно выстилают парафинированной оберточной бумагой. Бумажные влагоизолированные пачки с патронами предохранительных ВВ (кроме патронов в полиэтиленовых оболочках) независимо от гарантийных сроков хранения перед укладкой в ящики дополнительно помещают в полиэтиленовые мешки-вкладыши, которые после этого герметично сваривают или заклеивают. Мешки изготовляют из пленки рукавного типа толщиной 100 ± 20 мкм. При упаковке в ящик полиэтиленовых пакетов с патронами мешки-вкладыши не примсяют. Патроны в полиэтиленовых предохранительных оболочках упаковывают поштучно непосредственно в ящики, обложенные парафинированной бумагой.

Бумажные пачки с патронами непреходительных аммиачно-селитренных взрывчатых смесей упаковывают в ящики с применением полиэтиленового мешка-вкладыша только при поставке продукции потребителям Крайнего Севера.

Влагоизолированные патроны больших диаметров упаковывают в ящики без заправки в пачки. Ящики плотно выстилают влагоизолированной бумагой; при поставке ВВ с гарантийным сроком 12 мес патроны вкладывают в полиэтиленовый мешок-вкладыш.

Непатронированные сыпучие ВВ упаковываются в многослойные бумажные битумированные мешки или мешки с полиэтиленовым покрытием.

Гарантийный срок хранения промышленных ВВ зависит от степени герметичности упаковки, предотвращающей увлажняемость состава.

Для предотвращения увлажнения непатронированных ВВ их упаковывают в мешки-вкладыши из полиэтилена или в ламинированные мешки. Патронированные ВВ, в основном предохранительные, отправляемые дальним потребителям, помещают в полиэтиленовые пакеты.

Увлажняемость практически определяют, выдерживая навески ВВ в эксикаторах над растворами с различной, но заведомо известной упругостью водяных паров, взвешиванием до постоянного веса.

Процесс поглощения влаги из воздуха растворимой твердой солью протекает в две стадии. Сначала сухая соль адсорбирует влагу. Затем, по мере того, как адсорбированная влага покрывает всю или большую часть поверхности кристаллов, образуется пленка насыщенного раствора, давление пара над которым всегда меньше, чем давление насыщенного пара над чистой водой при одной и той же температур. Если парциальное давление водяного пара в воздухе больше, чем давление пара над насыщенным раствором, то вещество будет поглощать влагу из воздуха.

Слеживаемость — способность некоторых порошкообразных веществ терять при хранении сыпучесть и превращаться в плотную сплошную массу. Иногда это явление называют также «спеканием». Однако большей частью под спеканием понимают потерю сыпучести, вызванную нагревом.

Слежавшиеся ВВ неудобны в обращении: невозможно раздавливание патронов в шпурах, повышается опасность и затрудняется введение детонатора в патрон-боевик, перед заряданием скважин россыпью приходится дробить слежавшиеся аммониты, затрудняется механизация зарядания и т. п. Кроме того, слежавшиеся аммониты характеризуются пониженной детонационной способностью.

Одной из причин слеживаемости является рекристаллизация водорастворимых компонентов. При увлажнении ВВ некоторая часть солей (нитраты аммония, хлористого натрия или др.) переходит в раствор. Затем при подсыхании или понижении температуры из насыщенного раствора выделяются новые кристаллы, которые цементируют массу в прочный конгломерат. Этому процессу способствуют капиллярные силы, которые сближают увлажненные частицы. Поэтому при слеживаемости, помимо потери сыпучести, часто порошок самоуплотняется, т. е. происходит объемная усадка. Описанный процесс имеет место при умеренном увлажнении гидрофильных материалов. При большом содержании влаги уменьшение растворимости при понижении температуры может оказаться недостаточным для цементации массы образованием цевых кристаллов из раствора.

Слеживаемость по описанному механизму усиливается при внешнем давлении, например, при штабелировании материала, упакованного в мягкую тару (бумажные, пластиковые мешки), или при внутренних напряжениях, вызванных в результате полиморфных превращений аммиачной селитры с увеличением объема ВВ. В этом отношении особенно опасен нагрев аммиачной селитры выше температуры $+32^\circ\text{C}$, при которой она из β -формы переходит в γ -форму с увеличением объема на 2,5%. Некоторые исследователи обнаруживали слеживаемость в результате полиморфных превращений при температуре $+32^\circ\text{C}$ только влажной селитры; при отсутствии влаги слеживаемости при нагреве не происходило.

При прочих равных условиях слеживаемость аммиачно-селитренных смесей возрастает с увеличением степени измельчения.

Обволакивающие, нерастворимые в воде масла, парафин, керосин и другие примеси снижают слеживаемость гигроскопичного ВВ, покрывая его частицы негигроскопичной пленкой. Вследствие этого понижается скорость поглощения влаги этим ВВ. Кроме этого, пленка гидрофобного вещества изолирует частицы вещества друг от друга и образующиеся новые кристаллы менее прочно связывают массу вещества.

В теории кристаллизации известен принцип изменения активными примесями размеров и формы кристаллов, например, добавками поверхностно-активных веществ (0,01—0,1%), в том числе красителей. Соответственно эти добавки могут влиять и на процесс слеживаемости.

Экспериментально доказано, что краситель действует, изменяя форму кристаллов, в результате чего они становятся механически непрочными и слеживаемость снижается. Общим для структурной характеристики красителей, эффективно изменяющих размеры кристаллов, является присутствие в них сульфогрупп и катионной группы вида NH_2 или OH . Наиболее эффективно снижают слеживаемость аммиачной селитры фуксин кислотный из класса трифенилметановых красителей и кислотный красный ама-рант из класса азокрасителей.

Наибольшую слеживаемость имеют вещества со средними значениями гигроскопической точки 50—70%, способные периодически увлажняться и подсыхать с изменением влажности воздуха. Именно такими являются основной компонент промышленных ВВ — аммиачная селитра, а также входящие в состав предохранительных ВВ хлориды натрия или калия.

При укупорке гигроскопичного вещества в негерметичную тару благодаря чередующемуся увлажнению и подсыханию вещества, а также циклическим нагревам и охлаждению при хранении возможно переменное слеживание и разрыхление вещества. Однако слеживание может быть и необратимым, если процесс прошел слишком глубоко и возникли очень сильные связи между частицами. Часто необратимое слеживание наблюдается при упаковке недостаточно высушенного и охлажденного аммонита. По этой причине в технологических процессах производства строго регламентируются влажность и температура аммонитов и других ВВ на основе аммиачной селитры. При хранении этих ВВ следует избегать условий, когда возможно сильный нагрев вещества, например, под воздействием солнечных лучей.

Сильно слежавшиеся ВВ на основе аммиачной селитры подлежат механическому дроблению в соответствующих аппаратах, обеспечивающих безопасность процесса. Укупорка в герметичную тару, например в полиэтиленовые пакеты, снижает вероятность слеживаемости ВВ при хранении, так как устраняется влагооб-

мен с окружающей средой. По этой причине при упаковке таких ВВ в герметичную укупорку стандартами удлиняется гарантийный срок хранения ВВ. Но и в этом случае технологическим регламентом предусмотрены строгие ограничения по влажности и температуре ВВ перед укупоркой, чтобы избежать начала слеживаемости. Для предотвращения увлажнения ВВ на основе аммиачной селитры в технологическом цикле в производственных помещениях заводов вводят кондиционирование воздуха.

На слеживаемость могут влиять размеры и форма частиц ВВ. С увеличением размеров уменьшается удельная поверхность порошка, а следовательно, и число возможных узлов сцепления. По этой же причине порошок, состоящий из частиц сферической формы, меньше слеживается, чем порошки, содержащие частицы с плоскими поверхностями. На слеживаемость влияет также характер поверхности частиц. Гладкая поверхность создает меньше возможности для слеживаемости, чем шероховатая. Способы устранения или ослабления слеживаемости промышленных ВВ сводятся к следующему:

1) минимальное содержание влаги и охлаждение аммонитной массы перед патронированием и укупоркой (до температуры ниже 32 °С), надежная теплоизоляция готовой продукции герметичной пластикатной пленкой (пакетами, мешками), влагонепроницаемыми мастиками и др.;

2) хранение в условиях, исключая внешние сдавливающие нагрузки и резкие колебания температуры с переходом через температуру +32 °С, отвечающую полиморфизму превращения аммиачной селитры;

3) введение в селитру или в состав ВВ добавок, снижающих слеживаемость: пористых веществ, характеризующихся хорошей сорбционной влагеёмкостью, например, силикагеля, древесной, торфяной муки и др.; гидрофобных веществ, изолирующих частицы гидрофильных веществ в составе; добавок, уменьшающих толщину и механическую прочность межкристаллических связующих мостиков, например фуксина, эмаранта и других красителей; поверхностно-активных добавок (0,03—0,05 %);

4) укрупнение частиц ВВ или отдельных его компонентов зернением, гранулированием или другими технологическими способами.

Практикуют и такие способы снижения слеживаемости, как смещение полиформных превращений аммиачной селитры в область более высоких температур. Это достигается, в частности, введением в кристаллы аммиачной селитры хлористого калия или калиевой селитры.

До настоящего времени нет достаточно объективного, быстрого и удобного метода определения слеживаемости аммиачной селитры и ВВ на ее основе. Практическое определение слеживаемости сводится к следующему: аммиачную селитру, затаренную

в бумажные мешки, выдерживают в складских условиях в течение определенного срока (4—10 мес), после чего мешки сбрасывают на цементный пол. Затем вещество просеивают через сито и по величине остатка на нем определяют его слеживаемость.

Широко распространен прибор определения слеживаемости, предложенный Н. Е. Пестовым. Прибор состоит из разборного цилиндра и свободно перемещающегося мерного поршня с платформой для груза. Масса груза рассчитывается такой, чтобы она соответствовала давлению, которому материал подвергается в естественных условиях хранения. В нижней части цилиндра аппарат закрывается крышкой и герметизируется песчаным затвором. Навеска испытываемого материала предварительно увлажняется в эксикаторе в течение 2,5 ч. Увлажненное вещество переносится в прибор для сдавливания, где выдерживается в течение 3 сут при 50 %-ной относительной влажности. Уплотненные образцы далее высушиваются в эксикаторе над серной кислотой.

Слеживаемость определяется по сопротивлению раздавливанию шашек на лабораторном прессе. Наиболее точной считается методика определения степени слеживаемости в шаровой мельнице. Ее определяют по количеству остатка на соответствующем сите после дробления слежавшегося вещества в мельнице при заданном режиме ее работы.

О сравнительной эффективности рекомендуемых средств против слеживаемости можно судить по приведенным ниже показателям испытаний ряда аммонитов, содержащих различные добавки, по методу Пестова. В качестве эталона принята простейшая бинарная смесь селитры с тротилом с нулевым кислородным балансом. Аммонит 6ЖВ содержит добавку солей жирных кислот. Как видно из приведенных данных, в наибольшей мере слеживаемости препятствуют разрыхляющие добавки.

Аммонит	С ама- ран- том	С жирными кислотами	С фуксин- ном	С древесной мукой (3 %)	
Давление раздавливания (МПа) при влажности, %:					
0,1	0,23	0,08	0,06	0,04	
0,1—0,5	0,37	0,23	0,14	0,12	
Аммонит	С древесной мукой и жирными кислотами	С древес- ной мукой (8 %)	С асфаль- титом и па- рафином (1,5 %)	С алюми- нием (пуд- рой)	ПЖВ-20
Давление раздавливания (МПа) при влажности, %:					
0,1	0,02	— (не слеживается)	0,18	0,04	0,009
0,1—0,5	0,065	0,045	0,38	0,16	0,13

Гранулированные ВВ, гранулиты и граммониты, особенно горячего смешивания, обладают значительно меньшей слеживаемостью, чем порошкообразные ВВ.

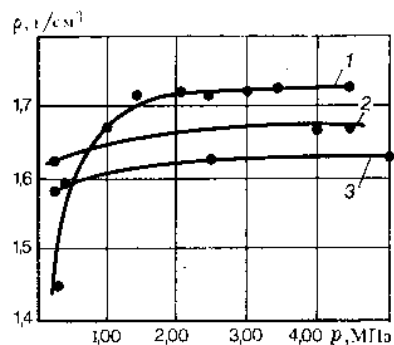


Рис. 7.1. Зависимость плотности ВВ (аммонита ПЖВ-20) от гидростатического давления:

1 — без добавок нитроэфиров; 2 — с добавкой 9% нитроэфиров; 3 — с добавкой 20% нитроэфиров

Уплотняемость — важное эксплуатационное качество сыпучих ВВ. Способность промышленных ВВ уплотняться при внешних нагрузках может иметь двойное практическое значение — как положительное, так и отрицательное. Для гранулированных ВВ, заряжаемых с помощью пневмозарядчиков, это свойство способствует повышению плотности заряжания.

Уплотняемость возрастает при наличии жидкой фазы в ВВ. Так, гранулиты и игданит сыпучей плотности 0,85—0,9 г/см³, содержащие жидкие нефтяные масла, при пневмозаряжении в шпурах и скважинах уплотняются до 1,2 г/см³. Аналогичное действие оказывает увлажнение перед пневмозаряжением граммонита 79/21, не содержащего жидких нефтепродуктов.

На кривых уплотняемости некоторых типичных предохранительных ВВ, полученных методом гидростатического объемного сжатия В. Ф. Старокожевым, видно (рис. 7.1), что при малых нагрузках аммониты, не содержащие жидкой фазы, имеют меньшую уплотняемость, чем составы, сенсibilизированные нитроэфирами. При больших нагрузках эти ВВ меняются местами.

Для патронированных порошкообразных ВВ, особенно предохранительных, уплотнение может привести к потере или снижению детонационной способности и, как следствие, к выгоранию зарядов (см. раздел 6). Причем само уплотнение может быть вызвано воздействием ударных воздушных волн при одновременном групповом взрывании. По этой причине стремятся снизить уплотняемость предохранительных ВВ.

Результаты прессования увлажненных образцов при удельном давлении 3 МПа приведены в табл. 7.2.

Из сравниваемых образцов селитры несколько меньшей уплотняемостью характеризуется водостойчивая аммиачная селитра марки ЖВК. Аммонит, содержащий упругую волокнистую добавку — древесную муку, в меньшей степени уплотняется сравнительно с аммонитом ПЖВ-20, в состав которого входят две гигроскопичные соли (аммиачная селитра и хлористый натрий).

Таблица 7.2

Продолжительность увлажнения, ч	Аммиачная селитра кристаллическая		Аммиачная селитра кристаллическая марки ЖВК		Аммонит ПЖВ-20		Аммонит с добавкой древесной муки (4%)		Аммонит с мипорой (2%)	
	φ, %	ρ, г/мл	φ, %	ρ, г/мл	φ, %	ρ, г/мл	φ, %	ρ, г/мл	φ, %	ρ, г/мл
0	0,04	1,44	0,038	1,47	0,05	1,5	0,15	Не уплотняется	0,11	Не уплотняется
6	0,15	1,5	0,09	1,42	0,25	1,45	0,27	1,0	0,34	То же
24	0,45	1,52	0,53	1,41	1,08	1,73	0,54	1,25	1,23	»
48	0,64	1,49	0,94	1,42	1,18	1,59	0,60	1,0	1,45	»
72	0,97	1,65	1,44	1,43	1,9	1,65	0,92	1,31	2,10	»

Примечание. φ — влажность, ρ — плотность.

Практически не уплотняются в условиях опыта аммиачно-селитренные ВВ, содержащие упругую высокопористую добавку — мипору.

Расслаивание — самопроизвольное или под влиянием внешних сил разделение ВВ на составные части или отдельные компоненты. Расслаивание характерно для смесевых сыпучих ВВ, компоненты которых существенно различаются по плотности, форме и размерам частиц, агрегатному состоянию. Так, у игданита наблюдается стекание в нижние слои ВВ дизельного топлива. У водосодержащих ВВ при большом содержании жидкой фазы и недостаточном ее загущении происходит постоянное оседание и скапливание в нижних слоях твердых компонентов.

Промышленные ВВ, изготовленные в заводских условиях, при соблюдении нормальных условий транспортирования и применения расслаиваются незначительно.

Введение в гранулированную селитру некоторых поверхностно-активных веществ способствует снижению или предотвращению расслаивания компонентов; при этом увеличивается впитывающая способность жидкого компонента (дизельного топлива, масла и т. п.) селитрой. Повышенной впитывающей способностью по отношению к дизельному топливу характеризуется водостойчивая селитра марки ЖВК, содержащая соли жирных кислот.

Впитывающая (удерживающая) способность гранул селитры зависит от их пористости и влажности. Ниже приведены данные о впитывающей способности гранулированной селитры марки Б (числитель дроби) и гранулированной пористой селитры марки П с пористостью 0,45 см²/г (знаменатель дроби) относительно солярового масла.

Влажность селитры, %	0,3/0,13	0,73/0,4	1,08/1,0	1,66/1,4
Поглощение масла селитрой, %	8,21/15,8	9,55/15,46	7,18/14,1	4,68/12,08

В смесях игданитов, изготовленных на малопористой селитре с гладкой поверхностью гранул и на низковязком горючем, например дизельном топливе, наблюдается стекание горючего в нижние слои заряда.

Расслаивание водосодержащих ВВ находится в обратной зависимости от их вязкости. Для предотвращения расслаивания водный компонент загущают так называемыми гелеобразующими агентами, набухающими в воде (полиакриламид, натрийкарбоксиметилцеллюлоза, некоторые полисахариды растительного происхождения, например, гуаргам и др.). Кроме того, в водосодержащих ВВ применяют структурирующие или так называемые «сшивающие» агенты, в числе которых наиболее распространены бура, бихроматы и др.

Одной из форм расслаивания является экссудация жидкой фазы вследствие миграции ее к поверхности заряда за счет капиллярных сил. Экссудация обычно наблюдается у патронированных ВВ, содержащих свободные или загущенные полимерами жидкие компоненты. Деструкция гелей (водных для водосодержащих ВВ и нитроглицериновых для нитроэфирсодержащих ВВ) приводит к появлению жидкой фазы, которая может мигрировать к поверхности патронов. Особенно опасна экссудация для пластичных динамитов, так как появление жидких нитроэфира или нитрогликоля на бумажной обертке патронов повышает опасность в обращении. Поэтому при разработке составов необходимо предусматривать предотвращение экссудации жидких нитроэфиров.

Для предотвращения экссудации жидкие нитроэфиры желатинируют нитроцеллюлозой или вводят специальные добавки-поглотители.

Экссудацию определяют визуально по жирной полосе выпотевшего нитроэфира при разворачивании патронной бумаги, а также ее можно определить количественно. Обычно ее выражают относительно содержания нитроэфиров в составе ВВ.

Летучесть — способность некоторых компонентов ВВ частично или полностью улетучиваться (испаряться, сублимировать) в процессе хранения или применения. Чем выше упругость паров и температура испаряемого компонента, тем выше летучесть ВВ. Частично улетучиваются нитроэфиры из нитроэфирсодержащих промышленных ВВ, с чем связано их токсичное действие, а также вода из водосодержащих ВВ и дизельное топливо из игданита.

При +40 °С нитроглицерин заметно испаряется. Упругость пара нитроглицерина, по данным Г. Каста, возрастает при повышенной температуре с 0,027 Па при 20 °С до 0,32 Па при 40 °С и 2,67 Па при 60 °С. Летучесть нитрогликоля при температуре +35 ÷ +38 °С в 13 раз выше, чем нитроглицерина. Из порошкообразного ВВ с содержанием 5 % жидкого нитрогликоля в парафинированных патронах при комнатной температуре испаряется за

12 дней 2 %, за 2 мес 12 %, за 6 мес 50 % нитрогликоля. Такая потеря массы нитроэфиров при хранении может отразиться на взрывчатых свойствах ВВ.

7.3. ХИМИЧЕСКАЯ СТАБИЛЬНОСТЬ

Химическая стабильность (стойкость) ВВ характеризует скорость разложения ВВ при хранении и определяет способность его сохранять химический состав и связанные с ним физико-химические и взрывчатые свойства в течение гарантийного срока хранения. Она зависит от химической природы ВВ, наличия или отсутствия в нем нестойких примесей или компонентов, несовместимых друг с другом, а также от условий хранения.

При низкой стойкости ВВ хранение больших количеств может привести к самоускоряющемуся разложению и взрыву.

Для индивидуальных ВВ в основе процесса медленного термического разложения лежит, как правило, реакция мономолекулярного распада, протекающая в соответствии с уравнением Аррениуса. Константа скорости реакции находится в экспоненциальной зависимости от температуры T :

$$K = B e^{-E/(RT)},$$

где B — предэкспонента; E — энергия активации реакции распада.

В обычных условиях, т. е. при невысоких температурах, химически чистые ВВ достаточно стойкие. Так, если принять для константы скорости первичной мономолекулярной реакции распада нитроглицерина значения $B = 10^{18,84}$ и $E = 183\,540$ Дж/моль, то период полураспада, рассчитываемый по формуле $\tau_{1,2} = \ln 2/K$, в зависимости от температуры составит:

Температура, °С	0	20	40	60
Предэкспонента скорости . . .	$10^{-64,34}$	$10^{-13,95}$	$10^{-10,93}$	$10^{-9,2}$
Период полураспада, лет . . .	$4,8 \cdot 10^8$	$2 \cdot 10^6$	1870	35

В некоторых случаях кинетика распада является более сложной, например, если продукты распада катализируют, ускоряют процесс разложения (аутокаталитические реакции).

Катализировать процесс разложения могут не только продукты собственного распада, но и некоторые примеси. Такими свойствами, в частности, обладают примеси азотной кислоты. Вот почему в технологическом процессе получения нитроэфиров и других мощных ВВ предусмотрена их тщательная отмывка от примесей азотной кислоты и других нестойких продуктов.

Аутокаталитическое разложение усиливается при герметичной или малогазопроницаемой укупорке ВВ, так как в этом случае происходит накопление каталитически действующих газообразных продуктов разложения (окислов азота, паров воды и др.).

Для нейтрализации каталитически действующих примесей или продуктов собственного распада в некоторые ВВ вводят стабилизирующие добавки. Так, в состав динамитов вводили соду, мел или другие вещества щелочной природы, взаимодействующие с остаточными кислотами, окислами азота и т. п.

При больших массах ВВ изотермический процесс разложения, протекающий при постоянной скорости, может смениться на самоускоряющийся, переходя во взрыв. Причиной взрыва является возрастание температуры вещества в случае, если теплоприход за счет реакции разложения, пропорциональный массе вещества, преобладает над отводом тепла в окружающую среду (см. раздел 2).

Вероятность перехода химического разложения ВВ во взрыв будет тем больше, чем выше температура ВВ при хранении, больше масса ВВ и ниже энергия активации реакции распада.

Для смесевых ВВ в изотермических условиях массовая скорость их разложения аддитивно складывается из скоростей реакции разложения каждого из компонентов и рассчитывается исходя из кинетических констант (B) для каждого вещества, если продукты распада ни одного из компонентов не влияют каталитически на распад других компонентов. В последнем случае расчеты усложняются. Часто для упрощения расчетов экспериментально определяют усредненные кинетические константы для смесей или так называемые эффективные энергии активации и предэкспоненты.

При неизотермическом самоускоряющемся разложении смесевых ВВ, у которых продукты распада компонентов могут вступать в экзотермическую реакцию взаимодействия, например систем окислитель — горючее (аммонитов и др.), при расчетах критических условий теплового взрыва необходимо учитывать тепловые эффекты вторичных реакций в газовой фазе.

В табл. 7.3 приведены кинетические коэффициенты медленного химического разложения ряда индивидуальных веществ.

Химическое взаимодействие ВВ с горными породами и грунтовыми водами. Известны случаи самопроизвольных взрывов зарядов в скважинах, заряженных ВВ на основе аммиачной селитры при добыче сульфидных руд. Предполагаемой причиной самопроизвольного взрыва является химическое взаимодействие отдельных компонентов (в основном аммиачной селитры) с мелкодисперсной пылью сульфидов и самородной серой в сильноокислой среде при наличии свободной меди. Накопление тепла в замкнутом объеме скважины вызывает самовоспламенение ВВ и его горение с последующей детонацией.

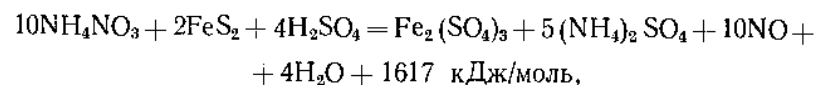
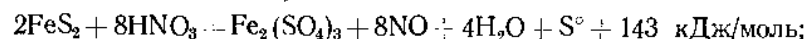
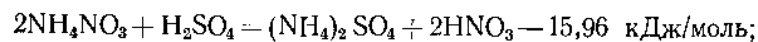
Руды Дегтярского медноколчеданного месторождения, содержащие более 35 % серы, и шахтные воды с водородным показателем 2—3,5 в результате ведения горных работ подвергаются природному окислению с выделением тепла и разогревом рудного массива. Эта среда опасна с точки зрения использования ВВ на

Таблица 7.3

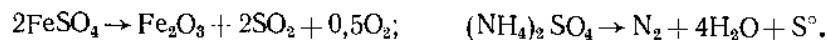
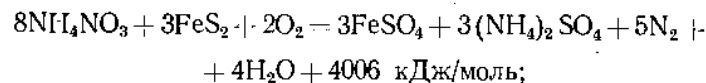
Вещество	E , кДж/моль	$\lg B$	Вещество	E , кДж/моль	$\lg B$
Нитроглицерин	179	18	Нитрат аммония	170	13,8
Диэтиленгликольдинитрат	178	16,5	Тротил	225	19,0
Тэн	197	19,8	Гексоген	199	18,5

основе аммиачной селитры. Шахтные воды содержат свободную серную кислоту с концентрацией от 0,01 до 1 г/л [41]. В этих условиях применение граммонита 79/21, гранулита АС-8 и аммонита 6ЖВ, даже патронированного, приводит иногда к самовозгоранию ВВ в скважинах.

А. Г. Яковенко, Г. В. Кузнецов, В. А. Малых на основе анализа случаев из практики горных предприятий и свойств системы «ВВ — среда» предложили гипотезу о причинах и механизме самопроизвольных взрывов ВВ на основе аммиачной селитры в сульфидных рудах. Причиной их считают химическое взаимодействие аммиачной селитры с сульфидами (пиритом), происходящее по следующему основному механизму



а также по реакциям:



Эти реакции развиваются автокаталитически с интенсивным выделением тепла и газообразных продуктов, в том числе и окислов азота. В результате разогрева происходит термическое разложение селитры и тротила, загорание ВВ и последующий переход горения во взрыв.

Сравнение изученных ВВ по найденным критическим температурам самовоспламенения при взаимодействии с сульфидными рудами показало, что наиболее чувствительными к тепловому воздействию являются аммонит 6ЖВ и граммонит 79/21 ($T_{кр} = 72 \div 84$ °С), наименее чувствительными — гранулол ($T_{кр} = 240 \div 250$ °С). С увеличением содержания тротила в составе ВВ стой-

кость их в описанных условиях возрастает. Получена эмпирическая зависимость критической температуры самовоспламенения от содержания в составе ВВ тротила (а): $T_{кр} = 36,5 + 2,12a$.

В качестве стабилизаторов исследованы: кислый тетраборат аммония — антиокислитель руд, мочевины, гашеная известь. Исследованные вещества полностью не предотвращали взаимодействия селитры с сульфидными рудами, но значительно тормозили его. Определены необходимые количества добавок по отношению к массе селитры: гашеной извести и мочевины — 10 %, тетрабората — 5 %. Эффективно применение 5—10 %-ных водных растворов указанных веществ. При наличии агрессивных сред наиболее безопасно применять стойкие к колчеданам ВВ, например гранулол. Эффективным стабилизатором проявил себя и формиат аммония. Его добавка к водосодержащему ВВ обеспечивает безопасное использование этого ВВ в контакте с сульфидными рудами в течение 24 ч при 80 °С.

Для повышения рН среды и приближения ее к нейтральной проводили промывку скважин раствором гашеной извести. Однако в процессе заряжания скважин граммонитом выделялся аммиак, что затрудняло подготовку к взрыву. Специально для сульфидных рудников разработано ВВ, являющееся аналогом гранулита АС-8 с добавкой нейтрализатора кислоты — мела. Кроме того, на Дегтярском руднике опробована технология заряжания скважин гранулитом АС-8 с орошением 4—6 %-ным водным раствором карбамидом, выполняющим также роль нейтрализатора.

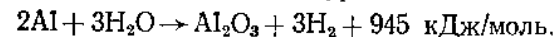
Все сквозные скважины, а также пробуренные в сторону обрушения и могущие иметь связь с обрушением по трещинам, закрывались глиняными пробками длиной не менее 1 м. Пыль со стенок и кровли выработок при этом смывалась и усиливалось проветривание участка на период подготовки и проведения взрывов.

Установлен допустимый контакт ВВ на основе аммиачной селитры со стенками скважины, который не должен превышать 12 ч.

Химическая стабильность ВВ, содержащих алюминий. Измельченный в отсутствие кислорода до пудрообразного состояния алюминий при соприкосновении с воздухом окисляется настолько энергично, что может самовоспламениться. Если частички алюминия окисляются при малом доступе кислорода, то образующаяся поверхностная пленка окиси предохраняет металл от дальнейшего окисления. Эта пленка защищает алюминий не только в чистом виде, но и в различных смесях. По данным Б. Я. Светлова, за семь лет хранения аммонита, содержащего алюминиевую пудру, каких-либо изменений по внешнему виду в нем не произошло.

Исследовалась стабильность алюминия в смесях с аммиачной селитрой, содержащих большое количество воды. В ряду электро-

химических потенциалов алюминий стоит ниже водорода, поэтому он может реагировать с водой по уравнению



В основе взаимодействия алюминия с водой лежат электрохимические процессы. Установлено, что примеси меди или железа в количестве более 0,01 % вызывают сильную коррозию алюминия. При достаточной толщине окисной пленки она надежно изолирует металл от окружающего раствора и не пропускает через себя ни положительные ионы алюминия, ни свободно движущиеся по металлу электроны. Алюминиевая лудра, частички которой покрыты толстой окисной пленкой, не проводит электрический ток. Тонкая пленка все же может пропускать через себя электроны, и при наличии участков открытого алюминия в растворе могут возникнуть электропары на поверхности металла. Таким образом, стабильность ВВ, содержащих алюминий, обеспечивается при наличии равномерной и прочной окисной пленки на поверхности алюминия, если ее не разрушают окружающие частицы раствора.

Существенно ускоряют взаимодействие алюминия с водой растворы щелочей и соляной кислоты. Напротив, азотная кислота пассивирует алюминий и связывает выделяющийся водород с образованием гидроксилamina по реакции $3H_2 + HNO_3 \rightarrow NH_2OH + 2H_2O$ или солей аммония — $4H_2 + 2HNO_3 \rightarrow NH_4NO_3 + 3H_2O$.

Водные растворы неочищенной натрийкарбоксиметилцеллюлозы энергично взаимодействуют с алюминиевой пудрой, но в присутствии нитратов кальция или аммония эти реакции замедляются. Стабилизирующее действие оказывают также соли хромовой кислоты.

Стабильность алюмосодержащих составов возрастает с увеличением размера частиц алюминия. Поэтому в водосодержащие промышленные ВВ вводят алюминисвый порошок наиболее крупных размеров.

Методы определения химической стойкости ВВ. Для оценки стойкости ВВ обычно определяют скорость их разложения при повышенных температурах, в пределе — при температуре вспышки. Для сокращения времени испытания ограничиваются определением скорости только начальной стадии разложения.

Стойкость нитроглицерина и нитроэфирсодержащих ВВ определяют иодокрахмальной пробой, по которой продукты разложения (окислы азота) улавливаются чувствительной иодокрахмальной бумажкой. Окислы азота, воздействуя на бесцветный ион иода в иодистом калии, переводят его в элементарный иод, который с крахмалом окрашивается в бурый цвет. Для более четкого обнаружения реакции иодокрахмальную бумажку перед испытанием смачивают до половины водным раствором глицерина. Тогда на границе раздела сухой и влажной бумажки видна ясно различимая цветная полоса. Нитроглицерин, предназначенный для

приготовления нитроэфирсодержащих ВВ, не окрашивает бумажку в течение 30 мин, нитроэфирсодержащие ВВ — в течение 10 мин.

Наиболее универсальным является определение химической стойкости с помощью манометрической пробы. В основе ее лежит измерение давления газообразных продуктов термического разложения при нагревании исследуемого образца ВВ при заданной постоянной температуре.

Иногда химическую стойкость ВВ определяют в условиях вакуума, так называемой вакуумной пробой, по которой нарастающее давление продуктов разложения и газификации вещества измеряют в предварительно вакуумированном замкнутом сосуде. Обычно такие исследования ведут сравнительно с эталонным ВВ, характеризующимся надежной стабильностью. По полученным данным вакуумной пробы можно, исходя из времени разложения 1 % вещества при заданной температуре, оценить стойкость ВВ, а также определить энергию активации и затем рассчитать время разложения при любой заданной температуре.

7.4. ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

Сыпучесть — способность ВВ свободно перемещаться по трубопроводам, шлангам к месту заряжания без зависания и сводообразования, высыпаться из бункеров, хорошо заполнять полость при заряжании нисходящих скважин. С развитием механизированных способов заряжания свойство сыпучести ВВ приобрело весьма важное значение.

Мелкодисперсные ВВ, применяемые для заряжания скважин, даже в неслежавшемся состоянии плохо высыпаются, зависают, особенно в узких скважинах, затрудняя их заряжание. Хорошей сыпучестью обладают гранулированные ВВ: гранулиты, игданит, граммониты, гранулотол, алюмотол. Многие мелкодисперсные ВВ почти полностью теряют сыпучесть при содержании влаги 1,5—2,0 %, а гранулированные — 5—6 %.

Сыпучесть характеризуют углом естественного откоса при свободном высыпании на горизонтальную поверхность, углом воронки высыпания ВВ.

Пыление — способность сыпучих ВВ при обращении с ними выделять в окружающую атмосферу мелкодисперсные частицы. Пыление зависит от степени дисперсности ВВ, состояния поверхности частиц и скорости потоков, создаваемых в процессе пневмотранспортирования или заряжания. Сильно пылят аммониты в сухом состоянии, мало пылят алюмотол, гранулотол, гранулит М, игданит, гранитолы, так как они практически лишены пылеобразных фракций или содержат жидкую фазу (гранулит, игданит). У металлизированных гранулитов марки АС основным источником пыления является алюминиевая пудра, у граммонита 79/21 — мелкие

фракции тротила. Пыление гранулированных ВВ зависит от прочности гранул селитры.

Для борьбы с пылением при пневмозаряжании применяют: увлажнение ВВ, ограничение скорости пневмотранспортирования, соблюдение оптимального расстояния между концом зарядного шланга и формируемым зарядом, расположение в устье скважины пылеулавливающих фильтров.

7.5. РЕОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

К реологическим свойствам относятся пластичность и текучесть ВВ.

Пластичность — способность ВВ легко деформироваться под воздействием небольших нагрузок и сохранять придаваемую им форму. Пластичные промышленные ВВ характеризуются высоковязкой структурой, обусловленной наличием в них пластификаторов и связующих, в динамитах в виде динамитного желатина (раствор нитроглицерина или нитрогликоля в нитроклетчатке), в водосодержащих ВВ — в виде водного геля. Пластичные свойства ВВ зависят от вязкости желатина и его содержания в ВВ.

К пластичным промышленным ВВ относятся динамиты, содержащие взрывчатую желатину, и высоковязкие водосодержащие ВВ (акваниты, аквагалы, гелеобразные аквагалы). При очень высокой вязкости желатина и значительном содержании его в составе ВВ приобретают резиноподобную структуру, деформация становится упругой, ВВ теряет свойство пластичности. К таким ВВ, в частности, относятся динамиты, содержащие более 60 % желатина.

Текучесть — способность ВВ вытекать из емкостей под действием силы тяжести. Этим свойством помимо собственно жидких ВВ обладают низковязкие суспензии — смеси жидкостей и порошкообразных наполнителей. Как и жидкости, такие системы могут перекачиваться по трубам и шлангам с помощью насосов различной конструкции.

К суспензионным текучим ВВ относятся многие низковязкие водосодержащие ВВ. Для предотвращения расслаивания их обычно структурируют, вводя в состав небольшие количества водорастворимых полимеров, таких, как соли карбоксиметилцеллюлозы, полиакриламид, крахмал, гуаргам и др. Некоторые пластичные ВВ при хранении приобретают структуру твердого тела и вновь становятся пластичными при разминании. Такое явление называется тиксотропией. Для стабилизации пластичности в состав ВВ вводят добавки поверхностно-активных веществ, таких как алкиламинны и другие. Для сохранения текучести при отрицательных температурах (-15 — -20 °С) в состав жидкой фазы водосодержащих ВВ вводят антифризы, в состав динамитов — нитроэфиры с низкой температурой затвердевания (нитрогликоли и др.).

Таблица 7.4

ВВ	Усадка (мм) столбиков диаметром 10 мм высотой 8,5 мм при постоянной нагрузке и различных температурах, °С			
	-10	-15	-20	-25
Динамит	4,14	1,50	0,81	0
Водосодержащее ВВ	4,8	0,37	0,27	0

Выполненные исследования структурно-механических (реологических) свойств показали, что водосодержащие ВВ как с алюминием, так и сенсibilизированные тротилом, по характеру аномалии вязкости относятся к неьютоновским жидкостям с ярко выраженными вязко-пластичными и тиксотропными свойствами [4]. При сближении вязкости увеличивается текучесть водосодержащих ВВ, которая обратно пропорциональна вязкости.

Вязкость и пластичность ВВ можно определить с помощью консистометра Геплера, которым измеряют скорость проникновения иглы с шариком на конце в массу вещества или деформацию цилиндров из ВВ при действии на них в течение определенного времени заданной нагрузки.

В табл. 7.4 приведены данные об изменении пластичности динамита и водосодержащего ВВ, определенные на консистометре Геплера.

Для определения пластичности ВВ чаще пользуются более простым прибором — пенетрометром. Пластичность оценивается в этом случае скоростью проникания иглы пенетрометра. Ниже приведены результаты испытания динамита и водосодержащего ВВ пенетрометром.

Содержание воды в ВВ, %	4	6	8	10
Время проникания иглы до основания столбика из ВВ высотой 40 мм, с	180	50	30	10

В полевых условиях пластичность ВВ качественно можно оценить по способности патронов разминаться в руке и сплющиваться в шпуре или скважине при нажатии забойником.

Текучесть водосодержащих акватолов в лабораторных условиях определяют измерением скорости их истечения из стеклянных калиброванных пробирок, наклоненных под определенным углом к горизонту, при фиксированной температуре.

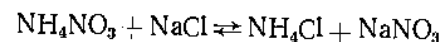
7.6. СТАРЕНИЕ

Старение — необратимое ухудшение взрывчатых и эксплуатационных свойств ВВ при хранении. Причины старения могут быть различными, но, в конечном итоге, они сводятся к химическим и

физическим изменениям в веществе, происходящим в результате внутренних процессов или взаимодействия с внешней средой (влажной воздуха, под воздействием солнечной радиации и др.).

Интенсивность этих процессов зависит от условий и длительности хранения, качества укупорки, климатических условий (температуры, влажности воздуха, цикличности и пределов их изменения и др.).

Примером физических изменений, приводящих к снижению или утрате детонационной способности ВВ, является слеживаемость тонкодисперсных ВВ (аммонитов). Примером химических изменений является постепенное окисление алюминия в алюмосодержащих ВВ (аммоналах, металлизированных акватолах и акванитах) с соответствующим снижением потенциальной энергии ВВ и показателей его работоспособности. В предохранительных ВВ, содержащих аммиачную селитру и хлористый натрий, возможна обменная реакция



с образованием менее активного, чем аммиачная селитра, нитрата натрия и соответствующим ухудшением детонационной способности ВВ.

Сыпучие промышленные ВВ в процессе нормированного срока хранения претерпевают сравнительно слабые изменения взрывчатых свойств, особенно при высоком качестве упаковки и правильной технологии изготовления. Большим изменениям взрывчатых свойств при хранении подвержены пластичные ВВ, например, динамиты, старение которых является существенным недостатком, снижающим эффективность их применения. В водосодержащих ВВ со временем происходит выкристаллизация растворенных компонентов, изменяется структура, снижаются вязкость и пластичность массы, удаляются воздушные пузырьки, служащие «горячими» точками при детонации, а это приводит к ухудшению детонационной способности. Разминание или повторное перемешивание массы ВВ в какой-то мере восстанавливает утраченные свойства, но не полностью.

Для предотвращения старения в состав динамитов вводят твердые взрывчатые сенсibilизаторы, не растворимые в нитроэфирах, например, гексоген или высокоплотные невзрывчатые соединения (сульфат бария или барит). Для возбуждения детонации динамитов с признаками старения применяют усиленный импульс в виде дополнительных детонаторов либо более мощных капсул-детонаторов.

В связи с процессами старения для промышленных ВВ устанавливается *гарантийный срок хранения*, в течение которого заводы-изготовители гарантируют сохранение основных показателей технических условий не ниже регламентированных норм.

Гарантийные сроки могут меняться в зависимости от качества укупорки. Непатронированные ВВ с гарантийным сроком годности 6 мес упаковывают в два пяти-шестислойных бумажных мешка, ламинированных полиэтиленом. Непатронированные ВВ с гарантией годности 12 мес, а также маслосодержащие ВВ упаковывают в сдвоенные бумажные битуминированные мешки с общим числом не менее 10, внутри которых вложен полиэтиленовый мешок-вкладыш.

При использовании патронированных ВВ (кроме предохранительных) в течение не более чем 3 мес с момента изготовления допускается пачки с патронами упаковывать в ящики без полиэтиленовых мешков. При этом ящики выкладываются бумагой, пропитанной влагоизолирующей смесью.

8. ОСНОВНЫЕ ТИПЫ ПРОМЫШЛЕННЫХ ВВ И ИХ СВОЙСТВА

8.1. ОБЩИЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ ТРЕБОВАНИЯ К ПРОМЫШЛЕННОМУ ВВ

Разнообразие условий ведения взрывных работ в народном хозяйстве обуславливает использование широкого ассортимента промышленных ВВ, отличающихся по своим взрывчатым и эксплуатационным характеристикам. В соответствии с условиями применения должны выбираться ВВ с наиболее высокими для данных условий технико-экономическими показателями.

Экономические показатели во многом определяются стоимостью сырья или исходных компонентов, а также затратами на производство при выбранном рецептурном составе и технологии приготовления ВВ. Однако они должны рассматриваться не в абсолютном выражении стоимости ВВ, а в стоимостных показателях, отнесенных к удельным величинам потенциальной энергии ВВ, как это следует из энергетического критерия эффективности (см. раздел 4).

Тротил и аммонит 6ЖВ имеют примерно равную теплоту взрыва (около 4180 кДж/кг). Но так как тротил примерно в 4 раза дороже селитры, то по стоимости энергии аммонит примерно вдвое экономичнее тротила (соответственно 0,000043 и 0,0000824 руб/кДж). Поэтому тротил выгодно применять только в тех случаях, когда по техническим причинам не могут быть использованы его смеси с селитрой, например в скважинах с проточной водой.

Добавка к смесям селитры с тротилом алюминия выгодна, так как увеличение энергии в этом случае обгоняет повышение стоимости ВВ. Она становится особенно выгодной при взрывании крепких пород, так как с увеличением крепости пород возрастают удельные расходы на бурение. Аналогичный вывод получен для смесей селитры с жидкими нефтепродуктами (игданит, гранулиты). Если для самой аммиачной селитры удельная стоимость энергии составляет 0,0000513 руб/кДж, то для ее смеси с дизельным топливом 0,0000262 руб/кДж.

Применение металлизированных гранулитов марки АС из-за высокой стоимости алюминиевого порошка выгодно только для взрывания крепких пород. Применение одной селитры как ВВ экономически нецелесообразно из-за малой теплоты взрыва.

Для каждого типового условия применения должен быть выбран оптимальный тип ВВ, в рамках которого могут быть несколько сортов, отвечающих наиболее высоким технико-экономи-

ческим показателям взрывных работ. Обычно под типом ВВ понимают некоторую качественную общность по химическому составу и технологии изготовления, а под сортом или маркой ВВ — конкретную рецептуру. При этом число типовых условий должно быть не слишком большим. В противном случае ассортимент ВВ очень расширяется, что вступает в противоречие с принципом унификации.

Критериями отбора должны служить условия применения, которые требуют специфических свойств ВВ и соответственно рецептурного состава и технологии приготовления ВВ. Так, применение ВВ на подземных работах или на земной поверхности определяет кислородный баланс ВВ, от которого зависит содержание токсичных газов в продуктах взрыва; степень обводненности забоев обуславливает требования по водоустойчивости ВВ; присутствие в подземных выработках горючих газов и пыли определяет требования к предохранительным свойствам ВВ; для применения ВВ на больших глубинах с высокой температурой необходимы термостойкие ВВ; применение ВВ для обработки металлов взрывом требует своих критериев и т. д.

Изложенные предпосылки являются основой современной классификации промышленных ВВ по областям применения.

8.2. НИТРОСОЕДИНЕНИЯ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ В НАРОДНОМ ХОЗЯЙСТВЕ

Нитросоединения, к которым обобщенно отнесена большая группа взрывчатых химических органических соединений, содержащих нитрогруппу, применяются в народном хозяйстве как самостоятельно в виде бризантных ВВ (гранулотол), шашек-детонаторов, детонирующих шпуров, зарядов вторичных ВВ в капсулах-детонаторах, так и в качестве компонентов смесевых промышленных ВВ (аммонитов, динамитов и др.). Более строго ВВ подразделяются на собственно нитросоединения, нитроэфиры, нитрамыны и другие классы в зависимости от того, к каким элементам присоединена нитрогруппа (см. раздел 1).

В смесевых ВВ нитросоединения могут выполнять различные функции. В смеси с аммиачной селитрой нитросоединения, обладающие отрицательным кислородным балансом и вместе с тем явно выраженными свойствами бризантных ВВ, таких как тротил, ксилит, тринитробензол и т. п., одновременно используются и как горючие, и как сенсibilизаторы по отношению к селитре или ее смесям с низкой детонационной способностью. Типичными примерами такого рода смесей являются аммониты, граммониты, аммоналы, тротилсодержащие сорта аквазолов и аквааналов.

В некоторых случаях для усиления сенсibilизирующего действия в состав смесей помимо тротила или взамен его вводят более мощные и более чувствительные к детонационному импульсу

вещества, такие как гексоген (скальные аммониты и аммонал), нитроглицерин (детониты, углениты), тэн и др.

Имеются и такие смеси, в которых нитросоединения как с положительным (нитроглицерин), так и с отрицательным кислородным балансом (тротил) сами являются окислителями по отношению к горючим компонентам, содержащимся в смеси, например алюминию. Примером может служить алюмотол, состоящий из тротила и алюминиевого порошка.

Некоторые нитросоединения со слабо выраженными взрывчатыми свойствами, например динитронафталин, используются во взрывчатых смесях как горючие компоненты. Примером являются составы Фавье, динафталиты, состоящие из аммиачной селитры и динитронафталина.

Применение нитросоединений в чистом виде ограничено токсичностью их продуктов взрыва (высокое содержание окиси углерода в продуктах взрыва соединений с отрицательным кислородным балансом), высокой чувствительностью к механическим воздействиям, а для некоторых ВВ — и их высокой стоимостью.

По указанным причинам индивидуальные ВВ типа нитросоединений применяются в чистом виде только в тех условиях, где невозможно применять более экономичные смесевые ВВ типа аммиачно-селитренных или ВВ на основе других дешевых окислителей: в тяжелых гидрогеологических условиях, например, в скважинах с интенсивным водообменом или на больших глубинах под водой, где применение смесей, содержащих водорастворимые соли-окислители, неэффективно из-за их вымывания из заряда; при взрывной обработке металлов (упрочнение, резка и др.); при получении взрывным способом искусственных минералов, когда необходимы высокие параметры детонации ВВ или малые критические диаметры зарядов; при производстве прострелочно-взрывных работ на больших глубинах в нефтедобывающей промышленности, где требуются высокие термостойкие свойства ВВ, которым отвечают гексоген, октоген и др.

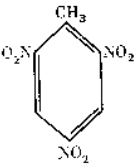
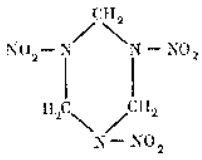
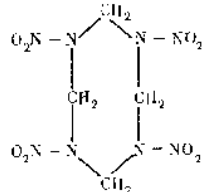
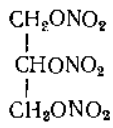
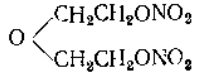
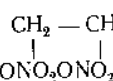
Взрывчатые свойства нитросоединений, наиболее широко применяемых в народном хозяйстве, приведены в табл. 8.1 [21, 46, 48].

8.2.1. Тротил и его применение в народном хозяйстве

По внешнему виду тротил представляет собой светло-желтое и в зависимости от технологии кристаллическое или чешуйчатое или гранулированное вещество. Кристаллы существуют в моноклинной и орторомбической формах.

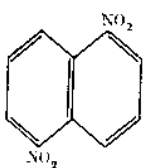
Тротил получается нитрацией толуола смесью азотной и серной кислот. Температура плавления очищенного продукта 80,6 °С. При наличии примесей, в основном асимметричных тринитротолуолов, температура плавления снижается до 75—77 °С. Примесей

Таблица 8.1

Вещество	Структурная формула	Молекулярная масса, г/моль	Максимально возможная плотность, г/см ³	Температура плавления, °С
Тротил (тринитролуол)		227,1	1,66	80,85
Гексоген (циклотриметилентринитрамин)		222	1,81	204,5
Октоген (циклотетраметилтетранитрамин)		296	1,906	270
Нитроглицерин (глицеринтринитрат)		227	1,6	13,2
Нитродигликоль (диэтиленгликольдинитрат)		196	1,385	—
Нитрогликоль (этиленгликольдинитрат)		152	1,48	-21,7

Теплота образования, кДж/кг	Кислородный баланс, %	Теплота взрыва, кДж/кг	Работоспособность в свиновой бомбе, мД	Максимальная скорость детонации, км/с	Давление детонации, ГПа	Чувствительность к удару, %
186,7	-74	3570 ^(1,0) 4330 ^(1,6)	285	7,0	20,5—21,0	4—28
-420,3	-21,6	5000 ^(1,1) 5420 ^(1,7)	470	8,8	34,7—35,4	70—90
-369,6	-21,6	5080 ^(1,3) 5460 ^(1,8)	415	9,1	—	84
1516,6	+3,5	6220	550	7,7	21,6	Взрыв вызывает груз массой 2 кг, падающий с высоты 4 см
2078,3	-40,8	3980	425	—	—	Взрыв вызывает груз массой 2 кг, падающий с высоты 175—180 см
1170	0	6640	650	7,4	—	Взрыв вызывает груз массой 2 кг, падающий с высоты 20 см

Продолжение табл. 8.1

Вещество	Структурная формула	Молекулярная масса, г/моль	Максимально возможная плотность, г/см ³	Температура плавления, °С
Тэн (тетранитропентаэритрит)	$\begin{array}{c} \text{CH}_2\text{ONO}_2 \\ \\ \text{CH}_2\text{ONO}_2 - \text{C} - \text{CH}_2\text{ONO}_2 \\ \\ \text{CH}_2\text{ONO}_2 \end{array}$	316	1,7	141
Динитроафталин		218	1,5	150—160
Нитрометан	CH_3NO_2	61	1,13	-28,6

Примечание. В скобках даны значения плотности (г/см³), при которой опреде-

образуют с тротилом многокомпонентные эвтектические сплавы, имеющие маслообразный вид, вследствие чего их называют тротильным маслом [46].

Плотность монокристалла тротила 1,663 г/см³, гравиметрическая плотность 0,5—0,85 г/см³. Гигроскопичность около 0,05 %, растворимость в воде низкая — 0,15 % при 100 °С, что является благоприятным свойством.

Тротил токсичен, предельно допустимая концентрация 0,001 мг/л, он поражает дыхательные пути, пищеварительный тракт. При длительном воздействии вызывает слабость, головокружение, дерматиты кожи, гепатит.

Очищенный тротил представляет собой физически и химически стойкое вещество, достаточно безопасное в обращении. Чувствительность к трению 300 МПа, с кварцевым песком — 190 МПа. Ударно-волновая чувствительность 0,7 ГПа. Температура вспышки 290 °С. Восприимчивость к детонации удовлетворительная: предельный инициирующий заряд азида свинца 0,1 г, гремучей ртути — 0,38 г.

Теплота образования, кДж/кг	Кислородный баланс, %	Теплота взрыва, кДж/кг	Работоспособность в свинцовой бомбе, мл	Максимальная скорость детонации, км/с	Давление детонации, ГПа	Чувствительность к удару, %
1516,6	-10,1	5440 ^(0,9) 5650 ^(1,7)	500	8,6	24,6	Взрыв вызывает груз массой 2 кг, падающий с высоты 17 см
-138	-139,4	2940	100	1,15	—	0
1377,6	-0,393	4640	410	1,15	—	0—8

лена теплота взрыва.

Критический диаметр порошкообразного тротила 8—10 мм, предельный диаметр детонации 32 мм. С увеличением плотности детонационная способность увеличивается, а чувствительность к детонации снижается.

Термостойкость тротила 215 °С. Эту температуру выдерживает тротил в течение 4 ч 40 мин, а температуру 225 °С — соответственно 2 ч 30 мин.

Тротил в чистом виде или в смеси с гексогеном (смеси ТГ, состав В) или тэном (пентолит) широко применяется в виде литых и прессованных шашек в качестве промежуточных детонаторов,кумулятивных зарядов для дробления негабаритных кусков породы, зарядов для сейсморазведки. Тротил входит в состав многих аммиачно-селитренных смесей и в виде гранулированного продукта применяется в чистом виде (гранулолот, гранитол, пелетол, нитропел, гранатол) или в смеси с алюминиевым порошком (алюмотол, гранатол А, айригел), применяемых в СССР, США, Канаде, Великобритании, Болгарии и в других странах в сравнительно больших количествах в качестве высокоустойчивого ВВ,

В США гранулированный тротил применяют в качестве сенсibilизатора в суспензионных смесевых ВВ типа «slurry», а также в глубоких скважинах и при подводном взрывании.

Состав гранулированного айригела: 60 % тротила, 20 % гексогена и 20 % алюминия (Канада).

Гранулотол и алюмотол характеризуются практически неограниченной водостойкостью и относятся к крупногранулированным ВВ. Только гранулотол и алюмотол могут применяться в рассыпном виде для заряжания обводненных скважин, особенно с проточной водой без ограничения времени пребывания в скважинах без потери или снижения взрывчатых свойств.

Размер сферических гранул этих ВВ составляет 2—4 мм. Гранул размером меньше 2 мм содержится до 15 % и размером больше 4 мм — до 10 %. Гранулы гранулотола светло-желтого цвета, а алюмотола — серого. Плотность гранул гранулотола 1,48—1,54 г/см³, алюмотола 1,52—1,68 г/см³. Благодаря крупному размеру гранул, гладкой поверхности и относительно высокой плотности они хорошо тонут в воде и более плотных ее шламах, компактно укладываются в зарядной емкости, обеспечивая плотность заряжания около 1 г/см³. Гранулотол и алюмотол сыпучи в сухом и смоченном состоянии, мало пылят, негигроскопичны и высокостабильны в обычных условиях хранения и применения. Они не увлажняются, не слеживаются и не спекаются при длительном хранении. В зимнее время могут смерзаться при содержании на поверхности гранул воды более 2 %. Во избежание смерзания в зимнее время содержание влаги в алюмотоле и гранулотоле регламентировано, оно не должно превышать 2 %. В сухом состоянии при пересыпании сильно электризуются. Поэтому при механизированном заряжании их необходимо смачивать (увлажнять).

Как ВВ с отрицательным кислородным балансом гранулотол и алюмотол относятся к классу I.

В сухом виде и в воде гранулотол и алюмотол химически стойки. Кислые воды мало изменяют их стойкость, щелочные — заметно снижают. Алюминиевый порошок, взаимодействуя со щелочью, превращается в гидроокись. Гранулы гранулотола и алюмотола в сухом виде плавятся при температуре 76—78 °С, они термически стабильны. Температура вспышки гранулотола и алюмотола 310—320 °С.

Не рекомендуется применять эти ВВ в сухих забоях, где по экономическим показателям они значительно уступают аммиачно-селитренным смесям. Кроме того, из-за выделения при взрыве большого количества окиси углерода, метана, водорода наблюдается образование вторичного пламени после взрывов. При взрывании в водонаполненном состоянии количество горючих газов, в особенности окиси углерода, уменьшается. Кроме того, снижается температура продуктов взрыва из-за теплообмена их с водой.

Таблица 8.2

Показатели	Тротил		
	тонкоизмельченной	чешуированный	гранулированный
Насыпная плотность, г/см ³	1	0,75	0,9
Бризантность по Гессу, мм:			
сухих зарядов	16	7—14	10—12
залитых водой	Отказ	6—13	21—23

Раньше для заряжания обводненных скважин применяли куски из литого тротила и чешуированный тротил. Изготовление кусков удорожало продукцию, их применение ограничивало возможность механизированного заряжания и не обеспечивало необходимой плотности заряжания, а чешуированный тротил оказался мало эффективным из-за плохой потопляемости и сильного флегматизирующего действия на него воды вследствие большой удельной поверхности. Этим недостатком не имеет гранулированный тротил со стабильной формой, размером и плотностью гранул. О флегматизирующем действии воды на тротил различной дисперсности дает представление табл. 8.2.

При плотной укладке гранул в межгранульное пространство входит около 30 % по объему воды. Как и для других ВВ с отрицательным кислородным балансом, водонаполнение приводит к увеличению теплоты взрыва в расчете на единицу массы сухого вещества. Возрастают и параметры детонации, уменьшается критический диаметр.

Предполагается, что алюминий полностью восстанавливает образующиеся при взрыве тротила воду до молекулярного водорода и примерно половину окиси углерода до элементарного углерода.

Гранулотол и алюмотол в водонаполненном состоянии устойчиво детонируют с большой скоростью, мало зависящей от диаметра их заряда и размера гранул. В таком состоянии они имеют малый критический диаметр и их можно применять в шпуровых зарядах. В сухом состоянии скорость и критический диаметр детонации сильно зависят от размера гранул и диаметра заряда.

Гранулотол и алюмотол в плотных бумажных целлюлозных мешках имеют гарантийный срок использования 1 год. В табл. 8.3 приведены характеристики гранулотола и алюмотола, открытый заряд которых характеризуется недостаточной чувствительностью к капсулю-детонатору.

В целях экономии тротила, а также для снижения вредных газов, выделяемых при его взрывании, на многих рудниках применяют комбинированные заряды, состоящие из гранулотола или алюмотола в сочетании с неводостойчивыми аммиачно-селитренными смесями.

Таблица 8.3

Показатели	Гранулотол		Алюмотол	
	сухой	водосодержащий	сухой	водосодержащий
Кислородный баланс, %	-74	—	-76,25	—
Теплота взрыва, кДж/кг	3650*1	3500*1	4740	4930
Объем газов, л/кг	750	1045*2	675	815
Полная идеальная работа взрыва, кДж/кг	3000	3600	4270	5080
Прочность гранул, Н	20—40	—	30—60	—
Тротильный эквивалент по баллистическому маятнику	1,0	1,13	1,24	1,35
Бризантность в стальном кольце, мм	24—26	32—34	28—30	34
Скорость детонации, км/с:				
в бумажной оболочке*3	4,0—4,6	5,0—5,5	4,0—4,2	4,8—5,0
в стальной оболочке диаметром заряда 40 мм	5,0—5,2	5,5—6,0	4,8—5,0	5,5—6,0
Критический диаметр, мм:				
в бумажной оболочке	60—80	25—30	70—80	25—30
в стальной оболочке	10—15	5—10	10—20	5—10
Минимальная масса промежуточного детонатора (ТНТ), г	5—10	25—30	5—10	25—30
Чувствительность измельченного ВВ:				
к удару, %	8—12	0—4	24—28	—
к трению с примесью песка, МПа	300	300	210	230

*1 Теплота взрыва 1 кг ВВ за вычетом теплоты испарения воды в межгранульном пространстве. *2 С учетом испарения окружающей воды. *3 Такое же значение в мягких грунтах.

На Михайловском ГОКе с целью снижения расхода тротила разработана технология буровзрывных работ, по которой в обводненную скважину вначале заряжают гранулотол, а после понижения уровня воды до статического заряжают верхнюю часть заряда неводоустойчивыми ВВ.

Предварительное осушение скважин сжатым воздухом с пенообразующим поверхностно-активным веществом (20 %-ным раствором алкилсульфата натрия) упрощает формирование комбинированного заряда [57]. В этом случае в предварительно осушенную скважину заряжают гранулотол, перекрывая статический уровень воды на 0,5 м, и далее сразу осуществляют зарядание неводоустойчивыми ВВ. Такие комбинированные заряды дают большой экономический эффект.

Широко используются комбинированные заряды из грануло-тола и алюмотола в сочетании с гранулитами и граммонитами на Ураласбесте, где более 50 % взываемых скважин обводнены.

Такое же положение на карьерах Кривбассаа, КМА и многих других [39].

Технология изготовления грануло-тола и алюмотола сводится к следующему. Предварительно расплавленный чешуированный тротил гранулируют вначале в горячей, а затем в холодной воде при значительном перепаде температур. В горячей воде расплавленный тротил разделяется на капли, которые, попадая в холодную воду, быстро затвердевают, превращаясь в гранулы.

При изготовлении алюмотола в расплавленный тротил добавляется алюминиевая пудра.

8.2.2. Гексоген и октоген

Гексоген. По внешнему виду представляет собой белое вещество с плотностью монокристалла 1,816 г/см³ и насыпной 0,8—0,9 г/см³. При прессовании достигается плотность 1,73 г/см³.

Гексоген получают нитрацией уротропина азотной кислотой. Температура плавления 204—205 °С. Технический продукт плавится при температуре 202 °С. Гексоген практически не гигроскопичен. Он весьма ядовит, предельно допустимая концентрация 0,001 мг/л; поражает центральную нервную систему, главным образом головной мозг, вызывает нарушения кровообращения и малокровие.

Гексоген характеризуется высокой чувствительностью к механическим воздействиям: удару — нижний предел в приборе № 2 70 мм, трению без кварцевого песка 150 МПа. С целью снижения чувствительности гексоген флегматизируют воскоподобными веществами.

Температура вспышки 220—230 °С. На открытом воздухе он сгорает ярким белым пламенем без остатка, при быстром нагревании разлагается со взрывом. Критический диаметр детонации 1—1,5 мм. Гексоген характеризуется высокой чувствительностью к детонации. С увеличением плотности детонационная способность повышается.

Температуру 185 °С выдерживает в течение 2,5 ч.

Гексоген кроме шашек-детонаторов применяют в качестве сенсибилизатора в ВВ, на основе аммиачной селитры, например в скальных аммонитах, аммоналах, также в пластичных ВВ типа гексопластов, в эластичных, детонирующих шнурах, линейных зарядах для сейсморазведки.

Октоген — белое кристаллическое высокоплавкое вещество с плотностью монокристалла 1,906 г/см³, гравиметрической плотностью 0,871 г/см³ и температурой плавления 278,5—280 °С. Его получают нитролизом уротропина азотной кислотой в среде уксусного ангидрида и нитрата аммония.

Октоген не гигроскопичен, в воде при 15—20 °С растворяется около 0,003 % октогена, при 100 °С — 0,02 %.

По токсичности октоген аналогичен гексогену, он поражает центральную нервную систему, в основном головной мозг, нарушает кровообращение и вызывает малокровие.

Октоген характеризуется высокой чувствительностью к механическим воздействиям: удару — нижний предел в приборе № 2 92—100 мм, трению без кварцевого песка 186—220 МПа.

Температура вспышки октогена 291 °С, критический диаметр детонации монокристалла 18 мм. Октоген отличается сравнительно высокой термостойкостью: температуру 200 °С выдерживает 8 ч 30 мин, 205 °С — 4 ч 30 мин, 220 °С — 2 ч.

Октоген как термостойкое ВВ используется в зарядах для перфорации глубоких нефтяных скважин, в термостойких капсулах-детонаторах, дополнительных детонаторах, детонирующих шнурах.

В США его применяют при температуре до 210 °С, в основном при прострелочно-взрывных работах, а также при дроблении горячих слитков, разгрузке и ремонте доменных печей и т. п.

8.2.3. Тэн

По внешнему виду белое кристаллическое вещество с температурой плавления 141,3 °С и плотностью 1,77 г/см³, плохо пресуется. Прессованием можно достичь плотности 1,6 г/см³. Размер частиц 10—830 мкм. Получают его нитрацией пентаэритрита азотной кислотой.

Тэн не гигроскопичен, растворимость его в воде при 19 °С 0,01 %, а при 100 °С — 0,035 %.

Тэн — токсическое вещество, вызывает раздражение верхних дыхательных путей, покраснение слизистых оболочек и кожи; при попадании в легкие вызывает расширение кровеносных сосудов.

Тэн химически стоек, более чувствителен к механическим воздействиям, чем гексоген и октоген. Чувствительность к иницирующему импульсу: масса предельного иницирующего заряда гремушей ртути 0,17 г, азид свинца — 0,03 г. Критический диаметр детонации 1—1,5 мм. Температура вспышки 205—225 °С.

Чистый и флегматизированный тэн используется для снаряжения средств иницирования и детонирующих шнуров, для пресованных дополнительных детонаторов, а также в эластичных ВВ.

8.2.4. Нитроглицерин, нитрогликоль

Нитроглицерин и нитрогликоли представляют собой маслянистые бесцветные жидкости.

Нитроглицерин получают нитрацией глицерина, нитродигликоль — нитрацией диэтиленгликоля, нитрогликоль — этиленгликоля.

Нитроглицерин имеет склонность к переохлаждению. Затверде-

вая, он может образовывать две формы: лабильную и стабильную с различными точками плавления. У нитроглицерина лабильной формы температура затвердевания +2,1 °С, температура плавления +2,8 °С, у стабильной формы, соответственно, +13,2 и +13,5 °С. Кристаллы лабильной формы нитроглицерина триклинной системы, а стабильной формы бипирамидально-ромбической. Лабильная форма легко переходит в стабильную при повышении температуры на 10 °С. Нитроэферы весьма чувствительны к механическим воздействиям.

Нитроглицерин легко детонирует при ударе железа о железо. От прикосновения раскаленного железа нитроглицерин взрывается. Зажженный нитроглицерин в небольших количествах горит голубоватым пламенем. Заморзший нитроглицерин менее чувствителен к удару, но более чувствителен к трению и поэтому значительно опаснее. Нагретый нитроглицерин еще более чувствителен к удару. Нитродигликоль и нитрогликоль значительно менее чувствительны к удару, чем нитроглицерин.

Растворимость нитроглицерина в воде при 15 °С 1,6 %, при 50 °С 2,5 %; нитродигликоль негигроскопичен, не растворим в воде; растворимость нитрогликоля значительная: в 100 г при 25 °С растворяется 0,52 г, при 60 °С — 0,85 г. Нитрогликоль мало гигроскопичен.

Нитроэферы весьма токсичны. Они вызывают головные боли, поражают нервную систему.

Нитроглицерин имеет положительный кислородный баланс (+3,5 %) и является одним из наиболее мощных ВВ. Нитрогликоль имеет нулевой кислородный баланс и по величине потенциальной энергии превосходит нитроглицерин на 7 %, имеет меньший критический диаметр.

Взрывчатое разложение нитроглицерина может быть вызвано нагреванием, механическим действием (удар, трение), инициальным импульсом капсуля-детонатора.

Скорость детонации жидкого нитроглицерина зависит от условий испытания. В обычных условиях испытания скорость детонации составляет около 7,7 км/с, но известны и так называемые низкоскоростные режимы распространения детонации (1,5—2 км/с).

Летучесть нитрогликоля значительно больше, чем нитроглицерина, что является существенным препятствием к его применению. Менее летуч нитродигликоль, входящий в состав угленитов и детонитов.

Из-за высокой чувствительности перевозка нитроэфиров запрещена, и они перерабатываются на месте изготовления.

Нитроэферы являются компонентами многих предохранительных ВВ, а также некоторых других порошкообразных, полупластичных и пластичных ВВ, выпускаемых в СССР и других странах (детонитов, динамитов и др.).

8.2.5. Динитронафталин

Динитронафталин представляет собой твердые гранулы, чешуйки или светло-желтые кристаллы с температурой плавления 150—160 °С. Его получают нитрованием моонитронафталина. Плотность монокристалла 1,5 г/см³, гравиметрическая плотность 0,9 г/см³.

Токсичность проявляется в действии на центральную нервную систему и на кровь, а также печень.

При медленном нагревании до 318 °С динитронафталин разлагается с образованием пены. Воспламенение происходит и от нагретой до 245 °С проволоки.

Динитронафталин — слабое взрывчатое вещество и мало восприимчиво к детонации, из-за чего самостоятельно не применяется. Температура вспышки 300—310 °С; он входит в состав промышленных взрывчатых веществ, в основном в смеси с аммиачной селитрой. Благодаря низкой чувствительности допускается механическая обработка динитронафталина с другими компонентами (аммиачной селитрой) под бегунами. Смеси аммиачной селитры с динитронафталином бегунной обработки в виде зеренных составов характеризуются высокими взрывчатыми и водостойчивыми свойствами (динафталиты).

8.2.6. Нитрометан

Нитрометан представляет собой бесцветную подвижную жидкость, растворимую в воде. При 20 °С растворяется 9,77 % нитрометана, сам нитрометан растворяет при этой температуре 2,2 % воды. Получают нитрометан при газофазном нитровании алифатических углеводородов с последующей ректификацией. Токсическое действие нитрометана невысокое, по ядовитости приравнен к бензинам. Предельно допустимая концентрация в воздухе 30 мг/м³.

Нитрометан способен детонировать при ударе или от взрывного импульса. Минимальный инициирующий импульс 3—5 г тротила, чувствительность к механическим воздействиям: удару — нижний предел в приборе № 2 230 мм, трению 127—133 МПа. Критический диаметр детонации в полиэтиленовой трубе 28—30 мм, в стальной — 8—10 мм.

По энергетическим характеристикам нитрометан можно приравнять к гексогену. Судя по величинам критического диаметра, нитрометан при инициировании дополнительным детонатором обладает высокой детонационной способностью, в то же время он мало чувствителен к механическим воздействиям.

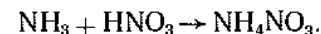
Нитрометан представляет большой интерес как самостоятельное жидкое не смешивающееся с водой и труднозамораживаемое взрывчатое вещество и как компонент смесевых аммиачно-селитренных и алюмосодержащих ВВ.

8.3. ВВ НА ОСНОВЕ АММИАЧНОЙ СЕЛИТРЫ

Взрывчатые смеси на основе аммиачной селитры являются наиболее распространенными промышленными ВВ. Это объясняется доступностью самой селитры как исходного сырьевого материала, широкой производственной базой ее изготовления, низкой стоимостью, а также сравнительной безопасностью переработки смесей на ее основе. Во взрывчатых смесях аммиачная селитра выполняет функцию окислителя, а горючим могут быть различные органические соединения, в том числе взрывчатые с отрицательным кислородным балансом, такие как тротил, динитронафталин и другие, а также металлические порошки алюминия.

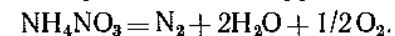
8.3.1. Аммиачная селитра и ее свойства

Аммиачная селитра представляет собой белое кристаллическое вещество, получаемое взаимодействием аммиака с азотной кислотой по уравнению



Выпускается в виде гранул, чешуек или кристаллов. Аммиачная селитра ранее применялась в чистом виде как малочувствительное ВВ при массовых взрывах; теплота взрывчатого превращения селитры 1600 кДж/кг, работоспособность в свинцовой бомбе 165—230 см³. Теплота образования — 355 кДж/моль, молекулярная масса — 80.

При взрыве селитра разлагается по уравнению



При недостаточном инициировании, а также при тепловом взрыве она может разлагаться и по другим уравнениям с меньшими тепловыми эффектами и с выделением токсичных окислов азота, например по реакциям:



Этим, в частности, объясняется выделение окислов азота при неполноценных взрывах ВВ на основе аммиачной селитры.

В зависимости от температуры аммиачная селитра может существовать в нескольких модификациях (табл. 8.4) [56].

В последнее время обнаружены еще четыре модификации нитрата аммония. Модификации VI, VIII и IX существуют при высоких давлениях (86—270 МПа), модификация VII — при температуре 170 °С. Подробно модификационные переходы исследованы А. Е. Никифоровым.

Переходы обратимые и протекают с не очень большим рыхлением структуры в поликристаллических образцах. Исключение

Таблица 8.4

Модификация	Диапазон изменения температуры для различных модификаций, °С	Вид симметрии	Параметры кристаллической решетки, 10 ⁻¹⁰ м			Объем кристаллической решетки, 10 ⁻¹⁸ м ³	Теплота переноса, кДж/кг	Изменение объема, %	Плотность, г/см ³
			a	b	c				
I	169,6—125,2	Кубическая	4,40	4,40	4,40	85,2	70,13	-2,13	1,55
II	125,2—84,2	Тетрагональная	5,75	5,75	4,95	163,7	51,25	-1,33	1,6
III	84,2—32,3	Ромбическая	7,06	7,66	5,80	313,7	17,46	+0,8	1,68
IV	32,3 ÷ (-17)	моноклинная ромбическая бипирамидальная	5,75	5,45	4,96	155,4	20,9	-3,3	1,70
V	(-17) ÷ (-50)	Тетрагональная	8,03	8,03	9,83	633,8	6,7	+1,65	1,72

составляет III модификация. Прямой переход во II и IV модификации затруднен из-за сравнительно большого термодинамического барьера, особенно в сухом веществе. Увлажнение облегчает переход из-за рекристаллизации. При определенных условиях возможен прямой переход из модификации II в IV. При циклических нагреваниях разрыхление заряда увеличивается. Переход из модификации IV в III сопровождается увеличением объема, по уточненным данным А. Е. Никифорова, на 0,0240 см³/г (4,14 %), из V модификации в IV соответственно на 0,016—0,018 см³/г, или до 3 %.

При температурных изменениях из-за полиморфных переходов в массе селитры (смесевых ВВ) возникают напряжения, которые могут привести либо к сцеплению порошкообразных частиц (слеживание, спекание), либо к разрыхлению и росту сформированных зарядов. Так как низкая влажность (ниже 0,1 %) тормозит наиболее опасный переход из модификации IV в III, то одним из способов физической стабилизации является либо подсушка (в производственных условиях), либо введение водопоглощающих добавок. Возможны метастабильные переходы из модификации II в IV или даже из II в V за счет введения этих добавок, а также стабилизация одной модификации в широком диапазоне температур ($\pm 60^\circ$), например, введением азотнокислого калия (KNO₃).

Гранулы аммиачной селитры, образующиеся при кристаллизации ее расплава, представляют собой капиллярно-пористое тело.

Гигроскопические точки (Г) аммиачной селитры при различных температурах имеют (в процентах относительной влажности) следующие значения:

t, °С	10	15	20	25	30	40	50
Г, %	75,3	69,8	66,9	62,7	59,4	52,5	48,4

Добавление в плав аммиачной селитры растворимых неорганических солей понижает гигроскопическую точку. Так, добавление 1,2 % нитрата магния понижает гигроскопическую точку при 25 °С до 57,3 %.

В зависимости от формы и размеров частиц насыпная плотность аммиачной селитры составляет 0,8—0,9 г/см³. В процессе хранения в условиях частого и резкого перепада температур происходит значительное увеличение ее объема, особенно при высокой влажности. Совершенно сухая аммиачная селитра даже при резких колебаниях температуры сохраняет свой первоначальный объем.

Аммиачная селитра хорошо растворяется в воде, причем ее растворимость находится в сильной зависимости от температуры.

Температура, °С	-15	-5	5	15	25	35
Концентрация NH ₄ NO ₃ , %	43,1	50,8	57,4	63,0	68,0	72,2
Температура, °С	45	55	65	75	85	95
Концентрация NH ₄ NO ₃ , %	75,9	79,2	82,2	85,0	87,6	90,0
Температура, °С	105	115	125	135	145	
Концентрация NH ₄ NO ₃ , %	92,2	94,2	95,7	97,1	97,9	
Температура, °С	155	165	169,6			
Концентрация NH ₄ NO ₃ , %	98,8	99,6	100,0			

Плотность насыщенных растворов аммиачной селитры также зависит от температуры (табл. 8.5).

Растворение селитры в воде сопровождается поглощением тепла и понижением температуры замерзания раствора. При растворении 6 частей селитры в 10 частях воды температура понижается примерно на 27 °С. Раствор, содержащий 50 г селитры на 100 г воды, замерзает при температуре около -13 °С.

Безводная аммиачная селитра плавится при температуре 169,4 °С. При увлажнении температура плавления значительно снижается:

$$t_{кр} = 169,4 - 13,2X,$$

где X — содержание влаги, %.

Термическое разложение селитры в присутствии продуктов разложения при низких температурах (около 180°) и больших отношениях массы вещества m к объему реакционного сосуда V имеет самоускоряющийся характер, а при высоких температурах (около 260°) и малых отношениях m/V отвечает реакции первого порядка. Изменение характера термического разложения можно объяснить

Таблица 8.5

Показатели	Температура, °C							
	20	40	60	80	100	120	140	160
Плотность, г/см ³	1,31	1,34	1,36	1,39	1,41	1,49	1,43	1,44
Содержание аммиачной селитры, %	66,1	73,3	80,2	85,9	91	94,7	97,4	99,4

Ускоряющим или активизирующим действием некоторых продуктов разложения, например азотной кислоты. С увеличением содержания кислых продуктов в жидкой фазе происходит ускорение термического разложения. Зависимость константы скорости разложения аммиачной селитры от температуры описывается выражением

$$K = 10^{13.7} \exp \frac{-38000 \pm 4000}{RT} \quad (8.1)$$

Вычисленные по формуле (8.1) значения констант для температур 225, 250 и 275 °C составляют соответственно $13,8 \cdot 10^{-4}$; $87,0 \cdot 10^{-4}$; $451 \cdot 10^{-4}$ мин⁻¹.

Действие различных примесей на разложение селитры разнообразно: хлориды, хроматы и соединения кобальта действуют каталитически, карбамид и сульфаты проявляют ингибирующее действие, нитраты металлов, окись алюминия, двуокись кремния влияния не оказывают.

Вводимые в промышленные сорта гранулированной селитры добавки сульфата аммония примерно в 1,5 раза снижают скорость термического разложения селитры, а добавки доломита и фосфатов увеличивают скорость в 2—3 раза. Водостойчивая селитра марки ЖВК, содержащая металлическую соль жирных кислот, по термической стабильности несколько уступает кристаллической.

Добавка к селитре веществ, которые могут разлагаться с выделением аммиака (например, карбамид или ацетамид), тормозит разложение. Обнаружено влияние на терморазложение селитры добавок хлоридов.

Снижают термическую стойкость селитры органические вещества, такие как углеводы, крахмал, сахараиды, глюкоза, а также материалы из целлюлозы — бумага, картон, древесина, обычно применяемые для укупорки аммиачной селитры. Из целлюлозных материалов, предназначенных для укупорки селитры, наиболее приемлема плотная бумага.

С селитрой легко взаимодействуют сера и сернистые соединения, сульфиды, азотная кислота и окислы азота, серная и фосфор-

ная кислоты, многие металлы, особенно в виде тонкодисперсных порошков (цинк, медь и сплавы, кадмий, никель, магний, висмут) и некоторые соединения, в частности, соли меди, марганца, хрома. Особенно опасно присутствие в селитре нитритных солей.

Не взаимодействуют с селитрой и не снижают ее термической стойкости алюминий, железо, их окислы и соли.

При хранении больших масс селитры в определенных условиях может произойти самовозгорание с переходом во взрыв.

На основе теории стационарного теплового взрыва можно ориентировочно рассчитать критические массы селитры в зависимости от температуры и геометрической формы бурта, а также период индукции для различных критических масс. Такой расчет проведен на основе уравнения Фраунк-Каменецкого

$$\delta_{кр} = \frac{Q\rho A \exp[-E/(RT_0)] Er^2}{\lambda RT_0^2},$$

где $\delta_{кр}$ — безразмерный параметр, зависящий от геометрии бурта селитры; Q — суммарный тепловой эффект реакции терморазложения; ρ — насыпная плотность; A — предэкспоненциальный множитель; E — эффективное значение энергии активации терморазложения нитрата аммония; R — универсальная газовая постоянная; T_0 — начальная температура; r — характерный размер для бурта селитры; λ — теплопроводность селитры.

Насыпная плотность нитрата аммония ρ принимается 950 кг/м³.

В табл. 8.6 приведены расчетные значения критических масс селитры и соответствующие периоды индукции теплового взрыва. При иных значениях кинетических констант, например из-за загрязнения селитры органическими или катализирующими примесями, величины критических масс могут быть меньшими, чем это указано в табл. 8.6. Тепловой взрыв может возникнуть не только в сухой селитре, но и в ее высококонцентрированных растворах и расплавах. Взрыв селитры может возникнуть и при ее горении, для которого не требуется кислород воздуха. Некоторые катастрофические взрывы, которым предшествовали пожары, свидетельствуют о такой возможности.

В США около Трасквуда в 1960 г. произошло крушение товарного поезда с 23 вагонами из-за повреждения вагонной буксы. Один из вагонов был с аммиачной селитрой в мешках и один с селитрой, нагруженной навалом. Остальные вагоны были загружены разнообразными материалами. Возник сильный пожар и затем взорвалась селитра, упакованная в мешки.

В 1973 г. в США (штат Оклахома) произошел пожар, сопровождающийся взрывом в отделении упаковки и хранения аммиачной селитры навалом. Стены строения были обшиты фанерой и имели покрытие из полиэтиленовой пленки и гофрированного алюминия.

Таблица 8.6

Температура, °С	Параметры асимметрически нагреваемого участка в зависимости от его формы			Максимальные перiodы индук- ции
	слой	параллелепипед	куб	
55	11,7/431 000	31,4/464 000	79,2/485 000	82 сут
60	7,0/89 700	18,6/96 200	46,9/96 500	14 сут
70	2,9/5 550	7,4/6 000	18,6/6 000	2,8 сут
80	1,1/385	3,0/430	7,7/430	13,82 ч
90	0,5/37	1,4/39	3,5/3,9	3 ч
100	0,24/3,9	0,6/4,2	1,7/4,2	47 мин

Примечание. В числителе полутолщина бурта (м), в знаменателе — его масса (т).

Имел место случай пожара с переходом во взрыв в отделении грануляции, происшедший в 1974 г. на установке фирмы «Атлас Поудер» (США). Первопричиной взрывов было загорание или термическое разложение селитры.

Переходу горения во взрыв способствует замкнутость емкости, когда удаление продуктов горения затруднительно и давление газов повышается. Вот почему особенно опасно загорание селитры в трюмах судов, цельнометаллических вагонах, в железных контейнерах. Горение, а также саморазогрев в результате термического разложения интенсифицируются при больших массах продукта. Большие массы селитры при горении прогреваются и в зону пламени выбрасывается расплавленное вещество. Слои вещества, отдаленные от очага горения, прогреваются вследствие сильного излучения.

Пожаро- и взрывоопасные свойства селитры возрастают при наличии в ней примесей органического происхождения (нефтепродуктов и т. д.), а также при укупорке в горючие материалы.

Загорание селитры возможно от открытого огня, искр, сильных разрядов электричества, в результате взаимодействия с некоторыми легко окисляемыми и агрессивными материалами. При загорании селитра плавится и растекается по полу помещения, причем опасность возникновения взрыва расплавленной селитры выше, чем кристаллической.

Присутствие в водоустойчивой аммиачной селитре марки ЖВК небольших количеств гидрофобных добавок (до 0,4 %) сколько-нибудь существенно не увеличивает ее пожароопасность по сравнению с обычной. При очень крупных и интенсивных очагах загорания тепловой взрыв может перейти в детонацию, которая способна распространяться по трубопроводам, заполненным расплавом или высококонцентрированным раствором селитры. Детонационный режим разложения характеризуется особенно сильными разрушениями промышленных сооружений и строений.

Чувствительность селитры к детонационному импульсу (ударно-волновая чувствительность), определяемая минимальным инициирующим импульсом и критическим диаметром, зависит от влажности, размера гранул и плотности. Детонация сухой тонкоизмельченной селитры при плотности 0,8 г/см³, по данным А. Ф. Беляева, устойчиво распространяется в открытых зарядах диаметром около 100 мм.

Детонация селитры с размером частиц 1 мм и влажностью 1 % затухает в открытом заряде диаметром 300 мм. Аммиачная селитра с влажностью 3 % не взрывается в зарядах еще больших диаметров.

Чувствительность к взрыву повышается в результате локального растворения и последующей перекристаллизации селитры, что приводит к увеличению пористости. При длительном хранении возможно существенное увеличение объема селитры (на 4 %).

Установлено, что чувствительность к взрыву можно снизить добавкой нескольких процентов нитрата калия. Эта добавка стабилизирует модификацию IV в интервале температур 32 ÷ 100 °С и тем самым снижает пористость селитры.

По данным М. Кука, скорость детонации измельченной селитры D в зависимости от диаметра заряда d имеет следующие значения:

d , мм	100	150	200	250	300	460
D , км/с	Отказ	1,4	1,6	1,8	1,15	2,75

На детонационную способность селитры влияет прочная оболочка. В неразрушающейся оболочке зарегистрирована устойчивая детонация аммиачной селитры в зарядах диаметром 5 мм.

Критический диаметр водоустойчивой селитры в зависимости от степени измельчения и содержания гидрофобных добавок (0,4 ÷ 0,8 %) составляет 50—80 мм, а тонкодисперсной пыли ее — 20 ÷ 30 мм. Толщина критического слоя распространения детонации измельченной водоустойчивой селитры без оболочки составляет 30—50 мм, а для ее тонкодисперсной пыли 15—20 мм, что в 1,5 раза меньше критического диаметра цилиндрических зарядов.

Скорость детонации селитры без добавок в металлической трубе диаметром 40 мм составила 1,95 км/с, водоустойчивая селитра в этих условиях детонировала со скоростью 2,57 км/с, а ее пыль — со скоростью 3,4 км/с. Скорость детонации водных растворов селитры в металлических трубах диаметром 50 мм с толщиной стенок 6,5 мм в зависимости от температуры приведена в табл. 8.7.

При введении в селитру органических добавок чувствительность к детонации возрастает.

К механическим воздействиям водоустойчивая селитра, особенно ее пыль, более чувствительна, чем обычная селитра, но менее чувствительна сравнительно с тротилом и аммонитом 6ЖВ.

Таблица 8.7

Показатели	Температура, °С							
	126	141	154	163	204	215	216	230
Содержание воды, %	20	10,3	5,7	4,1	1,0	0,7	1,0	0,6
Скорость детонации, км/с	1,15	1,19	1,13	1,17	1,1	1,13	1,8	2,1

Из-за малой чувствительности и низкой энергии взрыва аммиачная селитра имеет пониженную способность к передаче детонации на расстояние. Безопасное по передаче детонации расстояние между штабелями аммиачной селитры можно рассчитать по формуле

$$r = k\sqrt{G},$$

где G — масса селитры, кг; k — эмпирический коэффициент.

Коэффициент k , по экспериментальным данным, для кристаллической селитры без примесей равен 0,1 и может меняться в зависимости от размеров частиц и свойств примесей в продукте.

При оценке действия взрыва аммиачной селитры на окружающие строения можно пользоваться расчетной формулой безопасных по действию ударной воздушной волны расстояний:

$$B = a\sqrt{mG},$$

где a — коэффициент, зависящий от характера разрушений; m — тротиловый эквивалент селитры, который можно принять равным 0,35.

Промышленность выпускает несколько сортов аммиачной селитры. Наиболее массовым сортом является гранулированная селитра марок А и Б, изготавливаемая как для сельского хозяйства, так и для производства промышленных ВВ. Гранулированная селитра марки А предназначена для производства в основном заводских гранулированных ВВ, а селитра марки Б используется, главным образом, при изготовлении простейших ВВ на месте применения. Гранулы селитры марок А и Б малопористы, плохо поглощают и удерживают жидкие компоненты, вводимые в состав ВВ. Для простейших гранулированных ВВ заводского изготовления с жидкими нефтепродуктами вырабатывают пористую селитру марки П. Пористость гранул селитры марок А и Б составляет 6—9 %, марки П — 15—18 %. В пористой селитре впитывающая способность гранул относительно солярового масла должна быть не ниже 10 %. Прочность гранул этой селитры из-за наличия пор ниже, чем прочность гранул селитры марок А и Б: соответственно 2,5—4,0 и 4—8 Н.

Таблица 8.8

Показатели	Гранулированная рядовая (ГОСТ 2—86)		Гранулированная пористая П*	Кристаллическая водоустойчивая марки ЖВК** (ГОСТ 14702—79)
	марки А	марки Б		
Содержание, %:				
нитрата аммония (не менее)	98	азота 34 + 0,5	99,5	99
влаги (не более)	0,3	0,3	0,5	0,8
нерастворимых примесей (не более)	0,2	не нормированы	0,08	0,01
минеральных кислот в пересчете на азотную (не более)	4	4	0,02	0,07
добавок против слеживания, %				
нитратов кальция и магния в пересчете на СаО или фосфатов в пересчете на Р ₂ О ₅ или сульфата аммония	0,3—0,7	0,3—0,7	0,3—0,7	—
гидрофобных добавок:				
железа	—	—	—	0,6—0,09
органики	—	—	—	0,3—0,4
Прочность гранул на раздавливание, Н	40	30	25	—
Гранулометрический состав, %:				
гранул размером 1—3 мм (не менее)	92	93	90	—
гранул размером меньше 1 мм (не более)	5,0	5,0	10,0	—

* Впитывающая способность по отношению к соляровому маслу не менее 10 %.

** Водоустойчивость составляет 2,16 кПа.

Водоустойчивая селитра марки ЖВК в кристаллическом виде предназначена для изготовления порошкообразных промышленных ВВ. В табл. 8.8 приведены характеристики различных сортов аммиачной селитры, используемых при изготовлении промышленных ВВ.

8.3.2. Металлические горючие в составе промышленных ВВ

Одним из широко распространенных путей повышения энергии промышленных ВВ является введение в их состав алюминия. Однако возможно использование и других более экономичных и менее дефицитных высокотеплотворных металлов и их соединений. Расчетные значения прироста энергетических характеристик при замене тротила металлическими и другими горючими веществами для стехиометрической смеси селитры с горючим приведены в табл. 8.9.

Таблица 8.9

Горючая добавка	Относительная молекулярная масса	Формула окисла	Теплота образования окисла, кДж/моль	Повышение теплоты взрыва состава на 1 г горючего, кДж
Алюминий	27	Al_2O_3	1670	31
Кремний	28	SiO_2	860	31
Магний	24	MgO	600	25
Фосфор	31	P_2O_5	1540	24,7
Кальций	40	CaO	630	16
Марганец	55	MnO_2	520	9,4
Железо	56	Fe_2O_3	820	7,4

Практически интерес представляют металлические порошки, содержащие кремний, ферросилиций и силикокальций. Все перечисленные в табл. 8.9 металлы по теплотворной способности уступают алюминию, однако с кремнием образуют соединения, способные повысить теплоту взрыва ВВ.

Из-за высокой твердости частиц порошков ферросилиция и силикокальция чувствительность составов высокая, причем она возрастает по мере увеличения содержания кремния. Водонаполнение существенно снижает чувствительность к механическим воздействиям. По химической стойкости водосодержащие композиции с порошками ферросилиция и силикокальция не уступают составам с алюминием. Таким образом, замена алюминия в водосодержащих ВВ экономически доступными и дешевыми горючими компонентами, обеспечивающими высокую объемную энергию составов (9210—9710 кДж/л), позволяет снизить стоимость ВВ на 10—20%. По этим причинам в один из составов карбатов (ФТ-10) введен ферросилиций как экономичное высокоэффективное горючее. Составы, содержащие ферросилиций, применяются в Болгарии (аммонал ФС, водосодержащее ВВ марки ЖВ-ФС), Швеции (приллит Д), Японии (карлиты) [52, 55].

8.3.3. Простейшие гранулированные ВВ

К простейшим ВВ на основе аммиачной селитры относят смеси гранулированной селитры с жидкими или легкоплавкими нефтепродуктами, которые могут изготавливаться непосредственно на горных предприятиях и на специализированных заводах. Простейшими эти ВВ называются потому, что они не содержат нитросоединений.

Простейшие ВВ указанного типа в английской транскрипции обозначают индексом AN—FO (нитрат аммония — горючее масло), в русской — АС—ДТ (аммиачная селитра — дизельное топливо), однако имеются и собственные наименования: игданиты, гранулиты (СССР), нилит, аустенит (США), амекс (Канада), андекс,

амонекс (ФРГ), декамон, динамон (ГДР), гранулекс, анабел (Великобритания), селтит, ферролит, нитрат фуэл (Франция), нитрол, нитрекс (Югославия), пермон, пермонекс (Чехословакия), нафтенит (Болгария), никегран (Венгрия), лабрит (Австрия), анол, амелен, нитрамон (Румыния), солетрол (Польша), аннит (Финляндия), приллит (Швеция), наголит, алнафт, наурит (Испания), энергел (Индия) и др. Они могут отличаться между собой сортом селитры и видом жидкого горючего. Некоторые современные сорта (гранулиты марки АС, простейшие ВВ типа игданита и др.) содержат помимо жидкого горючего металлические порошки.

Смеси гранулированной аммиачной селитры с жидкими нефтепродуктами (дизельным топливом) начали применять на открытых горных разработках в США и Канаде в 1955 г. Их компоненты недефицитны и недороги. Смеси АС—ДТ намного безопаснее в обращении сравнительно с другими ВВ, так как они характеризуются весьма низкой чувствительностью к механическим воздействиям. В отличие от тонкодисперсных динамонов обладают хорошей сыпучестью и мало слеживаются.

Технология приготовления таких смесей чрезвычайно проста. Она сводится к простому механическому перемешиванию твердой и жидкой фаз, для чего пригодны простые по устройству лопастные смесители как в стационарных установках, так и на передвижных зарядно-смесительных агрегатах. Благодаря этим преимуществам смеси АС—ДТ оказалось возможным готовить на месте применения, а также осуществлять их механизированное зарядание.

Благодаря низкой стоимости исходных компонентов и малых производственных затрат смеси данного типа имеют низкую стоимость и для горных пород малой и средней крепости являются одними из наиболее экономичных промышленных ВВ.

Смеси АС—ДТ применяют как на открытых, так и на подземных горных разработках, причем в последнем случае зарядание шпуров и скважин производят с помощью пневмозаряжающих устройств и с высокой плотностью благодаря хорошей уплотняемости этих ВВ, содержащих жидкую фазу.

Гранулированные ВВ почти везде за рубежом представлены простейшими двухкомпонентными составами типа АС—ДТ, а в ряде стран также и трехкомпонентными смесями с содержанием в составе алюминия. Простейшие гранулированные взрывчатые смеси в настоящее время — самое распространенное промышленное ВВ, доля потребления их достигает 50—60% общего потребления промышленных ВВ, а в США в 1980 г. 85%.

Недостатки смесей АС—ДТ:

1) смеси неводостойчивы, под воздействием воды при содержании влаги более 5% они теряют детонационную способность и поэтому их нельзя применять в обводненных забоях;

2) смеси недостаточно физически стабильны. При больших высотах скважинных зарядов жидкая фаза стекает в нижние слои заряда;

3) для взрывания (рыхления) крепких и особо крепких пород детонационные параметры этих ВВ (детонационное давление) недостаточно высоки.

Многочисленные попытки придать бинарным смесям АС—ДТ необходимую степень водоустойчивости не увенчались успехом.

В СССР изготавливаются водоустойчивые сорта трехкомпонентных гранулитов марки АС—В, отличающихся от простейших ВВ типа АС—ДТ тем, что вместо жидкого горючего в них вводятся низкоплавкие твердые нефтепродукты, обладающие гидрофобными свойствами. Эти ВВ предназначены для заряжания обводненных шпуров и скважин в подземных выработках с помощью пневмозарядчиков.

Формируемый таким способом заряд вытесняет воду из зарядной емкости, а в уплотненном состоянии заряд обладает малой водопроницаемостью.

Для заряжания обводненных скважин методом свободной засыпки гранулиты этих марок мало пригодны. Хотя гидрофобная пленка и предохраняет гранулы селитры от растворения, однако вода, заполняющая межгранульное пространство, сильно флегматизирует эти ВВ, не содержащие взрывчатых сенсбилизаторов, и возможны отказы и неполные взрывы (см. раздел 7). Поэтому при производстве взрывных работ в обводненных забоях с помощью простейших ВВ описанного типа, засыпаемых в скважины без уплотнения, практикуют предварительную откачку воды из скважины, если скважины имеют небольшой водоприток.

Применяют также методы гидроизоляции зарядов, например с помощью полиэтиленовых рукавов.

Для заряжания скважин небольшой обводненности широко используют комбинированные заряды: нижнюю обводненную часть скважины заполняют водоустойчивыми гранулированными ВВ, например гранулоломом, а верхнюю, сухую часть — игданитами или гранулитами.

Комбинированные заряды позволяют решить и проблему повышения британного (дробящего) действия взрыва в нижней, наиболее трудновзрываемой части скважины, с хорошей проработкой подошвы.

Для повышения физической стабильности смесей АС—ДТ во многих странах применяют микропористую гранулированную селитру, изготавливаемую по специальной технологии. Она обладает повышенной впитывающей способностью по отношению к дизельному топливу. Если обычные сельскохозяйственные сорта аммиачной селитры (с гладкой поверхностью) впитывают 5—9 % дизельного топлива по массе, то микропористые сорта — до 12—16 %.

Физическая стабильность смесей может быть повышена и за счет применения более вязких, чем дизельное топливо, минеральных масел — солярового, индустриального и других, а также припудривания поверхности, смоченной жидкими топливами, и поверхности гранул тонкодисперсными твердыми горючими материалами — алюминиевой пудрой, древесной мукой и т. п. На этом принципе, в частности, основаны рецептуры многих советских простейших гранулированных ВВ (гранулитов), выпускаемых промышленностью.

В связи с тем что аммиачная селитра при изготовлении простейших ВВ не измельчается (при пневмозарядании происходит лишь частичное дробление гранул), взрывчатые характеристики ВВ этого типа существенно зависят от размера гранул селитры, их влажности, впитывающей способности, прочности, а также вязкости горючего. Энергетические характеристики смеси определяются ее химическим составом. Теплота взрыва будет наивысшей для смесей стехиометрического состава, отвечающего нулевому кислородному балансу. В случае трехкомпонентных алюмосодержащих ВВ она возрастает с увеличением соотношения между алюминием и жидким горючим.

Впитывающая (удерживающая) способность гранул селитры зависит от их пористости и влажности.

Установлена сильная зависимость впитывающей способности от влажности для непористой селитры марки Б. Впитывающая способность селитры марки Б с влажностью около 0,9 % относительно дизельного топлива составляет в зависимости от размера гранул 6,3—8,8 %. Влияние влажности на впитывающую способность относительно различных горючих жидкостей еще более сильное.

Гранулы селитры насыщали горючими жидкостями до сохранения сухости их, определяемой на ощупь.

При влажности 0,19 % непористая гранулированная аммиачная селитра впитывает 13,3 % дизельного топлива, 11,9 % глицерина, 18 % скипидара, 10,2 % полисилоксановой жидкости и 8 % автола. При влажности селитры 0,26 % гранулы впитывают лишь 1,5 % дизельного топлива, 2 % глицерина или скипидара или полисилоксановой жидкости, а также 2,5 % автола.

Чем меньше влажность аммиачной селитры, тем больше горючей жидкой добавки она впитывает. Увлажненная аммиачная селитра поглощает малое и примерно одинаковое количество горючих жидкостей независимо от их физических и химических свойств, причем это количество колеблется в пределах от 1,5 % до 2 %, в среднем составляя 2 %.

Поэтому для обеспечения нулевого или близкого к нулю кислородного баланса в состав ВВ вводят дополнительно твердые горючие добавки, такие как древесная мука, уголь, сажа, стеарат кальция, полиакриламид и др.

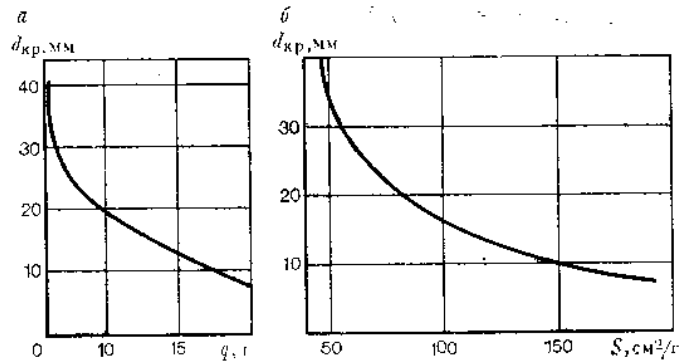


Рис. 8.1. Зависимость критического диаметра детонации $d_{кр}$ заряда игданита от удерживающей способности в 100 г аммиачной селитры q (а) и от удельной поверхности S аммиачной селитры (б)

Твердая горючая добавка должна быть пористой, способной поглотить ту часть жидкого горючего, которая не удерживается гранулами аммиачной селитры. С этой точки зрения лучшими твердыми горючими добавками являются каменный и древесный уголь, хорошо адсорбирующие жидкие компоненты.

Замена части дизельного топлива на угольный порошок уменьшает растворимость гранулитов. Помимо повышения водоустойчивости введение угольного порошка увеличивает эффективность взрыва на 17–20 % и повышает бризантность с 16 до 23 мм (испытание в кольцах).

На физико-химические и взрывчатые свойства смесей данного типа сильно влияние оказывают физические свойства компонентов. Свойства жидких нефтепродуктов, применяемых при изготовлении игданита и гранулитов, приведены в табл. 8.10.

При одинаковом химическом составе физические различия смесей обуславливают прежде всего различные значения величин критического $d_{кр}$ и предельного $d_{пр}$ диаметров заряда. Так, смесь дизельного топлива с непористой селитрой имеет $d_{кр} = 120 \div 160$ мм в патронах в бумажной оболочке, а с пористой селитрой — 70–100 мм.

Зависимость критического диаметра детонации заряда игданита от впитывающей (удерживающей) способности селитры относительно дизельного топлива и ее удельной поверхности при взрывании ВВ в стальных трубах показана на рис. 8.1.

При диаметре заряда больше критического, но меньше предельного, т. е. в области неидеального режима детонации, физические характеристики смеси влияют и на параметры детонации.

Известно, что введение в гранулированную селитру на стадии кристаллизации некоторых поверхностно-активных веществ (ПАВ)

Таблица 8.10

Показатели	Марка дизельного топлива									
	Автомоторное (ГОСТ 305–82)					Для быстроходных двигателей				
	А	З	Л	С	ДА	ДЗ	ДЛ	ДС		
Вязкость, мм ² /с: при 20 °С при 50 °С	1,5–2,5 30 –55	2,2–3,2 35 –35	3–6 40 –10	4,5–8,0 90 –15	2,5–4 35 –60	3,5–6,0 50 –45	3,5–8 60 –10	2,5–4 90 –15		
Температура вспышки, °С (не ниже) Температура застывания, °С (не выше)										

Продолжение табл.

Показатели	Марка масла			
	Соларное (ОСТ 38157–74)		Тракторное (ГОСТ 1805–78)	
	И-8А	И-12А	И-20А	И-20А
Вязкость, мм ² /с: при 20 °С при 50 °С	5–9 125 –20	6,3–8,5 120 –60	6–8 130 –20	10–14 165 –30
Температура вспышки, °С (не ниже) Температура застывания, °С (не выше)				17–24 180 –15

Примечания. Буквенные индексы топлива вместе с температурой застывания означают климатические условия применения топлива; А и ДА — арктический, З и ДЗ — зимнее, Л и ДЛ — летнее, С и ДС — летнее, И — специальное назначение.

способствует увеличению ее впитывающей способности и, соответственно, скорости детонации игданита при взрывании в стеклянных трубках диаметром 25 мм от 1,74 до 2,45 км/с.

Повышенной впитывающей способностью по отношению к дизельному топливу характеризуется водоустойчивая селитра марки ЖВК, содержащая соли жирных кислот. Игданит на ее основе отличается более стабильными физическими и взрывчатыми свойствами.

В США и Канаде выпускается гранулированная селитра с добавками ПАВ или припудренная пористым диатомитом (3 %).

При достижении предельного диаметра заряда физические особенности смеси (размер гранул, их впитывающая способность и др.) перестают влиять на параметры детонации, которые теперь зависят только от химического состава смеси и плотности заряда.

Величины $d_{пр}$ и $d_{кр}$ для простейших ВВ в сильной степени зависят от физико-механических характеристик оболочки заряда. В прочной и массивной оболочке они резко уменьшаются. Так, $d_{кр}$ для игданита и гранулитов в бумажной оболочке составляет 70—160 мм, а в стальной оболочке 18—30 мм. В практических условиях максимальная скорость детонации 3,8—4 км/с достигается при зарядании простейших ВВ в скважины, выбуренные в скальных породах, диаметром 150 мм. Минимальная скорость детонации, отвечающая $d_{кр}$, составляет 1,5—1,7 км/с в зависимости от свойств селитры и химического состава смеси.

При пневматическом зарядании шпуров и скважин простейшими ВВ, содержащими жидкое или низкоплавкое горючее с явно выраженными пластическими свойствами (типа парафина, воска и т. п.), гранулы селитры дробятся, что приводит к более равномерному смешиванию компонентов и уплотнению ВВ в зарядной камере. Благодаря этому параметры детонации становятся более высокими, чем при засыпке вручную. Так, например, в шпурах, выбуренных в известняке диаметром 50 мм, при плотности зарядания 0,8—0,9 г/см³ (засыпка вручную) скорость детонации простейших ВВ составляет 2,5—3,3 км/с, а при плотности 1,1—1,2 г/см³ (пневмозарядание) — 3,3—4 км/с.

Давление детонации в точке Жуге для простейших ВВ в идеальном режиме примерно в 3 раза, а в идеальном режиме в 1,6 раза ниже, чем у аммонита 6ЖВ в соответствующих режимах детонации, а импульс взрыва более растянут. Ширина зоны химической реакции игданита, рассчитанная по формуле Эйринга, в 17 раз больше ширины зоны аммонита 6ЖВ. Это приводит к более мягкому нагружению горных пород при взрывании их простейшими ВВ.

Оптимальное значение плотности простейших гранулированных ВВ составляет около 1,2 г/см³. Такая плотность при применении существующих моделей пневматических зарядчиков обеспечивается только при расстоянии от зарядной трубки до заряда ВВ

не более 0,5—0,6 м. Практически же оно изменяется от 0,3 до 1,5 м. Сравнительные результаты испытаний показывают, что при применении насадки имеет место образование по длине заряда видимых кольцевых областей ВВ повышенной плотности (1,15—1,25 г/см³) в той части заряда, где плотность его меньше 1 г/см³. Это объясняется трудностью сохранения оптимального расстояния между насадкой и зарядом ВВ при зарядании глубоких шпуров и изменением условий отвода сжатого воздуха из полости шпура. Ширина колец повышенной плотности ВВ 2—3 см, повторяются они через 7—10 см по длине заряда. При этом КИШ составил 0,95—0,98 и объем отбитой горной массы за цикл увеличился на 4—5 м³.

В целях повышения энергетических характеристик простейших ВВ в их состав вводят алюминиевый порошок или пудру (гранулиты марки АС). Введение в состав этих ВВ 4—8 % алюминия с адекватным уменьшением содержания жидкого горючего, отвечающим близкому к нулевому кислородному балансу, приводит к повышению теплоты взрыва на 20—40 % [11, 22].

Как ВВ, имеющие близкий к нулевому кислородный баланс, игданиты и гранулиты относятся к классу II и могут применяться как на открытых, так и на подземных работах.

В табл. 8.11 приведены свойства отечественных простейших гранулированных ВВ. Водоустойчивыми являются только гранулиты АС—4В и АС-8В.

Игданиты изготавливаются на местах производства взрывных работ, гранулиты — на специализированных заводах. Внешне они представляют собой сферические гранулы размером 1—3 мм, однородные по цвету, без видимых посторонних включений и комков.

Игданит — простейшая сбалансированная по кислороду бинарная смесь гранулированной аммиачной селитры с дизельным топливом, изготавливаемая на месте применения. В гранулированном состоянии игданит хорошо сыпуч, транспортабелен по пневмомагистралям, не пылит и мало электризуется, уплотняется при пневмозарядании, вследствие чего удерживается в восстающих скважинах крупного диаметра. Игданит отличается от ВВ заводского производства простотой изготовления и низкой стоимостью. Это ВВ устойчиво детонирует от промежуточного детонатора. С увлажнением зарядов мощность промежуточного детонатора должна быть увеличена.

Благодаря низкой чувствительности к механическим, тепловым и электрическим воздействиям и простоте технологии игданит изготавливается на централизованных стационарных установках, размещенных на специальных площадках при базисных или расходных складах ВВ. Изготовленный на этих установках игданит доставляется к местам ведения взрывных работ зарядно-транспортными машинами.

Критические параметры детонации и взрывчатые характеристики игданита при диаметре заряда меньше предельного в силь-

Таблица 8.11

Показатели	Игданит	Простейшее ВВ с алюминием	Гранулиты			
			М	АС-4	АС-4В	АС-8В
Кислородный баланс, %	0,12	-1,2	+0,14	+0,41	+0,35	-3,3
Теплота взрыва, кДж/кг	3760	4500	3760	4520	4520	5230
Объем газов, л/кг	980	—	980	907	—	—
Полная идеальная работа взрыва, кДж/кг	3150	—	3150	3550	3550	4000
Работоспособность, см*	320—330	400—410	320—330	390—410	390—410	400—420
Тротильный эквивалент по баллистическому маятнику	—	—	0,89	0,96	0,96	—
Бризантность в стальном кольце, мм*	15—20	—	18—22	22—26	22—24	22—26
Скорость детонации, км/с	2,2—2,8	2,5—3,6	2,5—3,6	2,6—3,5	2,8—3,5	3,0—3,6
Критический диаметр, мм:						
в бумажной оболочке	120—150	100—120	80—100	60—100	70—100	80—110
в стальной оболочке	25—30	25—30	15—20	20—25	15—20	20—25
Минимальный инициирующий импульс (трог), г	20—30	—	10—15	5—10	5—10	5—10
Чувствительность:						
к удару, %	0	0—20	0	4—12	0—12	0—8
к трению с примесью 5 % песка, МПа (не менее)	300	—	300	300	300	300
Насыпная плотность, г/см ³	0,8—0,9	0,8—0,9	0,8—0,9	0,8—0,9	0,8—0,9	0,8—0,9

* От шашки тротила массой 5 г.

ной степени зависят от свойств гранул селитры, их пористости, впитывающей способности относительно дизельного топлива, удельной поверхности и др.

Бризантность игданита возрастает с увеличением количества мелких фракций селитры, ее удельной поверхности (рис. 8.2). При изготовлении игданита на микропористой селитре критический диаметр снижается до 16 мм, скорость детонации составляет 2,8 км/с при диаметре 28 мм, 4,5 км/с — при диаметре 50 мм. Для игданита, изготовленного на непористых гранулах селитры, при применении в мягких грунтах и слабых породах рекомендуются скважинные заряды диаметром не менее 100 мм, в твердых породах — шпуровые и скважинные заряды диаметром не менее 30 мм. Физическую стабильность игданита на непористой селитре повышает введение в его состав поверхностно-активных и пористых веществ.

При увеличении содержания влаги в игданите детонационная способность его падает, увеличиваются критический диаметр и минимальный инициирующий заряд. При содержании воды более 6 % необходимо применять усиленные промежуточные заряды. В сухом состоянии надежно инициируется от взрыва патронов аммонитов, тротильных шашек-детонаторов.

Для определения количества вредных газов, выделяющихся при взрыве игданита, взрывали заряды диаметром 36 мм в блоках из гранита и габбро-диабазы. Результаты опытов, приведенные в табл. 8.12, показали, что непатронированный игданит при взрыве в крепких горных породах выделяет ядовитых газов меньше, чем патронированный аммиачно-селитренный состав.

Простейшее ВВ типа игданита с алюминием содержит алюминий более крупных частиц в виде порошка с меньшей удельной поверхностью сравнительно с алюминиевой пудрой, что уменьшает возможность пыления и реакционную способность с водой. При этом также улучшаются санитарно-гигиенические условия и повышается степень безопасности применения игданита с алюминием. Изготавливается на месте применения с помощью передвижного зарядного агрегата СУЗН-5А.

Заряды игданита с алюминием надежно детонируют в скважинах диаметром 243—269 мм при инициировании боевиками из

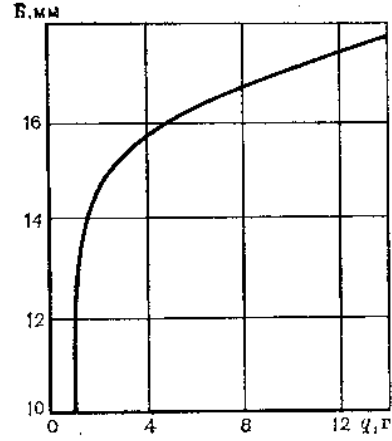


Рис. 8.2. Зависимость бризантности игданита Б от удерживающей способности q в 100 г аммиачной селитры

Таблица 8.12

ВВ	Удельная по- верхность, см ² /г	Масса заряда, г	Количество ядовитых газов (л/кг), образующихся при взрывании в блоках					
			гранита			габбро-диабазы		
			СО	NO ₂	суммарная СО+6,5NO ₂	СО	NO ₂	суммарная СО+6,5NO ₂
Игданит на аммиачной селитре:								
мелкодисперсной	340	20	—	—	—	28,3	1,31	37,1
то же	340	50	11,8	0,60	15,7	—	—	—
пористой	160	20	—	—	—	28,6	1,55	38,4
гранулированной	85	20	—	—	—	32,3	1,66	42,7
Аммиачно-селитренная смесь:								
без оболочки	235	50	20,9	0,95	27,0	—	—	—
то же	235	20	—	—	—	43,2	1,3	51,6
в бумажной парафи- нированной оболоч- ке	235	20	—	—	—	71,3	1,34	79,9

четырёх тротиловых шашек. Состав дешевый и достаточно ста-
бильный.

Гранулит М изготавливается на пористых сортах селитры, со-
держит в качестве горючего соляровое масло, которое полностью
впитывается в гранулы пористой селитры. Поэтому гранулы после
смешивания почти сухие на ощупь. Физически стабилен, масло
из гранул не эксудировано. Гранулит М хранится без изменения
химического состава и взрывчатых свойств в течение длительного
времени. Практически не слеживается, сыпуч, хорошо транспор-
тируется по трубам с малой степенью электризации, не пылит,
пригоден для пневматического заряжания. Как и игданит, харак-
теризуется низкой чувствительностью к механическим воздейст-
виям.

Благодаря однородности смешивания имеет более высокую
детонационную способность, чем игданит, что выражается в мень-
шем значении критического диаметра. В зависимости от плот-
ности заряжания и диаметра шпура (скважины) детонирует со
скоростью 2,8—3,8 км/с. При пневмозаряжании обеспечивается
плотность до 1,15 г/см³ в шпурах и до 1,05 г/см³ в скважинах.

По экономической эффективности гранулит М на подземных
разработках при пневматическом заряжании на 10—15 % превос-
ходит патронированный аммонит 6ЖВ. Гранулит М предназначен
для открытых и подземных работ. С учетом критических условий
распространения детонации гранулит М рекомендуется применять
в слабых породах в скважинах диаметром не менее 60 мм,
в скальных породах — не менее 30 мм.

Для надежности взрывания гранулита М рекомендуется при-
менять промежуточные детонаторы. Допустимая влажность гра-
нулита не более 5 % для шпуровых зарядов и не более 8 % для
скважинных зарядов. Применяется в сухих и слабо обводненных
забоях.

Гранулит АС-4 содержит алюминиевую пудру. При пневмати-
ческом заряжании обеспечивается плотность зарядов 1,1—1,2 г/см³
в шпурах и 1,0—1,1 г/см³ — в скважинах. При указанных пара-
метрах заряжания гранулит АС-4 по объемной концентрации энергии
превосходит мощные патронированные аммониты и дето-
ниты.

Гранулит АС-4 физически стабилен, сыпуч, но при пневмоза-
ряжании пылит. Для снижения пыления и электризуемости при
пневмозаряжании гранулит АС-4 рекомендуется орошать неболь-
шим количеством воды (2—3 %). К механическим воздействиям
несколько более чувствителен, чем неметаллизированные простей-
шие ВВ, но менее чувствителен, чем аммониты и граммониты. На-
дежно детонирует от промежуточного детонатора в виде патронов
аммонитов в подземных выработках, шашек-детонаторов из трот-
тила на открытых разработках. Применяется в сухих и слабо
обводненных забоях.

Гранулиты АС-4В и АС-8В в отличие от гранулита АС-4 вместо
солярового масла в качестве органического горючего содержат
легкоплавкие нефтепродукты (парафины, воски). Средний размер
гранул 1,8—2 мм, прочность на раздавливание 3—8 Н на гранулу.
Благодаря покрытию гранул пленкой из гидрофобного нефтепро-
дукта могут находиться в виде сформированных зарядов в тече-
ние 2—4 ч в шпурах и скважинах с непроточной водой без потери
взрывчатых свойств. При пневмозаряжании уплотняются в шпу-
рах и скважинах несколько хуже, чем составы с жидкими нефте-
продуктами. Для снижения электризуемости и уменьшения пы-
ления при пневмозаряжании эти гранулиты рекомендуется увлаж-
нять из расчета 2—3 % воды.

Изготовление простейших гранулированных ВВ. Игданит гото-
вится на местах применения на специально разработанных комп-
лексах с механическим перемешиванием, работающих в сочета-
нии с механизированным заряжением (пневмозарядчиками)
[29, 55].

Гранулиты М и АС-4 изготавливаются на автоматизированных
заводских технологических потоках непрерывного действия так
называемого «холодного смешивания». Смешивание компонентов
осуществляется в барабанно-лопастых смесителях. При изготов-
лении водоустойчивых гранулитов марок АС-4В и АС-8В приме-
няется технология так называемого «горячего смешивания», при
которой гранулы селитры покрываются пленкой расплавленного
гидрофобного воскообразного состава и опудриваются тонкодис-
персным алюминием.

Таблица 8.13

Страна	Наименование ВВ (состав в процентах)	Плотность ВВ, г/см ³	Теплота взрыва, кДж/кг	Скорость детонации, км/с
Венгрия	Нафтенит Г-1 (аммиачная селитра 94,1; ДТ 4; уголь 1,9)	0,9	3860	2,6
	Нафтенит В-2 (аммиачная селитра 94; ДТ 4; графит 1,9)	0,9	3860	2,6
	Нафтенит А-4 (аммиачная селитра 92; ДТ 4; порошок алюминия 4)	0,9	4280	2,5
ГДР	Декамон (аммиачная селитра пористая 94,5; ДТ 5,5)	0,8	3880	3,2
	Алюмон (аммиачная селитра 92; ДТ 4; порошок алюминия 4)	0,9	4540	3,5
	Динамон (аммиачная селитра 89; масло 1; порошок алюминия 3; мука древесная 7)	0,82	4200	3,6
	Пермон-1 (аммиачная селитра 94; ДТ 6)	1,0	3860	3,5
Польша	Солетрол (аммиачная селитра 94,5; ДТ 5,5)	0,9	4200—4620	2,8
	Солетрол М (аммиачная селитра 90—95; масло 3—5; алюминий 2—5)	0,9	4200—4620	3,2
Югославия	Нитрол (аммиачная селитра 88—90; порошок угля и лигнита 5—7; ДТ или масло 2—3; натрийкарбометилцеллюлоза 1)	0,98—1,0	3790	3,0
ФРГ	Аммонекс (аммиачная селитра 93,2; ДТ 4; мука древесная 3)	0,85	3780	2,5
	Аммонекс I (аммиачная селитра пористая 94,5; ДТ или легкое нефтяное масло 5,5)	0,85	4070	2,5

Как высокоэкономичные промышленные ВВ простейшие гранулированные ВВ получили широкое применение во всех развитых горнодобывающих странах, как это видно из табл. 8.13 [52, 55].

В Канаде применяются простейшие ВВ амекс, а также андомет и метамит, содержащие алюминий, в США — нилит, пеллит, анол, а также алювиты, алюмексы, темприлы с содержанием алюминия и аустенит с твердым горючим, в Швеции — приллит, а также приллит с добавками алюминия или ферросилиция, во Франции — ферролит, нитрат фуэл, в Великобритании — аноприл, анобел, нобелит, гранулекс.

8.3.4. Гранулированные аммониты и граммоналы

Появление в ассортименте промышленных ВВ гранулированных составов, содержащих тротил (граммонитов, граммоналов и гранитолов), было обусловлено необходимостью создать непылящие, недорогие ВВ, пригодные для механизированного заряжания скважин. Увеличение диаметра скважин обеспечивало достаточную детонационную способность этих ВВ от промежуточных детонаторов и полноту взрыва. Специальными исследованиями экспериментально было доказано, что в скважинных зарядах диаметром 150 мм нет разницы в параметрах детонации тонкодисперсного аммиачно-селитренного ВВ и граммонита 79/21 того же химического состава, но содержащего неизмельченные гранулированные селитру и чешуйчатый тротил. ВВ обоих типов детонируют в этих условиях со скоростью около 4,5 км/с. Вместе с тем стоимость 1 т гранулированного продукта на 6 руб. меньше, чем порошкообразного.

Преимущества граммонита перед аммонитом — пониженное пыление, лучшая сыпучесть и меньшая слеживаемость — обуславливают целесообразность его применения для заряжания скважин вместо порошкообразного аммонита.

Благодаря наличию тротила в составе ВВ данного типа, который одновременно выполняет функции горючего и сенсibilизатора, гранулированные аммониты и аммоналы обладают той или иной степенью практической водоустойчивости, т. е. они способны взрываться в обводненных скважинах и производить работу рыхления и выброса раздробленной горной массы. Степень их водоустойчивости зависит от содержания тротила и структуры ВВ. В зависимости от этих факторов ВВ этого типа можно разделить на истинно и условно водоустойчивые.

К первым относятся ВВ, из которых селитра вымывается крайне медленно благодаря особой структуре гранул, обладающих малой пористостью и высокими гидрофобными свойствами (гранитолы, получаемые по эмульсионной технологии).

Ко вторым относятся ВВ, представляющие собой механические смеси гранулированной селитры с тротилом, иногда с добавками других горючих компонентов. К таким ВВ относятся граммониты. В них поверхность гранул селитры не защищена или слабо защищена от действия воды и селитра быстро растворяется в окружающей заряд воде. Тем не менее, благодаря наличию в ВВ тротила они взрываются с полным или частичным выделением тепла. Если столб воды над зарядом невелик и раствор селитры в основном сохраняется в объеме заряда между гранулами (чешуйкой) тротила, то при взрыве реализуется почти вся потенциальная энергия ВВ, так как селитра и в растворенном состоянии принимает участие в общем процессе взрыва. При значительном столбе воды в скважине или ее циркуляции селитра выбывает из

зоны взрыва и энергия взрыва приближается к энергии взрыва содержащегося в ВВ тротила.

До середины 80-х годов в СССР выпускалось несколько марок граммонитов, в которых варьировалось содержание тротила от 21 до 70 %. В настоящее время сохранилась лишь одна марка — граммонит 79/21, предназначенный для заряжания ограниченно обводненных скважин. Высокопроцентные по тротилу граммониты сняты с производства и заменены более эффективными гранитолами. Таким образом, гранулированные аммониты и аммоналы по своим эксплуатационным качествам не дублируют простейшие гранулированные ВВ, а имеют свою собственную область применения. Если простейшие ВВ выгодно применять для заряжания сухих скважин, то гранулированные аммониты и аммоналы — для обводненных скважин. Этим объясняется наличие в отечественном ассортименте промышленных гранулированных ВВ обоих типов и значительный промышленный выпуск каждого из них.

При водонаполнении граммонитов и граммоналов в результате заполнения пустот между гранулами раствором аммиачной селитры, так же как и в случае водонаполнения гранулированного тротила, снижается критический диаметр зарядов, повышается скорость детонации и другие ее параметры. Это вызвано, с одной стороны, повышением плотности ВВ и, с другой — инерционным действием массы наполнителя, препятствующего радиальному разлету веществ в детонационной волне. Водный наполнитель в данном случае действует как «внутренняя оболочка». Каждому составу свойственно некоторое оптимальное содержание воды, отвечающее максимальным параметрам детонации. Положительное влияние водонаполнения, как правило, усиливается для ВВ с отрицательным кислородным балансом.

Учитывая повышение энергетических и детонационных характеристик при заполнении межгранульного пространства водоустойчивых ВВ насыщенным раствором аммиачной селитры, на некоторых рудниках (КМА и др.) практикуют дополнительную засыпку аммиачной селитры в скважины, заряженные гранулолом или алюмотолом из расчета примерно 30 % массы ВВ.

Граммонит 79/21 представляет собой механическую смесь гранулированной селитры с чешуйчатым тротилом. Предназначается для частично обводненных скважин на открытых горных работах, а также нисходящих скважин на подземных работах и для создания камерных зарядов.

В зависимости от диаметра скважин граммонит сохраняет детонационную способность при содержании в нем воды до 20—25 %. Замечено, что при содержании воды до 10 % сохраняется достаточно высокая восприимчивость к детонационному импульсу, а эффективность взрывов возрастает по сравнению со взрывом сухого граммонита. По данным В. Б. Иоффе, оптимальное содержание воды составляет 10—12 %.

При смешивании составов типа граммонита 79/21 с водой происходят следующие процессы. Часть селитры растворяется в воде, и насыщенный раствор заполняет межгранульное пространство. При этом происходят усадка и уплотнение заряда и повышается вместимость скважины. Согласно измерениям, максимальная плотность около 1,3 г/см³ отвечает содержанию воды 11—12 % по массе. В этом случае теплота взрыва водосодержащей смеси уменьшается примерно на 770 кДж/кг по сравнению с сухим ВВ, но объемная энергия увеличивается на 1670 кДж/л. Таким образом при соответствующем увеличении удельного расхода ВВ эффективность взрывания при постоянном объеме бурения может быть увеличена. Критический диаметр заряда растет с увеличением содержания воды в составе вначале медленно, примерно до 10 % содержания воды, затем быстрее. Скорость детонации, более сильно зависящая от плотности ВВ, чем от теплоты взрыва, достигает наибольших значений при максимальной плотности ВВ, т. е. при содержании воды 11—12 %. Восприимчивость к начальному импульсу падает с увеличением содержания воды в составе ВВ.

По измерениям на электромагнитной установке показатель политропы продуктов детонации составляет от 1,8 до 2,0 для сухой смеси; 2,47 и 1,84 — при содержании воды соответственно 10 и 20 %. Продолжительность химической реакции в детонационной волне τ при водонаполнении уменьшается от 0,49 до 0,32 мкс, что близко к значениям τ для индивидуальных ВВ.

Для сильно обводненных скважин эффективное использование граммонита 79/21 обеспечивается путем предварительного осушения (откачки) скважин. При этом в зависимости от скорости притока воды ВВ либо засыпается непосредственно в скважину, либо в полиэтиленовую оболочку, помещенную в скважину. Применяется также после откачки воды нагнетание в скважину поверхностно-активного пенообразующего вещества, заполняющего трещины и препятствующего притоку воды. В условиях Криворожских карьеров с малым водообменом вполне себя оправдала засыпка граммонита в скважины, осушенные с помощью легких погружных насосов. В других случаях осушение скважин и использование граммонита 79/21 позволило снизить более чем на 45 % расход высоководоустойчивых ВВ типа гранулолома. При использовании щелевого понижения уровня грунтовых вод в забоях карьера пробуриванием водоотливных скважин по его бортам и на площадках рабочих горизонтов также получен высокий экономический эффект.

Гранитолы — водоустойчивые составы, в которых гидроизоляция водорастворимых компонентов достигается в результате образования эмульсий солей-окислителей в тротиле в присутствии поверхностно-активных веществ (пластификаторов и полимеров).

Таблица 8.14

Показатели	Время выдержки, сут				
	0	1	3	6	10
Бризантность, мм	25—26,5	24—24,5	23—23,5	23,0	22—22,5
Работоспособность, см ³	340—345	335—340	285—290	275—280	270—275

Заряд гранитола-1 в бумажной оболочке диаметром 60 мм и длиной 300 мм детонирует полностью при инициировании промежуточным детонатором аммонитом 6ЖВ массой 100 г.

Количество аммиачной селитры, растворяющейся при выдержке гранитола в воде в течение 4 ч, составляет 6,2 %. Гранитол-7А содержит в составе алюминиевый порошок. При выдержке гранитола-7А в воде в течение 4 ч растворяется 3 % аммиачной селитры.

После выдержки в воде в стальной трубе диаметром 40 мм в течение 10 сут и более гранитолы полностью детонируют (табл. 8.14).

Гранитолы характеризуются хорошей потопляемостью, и их укладку в скважину можно выполнять через столб воды. В отличие от механических смесей селитры и тротила (граммонита 79/21) при частичном растворении селитры заряды практически не уплотняются (не оседают), так как тротильные оболочки сохраняют жесткий каркас заряда в его первоначальном объеме.

Физико-химические и взрывчатые свойства граммонита и гранитолов приведены в табл. 8.15.

Таблица 8.15

Показатели	Граммонит 79/21	Гранитол-1	Гранитол-7А
Кислородный баланс, %	0,02	—34,4	—52
Теплота взрыва, кДж/кг	4330	3990	4620
Объем газов взрыва, л/кг	895	820	800
Полная идеальная работа взрыва, кДж/кг	3570	3280	3740
Работоспособность, см ³	360—370	320—340	400—420
Тротильный эквивалент по баллистическому маятнику	1,05	0,95	—
Бризантность в стальной кольце от шашки тротила, массой 5 г, мм	20—25	25—28	26—28
Скорость детонации, км/с	3,2—4,0	5,0—5,5*	5,0—5,3*
Критический диаметр, мм, в бумажной оболочке	40—60	40—60	40—50
Чувствительность к удару, %	12—24	4—12	12—24

* Скорость детонации в воде.

Изготовление (смешивание) граммонитов производится в барабанно-лопастном смесителе, гранитолов — в подогреваемых аппаратах, снабженных мешалкой.

8.3.5. Порошкообразные ВВ

Основной особенностью порошкообразных аммиачно-селитренных взрывчатых смесей является их тонкодисперсная структура, благодаря которой достигается более равномерное, чем у гранулированных ВВ, распределение компонентов по составу. Такая структура обуславливает и более высокую детонационную способность ВВ, что выражается в меньшем значении величин критического и предельного диаметров заряда. Критический диаметр аммонитов и аммоналов на порядок меньше, чем у граммонитов и граммоналов. Они значительно более чувствительны к детонационной импульсу, устойчивая детонация возбуждается в них от средств первичного инициирования (капсулей-детонаторов) и детонирующего шнура. Более чувствительны к механическим воздействиям, чем гранулированные ВВ.

Детонационная способность порошкообразных ВВ на основе аммиачной селитры зависит от их химического состава, размера частиц, влажности, пористости и плотности ВВ в заряде. Наиболее распространенными являются смеси аммиачной селитры с тротилом (аммониты), реже — с другими нитросоединениями, например динитронафталином. Иногда в состав аммонитов и аммоналов вводят горючие материалы (древесная, торфяная, злаковая мука и т. п.) как в целях частичной замены и экономии тротила, так и в качестве разрыхляющей добавки, предотвращающей слеживание.

В тех случаях, когда этого требуют условия эксплуатации, в состав ВВ вводят сенсibilизаторы (гексоген, тэн, нитроглицерин) для повышения их детонационной способности. Так, для изготовления прессованных шашек плотностью 1,5 г/см³, детонирующих со скоростью около 6 км/с, предназначавшихся для проведения выработок в крепчайших породах, в состав прессованного скального аммонита № 1 (выпускался до середины 80-х годов) вводили гексоген. При введении в аммониты и аммоналы 6—15 % гексогена или тэна критический диаметр уменьшается до 4—10 мм. Это позволяет применять ВВ в патронах уменьшенного диаметра, например для контурного взрывания. Отечественной промышленностью выпускается скальный аммонал № 3, содержащий гексоген в качестве сенсibilизатора. При диаметре патронов 24 мм он устойчиво детонирует в шнурах и передает детонацию на расстояние 3—5 см. Сенсibilизирующая способность тэна или гексогена возрастает с уменьшением размеров кристаллов (рис. 8.3). Широкое распространение получили порошкообразные аммиачно-

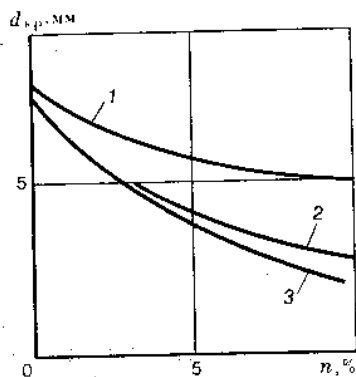


Рис. 8.3. Зависимость критического диаметра аммонита $d_{кр}$ от типа сенсибилизатора и его содержания n :

1 — ТЭН (300–50 мкм); 2 — ТЭН (до 50 мкм); 3 — нитроглицерин

селитренные взрывчатые смеси, сенсибилизированные нитроглицерином (детониты и др.).

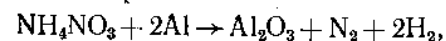
Известно, что чем мельче компоненты, тем более высокой детонационной способностью обладают аммониты. Вот почему управление процессом измельчения при подготовке компонентов и их смешиванием в соответствующих аппаратах является действенным средством регулирования детонационной способности аммонитов. Наиболее распространенными аппаратами, в которых происходит одновременное измельчение компонентов и их равномерное перемешивание, являются шаровые мельницы непрерывного или периодического действия. В ряде стран для этой цели пользуются бегунами.

Существенная зависимость детонационной способности от структуры вещества является специфической для аммонитов. Так, слеживание аммонитов в патронах приводит к резкому падению их детонационной способности, к полным или частичным отказам в шпурах, хотя в свежизготовленном состоянии аммониты имели почти утроенный запас по критическому диаметру ($d_{кр} = 12 \div 14$ мм). Причина столь сильного влияния слеживаемости, не сопровождающегося заметным уплотнением вещества, точно не определена. Можно предположить, что она связана с падением газопроницаемости массы вещества из-за образования новых кристаллических мостиков, от чего зависит возможность распространения детонации по механизму взрывного горения с прониканием микроструй горячих продуктов взрыва в поры между частицами ВВ и поджигания их с поверхности.

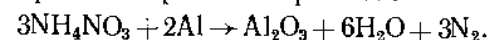
Само по себе влияние слеживаемости на детонационную способность аммонитов привело к жесткой регламентации влажности продукта, способствующей слеживанию, и температуры его перед патронированием и укупоркой. Вводили в селитру стабилизирующие добавки (фуксица, амаранта). Стабилизирующее действие оказывают также соли жирных кислот, содержащиеся в водостойчивой селитре марки ЖВК. Аммониты, изготовленные на этом сорте селитры, слеживаются в значительно меньшей мере, чем изготовленные на селитре без добавок. Установлено, что поверхностно-активные вещества повышают детонационную способность предохранительных аммонитов: критический диаметр уменьшается на 3–6 мм, возрастает скорость детонации.

Повышение детонационной способности аммонитов, приготовленных на селитре с добавками поверхностно-активных веществ, по-видимому, объясняется уменьшением механической прочности и увеличением пористости в результате адсорбции поверхностно-активных веществ на поверхности образующихся кристаллов селитры. Селитра с их добавкой легче разрушается при шаровой обработке в мельницах. Таким образом, наблюдаемое повышение детонационной способности аммонитов с добавкой поверхностно-активных веществ, видимо, объясняется повышенным содержанием в них мелких фракций селитры.

Наиболее высокими энергетическими показателями характеризуются смеси аммиачной селитры с алюминием. Стехиометрическая смесь, содержащая 40 % алюминия и рассчитанная на полное использование кислорода на окисление алюминия по реакции



выделяет при взрыве 9750 кДж/кг. При содержании 18,6 % алюминия на его окисление расходуется только избыточный кислород и в продуктах взрыва содержатся пары воды:



В этом случае выделяется 6700 кДж/кг.

Однако бинарные аммоналы в настоящее время не применяются из-за низкой детонационной способности, а алюминий вводится чаще всего в состав аммиачно-селитренных смесей, содержащих пирросоединения или нитроэферы, в качестве высокоэнергетической добавки в количестве 5–15 %. При этом теплота взрыва составов повышается на 15–20 %. Для придания порошкообразным ВВ водостойчивости в их состав вводят гидрофобные добавки. Их вводят в состав ВВ вместе с аммиачной селитрой (селитра марки ЖВК) или в виде отдельных компонентов (стеараты металлов, парафин). При этом механизм придания водостойчивых свойств порошкообразным аммиачно-селитренным смесям иной, чем гранулированным. Он основан не на полной гидроизоляции поверхности частиц селитры путем нанесения на нее пленки из водонерастворимых веществ, а на введении в массу ВВ частиц с сильно выраженными водоотталкивающими (гидрофобными) свойствами. При уплотнении ВВ с такими добавками (их массовая доля обычно не превышает нескольких процентов), например при формовании патронов, в нем создается пространственная решетка из гидрофобных частиц, которая препятствует прониканию воды по порам в глубь заряда. Неуплотненные порошкообразные ВВ с гидрофобными добавками обладают невысокой водостойчивостью, и применение их россыпью для заряжания обводненных скважин мало эффективно.

В 40–60-х годах порошкообразные аммониты и аммоналы, выпускавшиеся россыпью и в патронированном виде, составляли

основную массу промышленных ВВ в нашей стране. Однако в связи с широким внедрением механизированных способов транспортирования ВВ к забоям и заряжания зарядных емкостей, увеличением диаметра скважин, а также в целях повышения экономичности взрывания горных пород в обводненных забоях без применения средств внешней гидроизоляции зарядов порошкообразные аммиачно-селитренные смеси постепенно стали заменяться гранулированными (см. табл. 8.15).

Для механизированного транспортирования и заряжания порошкообразные ВВ мало пригодны из-за пыления, слеживаемости и относительно высокой чувствительности к механическим воздействиям.

Порошкообразные ВВ непригодны также для заряжания россыпью обводненных скважин, даже если они содержат гидрофобные добавки. Они плохо тонут в воде и, кроме того, благодаря большой удельной поверхности сильно флегматизируются водой. Их практическая водостойчивость сохраняется только у сформованных зарядов (патронов), в глубь которых вода трудно проникает из-за гидрофобных включений. Но применение патронированных ВВ для заряжания скважин большого диаметра значительно менее выгодно, чем, например, граммонитов методом свободной засыпки в скважину. По этим причинам в настоящее время аммониты и аммоналы преимущественно выпускаются в патронированном виде и предназначены для тех видов взрывных работ, где невозможно или трудно оперировать с непатронированными гранулированными или суспензионными ВВ (контурное взрывание, специальные виды взрывных работ в промышленности, сельском хозяйстве, при геологоразведочных работах, других маломасштабных взрывных работах).

Патронированные аммониты и аммоналы широко применяются в качестве промежуточных зарядов (патронов-боевиков) для вторичного инициирования гранулированных и водосодержащих ВВ.

Все отечественные марки порошкообразных аммонитов и аммоналов в настоящее время выпускают только в водостойчивом варианте. Их основой служит водостойчивая селитра марки ЖВК.

Аммонит 6ЖВ представляет собой бинарную смесь аммиачной селитры марки ЖВК с тротилом. В аммонал М-10 добавлен алюминиевый порошок, а в аммонал скальный 3 помимо алюминия добавлен гексоген.

Аммонит 6ЖВ и аммонал М-10 выпускаются как в виде патронов диаметром от 32 до 120 мм, так и в виде порошка, расфасованного в бумажные плототканевые мешки.

В табл. 8.16 приведены свойства некоторых порошкообразных аммиачно-селитренных взрывчатых смесей отечественного ассортимента.

Таблица 8.16

Показатели	Аммонит 6ЖВ	Аммоналы	
		М-10	скальный 3
Кислородный баланс, %	-0,53	-5,8	-0,78
Теплота взрыва, кДж/кг	4330	5290	5710
Объем газов взрыва, л/кг	895	780	810
Полная идеальная работа взрыва, кДж/кг	3470	4450	4670
Работоспособность, см ²	360—380	430—440	450—480
Тротиловый эквивалент по баллистическому маятнику	1,08	1,08	1,12
Бризантность, мм	14—16	15—18	18—20
Скорость детонации, км/с	3,6—4,8	4—4,5	4,2—4,6
Критический диаметр при насыпной плотности, мм	10—13	10—12	8—10
Передача детонации между патронами, см:			
диаметром 27—28 мм	—	—	6—8
диаметром 36—37 мм	10—13	10—12	8—12
после выдержки в воде диаметром 36—37 мм	5—9	4—6	6—8
Чувствительность:			
к удару, %	16—32	24—36	40—44
к трению с примесью 5 % песка, МПа	233,5	193,6	132,0

За рубежом широко представлены простые бинарные смеси селитры с тротилом в различном соотношении (табл. 8.17) [52, 55, 69].

В Югославии выпускаются аммиачно-селитренные смеси, содержащие в качестве горючего алюминий (4—6 %) и древесную муку.

В Венгрии производят и применяют порошкообразные пакситы, в Румынии — нитраммониты, содержащие от 1 до 15 % высококалорийного алюминия.

Во Франции в качестве гидрофобизирующего аммониты компонента применяют стеараты.

В Болгарии в аммиачно-селитренные составы вводят в качестве разрыхлителей уголь или древесную муку (балканит).

Болгарский аммонит ФС в качестве горючего содержит ферросилиций и характеризуется плотностью 1,1 г/см³, теплотой взрыва 6130 кДж/кг, скоростью детонации 3,5 км/с и критическим диаметром 9 мм.

Смешивание порошкообразных аммиачно-селитренных взрывчатых смесей осуществляют в шаровых мельницах. Для смешивания промежуточной аммонитной массы в производстве скального аммонала используются те же шаровые мельницы, дополнительное смешивание с гексогеном производят без мелющих тел в барабанно-лопастных смесителях. Патронирование аммиачно-селит-

Таблица 8.17

Страна	Наименование ВВ (состав в процентах)	Плотность, ВВ, г/см ³	Температура норм., КДж/кг	Скорость детонации, км/с	Передача детонации на расстоянии, см	Примечание
Болгария	Перник-1 (аммиачная селитра 92, тротил 8)	1,0	2710	3,1	2—4	Кислородный баланс 12,5 %; неводоустойчив, критический диаметр 10 мм
	Перник-2 (аммиачная селитра 89, тротил 11)	1,0	3110	3,0	2—5	Кислородный баланс 9,85; критический диаметр 10 мм
	Аммонит 6 (аммиачная селитра 79, тротил 21)	1,0	4300	3,6	6	Кислородный баланс 0,25; критический диаметр 9 мм
Чехословакия	Пермонал В-10 (аммиачная селитра 82,4, тротил 10,6, алюминий 6, стеарат 0,45, масло парафиновое 0,55)	1,05	5040	4,4	7	Водоустойчив, работоспособность 440 мл
Польша	Аммонит 0 (аммиачная селитра 90, тротил 10)	1,0	2980	3,0	3—4	Работоспособность 330 мл
	Аммонит 2 (аммиачная селитра 84,8, тротил 11,5, динитроглицерин 2, мука древесная 1,5)	1,0	4030	3,5	4—6	Работоспособность 360 мл
	Аммонит скальный 5 (аммиачная селитра 83,5, тротил 7,5, динитроглицерин 2, алюминий 7)	1,05	4980	4,0	6—7	Работоспособность 400 мл
ФРГ	Аммонит (аммиачная селитра 82, тротил 16, мука древесная 2)	1,05	4330	4,0	—	—
Франция	Нитрат 0 (аммиачная селитра 79, тротил 21)	1,0	4330	4,0	—	Работоспособность 360 мл
	Нитрат 40R (аммиачная селитра 81,5, тротил 15,8, мука древесная 1,7, стеарат)	1,1	4120	4,7	—	Работоспособность 360 мл
	Нитрат 31R (аммиачная селитра 79, пентолит 11,5, алюминий 8,5, стеарат 1,0)	1,15	5380	4,3	—	Работоспособность 400 мл
	Нитрат 19 (аммиачная селитра 87,9, тротил 5,5, мука древесная 4,1)	1,0	3780	4,0	—	Работоспособность 340 мл
	Динафталит (аммиачная селитра 87,4, динитроафталин 12,6)	1,0	4120	4,2	—	Работоспособность 330 мл
Великобритания	Т-паулер (аммиачная селитра 82, тротил 18)	1,0	4010	4,8	—	—
	Аммонал (аммиачная селитра 83, тротил 12, алюминий 5)	1,1	4620	4,9	—	—

ренных взрывчатых смесей мелкого калибра осуществляют на специальных патронировочных автоматах, крупного калибра — на станках для наполнения гильз методом вибрации. Содержащий тексоген скальный аммонал патронируют методом вибрации.

8.3.6. Водосодержащие ВВ

Заполнение пустот между частицами сыпучих ВВ жидкостью способствует повышению плотности ВВ, придает им текучесть, пластичность и другие структурно-механические свойства. В качестве жидкого наполнителя и пластифицирующего материала обычно используют водные гели, а содержащие их ВВ называют водосодержащими.

Водонаполнение гранулированных ВВ способствует также снижению критического диаметра, повышению скорости детонации, бризантного действия взрыва и других параметров детонации. Вместе с тем водный пластификатор может флегматизировать ВВ. Поэтому подбирают оптимальное соотношение между твердой фазой и жидким наполнителем, определяемое требуемыми реологическими свойствами, гранулометрическим и химическим составом твердой фазы.

Вода как наполнитель промышленных ВВ имеет ряд достоинств. Вследствие растворения в ней аммиачной селитры пространство между частицами ВВ заполняется насыщенным раствором с плотностью около 1,3 г/см³, благодаря чему при содержании воды 5—15 % средняя плотность водосодержащих ВВ (ВВВ) достигает 1,5 г/см³, а при содержании в составе водорастворимых нитратов щелочных и щелочноземельных металлов — 1,6 г/см³ при начальной (насыпной) плотности ВВ 0,8—0,9 г/см³. Кроме того, вода снижает чувствительность состава, придает ему текучесть или пластичность, появляется возможность механизированной перекачки низковязких ВВВ по трубопроводам и шлангам с помощью насосов различной конструкции.

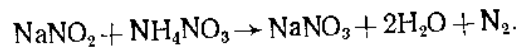
Недостатком воды как наполнителя является ее химическая инертность, поэтому в составах без металлов она служит балластом. Часть тепла, выделяющегося при взрыве, расходуется на прогрев воды и ее испарение. Причем к моменту завершения механической работы продукты взрыва сохраняют температуру выше 100 °С и возврата тепла вследствие конденсации паров не происходит. Некоторое повышение термодинамического КПД взрыва достигается в результате обогащения продуктов взрыва водяными парами, так как средняя теплоемкость продуктов взрыва уменьшается и увеличивается общий объем газов, отнесенный к единице массы ВВ. Но за счет этого потери тепла компенсируются неполностью. Так, работа взрыва водосодержащих аммонитов с нулевым кислородным балансом на единицу их массы и в пересчете на единицу массы сухого вещества меньше, чем тех же ВВ

в сухом состоянии. Для аммоналов термодинамический выигрыш от обогащения продуктов взрыва водяными парами больше.

Известны водосодержащие ВВ различного химического состава и реологических свойств — от жидкотекучих до густых резиноподобных. Простейшие композиции таких ВВ представлены смесью аммиачной селитры и тротила или алюминия и водного геля. Более сложные составы содержат одновременно тротил и алюминий, гранулированный сплав тротила с гексогеном или тэном, нитраты щелочных и щелочноземельных металлов, антифризы и др.

Благоприятным с энергетической точки зрения является введение в водосодержащие ВВ (акваналы) алюминия. В этом случае вода по отношению к алюминию является окислителем. Теплота реакции взаимодействия алюминия с водой 8710 кДж/кг, а реакции окисления алюминия аммиачной селитрой 9750 кДж/кг. Несмотря на эти достоинства простейших водосодержащих аммоналов, не содержащих взрывчатый сенсibilизатор, их применение ограничено в основном из-за низкой детонационной способности. Составы подобного типа сенсibilизируют газовыми пузырьками и применением высокодисперсной алюминиевой пудры. Из отечественных сортов пудры высокую детонационную способность акваналов обеспечивает алюминиевая пудра марок ПАК-3 и ПАК-4, свойства которых приведены в табл. 8.18. Близкие к ним характеристики имеет пудра марок ПАП-1 и ПАП-2.

Насыщение акваналов газовыми пузырьками производят несколькими способами. Простейший из них состоит в механическом запеснении пузырьков воздуха в массу ВВ при интенсивном перемешивании водного раствора аммиачной селитры с алюминиевой пудрой или порошком. Этот процесс называется аэрацией. Другой способ состоит в том, что в состав ВВВ вносят так называемые порофоры — вещества, способные взаимодействовать с каким-либо из компонентов ВВ с образованием газообразных продуктов реакции, например нитрит натрия, который взаимодействует с нитратом аммония с выделением газообразного азота по реакции



Практикуют и введение в состав ВВ полых тонкостенных шариков из какого-либо полимера или стекла, заполненных воздухом (так называемые микросферы). Первые два способа более экономичны, но получаемые ВВВ менее физически стабильны. При хранении и температурных изменениях газовые включения могут диффундировать в атмосферу, в результате чего детонационная способность таких ВВ падает.

Механизм сенсibilизации ВВВ газовыми пузырьками сводится к тому, что при адиабатическом сжатии их в детонационной волне они сильно разогреваются и служат «горячими точками», способствующими распространению детонации по заряду.

Таблица 8.18

Марка	Удельная поверхность, см ² /г	Размер частиц, мкм	Активность, %	Форма частиц	Метод получения
П о р о ш к и					
ПА-1	350	60—65	—	—	—
ПА-2	400	50—55	—	—	—
ПА-3	700	30—31	—	—	—
ПА-4	1 000—1 100	20—22	91	Несправильная	Пulверизация расплавленного алюминия
ПА-5	1 100	—	99	То же	То же
АСД-1	1 500—1 800	15	99,2—99,5	Сферическая	Распыление инертным газом
АСД-1м	2 200—2 500	10	99,0	То же	Промежуточный продукт порошка АСД-1
АСД-2	3 600—3 800	5	99	»	Распыление инертным газом
П у д р а					
ПП-1	3 540	6—7	90	Лепестковая	Размол алюминиевого пulверизата в шаровых мельницах
ПП-2	4 000	5—6	90	То же	То же
ПП-3	4 550	4—5	90	»	»
ПП-4	4 400—6 000	3—4	90	»	»
ПАК-3	25 000	0,8—0,9			
ПАК-4	30 000	0,7—0,8			

Скорость детонации водосодержащих аммоналов повышается с уменьшением размеров частиц селитры и алюминия. Оптимальное по детонационным характеристикам содержание раствора селитры возрастает с увеличением содержания алюминия в составе ВВВ. Избыток раствора приводит к снижению детонационной способности ВВ.

Согласно исследованиям В. Э. Анникова и Б. Н. Кондрикова, критический диаметр акванала, содержащего 20 % пудры марки ПАК-3, при плотности ВВ 1,2 г/см³ составил 5 мм. Удовлетворительной детонационной способностью характеризуются также составы, в которых часть мелкодисперсной пудры заменена на более грубый порошок ПА-3 или ПА-4.

Установлено, что критический диаметр детонации обратно пропорционален квадрату произведения удельной поверхности дисперсного алюминия на коэффициент растворимости окислителя.

Первые водосодержащие ВВ, сенсibilизированные тротилом, были разработаны в 1957 г. М. Куком [37] и сразу же получили

промышленное применение благодаря простоте изготовления и достаточно хорошей воспроизводимости составов. В отличие от аэрированных ВВ эти ВВ можно эффективно применять в глубоких скважинах и при подводном взрывании, т. е. при повышенном гидростатическом давлении.

Наиболее распространенным сенсибилизатором в составе ВВВ является тротил, реже — смесь тротила с гексогеном.

По данным В. Б. Иоффе, заметное сенсибилизирующее действие в сочетании с тротилом оказывают тяжелые добавки — сульфат бария, вольфрам, цинк и другие. Перспективными следует признать водорастворимые ВВ — сенсибилизаторы, такие как нитраты органических аминов и другие. В Швеции, например, для этой цели используют бистринитроэтилмочевину.

Структура и реологические свойства ВВВ зависят от содержания в них водного геля, его вязкости, определяемой природой и количеством загустителя, водорастворимых нитратов и других веществ, от технологии приготовления и ряда других факторов.

Гелеобразующими агентами являются набухающие в воде синтетические или природные полимеры, в частности, некоторые полисахариды растительного происхождения (гуаргам) в различных модификациях, соли карбоксиметилцеллюлозы, полиакриламид и др. Водные гели являются не только наполнителем и пластификатором, но также предотвращают или замедляют вымывание селитры и других водорастворимых солей из ВВ при зарядании обводненных скважин, придают ВВ пластичность, в отдельных случаях — липкость и другие полезные эксплуатационные качества. В зависимости от способа приготовления ВВВ требования к загустителям могут быть различными.

Большое значение при выборе загустителя как компонента ВВ имеет кинетика образования коллоидного раствора. При изготовлении низковязких текучих ВВВ (slurry) на месте применения необходима быстрая желатинизация. В гелеобразных ВВВ, которые изготавливаются в заводских условиях, процесс загущения может быть более длительным. Он начинается с образования суспензии загустителя и образования вязкого коллоидного раствора. Процесс набухания связан с проникновением молекул растворителя в полимер. Молекулы растворителя, проникая в пространство между звеньями высокомолекулярного загустителя, раздвигают цепи микромолекул, что приводит к набуханию образца. Набухание переходит в собственно растворение или неограниченное набухание в том случае, если между макромолекулярными цепями отсутствуют поперечные химические связи. Разделение цепей ослабляет силы межмолекулярного взаимодействия и позволяет макромолекулам диффундировать в растворитель. Для образования прочных структур с поперечными связями вводятся специальные сшивающие агенты, обычно в виде солей металлов с переменной валентностью (хрома и др.).

Водозащитные свойства гелей зависят от природы и количества загустителя и сшивающего агента, определяющих вязкость геля и его стабильность.

Содержание загустителя в ВВВ обычно составляет 0,7—1,5 %, воды 5—15 %. Влияние воды на вязкость составов выражается следующими цифрами:

Содержание воды, %	10	12	15	18	20	23
Вязкость на приборе Баха, Па·с	>80	79	45	2,1	2	<2

Результаты определения вязкости водных насыщенных и 40 %-ных растворов аммиачной селитры в вискозиметре Геллера в зависимости от содержания загустителей, выполненные Н. В. Селивановой, приведены на рис. 8.4. ВВВ с загустителем и сшивкой характеризуются более высокими водоустойчивыми свойствами по сравнению с составами без сшивки (рис. 8.5).

Для ВВВ с алюминием помимо физической необходимо обеспечить также химическую стабильность составов с учетом способности алюминия взаимодействовать с водой, особенно в присутствии щелочей. Исследования в этой области выполнены Б. Я. Светловым, Р. Н. Солнцева, А. Г. Павловым.

Имеются два эффективных способа стабилизации: гидроизоляция и пассивирование частиц алюминия. Надежная гидроизоляция ВВ, содержащих тротил и алюминий одновременно, достигается совместной грануляцией этих компонентов из суспензии алюминиевого порошка в расплавленном тротиле по технологии получения алюмотола. Пассивирование достигается образованием на поверхности частиц алюминия плотной и прочной окисной пленки при введении в состав ВВ небольших количеств (до 2,5 %) солей хромовой кислоты, нитритов и других водорастворимых активных окислителей. Стабилизации пленки способствует добавка фосфатов. Для повышения химической стабильности ВВВ применяют также ингибированную алюминиевую пудру.

Активность алюминия возрастает с увеличением удельной поверхности частиц. Замечено, что скорость взаимодействия пудры алюминия ПП-4 с горячей водой примерно вдвое выше, чем порошка ПА-1. Поэтому в ВВВ типа акваналов вводят преимущественно порошки алюминия с наиболее крупными частицами. Раствор загустителя не должен давать щелочную реакцию, так как щелочность способствует взаимодействию алюминия с водой. Растворы аммиачной селитры с гидролизной кислотностью ($\text{pH} < 7$) более стойки по отношению к алюминию, чем вода.

В состав ВВВ в качестве окислителей помимо аммиачной селитры могут входить также нитраты щелочных и щелочноземельных металлов и другие соединения, например перхлораты.

Нитраты металлов повышают плотность ВВВ. Так, например, плотность металлизированного акватола в зависимости от соотноше-

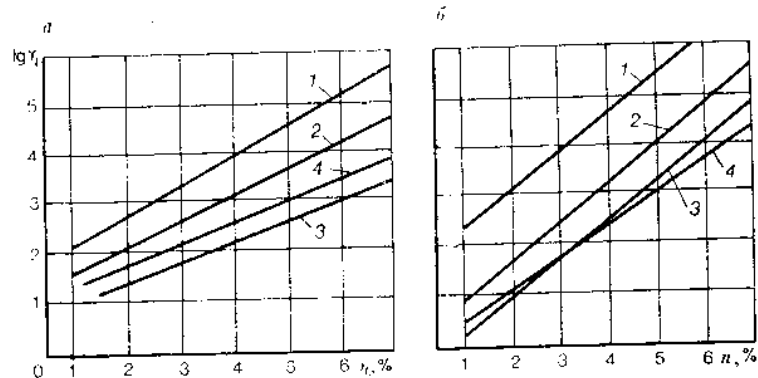


Рис. 8.4. Зависимость вязкости растворов аммиачной селитры от содержания загустителя (η , Па·с $\times 10^{-1}$):
 а — насыщенных водных растворов; б — 40%-ых растворов; 1 — аммоний КМЦ; 2 — натрий КМЦ очищенная; 3 — полиакриламид; 4 — натрий КМЦ техническая

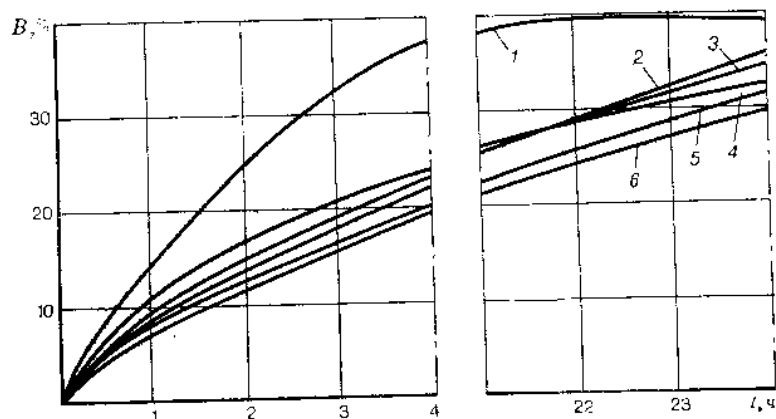


Рис. 8.5. Зависимость водостойкости B образцов ВВ с 2% загустителя от времени t :
 1 — полиакриламид; 2 — то же, со сшивкой; 3 — аммоний КМЦ; 4 — натрий КМЦ со сшивкой; 5 — натрий КМЦ; 6 — аммоний КМЦ со сшивкой

ния в составе ВВ аммиачной и натриевой селитры меняется следующим образом:

Аммиачная селитра, %	...	46,5	26,5	16,5	0
Натриевая селитра, %	...	0	20	30	46,5
Плотность, г/см ³	...	1,36	1,48	1,55	1,63

Недостатком нитратов металлов как окислителей является образование благодаря им твердых продуктов взрыва (окислов, гидроокисей или карбонатов металлов), что ухудшает термодина-

мические характеристики продуктов взрыва. К недостаткам перхлоратных солей можно отнести их меньшую, чем у нитратов, растворимость в воде, к достоинствам — меньшую зависимость растворимости от температуры, большую энергоемкость, благодаря чему повышаются энергетические характеристики ВВ по сравнению с аналогами, содержащими аммиачную селитру или другие нитраты.

Увеличение вязкости и потеря пластичности при низких температурах ограничивают область применения ВВВ. В связи с этим снижение температуры их затвердевания является одной из важных задач совершенствования ВВВ.

Одним из известных путей снижения температуры замерзания водных растворов является введение в их состав антифризов и подбор окислителей и их сочетаний с низкой температурой затвердевания водных растворов. К антифризам, используемым в составе ВВВ, предъявляют следующие требования: высокая растворимость в воде и в насыщенных растворах окислителей, низкая температура затвердевания антифриза и его смесей с растворами солей, невысокий отрицательный кислородный баланс, отсутствие растворяющего действия по отношению к основному взрывчатому компоненту, высокая температура кипения, низкая летучесть, невысокая вязкость антифриза и его смеси с водными растворами солей, особенно при понижении температуры. Перечисленным требованиям могут удовлетворять низкомолекулярные соединения типа амидов низших кислот и др.

Для обеспечения достаточно низкой температуры затвердевания жидкой фазы содержание антифриза в насыщенном растворе окислителя должно составлять 20—30 %.

При введении в состав ВВВ 10—30 % кальциевой селитры температура замерзания состава снижается до -58 °С. Еще более сильное влияние оказывают хлориды кальция и магния. При их введении в состав в количестве 10 % температура замерзания аквазола понижается до -46 °С, однако эти соли заметно флегматизируют ВВ. Натриевая селитра и формамид снижают температуру замерзания аквазолов примерно до того же уровня, что и этилцеллозольв, но формамид несколько снижает детонационные параметры аквазола.

Во всех случаях с понижением температуры растворосодержащего ВВ его восприимчивость к детонации падает, что связано с увеличением вязкости вещества.

С понижением температуры детонационная способность ВВВ снижается, что объясняется, видимо, повышением их вязкости. Критерием детонационной способности азрированных аквазолов служила предельная плотность, при которой наблюдалась устойчивая детонация в заряде диаметром 18—19 мм и длиной 120 мм при инициировании электродетонатором. Заряды помещались в стеклянные оболочки с толщиной стенки 1 мм. Азрированные

состав, содержащий в качестве окислителя аммиачную селитру, при комнатной температуре устойчиво детонировал при плотности до $1,24 \text{ г/см}^3$, при уменьшении начальной температуры критическая плотность снижалась.

При температуре -5°C критическая плотность составляла $1,11 \text{ г/см}^3$, при -10°C в заряде плотностью $1,11 \text{ г/см}^3$ детонация не возбуждалась.

Замена аммиачной селитры на нитрат натрия повысила критическую плотность при температуре 19°C до $1,3 \text{ г/см}^3$. Влияние температуры в этом случае на критическую плотность значительно слабее. Состав устойчиво детонировал при температуре до -30°C , критическая плотность при этой температуре составила $1,15 \text{ г/см}^3$.

Сенсибилизирующее действие нитрата натрия при пониженной температуре проявляется за счет увеличения доли окислителя, находящегося в растворе, так как совместная растворимость смеси нитратов натрия и аммония выше, чем одного нитрата аммония. Такое влияние связано с тем, что при детонации в реакции принимает участие окислитель, растворенный в воде. Определяющую роль в этом случае играет весь кислород, содержащийся в окислителе.

Здесь имеет место аналогия с индивидуальными пористыми ВВ, у которых чувствительность к ударной волне тем больше, чем больше кислорода они содержат.

Давление инициирования от плотности выражается линейной зависимостью.

Чем больше кислорода в составе водонаполненной смеси, тем меньше давление инициирования.

ВВВ без пузырьков газа мало восприимчивы к детонационному импульсу и требуют дополнительного детонатора. По механизму возбуждения и распространения детонации ВВВ близки к жидким ВВ. Их применяют как на открытых работах (акватола, аквапалы, карбатола), так и на подземных (аквапалы). ВВВ для открытых работ имеют произвольный кислородный баланс, для подземных — близкий к нулевому.

Важными эксплуатационными качествами акватолов и карбатолов является их текучесть и физическая стабильность, которые в известной мере противоречивы. Высокая текучесть необходима для механизированного заряжания скважин закачкой по шлангам от передвижного бункера-накопителя (зарядной машины). Стабильность важна для сохранения химического состава и свойств ВВ в процессе заряжания в обводненную скважину. С уменьшением вязкости, как правило, физическая стабильность падает; при погружении массы ВВВ через столб воды происходит частичное расслоение и вымывание селитры. Поэтому ВВВ заряжают не свободным выливом сверху, а опускают шланг на дно скважины, т. е. под столб воды, что при глубоких скважинах создает ряд трудностей. Оптимальными являются такие составы, которые по-

зволяют производить зарядание по шлангу сверху, т. е. на столб воды. Достижение этого качества во многом зависит от свойств применяемых загустителей.

На Балхашском ГМК совместно с ИПКОН АН СССР создан промышленный комплекс для приготовления и зарядания скважин акваатолами. С их применением плотность зарядания достигает $1,35-1,5 \text{ г/см}^3$, что существенно повышает эффективность взрывных работ.

При разработке ВВВ для подземных работ приходится считаться с ограничением по кислородному балансу; а также меньшим диаметром свайн, т. е. применять ВВВ с меньшими значениями $d_{кр}$ и $d_{пр}$.

Основные преимущества ВВВ перед гранулированными и порошкообразными ВВ состоят в их высокой плотности ($1,3-1,5 \text{ г/см}^3$), водоустойчивости, способности целиком заполнять зарядные емкости без принудительного уплотнения и безопасности в обращении, определяемой низкой чувствительностью к механическим и тепловым воздействиям. ВВВ позволяют достигать концентрации энергии в зарядах в $1,8-2$ раза выше, чем патронированные ВВ, и получать соответственно высокие результаты взрывания весьма крепких пород. Вместе с тем более сложный рецептурный состав и технология изготовления, меньшая физическая стабильность удорожают их сравнительно с гранулированными ВВ. По этим причинам ВВВ в СССР и других странах применяются в значительно меньших объемах, чем гранулированные аммиачно-селитренные взрывчатые смеси. Так, в 1980 г. их было изготовлено и использовано в СССР всего $9,4\%$ общего годового выпуска промышленных ВВ.

Сдерживающими применение ВВВ факторами являются следующие:

многокомпонентность составов и наличие в них импортных веществ (гуаргам),

сложность технологического процесса изготовления,

высокая стоимость составов (в $5-6$ раз выше, чем АС—ДТ),

низкая чувствительность к инициирующему импульсу.

Дальнейшее совершенствование ВВВ привело к созданию составов, не содержащих тротила и алюминия, а сенсибилизированных только горючими добавками (нефтепродуктами и др.), которыми либо пропитывают пористые гранулы селитры, входящие в состав твердой фазы водной суспензии, либо эмульгируют их в водном растворе селитры, получая прямые эмульсии типа «масло в воде» или обратные типа «вода в масле». Их можно использовать для наполнения твердыми компонентами. Таким образом, появился новый тип ВВВ — эмульсионные ВВ.

Водосодержащие ВВ для открытых работ. Акватола — растворонаполненные ВВ, представляющие собой плотные переслаивающиеся суспензии, твердой фазой которых служит смесь

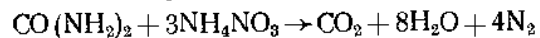
гранулированной аммиачной селитры с гранулотолом или алюмотолом. Жидкая фаза суспензий представлена насыщенным раствором аммиачной селитры, целиком заполняющим межгранульное пространство в заряде ВВ. Ранее эти составы были известны под названием ифзаритов или горячельющихся ВВ марки ГЛТ. Наиболее распространен акватол Т-20, содержащий 20 % гранулотола или алюмотола. Имеется несколько его модификаций.

Для придания водоустойчивости раствор аммиачной селитры загущается солью карбоксиметилцеллюлозы и дополнительно его структурируют сшивающими агентами. В акватоле Т-20 содержание воды в жидкой фазе составляет 20 %. ВВ предназначено для сухих и обводненных скважин диаметром более 100 мм, устойчиво детонирует от стандартной шашки-детонатора. При изготовлении и зарядании акватолов марки Т-20 применяются смешительно-зарядные машины. Их можно получать также на основе готовых сухих смесей совмещением с насыщенным раствором селитры. При введении сшивки образуется гель в течение 3—5 мин.

Карбатолы — литьевые ВВ, отвердевающие после загрузки в скважину. Их изготавливают из низкоплавкой эвтектики аммиачной селитры и карбамида, сенсibilизированной тротилом, которая по своей плотности мало отличается от плотности гранул тротила, что делает суспензию нерасплаивающейся до затвердевания без введения загустителя. Эвтектическая смесь плавится и содержится в расплавленном состоянии до момента смешивания при температуре ниже плавления тротила. Использование низкоплавкой эвтектики упрощает изготовление карбатолов и повышает их безопасность в полевых условиях.

Карбатолы характеризуются высокой плотностью, в их состав вводится 3—5 % воды для образования раствора. Иногда они содержат в качестве структурообразователя соли карбоксиметилцеллюлозы с бихроматом, используемым для сшивки.

Взрывчатое разложение стехиометрической смеси карбамид — селитра происходит по уравнению



с выделением 3810 кДж/кг тепла и образованием 968 л/кг газов.

Для обеспечения устойчивой детонации скважинных зарядов больших диаметров (200—300 мм) требуется применение промежуточных детонаторов массой не менее 400 г.

В карбатоле ГЛ-15Т сенсibilизатором служит гранулотол; карбатол ГЛ-10В наряду с гранулотолом содержит алюминиевый порошок, который в процессе изготовления эвтектической смеси пассивируется, что обеспечивает ему необходимую химическую стабильность. Карбатол ФТ-10 в качестве высококалорийного и недорогого металла содержит ферросилиций.

Заряды карбатолов могут находиться в скважине с непроточной водой 20—30 сут. Обводненные скважины заряжают закачи-

ванием смеси под столб воды. В мерзлых породах карбатолами можно заряжать сразу после бурения.

Карбатолы практически не чувствительны к механическому воздействию на всех стадиях приготовления и зарядания, в том числе при повышенной температуре (до 200 °С). По удельному электрическому сопротивлению карбатолы относятся к полупроводникам и имеют низкую чувствительность к электрической искре при действии на образцы искрового потока различной энергии, поэтому принимать какие-либо меры по защите от статического электричества на механизированных комплексах в этом случае нет необходимости. Они также не чувствительны к лучу огня огнестойкого шнура при непосредственном соприкосновении с пламенем [14].

Карбатолы изготавливаются на месте применения из отдельных компонентов.

Акванал А-10—ВВВ, содержащее алюминиевый порошок или менее дорогостоящий металлический компонент — силикоалюминий, и представляет собой смесь металлизированной сухой фазы с насыщенным водным раствором аммиачной селитры. Акванал А-10 изготавливается на месте применения и предназначается для ведения взрывных работ на дневной поверхности.

Водосодержащие ВВ для подземных работ. Акванит АРЗ-8Н (акванит раздельного зарядания), предназначенный к применению в подземных условиях, состоит из смеси аммиачной селитры, алюминиевого порошка и водорастворимого загустителя. Изготавливается по эмульсионной технологии и выпускается в виде гранул, водосовмещается и пластифицируется в процессе пневмозарядания с использованием зарядчиков и оросительных насадок. Таким образом, в акваните АРЗ-8Н сочетаются достоинства и гранулированных, и водосодержащих ВВ.

Как гранулированное ВВ он легко транспортируется и заряжается с помощью пневмозарядчика, а в смоченном и пластифицированном состоянии хорошо уплотняется в шпурах и скважинах умеренного сечения.

При введении воды в процессе пневмозарядания гранулы акванита АРЗ-8Н пластифицируются и уплотняются в заряде. Смачивание акванита АРЗ-8Н при зарядании устраняет его пыление и электризацию.

В табл. 8.19 приведены основные показатели водосодержащих ВВ.

ВВВ широко распространены и за рубежом (табл. 8.20), их свойства близки к свойствам отечественных водосодержащих ВВ [25, 65].

ВВВ в Венгрии представлены габбровитами, содержащими аммиачную селитру и тротил. По физическому состоянию они подразделяются на пластичные (плотность 1,4—1,6 г/см³) и суспензионные (плотность 1,3—1,4 г/м³) составы, характеризующиеся

Показатели	Акагол Т-20	Карбатола			Аканит АРЗ-8Н	Аканит А.10
		ГЛ-10В	ГЛ-15Т	ФТ-10		
Кислородный баланс, %	-1,2—1,6	-21,4	-9,6	—	-1,3	-1,5
Теплота взрыва, кДж/кг	3310—3690	5680	3430	5380	5040	4980
Плотность, г/см ³	1,35—1,4	1,55—1,6	1,50—1,55	1,6—1,65	0,8—0,85**	1,5—1,55
Объемная энергия, кДж/л	4450—5200	8810—9200	5130—5300	8600—8870	6040—6550	7460—7710
Работоспособность, см ³	—	450—470	320—350	—	400—410	—
Полная идеальная работа взрыва, кДж/кг	2790	4430	2980	4490	4140	4200
Объем газов, л/кг	987	844	946	720	822	812
Бризантность в стальном кольце, мм	24—26	28—30	24—26	24—26	22—25	—
Критический диаметр, мм	100—120	140—160	120—150	250—280 (80—100)*	90—100 (40—45)*	280—300 (80—100)*
Скорость детонации, км/с	4,5—5,0	4,5—5,0	4,5—4,8	4,0—4,2	2,8—3,5	4,0—4,2
Чувствительность к удару, %	0—4	12—24	4—12	12—24	0—4	12—24
Минимальный инициирующий импульс, г тротила	40—60	40—50	—	—	—	—

* Для патронов ВВ в металлической оболочке.

** Плотность после водонаполнения составляет 1,25—1,3 г/см³.

Таблица 8.20

Страна	Наименование ВВ (состав в процентах)	Физическое состояние	Плотность, г/см ³	Теплота взрыва, кДж/кг	Скорость детонации, км/с	Примечание
ФРГ	Хабластит 10: жидкая фаза (аммиачная селитра 40, калийная селитра 32,7, вода 15,5, этиленгликоль 5, прочие добавки 1,4); твердая фаза (крахмал, гипсонит 7,3, пилментная эламинированная пудра 1,7, нитрат натрия и др.)	Пластинчатый в патронах или пастообразный в контейнерах	1,1—1,2	3530	3,0—3,5	Водоустойчивый
	Хабластит 85: жидкая фаза (аммиачная селитра 48,8, калийная селитра 21,7, вода 10,6, этиленгликоль 2, диэтиленгливо 2,3); твердая фаза (алюминиевый порошок 10, пигментная пудра 5, нитрат натрия и др.)	Пластинчатый в патронах или пастообразный в контейнерах	1,1—1,25	5330	3,2—3,8	Водоустойчивый

Страна	Наименование ВВ (состав в процентах)	Физическое состояние	Плотность, г/см ³	Теплота взрыва, кДж/кг	Скорость детонации, км/с	Примечание
Швеция	Реолит А-2 (аммиачная селитра 28, натриевая селитра 25, тротил 23, алюминий 7,5, вода 15, загуститель и структурообразователь 1,5)	Текучее водногелевое	1,5	5040	4,9	Выпускается в автостерных или контейнерах, заполненных полностью
	Реолит Р-25 (аммиачная селитра 62,6, тротил 25, вода 12, гуар 1,3, синька 0,1)	Текучее водногелевое	1,4	3570	5,5	Выпускается в автостерных или контейнерах, заполняемых полностью
	Реомекс А: твердая фаза (аммиачная селитра 89,6, ДТ 5, алюминий 5,4); жидкая фаза (аммиачная селитра 37, натриевая селитра 13, нитрат метилamina 35, вода 14,5, гуар 0,5, синька 0,05)	Водногелевое ВВ раздельного заряжания	1,4	4960	4,2	
	Кимит (аммиачная селитра 57, натриевая селитра 10, алюминий 8, вода 16, твердое горючее 3,5, этиленгликоль 4, гуар 1,5, синька 0,05)	Пастообразный	1,1—1,2	4300	3,8—4,0	Выпускается в патронах, шланговых монозарядах и контейнерах, водостойность хорошая

устойчивой детонацией в диаметре 50—120 мм и теплотой взрыва 3280—4120 кДж/кг.

В Польше ВВ представлены ватергелом. Его свойства: плотность 1,4 г/см³, теплота взрыва 3650 кДж/кг, скорость детонации 4,5 км/с.

В Канаде выпускаются нитрекссы, гидромексы, повергел, аква-мекс. Эти ВВ отличаются хорошей подвижностью и текучестью. Их свойства: плотность 1,25—1,58 г/см³, скорость детонации 3,5—5,2 км/с. По заказам потребителя они могут выпускаться в патронах диаметром 30—50 мм. В США применяются пастообразные товсксы 20, А-4, 100, 210, 220, 500, 600, 650, 700, 800, экстрa, сларриты 10, 85, 135, сларран, трогелы WS-7, сларры и гелеобразные карбогелы 5, 10, 15, которые выпускаются с алюминием и без него, а также с содержанием в качестве окислителя перхлоратных солей. Их свойства: плотность от 1,1 до 1,5 г/см³, теплота взрыва 2770—5710 кДж/кг, скорость детонации 3,4—6,8 км/с. Выпускаются в патронах и шлангах.

Эмульсионные ВВ (эмулиты). Сравнительно новым направлением в развитии ВВ является создание эмульсионных ВВ как разновидностей простейших аммиачно-селитренных взрывчатых смесей. Их особенность состоит в том, что в отличие от смесей типа АС—ДТ, в которых дизельное топливо или другое низковязкое жидкое горючее покрывает гранулы селитры и частично впитывается внутрь гранул, в эмулитах жидкое горючее покрывает тонкой пленкой капли насыщенного раствора аммиачной селитры (иногда смешанных растворов аммиачной селитры и натриевой селитры или щелочно-земельного металла), образуя так называемую обратную эмульсию. Процесс эмульгирования осуществляют в смесителях с быстро вращающейся мешалкой в присутствии специальных веществ—эмульгаторов. Размер капель, порядка, 10⁻⁶ м. Такие смеси в отличие от смесей АС—ДТ обладают высокой водостойкостью и физически стабильны.

Для повышения детонационной способности в эмулиты, как и в акваналы, вводят газовые пузырьки в виде, например, микросфер из полимерных материалов или стекла, добавляя газообразующие вещества (порофоры) или иным способом. В таком состоянии, как и акваналы, эмулиты становятся чувствительными к импульсу капсюля-детонатора и имеют сравнительно малые величины критического диаметра. В эмулитах достигается высокая поверхность контакта между окислителем (раствор аммиачной селитры) и горючим (нефтемасла). По показателям плотности они несколько уступают взрывчатым суспензиям типа акватолов, но превосходят гранулированные ВВ и патронированные аммониты. В зависимости от содержания жидкой фазы могут обладать как текучими, так и пластическими свойствами. Для повышения энергетических показателей во многие сорта эмульсионных ВВ вводят тонкодисперсный алюминий.

Изучение и разработка эмульсионных ВВ была начата в нашей стране в 1975 г. Вначале разрабатывали технологию изготовления и изучали свойства обратных эмульсий типа «вода в масле». Задача была поставлена в связи с разработкой технических средств для внутривзрывных взрывов, производимых с целью интенсификации добычи нефти и газа. Специфическим требованием к разрабатываемым ВВ была высокая детонационная способность при давлении 10^{12} МПа. Технический анализ показал, что поставленным требованиям в большей степени отвечают взрывчатые смеси на основе обратных эмульсий гидрофильного характера — растворы солей-окислителей с технологическими, энергетическими и сенсibiliзирующими добавками. На основе этих эмульсий при сенсibiliзации их тротилом или гексогеном были получены ВВ, пригодные для внутривзрывных взрывов. В дальнейшем разрабатывались эмульсионные ВВ без нитросоединений, сенсibiliзированные газовыми пузырьками.

Технология изготовления обратных эмульсий дизельное топливо — водные растворы аммиачной селитры сводится к следующему. Вначале готовят водный раствор селитры, отдельно — смесь дизельного топлива с поверхностно-активными веществами, при циркуляции насосом. Далее происходит процесс эмульгирования фаз, обеспечивающий синтез обратной эмульсии.

В СССР разработаны эмульсионные ВВ обратной структуры, в котором в качестве гидрофобной среды используется дешевый и широко распространенный нефтепродукт — мазут, а окислитель представляет собой водные растворы аммиачной и натриевой (кальциевой) селитры. Для образования и стабилизации эмульсии раствора окислителя в горючем используются поверхностно-активные вещества.

Плотность заряда 1,2—1,3 г/см³ достигается введением газообразующего компонента в небольших количествах при температуре эмульсии 70 °С. При этих условиях и плотности 1,22 г/см³ критический диаметр открытого заряда составляет 20 мм; скорость детонации 4,9—5,2 км/с, теплота взрыва около 350 кДж/кг. Детонирует от капсуля-детонатора.

Отработана технология получения эмульсионного ВВ в комплексе со специальной зарядной машиной в опытных условиях. Проведены промышленные испытания этого эмульсионного ВВ, которое рекомендуется применять в породах с коэффициентами крепости до 12 по шкале проф. М. М. Протоdjяконова I и II категории взрываемости. Вещества высоководоустойчивы, они сохраняют свои взрывчатые свойства в течение 7—14 сут пребывания в воде. Для пород крепостью выше 12 в эмульсионное ВВ вводят высокоэнергетические добавки (алюминий и др.). Разработанное эмульсионное ВВ выпускается на специализированных заводах в виде патронов различного диаметра и на горных предприятиях в виде маловязкой текучей массы.

Таблица 8.21

Наименование шведских эмультивов (состав)	Физическое состояние	Плотность, г/см ³	Теплота взрыва, кДж/кг	Объем газов взрыва, л/кг	Скорость детонации, км/с	Примечание
Эмулит АГ (аммиачная селитра, натриевая селитра, вода, масло или парафиновый воск, эмульгатор, микросферы из полимерных материалов, порошок алюминия)	Эмульсионное	1,2	4070	840	4,5—5,0	Чувствительно к капсулю детонатору, применяется для подземных работ
Эмулит Л (аммиачная селитра, натриевая селитра, вода, парафиновое масло, эмульгатор, микросферы)	То же	1,2	3100	1000	4,5—5,0	Мало чувствительно к капсулю-детонатору, применяется для открытых работ

За рубежом впервые стали заниматься эмульсионными ВВ в США в 1964 г. В качестве эмульгаторов для состава, содержащего аммиачную селитру, воду, нефтяное масло и нитропроизводные парафиновых углеводородов, применялись соли щелочно-земельных металлов жирных кислот, производные полиоксиэтилена, эфиры сорбита и жирных кислот, оксазолины.

Эмульсионные ВВ в различных странах содержат различные поверхностно-активные вещества в качестве эмульгаторов. За рубежом применяются с 1970 г. Составы, содержащие эмульсии в смесях типа АС—ДТ, называют эмулянами. В Финляндии эмульсионные ВВ называют кемитами, в Испании — риогелями, в Швеции — эмулитами.

В табл. 8.21 приведены свойства шведских эмультивов.

Эмульсионные ВВ являются весьма перспективными благодаря доступности и дешевизне сырья, высокой безопасности производства и применения, высокой водоустойчивости и эффективности взрывания.

8.4. ДРУГИЕ ТИПЫ ВВ ДЛЯ ГОРНОРУДНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

8.4.1. Нитроэфирсодержащие ВВ

Промышленные ВВ, содержащие жидкие нитроэфиры (нитраты спиртов), независимо от природы и содержания других компонентов часто называют нитроэфирсодержащими. Их классифицируют по содержанию нитроглицерина и других жидких нитроэфиров, по консистенции ВВ и другим признакам.

По первому признаку составы подразделяются на низкопроцентные, среднепроцентные и высокопроцентные (по содержанию нитроэфиров). Строгой и единой для разных стран градации, относящей эти ВВ к той или иной категории по содержанию нитроглицерина (нитроэфиров), нет. В СССР низкопроцентными считают составы с содержанием до 15 % нитроэфиров, высокопроцентными — более 60—75 %.

По второму признаку составы подразделяют на порошкообразные, полужидкие и пластичные, две последние группы называют динамитами. В СССР к порошкообразным нитроэфиродержащим ВВ относят составы, содержащие не более 15 % жидких нитроэфиров. Иногда из пластичных динамитов выделяют гремучий студень, представляющий собой динамитный желатин без твердых наполнителей, состоящий из 92—93 % нитроглицерина (или в смеси с нитрогликолями) и 7—8 % нитроклетчатки, а также аммонжелатиндинамиты, содержащие в качестве окислителя аммиачную селитру.

Нитроглицерин имеет высокую температуру кристаллизации (+10÷+13 °С), а с переходом его в твердое состояние составы на его основе затвердевают, теряют пластичность, сыпучесть, повышается опасность в обращении. Поэтому в состав современных нитроэфиродержащих ВВ вводят вещества, хорошо смешивающиеся (растворяющиеся) в нитроглицерине и понижающие температуру его кристаллизации. Обычно в качестве таких добавок используют нитраты других многоатомных спиртов (нитрогликоли и др.). В СССР для этой цели используется нитродигликоль (диэтиленгликольдинитрат), отличающийся меньшей летучестью, чем нитрогликоль (этиленгликольдинитрат). При этом смесь нитроглицерина с нитродигликолем переходит в твердое состояние при температуре —19,5 °С. В других странах чаще добавляют нитрогликоли. Встречаются марки ВВ, в которых содержатся только нитрогликоли и нет нитроглицерина.

Для предотвращения вытекания нитроглицерина и других нитроэфиров из состава ВВ их обычно желатинируют нитроклетчаткой, содержащей 12—12,5 % азота, называемой коллоидным хлопком. Нежелатинированные нитроэфиры применяют только в тех случаях, когда их содержание в составе ВВ не превышает 5—6 %.

В СССР применяют порошкообразные нитроэфиродержащие ВВ: детонит М, предохранительные ВВ: углениты Э-6, 12ЦБ, ионит. В отечественной горной промышленности динамиты прекратили применять с начала 60-х годов из-за опасности в обращении. В некоторых зарубежных странах они еще изготавливаются (ГДР, ФРГ, Швеция, Великобритания). В связи с развитием и широким внедрением в горную промышленность пластичных и гелеобразных ВВ нитроэфиродержащие ВВ почти повсеместно заменяются более безопасными составами.

Детонит М — малопылящее, жирное на ощупь порошкообразное ВВ, изготавливаемое на труднозамерзающей смеси нитроэфиров. Выпускается только в патронированном виде, не слитывается. Отличается высокими водоустойчивостью и детонационной способностью, устойчиво детонирует в зарядах малого диаметра и предназначен для трудно взрывааемых весьма крепких пород в обводненных проходческих и очистных забоях на подземных горных работах при взрывании шпуровыми зарядами, в том числе патронами уменьшенного диаметра (28 мм). Детонит М имеет повышенную чувствительность к механическим и тепловым воздействиям и требует более осторожного обращения, чем аммониты. Основные показатели детонита М приведены ниже.

Кислородный баланс, %	0,18
Теплота взрыва, кДж/кг	5800
Полная идеальная работа взрыва, кДж/кг	4330
Объем газов взрыва, л/кг	832
Плотность патронов, г/см ³	0,95—1,2
Работоспособность, мл	460—500
Бризантность, мм	18—22
Критический диаметр в бумажной оболочке, мм	8—10
То же, в стальной оболочке, мм	4—5
Скорость детонации в патронах диаметром, км/с:	
27—28 мм	4,2—4,8
31—32 мм	4,7—5,0
36—37 мм	4,9—5,2
Передача детонации между сухими патронами диаметром, см:	
27—28 мм	10—14
31—32 мм	12—18
36—37 мм	14—20
Передача детонации после выдержки в воде в течение 1 ч патронов диаметром, см:	
27—28 мм	6—12
31—32 мм	10—15
36—37 мм	12—18
Чувствительность к трению с примесью 5 % песка, МПа	152,5
Чувствительность к удару, %	40—60
Тропиловый эквивалент по баллистическому маятнику	1,12

8.4.2. ВВ на основе твердых и жидких окислителей

Кроме аммиачной селитры в состав промышленных ВВ в качестве окислителя могут быть введены другие жидкие и твердые соединения. Их относительную эффективность можно оценить по энергетическим характеристикам смесей стехиометрического состава, содержащих одно и то же горючее. В табл. 8.22 приведены результаты расчета энергетических характеристик смесей с тротилом, причем в качестве критерия эффективности принята величина идеальной работы взрыва, относительная эффективность выражена в процентах к идеальной работе смеси тротила с аммиачной селитрой, принятой за 100.

Таблица 8.22

Окислитель	Содержание тротила, %	Теплота взрыва, кДж/кг	Объем газов взрыва, л/кг	Полная идеальная работа взрыва, кДж/кг	Относительная эффективность к тротилу, %
Двуокись азота (N_2O_4)	48,4	7390	650	5950	166
Тетранитрометан $[C(NO_2)_4]$	39,8	7180	640	5750	161
Перекись водорода (H_2O_2)	41,3	7080	835	5680	159
Хлорная кислота ($HClO_4$)	46,3	6570	622	5280	148
Азотная кислота моногидрат (HNO_3)	46,3	6360	695	5090	142
Перхлорат гидразина ($N_2H_5ClO_4$)	24,6	6090	795	5010	140
Перхлорат аммония (NH_4ClO_4)	31,5	5710	745	4620	129
Хлорат натрия ($NaClO_3$)	37,9	5920	420	4560	128
Перхлорат натрия ($NaClO_4$)	41,4	6170	450	4360	122
Аммиачная селитра (NH_4NO_3)	21,3	4310	892	3570	100
Натриевая селитра ($NaNO_3$)	38,8	4960	420	3420	95,5
Калиевая селитра (KNO_3)	35,0	4370	380	2940	82

Наиболее высокие показатели имеют смеси на основе жидких окислителей, которые превосходят аммониты по работоспособности в 1,42—1,66 раза.

Из приведенных в табл. 8.22 окислителей помимо аммиачной селитры в составах промышленных ВВ применяют соли хлорной и хлорноватой кислот (перхлоратные и хлоратные ВВ), нитраты щелочно-земельных и щелочных металлов. Последние вводятся в состав некоторых ВВВ для повышения плотности, а также в селективно-детонирующие предохранительные ВВ.

Перхлоратные ВВ — смеси, в которых в качестве окислителя используются соли хлорной кислоты — перхлораты калия, натрия или аммония. Взрывчатые смеси, содержащие перхлоратные соли, отличаются очень высокой чувствительностью к трению и удару, поэтому в СССР они не применяются. Находят применение в некоторых странах, наиболее широкое — в Японии (карлиты).

Перхлораты как окислители дают большой энергетический выигрыш по сравнению с аммиачной селитрой. Так, стехиометрические смеси селитры с тротилом имеют теплоту взрыва 4190 кДж/кг, с парафином — 3770 кДж/кг; те же горючие с перхлоратом аммония образуют смеси с теплотой взрыва соответственно 5550 и 5230 кДж/кг.

Традиционные способы флегматизации нитросоединений и их смесей введением в них низкоплавких органических веществ (парафина, церезина, восков и т. п.) не только не снижают чувствительность перхлоратных солей и их композиций, но, напротив, повышают ее. Наиболее сильным флегматизатором является желатинированная вода, снижающая чувствительность к удару перхлоратных солей с 80—100 до 40—60 %.

Подробно механизм возбуждения взрыва перхлоратных смесей при механическом воздействии и способы их эффективной флегматизации исследованы И. А. Карлухиным. Развитие взрыва происходит двухстадийно. Вначале разлагается перхлоратная соль с выделением химически высоко активной хлорной кислоты. Последняя взаимодействует с горючим компонентом смеси с выделением тепла. Механизм эффективной флегматизации в такой системе должен сводиться к связыванию флегматизирующей добавкой промежуточного продукта разложения перхлората — хлорной кислоты с минимальным тепловым эффектом.

Перхлораты калия и натрия образуют менее чувствительные смеси, чем перхлорат аммония. При взрыве они образуют тонкодисперсные хлориды металлов, действующие как ингибиторы. Поэтому их вводят в некоторые предохранительные ВВ.

ВВ на основе жидких окислителей. Известны патенты ЧССР, США, Великобритании, в которых предлагаются способы приготовления различных составов на основе азотной кислоты. Подобные составы были известны еще и на ранней стадии развития промышленных ВВ. Наибольшее количество тепла в системах кислота — тротил выделяется при содержании тротила 35—40 %. Наиболее доступными и экономически выгодными являются композиции на основе желатинированной полиакрилом кислоты с ферросплавами, теплота взрыва которых 8370—9210 кДж/кг (12 500—13 820 кДж/л). Теплота взрыва смесей азотная кислота — алюминий может достигать 11 720 кДж/кг. Однако объем газообразных продуктов взрыва при теплоте, большей 8370 кДж/кг, не превышает 420 л/кг.

Высокая летучесть азотной кислоты, ее агрессивность и низкая живучесть геля на ее основе сдерживают практическое использование таких составов.

Жидкие взрывчатые смеси на основе четырехоксида азота N_2O_4 , тетранитрометана $C(NO_2)_4$ и 98 %-ной азотной кислоты, используемых в качестве окислителя, и керосина (горючего), характеризуются высокой детонационной способностью. Критический диаметр детонации таких смесей 1,2—2 мм. Подобного рода смеси использовались в технологии взрывного бурения.

8.4.3. Смеси на основе жидких нитропарафинов и солей гидразина (астралиты)

Жидкие ВВ давно привлекали внимание исследователей в связи с повышенной плотностью, малым критическим диаметром, способностью целиком заполнять зарядный объем и тем самым обеспечивать высокую концентрацию энергии и эффективность взрывания [46]. Жидкие ВВ не растворяются в воде, не смешиваются с ней и являются водоустойчивыми. Они обладают хорошей текучестью даже при минусовых температурах, что облегчает механизацию зарядных работ. Наибольший интерес представляют жидкие нитропарафины и ВВ на их основе. Особое внимание в этом классе соединений уделяется нитрометану, который имеет явно выраженные взрывчатые свойства. Нитрометан предназначен для взрывных работ в нефтедобывающей промышленности для внутрипластового взрывания.

В табл. 8.23 приведены свойства эвтектических бинарных смесей нитропарафинов с аммиачной селитрой. Видно, что по энергетическим характеристикам смесь на нитропарафине превосходит аналогичную смесь на тротиле.

В США нитрометан получают нитрацией попутных газов нефтепереработки слабой азотной кислотой. Нитрация осуществляется в паровой фазе при температуре 400—450 °С и повышенном давлении (0,7—1,0 МПа). При этом получают смесь нитропарафинов, которые разделяют ректификацией.

Так как нитрометан тяжелее воды и не смешивается с ней, им можно заряжать обводненные скважины через столб воды, которая в данном случае будет выполнять роль забойки.

Недостатком нитрометана является его высокая летучесть.

Взрывчатые свойства нитрометана: бризантность 15 мм при инициировании от шашки тетрила массой 5 г и 22 мм — от шашки массой 10 г; работоспособность по баллистической мортире 134 % по отношению к тротилу; скорость детонации в металлической трубе 6—6,5 км/с.

Таблица 8.23

Наименование нитропарафина	Содержание аммиачной селитры в стехиометрической смеси, %	Плотность, г/см ³	Теплота взрыва		Объем газов взрыва, л/кг	Относительная эффективность к тротилу, %
			весовая, кДж/кг	объемная, кДж/л		
Тротил (эталон)	78,7	1,308	4200	5500	892	100
Нитрометан	67	1,32	4710	6210	930	112
Нитроэтан	84	1,32	4030	5290	950	95
Нитропропан	87,5	1,3	4000	5400	961	94

Таблица 8.24

Взрывчатая смесь	Плотность, г/см ³	Масса заряда*, г	Размеры воронки			Коэффициент относительной работоспособности
			диаметр, мм	глубина, мм	объем, см ³	
Аммонит 6ЖВ	1	200	1,19	0,84	0,309	1
Нитрометан	1,13	226	1,25	0,8	0,326	1,06
Нитрометан — селитра 37/63	1,36	272	1,12	0,7	0,265	0,86
Нитрометан — дюралева	1,3	260	1,75	0,92	0,742	2,4
Стружка 75/25						
Нитрометан — алюминиевая пудра 77/25	1,32	264	1,45	0,97	0,535	1,73

* Заряды помещали в металлическую трубку диаметром 32 мм с толщиной стенок 1,5 мм и инициировали шашкой массой 30 г.

Нитрометан растворяет многие органические соединения, в том числе нитросоединения. Последние используются в качестве загустителей нитрометана. В нитрометане растворяется до 40 % тетрила, до 30 % тротила, 3 % гексогена и 0,3 % тэна. Критический слой детонации тротиловых и тетриловых растворов нитрометана 0,5—1,0 мм. По энергетическим характеристикам нитрометан можно приравнять к гексогену. Судя по величинам критических диаметров и слоя, нитрометан при соответствующем инициировании обладает достаточно высокой детонационной способностью при малой чувствительности к механическим воздействиям.

Из бинарных смесей нитрометана с селитрой практический интерес представляют смеси стехиометрического состава или близкие к ним, изготавливаемые на месте применения отдельным заряданием. Раздельное хранение компонентов удобнее и безопаснее.

В патентах США рекомендовано в смесях AN—FO часть нефтепродукта заменять на нитрометан в целях повышения чувствительности к инициирующему импульсу.

Введением в нитрометан алюминия можно повысить массовую энергию взрыва в 1,4—1,5 раза и объемную в 1,6—2 раза. По приближенным оценкам, в благоприятных условиях взрывания может участвовать во взрывчатом превращении до 25 % алюминия. Объемная энергия таких бинарных систем порядка 8400—9660 кДж/л, что превосходит объемную энергию алюмотола, грамонала и акватола на 28—45 %.

Физически стабильные заряды бинарных систем нитрометан—алюминий можно получить либо на тонкодисперсной пудре, удерживаемой во взвешенном состоянии за счет загущения нитрометана, либо на стружке, получаемой в машиностроении при токар-

ной или фрезерной обработке алюминиевых или дюралевых заготовок (толщина стружки 0,1—0,15 мм; куски размером 5—50 мм). Стружка способна образовывать жесткий каркас заряда, и в этом случае надобность в загущении нитрометана отпадает. В табл. 8.24 приведена эффективность бинарных смесей нитрометана с аммиачной селитрой или алюминиевой стружкой. Коэффициент крепости взрываемых пород, по Протодьяконову, 7—8, диаметр шпуров 45 мм, длина 1 м. При этом получено увеличение выхода горной массы в 2,2 раза с улучшением ее дробимости за счет высокой плотности заряжания на 30 %.

На основе загущенного нитрометана и измельченной аммиачной селитры можно готовить пластичные высокоплотные и высокоустойчивые ВВ, не уступающие по мощности динамитам и в то же время отличающиеся от них малой токсичностью, высокой морозостойкостью, низкими чувствительностью к механическим воздействиям и стоимостью. Взрывчатые свойства пластичных нитрометановых ВВ: теплота взрыва 6300—7560 кДж/л, бризантность 14—19 мм, работоспособность 380—490 мл, скорость детонации 4,7—5,8 км/с.

Смеси на основе гидрата гидразина ($\text{NH}_2\text{NH}_2\text{H}_2\text{O}$), за рубежом называемые астралитами, характеризуются высокими расчетными энергетическими показателями. Кроме простейшей смеси гидразина с аммиачной селитрой запатентованы многокомпонентные жидкие составы. Взрывчатой основой в таких системах служат нитрат и перхлорат гидразина. К достоинствам жидких гидразинсодержащих ВВ можно отнести: низкую температуру замерзания ($-30 \div 45$ °С), высокие плотность (1,3—1,4 г/см³) и скорость детонации (7,5—8 км/с), относительно высокую безопасность в обращении. Благодаря высокой плотности объемная энергия заряда в скважине может достигать 5650 кДж/л. Объем продуктов взрыва достигает 1000 л/кг. Недостатком астралитов является их низкая физическая стойкость из-за испарения гидразина.

Астралиты можно готовить на месте применения смешиванием нитратов и перхлоратов гидразина с жидким аммиаком или растворами аммиачной селитры.

Непредохранительные промышленные ВВ по условиям применения классифицируют следующим образом.

К классу I относятся непредохранительные ВВ, предназначенные для взрывания только на земной поверхности (игданит, карбатылы ГЛ-10В, ГЛ-15Т, ФТ-10, Т-20, ГЛТ-20, аквагал А-10).

К классу II относятся непредохранительные ВВ для взрывания на земной поверхности и в забоях подземных выработок, в которых либо отсутствует выделение горючих газов или пыли, либо применяется инертзация призабойного пространства, исключаящая воспламенение взрывоопасной среды при взрывных работах (аммонит 6ЖВ, аммоналы-200, М-10, скальный № 3, аммонит скальный № 1, детонит, динафталит).

8.5. ПРЕДОХРАНИТЕЛЬНЫЕ ВВ

В разделе 6 были сформулированы принципы построения современных ПВВ, вытекающие из моделей взаимодействия взрыва бризантных ВВ с горючей (взрывоопасной) шахтной средой.

В настоящем разделе излагаются инженерные решения задачи создания предохранительных ВВ различного назначения и свойств, основанные на этих принципах.

8.5.1. Способы регулирования энергетических характеристик предохранительных ВВ

Основная особенность предохранительных ВВ состоит в том, что при взрывных работах они не воспламеняют взрывчатые смеси горючих рудничных газов или пыли с воздухом, образующихся в атмосфере горных выработок угольных, серных, нефтяных и других шахт.

С точки зрения технико-экономической эффективности применения ПВВ наиболее важной является связь между энергетическими параметрами ВВ и показателем его антигризутности (предохранительности). Соответствующие зависимости показаны на рис. 8.6 и 8.7.

Известно, что чем выше энергетические характеристики ВВ (теплота, температура взрыва), тем легче продукты взрыва воспламеняют горючую шахтную среду (см. раздел 6). Таким образом, требования по безопасности взрывных работ в шахтах с горючей атмосферой вступают в противоречие с требованиями максимальной эффективности этих работ. Поэтому основная задача при создании современных предохранительных ВВ состоит в том, чтобы при заданном уровне предохранительности ВВ за счет оптимизации химического состава ВВ или устройства заряда обеспечить наиболее высокие их энергетические характеристики. Это не исключает поиски других способов повышения безопасности взрывных работ в шахтах, таких, например, как инертзация атмосферы призабойного пространства, устройство водяных завес, сланцевых и др. [15].

Наиболее эффективным способом регулирования энергетических характеристик предохранительных ВВ является введение в их состав каталитически активных пламегасителей—ингибиторов цепной реакции окисления метана и других горючих рудничных газов. Применение таких солей дает значительный энергетический выигрыш по сравнению с каталитически неактивными (инертными) материалами, вводимыми в состав ВВ в качестве охлаждающего агента.

Наиболее широко в качестве пламегасителей применяются хлориды натрия (поваренная соль) и калия, в меньшей мере— другие соли щелочных и щелочно-земельных металлов. Для усиления

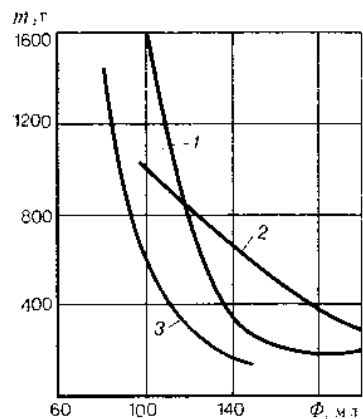


Рис. 8.6. Зависимость массы предельного заряда m от работоспособности Φ предохранительных ВВ:
1 — открытый заряд; 2 — заряд в цилиндрической мортре с обратным liningованием; 3 — заряд в угловой мортре с отражательной стенкой

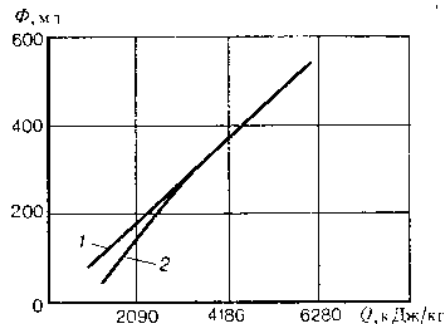


Рис. 8.7. Зависимость работоспособности предохранительных ВВ (Φ) от теплоты взрыва (Q):
1 — ВВ без солей-пламегасителей; 2 — ВВ с солями-пламегасителями

ингибирующего действия солей их вводят в тонкодисперсном виде, измельченных отдельно или совместно с активными компонентами в процессе смешивания составов. Взвесь ультрамелких порошков пламегасителя образуется и при взрыве селективно-детонирующих предохранительных ВВ ионообменного типа. К недостатку данного способа регулирования энергетических характеристик предохранительных ВВ следует отнести присутствие или образование твердой фазы в продуктах взрыва, что снижает термодинамический КПД взрыва ($\eta = A/Q$).

Для составов, не содержащих в продуктах взрыва твердых веществ, зависимость работоспособности ВВ от теплоты взрыва Q , полученная при взрывании в свинцовых бомбах, близка к линейной, в то время как для составов, содержащих инертную соль, она не подчиняется линейному закону. С увеличением содержания соли отклонения от линейной зависимости возрастают, соответственно уменьшается КПД взрыва (см. рис. 8.7).

Теоретически имеется несколько способов повышения КПД взрыва предохранительных ВВ. Один из них состоит в снижении содержания твердых веществ в продуктах детонации путем максимального уменьшения содержания не разлагающихся при взрыве солей-пламегасителей в составе ВВ, в пределе — до минимума, отвечающего функции только ингибирования. Экспериментально установлено, что это количество может быть снижено до 8—10 %, если в качестве взрывчатой основы предохранительных ВВ применять индивидуальные ВВ или смеси, имеющие малые теплоты

Таблица 8.25

Вещество	Кислородный баланс, %	Теплота взрыва, кДж/кг	Температура взрыва, °С	Объем продуктов взрыва, м³/кг	Q/V , Дж/м³
Смесь аммиачной селитры с тротилом	0	4280	—	0,895	4,77
Тротил	-74	4180	3100	0,73	4,25
Смесь нитрогуанидина с селитрой	0	3580	—	0,91	4,00
Нитромочевина	-7,6	3330	2630	0,85	3,91
Смесь нитрата мочевины с селитрой	0	2950	—	0,886	3,31
Нитрат мочевины	-6,5	2550	1927	0,91	2,8
Нитрогуанидин	-30,8	2640	2067	1,07	2,33
Нитрат гуанидина	-26,2	2060	1527	1,1	1,87
Аммиачная селитра	+20	1450	1357	0,98	1,48

взрыва (меньшие, чем смеси аммиачной селитры с тротилом или другими пирросоединениями, имеющими теплоту взрыва около 4300 кДж/кг). При этом следует предпочесть такие индивидуальные ВВ или смеси, которые образуют при взрыве возможно большее количество газообразных продуктов и характеризуются малым значением показателя Q/V , сами продукты состоят преимущественно из малоатомных газов с низкой теплоемкостью. В этом случае показатель η будет наибольшим.

Указанным характеристикам в наибольшей мере удовлетворяют высокоазотные соединения, такие как нитропроизводные гуанидина, мочевины и некоторые другие. В табл. 8.25 приведены расчетные энергетические характеристики этих веществ и их смесей с аммиачной селитрой в сравнении со смесью аммиачной селитры с тротилом с нулевым кислородным балансом. Перспективность данного направления подтверждена экспериментально. Так, открытый заряд ВВ массой 200 г, содержащий 90 % нитрата мочевины и 10 % хлорида калия с работоспособностью 227 см³, не воспламенял метано-воздушную смесь. Такой уровень антигрозутности отвечает предохранительным ВВ класса V — углениту Э-6, имеющему работоспособность 160—170 см³. Выигрыш по работоспособности в данном случае составил около 38 %.

Реализация данного направления затруднена из-за низких показателей физической стабильности и детонационной способности составов на основе нитропроизводных мочевины и гуанидина.

Другой путь повышения работоспособности предохранительных ВВ состоит в том, чтобы охлаждающий агент при взрыве переходил в газообразное состояние в результате термического разложения, испарения или сублимации. Наиболее подходящим материалом для этой цели является вода, которая может вводиться

в состав предохранительных ВВ в виде водного желатина, кристаллогидрата или в виде внешней оболочки на патронах. Этот способ был реализован в СССР в патронах с водосодержащими предохранительными оболочками (патроны СП-1, ПВП-1У), однако из-за сложности технологии изготовления и высокой стоимости эта продукция была снята с производства. В ряде зарубежных стран производятся водосодержащие предохранительные ВВ различной рецептуры. Недостатком их является низкая детонационная способность. Третий путь связан с применением пламегасителей, разлагающихся при взрыве и образующих газообразные ингибиторы, например, молекулярные галоиды или их соединения, однако исследования в этом направлении пока не привели к положительным результатам.

Наиболее перспективным в настоящее время признан путь создания так называемых селективно-детонирующих ВВ, получивших широкое распространение в большинстве угледобывающих стран. Его идея состоит в следующем. ВВ этого типа содержат в своем составе резко различающиеся по химической активности компоненты, например, нитроглицерин (сенсibilизатор) и смесь хлористого аммония с нитратом натрия или калия. В процессе взрыва они способны взаимодействовать друг с другом по реакции



с выделением тепла. Такие смеси взрываются избирательно (селективно) в зависимости от условий протекания взрыва. При быстром спаде давления в продуктах детонации, например при взрывании в шпурах, пересекаемых трещинами, без внутренней забойки, открытых или полуоткрытых зарядов, в детонационной волне разлагается только сенсibilизатор. Остальные компоненты ведут себя как инертные вещества, не успевающие прореагировать между собой и разбрасывающиеся из зоны взрыва. При взрывании в замкнутой камере, например в шпурах с прочными стенками и внутренней забойкой, во взрывчатом превращении участвуют все компоненты с полным выделением энергии. Так, состав, содержащий нитроглицерин (10 %) и эквимолекулярную смесь хлористого аммония и нитрата натрия, при взрыве открытого заряда выделяет всего 630 кДж/кг тепла, а при взрыве в шпуре с забойкой — 1410 кДж/кг.

Полнота выделения энергии при взрыве селективно-детонирующих предохранительных ВВ зависит от скорости спада давления в продуктах взрыва. Задаваясь некоторыми условиями протекания взрыва и измеряя количество тепла, выделившегося при взрыве, можно оценить степень селективности ВВ, равную отношению выделившегося тепла к потенциальной энергии ВВ. Чем меньше эта величина, тем выше степень селективности и более безопасно предохранительное ВВ.

Основное достоинство селективно-детонирующих ВВ состоит в том, что в опасных условиях взрыва (открытый или полуоткрытый заряд) они характеризуются высокими предохранительными свойствами, а в менее опасных условиях (нормально работающий шпуровой заряд с внутренней забойкой) выделяют энергии не намного меньше, чем предохранительные ВВ обычного типа. Кроме того, при взрыве селективно-детонирующего ВВ ингибитор, например хлористый натрий, образуется в ультрадисперсном состоянии, так как он сам является продуктом реакции между хлористым аммонием и нитратом натрия. Так как первой стадией реакции является обмен ионами ($\text{NH}_4\text{Cl} + \text{NaNO}_3 \rightarrow \text{NaCl} + \text{NH}_4\text{NO}_3$), то часто такие взрывчатые смеси называют ионообменными. По другому варианту селективно-детонирующие ВВ содержат одни и те же компоненты, но с разным размером или плотностью частиц, например, мелкодисперсную и гранулированную селитру или смесь порошкообразного и таблетированного аммонита. Мелкодисперсные фракции разлагаются в детонационной волне быстрее, чем крупнодисперсные, что и обеспечивает процесс селективной детонации.

В ассортименте отечественных предохранительных ВВ к селективно-детонирующим системам можно отнести углениты Э-6, 12ЦБ и иорит.

8.5.2. Пламегасители в составе предохранительных ВВ

Выбор пламегасителя определяется его ингибирующей способностью, совместимостью с другими компонентами ВВ, влиянием на взрывчатые и физико-химические свойства ВВ, токсичностью самого пламегасителя или продуктов его разложения, а также доступностью и товарной стоимостью. Так, например, фтористые соли хотя и характеризуются высокой ингибирующей способностью, из-за токсичности применяют в предохранительных ВВ с большой осторожностью. Высокоактивные соли лития не применяют из-за высокой стоимости. Наиболее широкое применение получили хлориды натрия и калия благодаря их дешевизне, доступности и в то же время достаточно высокой ингибирующей способности.

Ингибирующее действие солей-пламегасителей в значительной степени зависит от удельной поверхности частиц, образующих взвесь в продуктах детонации, и, следовательно, от их размеров. Суммарная поверхность частиц приближенно рассчитывается по формуле

$$S = ns' = \frac{G}{\pi d^2 \rho_0 / 6} \pi d^2 k = k \frac{6G}{d \rho_0},$$

где n — число частиц соли, диспергированных в среде; s' — поверхность частицы; G — масса соли в заряде ВВ; d — усредненный диаметр частицы; ρ_0 — плотность соли; k — коэффициент дробления соли при взрыве.

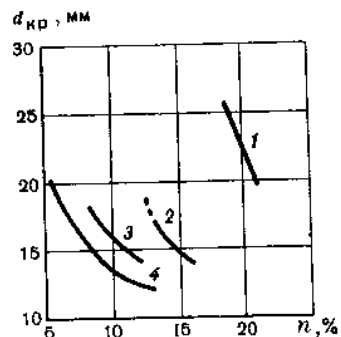


Рис. 8.8. Зависимость критического диаметра заряда предохранительных ВВ ($d_{кр}$) с 20% пламегасителя при плотности 1,6–1,7 г/см³ от количества сенсбилизатора (n):
1 — тротил; 2 — смесь нитроэфиров 60/40; 3 — гексоген; 4 — нитроглицерин

Рис. 8.9. Зависимость вероятности воспламенения метано-воздушной смеси (ω) от размера частиц пламегасителя (s) при его содержании 35 (кривая 1) и 40% (кривая 2)

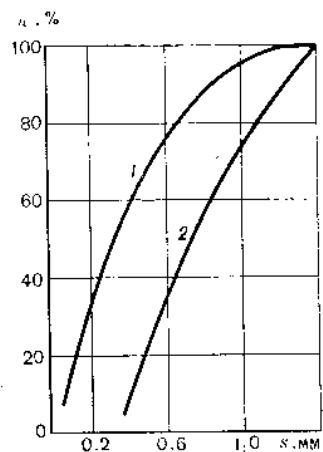
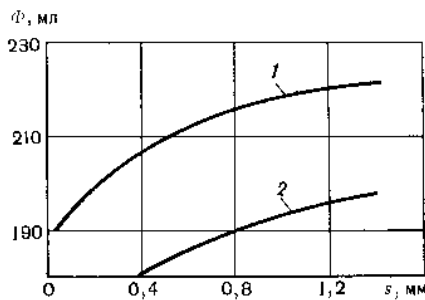


Рис. 8.10. Зависимость работоспособности предохранительных ВВ (Φ) от размера частиц пламегасителя (s) при его содержании 35 (кривая 1) и 40% (кривая 2)



По экспериментальным данным, при взрыве предохранительных ВВ происходит дробление пламегасителя. Степень дробления зависит от дефектов поверхности исходных кристаллов и не требует больших нагрузок. При начальном размере частиц соли 0,1–2 мм наибольшее число частиц после взрыва имело средний размер около 8 мкм. Вместе с тем введение в состав предохранительных ВВ тонкодисперсного пламегасителя имеет отрицательные стороны: усиливается слеживаемость аммонитной массы, снижается детонационная способность ВВ. Поэтому в составы, содержащие тонкодисперсный пламегаситель, обычно вводят сенсбилизаторы в количестве 5–15%, чаще всего нитроглицерин или смеси его с нитрогликолями, реже — твердые сенсбилизаторы типа гексогена или тэна (рис. 8.8). На рис. 8.9 показана зависимость предохранительных свойств аммично-селитренной смеси (79% аммиачной селитры и 21% тротила) от дисперсности пла-

мегасителя, а на рис. 8.10 — зависимость работоспособности от дисперсности соли.

С уменьшением размеров частиц пламегасителя-хлористого натрия несколько снижается работоспособность ВВ. При уменьшении размеров частиц на порядок работоспособность снижается на 13% (см. рис. 8.9).

Многие исследователи пытались получить взвесь ультрадисперсного пламегасителя введением в состав ВВ органических или минеральных соединений металлов, которые бы разлагались при взрыве с образованием солей или окислов металлов. В качестве таковых были предложены пикрат калия (ВВ), перхлорат калия или натрия (окислитель) и т. п. Однако опробованные соли не были применены, так как помимо ингибирования пламегаситель должен снижать температуру продуктов детонации. Ультратонкое распыление пламегасителя достигается при взрыве селективно-детонирующих ВВ, содержащих так называемую ионообменную или обратную пару солей (хлористый аммоний и натриевую или калиевую селитру). Продуктом их взаимодействия при взрыве является ультрадисперсный хлористый натрий или калий.

8.5.3. Особенности селективно-детонирующих предохранительных ВВ

Сильное влияние на свойства селективно-детонирующих предохранительных ВВ оказывает гранулометрический состав. Для составов, содержащих одно и то же количество сенсбилизатора и ионообменную пару солей (53% нитрата натрия и 35% хлористого аммония), но отличающихся по размеру частиц компонентов, была определена величина отклонения баллистического маятника, характеризующая работоспособность ВВ (табл. 8.26).

Таблица 8.26

Дисперсность пламегасителя, мкм	Работоспособность, см ²	Скорость детонации, км/с	Отклонение маятника, мм	
			Соосное положение заряда	Перпендикулярное положение заряда
Составы на основе $\text{NaNO}_3 - \text{NH}_4\text{Cl}$				
500–1250	83	1,4	24,7	59,2
280–500	51	1,7	—	51
140–500	89	1,7	—	51
<140	62	1,8	22,1	—
<100	62	—	17,6	—
Состав на основе хлористого натрия				
<140	—	1,2	9,5	14,0

Величина заряда во всех случаях составила 100 г, диаметр 36 мм, расстояние до носка маятника 40 мм, масса маятника 160 кг.

Все композиции, в которых применялись не слишком тонкие порошки ионообменной пары, дали отклонения маятника, в 2—3 раза превышающее отклонение при взрыве состава с хлористым натрием, принятого за эталонное ВВ. Это свидетельствует о различной степени полноты реакции ионообменной пары или, что то же самое, о селективности. Реакция замедляется лишь при очень тонкой дисперсности порошков (менее 100 мкм).

8.5.4. Детонационная способность предохранительных ВВ

Высокая и стабильная детонационная способность является важнейшим требованием к предохранительным ВВ, особенно в связи с широким применением короткозамедленного взрывания и возросшей в этой связи опасностью выгорания предохранительных ВВ из-за неодновременности взрыва зарядов и их уплотнения в шпурах волнами сжатия.

Наиболее эффективным способом повышения детонационной способности предохранительных ВВ является введение в состав сенсбилизаторов. В течение почти всей истории существования предохранительных ВВ в большинстве случаев в качестве сенсбилизатора использовали нитроглицерин, нитрогликоли или их смеси. Последние содержатся в отечественных предохранительных ВВ типа угленитов.

Известно, что нитроэфирсодержащие ВВ и в уплотненном состоянии характеризуются высокой детонационной способностью. Критический диаметр этих ВВ составляет 5—10 мм, в уплотненном состоянии (давление 50 МПа) — 15—17 мм. Уплотняемость нитроэфирсодержащих ВВ ниже, чем аммонитов (табл. 8.27). Плотность этих ВВ быстро достигает максимального значения, но в дальнейшем с повышением давления мало увеличивается.

Относительная плотность при этом не превышает 0,94, в то время как аммонит уплотняется до относительной плотности 0,965.

Стабилизирующее действие на нитроэфирсодержащие ВВ оказывают разрыхлители (древесная мука и др.). Оптимальным можно считать содержание разрыхлителя 4 %.

Для повышения детонационной способности предохранительных аммонитов, не содержащих нитроглицерина, применяется более интенсивное измельчение аммонитной массы, увеличение содержания тротила (аммонит Т-19). По детонационной способности, определяемой испытаниями ВВ в углецементных блоках, наименьшее приведенное расстояние, при котором сохраняется устойчивая детонация ВВ в уплотненном состоянии, у аммонита Т-19 с 19 % тротила $\bar{R} < 7,5$, а у аммонита Т-19 с 16 % тротила $\bar{R} \approx 9,0$. Чем меньше величина \bar{R} , тем выше устойчивость детонации.

Таблица 8.27

Давление сжатия, МПа	Содержание нитроэфиров, %								Аммонит ПЖВ-20	
	5		9		13		20		$\rho_{абс}$, г/см ³	$\rho_{отн}$
	$\rho_{абс}$, г/см ³	$\rho_{отн}$	$\rho_{абс}$, г/см ³	$\rho_{отн}$	$\rho_{абс}$, г/см ³	$\rho_{отн}$	$\rho_{абс}$, г/см ³	$\rho_{отн}$		
3	1,64	0,91	1,62	0,9	1,6	0,9	1,58	0,88	1,45	0,8
5	1,65	0,92	—	—	—	—	—	—	1,57	0,87
10	1,65	0,92	—	—	—	—	—	—	1,67	0,925
15	1,67	0,93	1,65	0,925	1,63	0,93	—	—	1,72	0,95
20	—	—	1,66	0,93	1,64	0,925	—	—	1,72	0,95
25	—	—	—	—	1,66	0,93	1,62	0,92	1,72	0,95
30	—	—	1,67	0,935	—	—	—	—	1,74	0,965
35	—	—	—	—	—	—	—	—	1,74	0,965
40	—	—	1,66	0,93	—	—	—	—	1,74	0,965
45	—	—	1,66	0,93	1,66	0,93	—	—	1,74	0,965
50	1,69	0,94	—	—	—	—	1,62	0,92	—	—

Радикальным решением проблемы ликвидации выгорания предохранительных ВВ является применение устойчиво детонирующих ВВ в виде сплошных зарядов (монозарядов). Применение монозарядов исключает возможность образования разрывов и перемычек между патронами, благодаря чему снижается вероятность прерывания детонации.

Одним из способов повышения детонационной способности предохранительных ВВ является увеличение диаметра патронов, например с 32 до 36 мм.

Для повышения эффективности взрывных работ при использовании маломощных высокопредохранительных ВВ необходимо увеличивать диаметр шпуровых зарядов. Опытные взрывания в угольных шахтах показали, что при использовании предохранительных ВВ VI класса в патронах диаметром 43 мм удалось получить такую же эффективность взрывных работ, как при взрывании более мощного ВВ V класса — угленита Э-6. Еще большая эффективность обеспечивается при механизированном зарядании шпуров на полное сечение. При правильно выбранной технике и хорошей организации работ достигаются рекордные темпы проведения подготовительных выработок (более 1000 м/мес) по породам, разрушение которых комбайнами пока невозможно.

8.5.5. Горючесть предохранительных ВВ и другие эксплуатационные качества

Для предотвращения выгорания предохранительных ВВ необходимо, чтобы наряду с высокой детонационной способностью при возможных уплотнениях предохранительное ВВ характеризовалось также пониженной горючестью.

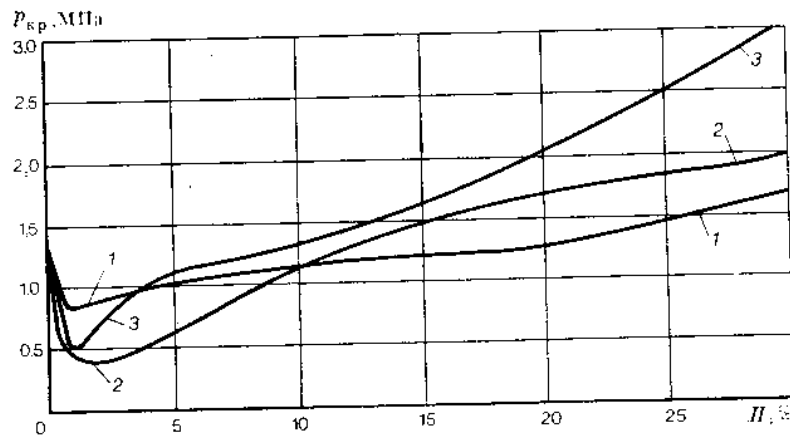


Рис. 8.11. Зависимость критического давления ($P_{кр}$) поджигания аммонита 6ЖВ от содержания пламегасителя ($П$):
1 — хлористого натрия; 2 — хлористого калия; 3 — хлористого аммония

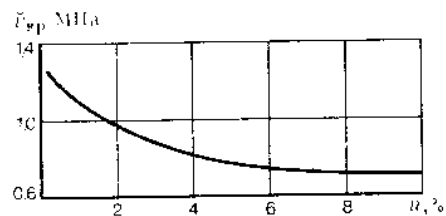


Рис. 8.12. Зависимость критического давления поджигания ($P_{кр}$) для аммонита от содержания в нем нитроглицерина (n)

Большинство аммиачно-селитренных взрывчатых смесей характеризуется сравнительно невысокой горючестью. Хлористый натрий, калий и аммоний при содержании их в составе предохранительного ВВ до 10 % повышают горючесть ВВ (рис. 8.11). Введение в эти смеси нитроглицерина также повышает горючесть ВВ (рис. 8.12). При добавлении древесной муки критическое давление поджигания вначале увеличивается, горючесть падает, достигает максимума при содержании древесной муки около 1 %, а затем снижается до атмосферного давления при содержании древесной муки около 5 %.

Существенно, в 2—2,5 раза, снижают горючесть предохранительных ВВ добавки небольших количеств фторида аммония или натрия (около 3 %). Горючесть аммонитов также снижается в присутствии диаммонийфосфата в сочетании с фторидами. Для снижения горючести были исследованы и другие соли фосфорной кислоты, а также оксалат аммония, гидрат окиси кальция, формиаты кальция и калия и т. п. В табл. 8.28 приведены данные о влиянии различных антипиренов на горючесть аммиачно-селитренных

Таблица 8.28

Наименование антипирена	Содержание антипирена в аммоните, %	$P_{кр}$, МПа	
		Аммонит 6ЖВ	Аммонит 6ЖВ с 18 % хлористого натрия
Оксалат аммония	—	1,8	1,3
То же	5	3,2	—
То же	10	4,6	1,7
»	40	10	—
Гидрат окиси кальция	4	2	—
То же	6	3,9	2,0
Формиат кальция	4	2,6	—
То же	5	—	3,0
»	6	1,8	2,7
»	10	—	3,4
Фосфорнокислый калий	10	1,5	1,8
Фосфорнокислый аммоний	10	1,8	1,8
Фосфорнокислый кальций	10	1,5	1,3
Асбест	2	1,4	—
То же	6	0,4	—

взрывчатых смесей. Лучшие результаты получены на образцах с добавкой формиатов. Низкой горючестью характеризуются предохранительные ВВ, в которых содержатся кальциевая селитра, а также образцы водосодержащих ВВ.

Другие эксплуатационные качества, такие как стабильность физико-химических свойств, водоустойчивость и другие, обеспечиваются известными, общими для промышленных ВВ, методами.

Для обеспечения водоустойчивости предохранительных ВВ, содержащих жидкие нитроэфиры, кроме гидрофобизации состава необходима также слабая желатинизация нитроэфиров коллоидным хлопком (0,2 %) для снижения подвижности (повышение вязкости) жидкого компонента. Еще более высокую водоустойчивость предохранительных ВВ с жидкими нитроэфирами можно получить, если наряду с гидрофобизацией состава вводить в ВВ набухающие в воде добавки. В этом случае при контакте с водой на периферии патрона образуется гелеобразный слой, который препятствует прониканию воды в глубь патрона.

8.5.6. Классификация предохранительных ВВ

К предохранительным ВВ относятся промышленные ВВ III—VII классов. В основе классификации предохранительных ВВ по области применения лежит опасность подземных взрывов газа и пыли при производстве взрывных работ, которая определяется химическим составом шахтной атмосферы, газоопасностью добываемых полезных ископаемых, возможностью внезапных выбросов

газа, характером взрывных работ, горю-геологическими особенностями выработок и рядом других факторов, которые могут влиять на возникновение взрывоопасных ситуаций. В разных странах имеются свои подходы и критерии оценки взрывоопасности соответствующих горных разработок и, соответственно, своя классификация предохранительных ВВ. В СССР все предохранительные ВВ подразделяются на пять классов — от III до VII, характеристики которых приведены ниже. К каждому классу предъявляются свои технические требования в отношении безопасности применения в шахтах с газовым или пылевым режимом; предусмотрены и соответствующие методики испытаний на безопасность (см. раздел 9). Выполнение этих требований обеспечивается соответствующей рецептурой ВВ, конструкцией заряда и технологией изготовления. Могут варьироваться количество, химическая природа и размер частиц пламегасителя, изменяться плотность и диаметр заряда и т. д. При этом всегда придерживаются принципа, что заданный уровень предохранительности должен сочетаться с возможно более высоким уровнем работоспособности для ВВ данного класса или подкласса.

Структура ВВ, водоустойчивость, физическая стабильность, состав продуктов взрыва и другие качественные характеристики обеспечиваются введением в состав ВВ соответствующих веществ или технологией изготовления. Предохранительные ВВ, как и большинство промышленных ВВ, являются смесевыми, состоящими из нескольких компонентов.

Класс III — предохранительные ВВ для взрывания только по породе в забоях подземных выработок, в которых имеется выделение метана и отсутствует взрывчатая пыль.

Класс IV — предохранительные ВВ для взрывания по углю и (или) породе или горючим сланцам в забоях подземных выработок, опасных по взрыву угольной или сланцевой пыли при отсутствии выделения метана; или по углю и (или) породе в забоях подземных выработок, проводимых по угольному пласту, в которых имеется выделение метана, кроме забоев, отнесенных к особо опасным по метану при взрывных работах; или для сотрясательного взрывания в забоях подземных выработок.

Класс V — предохранительные ВВ для взрывания по углю (или) породе в особо опасных по метану при взрывных работах в забоях подземных выработок, проводимых по угольному пласту, когда исключен контакт боковой поверхности шпурового заряда с метано-воздушной смесью, находящейся либо в пересекающих шпур трещинах горючего массива, либо в выработках.

Класс VI — предохранительные ВВ для взрывания: по углю и (или) породе в особо опасных по метану при взрывных работах, забоях подземных выработок, проводимых в условиях, когда возможен контакт боковой поверхности шпурового заряда с метано-воздушной смесью, находящейся либо в пересекающих шпур тре-

щинах горного массива, либо в выработке; или в угольных и смешанных забоях восстающих (с углом более 10°) выработок, в которых выделяется метан, по длине выработок более 20 м и проведении их без предварительно пробуренных скважин, обеспечивающих проветривание за счет общешахтной депрессии.

Класс VII — предохранительные ВВ и изделия из предохранительных ВВ VI—VII классов для ведения специальных взрывных работ (для водораспыления и распыления порошкообразных ингибиторов, для взрывного перебивания деревянных стоек при посадке кровли, при ликвидации завесаний горной массы в углеспускных выработках, для дробления негабаритов) в забоях подземных выработок, в которых возможно образование взрывоопасной концентрации метана и угольной пыли с другими материалами.

8.5.7. Свойства предохранительных ВВ отечественного ассортимента

Предохранительные ВВ класса III. Этот класс представлен аммонитом АП-5ЖВ, который содержит водостойчивую аммиачную селитру, тротил и хлористый натрий. Мощное предохранительное ВВ ограниченного применения используется в чистопородных забоях угольных шахт, опасных по газу или пыли, при соблюдении следующих условий: выполнение мероприятий, исключающих попадание в забой угольной пыли из других выработок или вскрытых пластов, применение водораспылительных завес при содержании метана в забое до 1%. При большем содержании метана использование аммонита не разрешается, не допускается также применять его в породных забоях на расстоянии до 5 м от угольных пластов.

Предохранительные ВВ класса IV. В настоящее время этот класс представлен аммонитом Т-19, который содержит также тройную смесь: водостойчивая аммиачная селитра — тротил — хлористый натрий, но в ином соотношении, чем у аммонита АП-5ЖВ, в частности, содержит больше пламегасителя. ВВ средней мощности и предохранительности, обладают высокой детонационной способностью и детонируют при значительном уплотнении ($1,65—1,7$ г/см³). Благодаря этому снижается вероятность частичных отказов и выгорания зарядов при короткозамедленном взрывании.

Предохранительные ВВ класса V. Этот класс представлен угленитом Э-6. Это ионообменное ВВ, сенсibilизированное жидкими нитроэфирами. В результате обменной реакции между хлористым аммонием и натриевой селитрой при взрыве угленита Э-6 образуется хлористый натрий в ультрадисперсном состоянии. Кроме ионообменной пары угленит Э-6 содержит в составе небольшое количество хлористого калия в качестве дополнительного пламегасителя.

Угленит Э-6 характеризуется достаточно высокой детонационной способностью, которая обеспечивается значительным содержанием нитроэфиров. Водостойчивость достигается опудриванием компонентов состава гидрофобной добавкой типа стеаратов и слабой желатинизацией нитроэфиров коллоидным хлопком. По водостойчивости угленит Э-6 уступает аммониту Т-19, время выдержки патронов в воде перед испытанием на передачу детонации 30 мин.

Предохранительные ВВ класса V рекомендуются для взрывания угля любой крепости и пород слабых и средней крепости только при наличии двух открытых поверхностей в забое; в мягких и средней крепости углях при одной открытой поверхности.

К предохранительным ВВ класса VI относится угленит 12ЦБ, селективно-детонирующее ВВ, сенсibilизированное нитроэфирами. В углените 12ЦБ содержится смесь карбамида и натриевой селитры, которая при взрыве в замкнутой камере реагирует с образованием углекислого газа, воды и азота. Для усиления предохранительных свойств в состав угленита дополнительно вводится небольшое количество хлористого натрия. В качестве желатинизатора применяется натрийкарбоксиметилцеллюлоза.

Предохранительные ВВ класса VI предназначены для взрывных работ в особо опасных условиях угольных шахт. Угленит 12ЦБ применяется для взрывной отбойки угля и породы шпуровым методом в забоях выработок шахт, опасных по газу всех категорий и опасных по пыли, кроме особо опасных восстающих забоев по углю и особо опасных комбайновых ниш с одной плоскостью обнажения.

Предохранительное ВВ класса VII — ионит, представляет собой типичное ионообменное ВВ, состоящее из смеси: натриевая селитра, хлористый аммоний и сенсibilизатор. Как и при взрыве угленита Э-6, в результате ионообменной реакции образуется тонкодисперсный хлористый натрий. В качестве желатинизатора применяется коллоидный хлопок.

Ионит допущен к взрыванию в виде накладных зарядов: при пропуске угля (породы), застрявших в углеспускных выработках и дроблении негабаритных кусков породы (и горючего сланца), массой не более 600 г; при разрушении деревянных стоек, а также для взрывного способа распыления воды, находящейся в полиэтиленовых сосудах, — массой 150 г (для сосудов вместимостью 20 л) и 300 г (для сосудов вместимостью 40 л).

Предохранительные ВВ классов VI—VII характеризуются достаточно высокой детонационной способностью, которая обеспечивается наличием в составе жидких нитроэфиров. Водостойчивость достигается опудриванием компонентов стеаратами, а также слабой желатинизацией нитроэфиров.

Предохранительные ВВ VI—VII классов как нитроэфирсодержащие ВВ характеризуются повышенной чувствительностью к ме-

Таблица 8.29

Показатели	Аммонит АП-5ЖВ	Аммонит Т-19	Углениты		Ионит
			Э-6	12ЦБ	
Кислородный баланс, %	-0,02	-2,47	+0,5	0	+6,47
Теплота взрыва, кДж/кг	3500	3410	2680	2300	1930
Полная идеальная работа взрыва, кДж/кг	3000	2600	1950	—	1440
Температура взрыва, °С	2520	2230	1790	—	—
Объем газов взрыва, л/кг	787	724	560	520	580
Плотность патронов, г/см ³	1,0—	1,05—	1,1—	1,15—	1,0—
	1,15	1,2	1,25	1,35	1,2
Работоспособность в свинцовой бомбе, см ³	320—	265—	130—	95—	95—
	330	280	170	120	125
Работоспособность на баллистическом маятнике	0,74	0,7	0,58	0,8	—
Бризантность, мм	14—17	15—17	7—11	—	5—6
Скорость детонации, км/с	3,6—4,6	3,6—4,3	1,9—2,2	1,9—2,0	1,6—1,8
Критический диаметр, мм	10—12	10—12	7—9	—	—
Передача детонации, см: между патронами	5—10	7—12	5—12	4—5	Детонация впрыток То же
после выдержки в воде, см	2—7	4—8	3—10	2—3	
Чувствительность:					
к удару, %	12—32	12—24	40—70	50—60	24—32
к трению без песка, МПа	—	—	230	—	300
к трению с примесью 5 % песка, МПа	190	190	—	—	—

ханическим воздействиям, обладают более высокой токсичностью, поэтому требуют более осторожного обращения, чем аммониты. Пригодны для применения в различных климатических районах страны. Хранящиеся в поверхностном складе при температурах ниже минус 20 °С патроны перед применением следует отогреть в подземном расходном складе.

Предохранительные ВВ типа аммонитов изготавливают в шаровых мельницах с предварительной шаровой обработкой аммонитной массы и последующим смешиванием с пламегасителем (хлористым натрием) определенной дисперсности, обеспечивающим необходимые антригризутные свойства составу.

Нитроэфирсодержащие предохранительные ВВ (углениты Э-6, 12ЦБ, ионит) изготавливают в две фазы. В первой фазе осуществляют смешивание сыпучих компонентов (ионообменной пары) и гидрофобизацию их стеаратами. Окончательное смешивание сыпучих компонентов со слабожелатинизированными нитроэфирами осуществляют в механических лопастных смесителях типа Вернер-Пфляйдерер. В табл. 8.29 приведены свойства отечественных предохранительных ВВ.

Страна	Наименование ВВ (состав в процентах)	Работоспо- собность, кг	Передача детонации на расстоя- нии, см	Скорость детонации, км/с	Плотность, г/см ³	Температура взрыва, кДж/кг
Болгария	Балканит-2 (аммиачная селитра 62, калие- вая селитра 6, тротил 10, древесный уголь 10, древесная мука 0,75, хлористый на- трий 20)	260	2—3	3,0	—	—
	Скалинит (аммиачная селитра 69, тротил 15, древесная мука 1, хлористый натрий 15)	299	4	3,4	—	—
	Синтезит 18 (аммиачная селитра 66,2, тро- тил 14,7, древесная мука 1,1, хлористый натрий 18)	250	3	3,8	1,08	3360
	Димитрит-2 (нитрофосфиды 7, аммиачная се- литра 64,5, тротил 7, древесная мука 1,5, хлористый натрий 23)	240	7—10	3,0	1,05	3280
Чехослова- кия	Гармонит 5 (нитрофосфиды 10, натриевая се- литра 52,5, хлористый аммоний и прочие до- бавки 34)	120—130	2—6	1,7—1,9	1,25	1670
	Остравит EQ-63 (нитрофосфиды 11, аммиач- ная селитра 24,5, барит 3,5, древесная му- ка 1, хлористый натрий 59,8)	80—105	5—9	1,9—2,1	1,2	1320
	Кемпосит (нитрофосфиды 12, натриевая се- литра 40, хлористый аммоний 31, шавелево- кислый аммоний 6,5, прочие добавки 1,06)	130	3—5	1,84	1,1	—
	Шарбожит 4/50 (нитрофосфиды 9,5, калиевая се- литра 55, 25, хлористый аммоний 28, шаве- лекислый аммоний 5, прочие добавки 2,25)	93	3—5 (в трубе)	1,5	1,1	—
Великобри- тания	Полар-явкс пластичный (нитрофосфиды 26,5, аммиачная селитра 42,7, углеродсодержа- щее горючее 3,8, хлористый натрий 24,6, прочие добавки 2,4)	250	10—15	5,8	1,55	—
	Гидробел пластичный (нитрофосфиды 39,4, аммиачная селитра 20, хлористый натрий 27,1, прочие добавки 3,8, барит 9,7)	185	5—6	5,0—6,0	1,7	—

ФРГ	Юнжекс (нитрофосфиды 16, аммиачная се- литра 46,5, нитроглицерол 3,5, хлористый на- трий 25,5, прочие добавки 8,5)	175—180	15—20	2—2,5	1,1—1,3	—
	Кюнирлуф Кэррифрекс (нитрофосфиды 8,7, аммиачная селитра 9,9, натриевая селитра 46,8, хлори- стый аммоний 27,9, прочие добавки 6,7)	135—140	10—15 5—8	2,4 1,45—1,5	1,23 1,1	—
	Дайналжекс (нитрофосфиды 11, аммиачная се- литра 27, натриевая селитра 15,1, хлори- стый аммоний 5,6, формилат натрия 25, ки- сельгур 3, прочие добавки 1)	140	25—30	2,3	1,39	—
	Веттер-детовит А (нитрофосфиды 7, тротил 14, аммиачная селитра 54,5, хлористый натрий 23, древесная мука 1,5)	190	5—10	2,3	1,0	—
	Веттер-вазатит В (нитрофосфиды 27,5, амми- ачная селитра 30,5, хлористый аммоний 40, прочие добавки 2,0)	—	—	—	—	—
	Веттер-энергит А (нитрофосфиды 12, калиевая селитра 55,5, хлористый аммоний 29, про- чие добавки 3,5)	110—120	4—6	1,5—1,9	1,2	—
	Веттер-карбонит С (нитрофосфиды 10, натри- евая селитра 54,5, хлористый аммоний 34,5, прочие добавки 1)	93	3 (в трубе)	1,5	1,1—1,15	—
	Скальный аммонит № 41 (аммиачная се- литра 73,3, тротил 15, хлористый натрий 8,5, древесная мука 3)	300	8	4,5	1,05	—
	Угольное ВВ № 7-бис (аммиачная селитра 67,5, тротил 9,5, хлористый натрий 18, дре- весная мука 5)	270	2—6	4,0	1,05	—
	Франция	Лризулин хлористый № 16 (нитрофосфиды 12,3, аммиачная селитра 33, хлористый на- трий 49, торф 5, динитроглицерол 0,7)	120	5—10	2,1	1,0
Метаниты № 1—8 (нитрофосфиды 25—28, ам- миачная селитра 30—37, хлористый натрий 36—46, прочие добавки 2—3)		170—230	5—10	1,6—1,9	1,1—1,15	—
Карлит желтый (перхлорат аммония 5—9, аммиачная селитра 58—63, натриевая се- литра 3—7, тротил 6—11, хлористый на- трий 11—16, прочие добавки 2—10)		285	—	4,3	1,05	3230

По предохранительным свойствам аммонит АП-5ЖВ не должен воспламенять метано-воздушную смесь в опытном штреке при взрыве в цилиндрической mortarе зарядом массой 600 г.

Аммонит Т-19 кроме этого испытания не должен воспламенять угольную пыль при взрыве заряда массой 700 г.

Угленит Э-6 выдерживает испытания при взрыве открытого свободно подвешенного заряда массой 200 г в камере опытного штрека в атмосфере метано-воздушной смеси и угольной пыли.

Угленит ЦБ не должен воспламенять метан и угольную пыль при взрыве заряда массой 1000 г в цилиндрической mortarе без забойки. Кроме того, угленит ЦБ не должен воспламенять метано-воздушную и пылевоздушную смесь при взрыве заряда массой 800 г в уголковой mortarе.

Ионит выдерживает испытания при взрыве заряда массой 600 г в уголковой mortarе опытного штрека с отражательной стенкой, расположенной на расстоянии 200 м от mortarы.

8.5.8. Свойства предохранительных ВВ зарубежного ассортимента

За рубежом почти все предохранительные ВВ содержат в качестве сенсibilизатора нитроглицерин или его смеси с нитроглицером. Однако имеются в ассортименте и аммиачно-селитренные составы типа советских предохранительных аммонитов: балканит (НРБ), синтезит (ЧССР), скальный аммонит 41, угольное ВВ № 7-бис (Франция), юниред, тринит (Великобритания).

В Великобритании предохранительные ВВ подразделяют на пять групп. Группа P_1 — полар-аякс, дирифтекс, антифрост, нитрокс № 3, симекс. К группе P_2 относятся заряды в предохранительных оболочках. К ВВ группы P_3 относятся: юнижекс, денекс-пекс, пентрегел, представляющие собой пластичные нитроэфирсодержащие ВВ, а также комплекс, колеспекс — порошкообразные ВВ. ВВ группы P_4 применяются для короткозамедленного взрывания по подрубленной породе и углю (кэррифрекс, кэрибел). Предохранительные ВВ группы P_5 применяются для короткозамедленного взрывания пластов с одной поверхностью обнажения, представителем этой группы служит дайнаджекс.

В Бельгии предохранительные ВВ делятся на четыре класса. Наиболее широкое применение получили кемпоксит и шарбриты (IV класс, сверхпредохранительные ВВ).

В ФРГ применяются предохранительные ВВ трех классов: веттер-нобелит В, веттер-вазагит В (I класс), веттер-энергит, веттер-робурит (II класс), веттер-карбонит, веттер-секюрит (III класс).

В ЧССР все предохранительные ВВ делятся на два класса: семтимит, димитрит, славит (I класс), гармонит, остравит (II класс).

В США угольные пласты отличаются малой газообильностью, благодаря чему американские предохранительные ВВ обычно содержат не более 15 % пламегасящих добавок.

Свойства зарубежных предохранительных ВВ приведены в табл. 8.30 [38, 52].

8.6. ШАШКИ-ДЕТОНАТОРЫ И ЗАРЯДЫ ВТОРИЧНОГО ДРОБЛЕНИЯ

Для возбуждения детонации в гранулированных и водосодержащих ВВ на земной поверхности используют шашки-детонаторы из прессованного тротила или смеси тротила с гексогеном. В зависимости от конструкции они сами инициируются либо от детонирующего шнура, либо от капсюля-детонатора.

Промышленность выпускает три типа шашек, два из которых (ТП-400Г и ТГ-500) имеют цилиндрическую форму и сквозной центральный канал, рассчитанный на пропускание через него четырех ниток детонирующего шнура, третий — ТП-200 и ТП-400 — прямоугольной формы с гнездом под капсюль-детонатор.

Шашки первых двух типов используются только в качестве промежуточных детонаторов, шашки третьего типа — также при сейсмических и других геологоразведочных работах. Все они обладают высокой степенью водостойчивости. Наиболее высокой инициирующей способностью обладают шашки ТГ-500. Прессованные шашки из тротила снаружи покрыты слоем из гидроизолирующей мастики, литые шашки из состава ТГ обернуты парафинированной бумагой.

Шашки всех трех типов упаковывают в деревянные ящики, выложенные бумагой. Допускается также упаковка шашек в ящики из древесно-волоконистых плит или гофрированного картона. Гарантийный срок использования шашек всех типов 2 года со дня изготовления.

Свойства и размеры шашек приведены в табл. 8.31.

Таблица 8.31

Показатели	ТП-400Г	ТГ-500	ТП-200; ТП-400
Масса, г	400	500	200, 400
Поперечный размер, мм	70	70	37, 52
Длина, мм	71	86	101
Диаметр канала (гнезда), мм	14,5	14,5	7,7
Плотность, г/см ³	1,52—1,55	1,58—1,6	1,47—1,58
Скорость детонации, км/с	6,8—7	7,2—7,8	6,2—6,8
Давление детонации, ГПа	15—20	21—24	—
Водостойчивость, сут	6	Не ограничено	10
Водостойчивость при гидростатическом давлении, МПа	0,1—0,2	—	0,5

8.7. ВВ ДЛЯ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ ВЗРЫВОМ

Взрывной способ обработки металлов все шире применяется в машиностроении и металлургии для штамповки, сварки, изготовления биметаллов, упрочнения и т. п. Многообразие форм обработки металлов взрывом предъявляет различные требования к ВВ. Так, например, для упрочнения, резания, пробивания отверстий, прессования порошков необходимы ВВ с высокой скоростью детонации (7—8 км/с), большой плотностью и малым критическим диаметром или критической толщиной слоя.

Для сварки взрывом скорость детонации ВВ не должна превышать скорость звука в свариваемых металлах, а в ряде случаев нужны ВВ со скоростью детонации менее 2 км/с. Заряд ВВ должен обеспечить систему из свариваемых металлов необходимым количеством энергии, достаточным для создания в области соударения давления, необходимого для развития пластической деформации. В отечественной промышленности для сварки взрывом применяют низкочастотные сварочные аммониты, состоящие из аммиачной селитры (смеси гранулированной и кристаллической), тротила и хлористого натрия заданного фракционного состава со скоростью детонации 2—2,6 км/с и толщиной критического слоя 10—20 мм (табл. 8.32).

Эффективность штамповки в значительной степени зависит от технологических параметров процесса (массы заряда, его формы, высоты подвеса и т. п.). С этой точки зрения особенно пригодными для штамповки взрывом являются пластичные ВВ, которым можно легко придать желаемую форму. Кроме того, пластичные ВВ обладают высокой плотностью, они водостойчивы и работоспособны в широком интервале температур. Предпочтение отда-

Таблица 8.32

ВВ	Теплота взрыва, кДж/кг	Объем газов, л/кг	Плотность, г/см ³	Работоспособность, см ³
Аммониты АТ	3700—3800	920—930	0,85—0,9	270—285
Гексопласт ГП-87К	5020	—	1,45—1,5	400—410

ВВ	Бризантность, мм	Критический слой, мм	Скорость детонации, км/с	Чувствительность к удару, %
Аммониты АТ	7—8 (без кольца)	10—20	1,5—3,8	4—24
Гексопласт ГП-87К	23—25	3—5	7—7,6	36—54

ется пластичным ВВ с близким к нулевому кислородным балансом, которые при взрыве не выделяют сажеподобных продуктов и не загрязняют водной среды, в которой производится операция штамповки.

Упрочнение металлов под воздействием взрывных нагрузок проявляется в изменении физических свойств металлов: возрастает твердость, повышается прочность при растяжении, изменяются пределы текучести и характеристики пластичности.

Взрывное упрочнение используется в промышленности в основном для изготовления таких деталей, как крестовины железнодорожных стрелок, захваты камнедробилок, детали мельниц, ковши экскаваторов и т. п.

Основные свойства ВВ, необходимые при упрочнении металлов: высокая скорость детонации (7—8 км/с) и плотность (не менее 1,5 г/см³), малая толщина критического слоя (3 мм), предел прочности на разрыв не менее 0,05 МПа. В СССР для упрочнения взрывом используется гексопласт ГП-87К (см. табл. 8.32).

В США в качестве низкочастотных составов для сварки предложены низкоплотные эластичные ВВ-ячеистые, волокнистые, пластичные, сыпучие взрывчатые смеси, разбавленные для снижения скорости детонации инертным наполнителем.

Для плакирования больших поверхностей металлов в США используются сыпучие динамоны со скоростью детонации 1,05—1,3 км/с при толщине заряда около 25 мм. В некоторых случаях предложено использовать инициирующие ВВ.

В Великобритании используются высокоплотные листовые ВВ, содержащие политетрафторэтилен с пониженной скоростью детонации. В ЧССР для плакирования металлов взрывом используются порошкообразные составы — семтексы. Пластичные семтексы изготавливаются на основе тэна и связующих добавок (высокополимерных материалов).

Для упрочнения изделий из стали Гадфильда в промышленности США применяются ВВ типа EL-506A, EL-506A₂, EL-506A₄, в состав которых входят тэн, коллоксилин и другие компоненты. Это эластичные листовые ВВ с плотностью 1,45—1,5 г/см³, детонирующие со скоростью 6,7—7,3 км/с; критическая толщина слоя детонации их 1,6 мм.

За рубежом для импульсной обработки металлов разработаны различные пластифицированные ВВ, представляющие собой двух- или многокомпонентные смеси, состоящие из взрывчатого наполнителя (гексогена, тэна, нитроглицерина и др.) и пластификатора — связующего (полиизобутилен, бутилкаучук, коллоксилин и др.). В некоторые составы введены дополнительно добавки, повышающие пластичность ВВ (дибутилфталат), прочность (фторопласт), восприимчивость к детонации (углекислый свинец).

9. МЕТОДЫ ИСПЫТАНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ

9.1. ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ДЕТОНАЦИИ

Методы измерения скорости детонации с использованием современной электронно-оптической аппаратуры (фоторегистров, фотохронографов) обеспечивают высокую точность на сравнительно небольших зарядах.

Фотографический метод измерения скорости детонации основан на регистрации светящегося фронта детонационной волны, распространяющейся по заряду ВВ. Для этой цели применяются фоторегистры с зеркальной разверткой (СФР, ЖФР, ЖЛВ и т. п.), позволяющие проводить съемку как в режиме непрерывной развертки светящегося изображения, так и в режиме покадровой съемки. На принципиальной схеме наиболее широко применяемого скоростного фоторегистра СФР заряд ВВ 1 расположен перпендикулярно к плоскости рисунка (рис. 9.1). Объектив 2 проецирует изображение исследуемого процесса на плоскости с вертикальной регулируемой щелью 3, которая выделяет из этого изображения узкую полоску. Объектив 4 с помощью вращающегося зеркала 5 фокусирует изображение этой плоскости на фокальной поверхности с неподвижной фотопленкой 6. При вращении зеркала световая полоска, вырезанная из изображения процесса, перемещается вдоль фокальной поверхности, экспонируя пленку. Благодаря сочетанию движения изображения по пленке с движением самого процесса на пленке образуется линия, наклон которой определяет скорость детонации заряда:

$$D = v_p \operatorname{tg} \varphi / \beta, \quad (9.1)$$

где v_p — скорость развертки изображения; φ — угол наклона касательной к кривой фотограммы; β — коэффициент поперечного увеличения системы, равный отношению длины изображения на пленке к длине заряда.

Из формулы (9.1) видно, что точность определения скорости процесса зависит от точности измерения величин v_p , β и φ . Максимальная относительная погрешность определения скорости детонации

$$\delta D = \pm \left(\frac{\Delta v_p}{v_p} + \frac{2\Delta\varphi}{\sin 2\varphi} + \frac{\Delta\beta}{\beta} \right).$$

Относительная погрешность измерения скорости развертки для СФР не превышает 0,1%. Максимальная относительная погрешность измерения увеличения изображения может достигнуть 0,2%.

Минимальная относительная погрешность измерения угла наклона фотограммы соответствует величине угла, близкой к 45°. Суммарная относительная погрешность определения постоянной скорости детонации достигает 0,8%, а процесса, идущего с переменной скоростью, — 2,5%.

Достоинством фотографического метода является возможность непрерывного измерения скорости детонации по длине заряда.

Прибор СФР вместо непрерывной развертки процесса во времени обеспечивает также получение серии отдельных снимков с частотой до $2 \cdot 10^6$ кадров в секунду.

При покадровой съемке детонации экспозиция должна быть значительно меньше времени перемещения изображения по пленке на расстояние одного кадра. Для этой цели между зеркалом и пленкой устанавливается линзовая вставка, выполняющая функцию светового затвора.

Осциллографический метод измерения скорости детонации основан на ионизации ПВ за фронтом детонационной волны. Электрическое сопротивление ПВ составляет от нескольких единиц до нескольких десятков Ом на миллиметр. Если в заряд ВВ на некотором расстоянии один от другого, называемом базой измерения, поместить искровые промежутки, к которым приложено некоторое напряжение, то в момент прохождения фронтом детонации искрового промежутка в его цепи возникает электрический импульс, регистрируемый осциллографом.

Перед измерением скорости детонации с помощью ионизационных датчиков 1 и 2 (рис. 9.2) конденсаторы 3 и 4 через зарядные сопротивления 5 и 6 заряжаются от источника питания 8. При распространении детонации (на нашей схеме сверху вниз) замыкается ионизационный датчик 1, и конденсатор 3 начинает разряжаться через ионизационный промежуток и разрядное сопротивление 7, в результате чего в цепи возникает скачок напряжения. Через некоторое время, необходимое для подхода детонационной волны ко второму датчику, происходит его замыкание с разрядкой конденсатора 4, и в цепи возникает второй скачок напряжения. Последовательные скачки напряжения, возникающие при замыкании ионизационных датчиков, фиксируются осциллографом. Время между двумя импульсами t соответствует времени прохождения детонационной волны между датчиками, помещенными на расстоянии один от другого L , являющемся базой измерения. Скорость детонации в этом случае рассчитывается по формуле $D = L/t$.

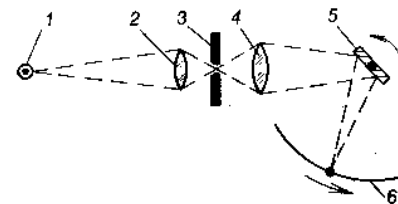


Рис. 9.1. Принципиальная оптическая схема фоторегистра СФР в режиме непрерывной развертки

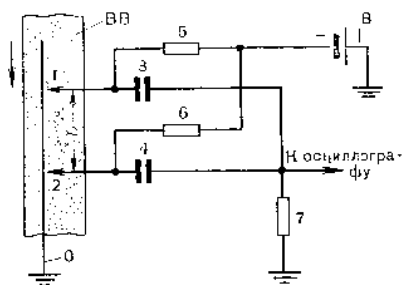


Рис. 9.2. Принципиальная схема измерения скорости детонации с помощью ионизационного датчика

Для обеспечения точного измерения скорости детонации необходимо, чтобы импульсы, снимаемые с ионизационных датчиков, имели возможно более крутой передний фронт, достаточную величину и небольшую длительность. При этом измерительная схема не должна пропускать импульсы от повторного замыкания датчиков. Для этой цели используются различные электронные схемы формирования импульсов. Наиболее широко применяется так называемая «спусковая» тиристорная схема формирования импульсов, позволяющая использовать последовательно до 12 ионизационных датчиков. Импульсы, получаемые от тиристорного преобразователя, фиксируются двухлучевым осциллографом ОК-17 с линейной разверткой длительностью от 3 до 2000 мкс, что позволяет измерять скорость детонации на базе 20 мм с точностью до 1%.

Еще большую точность в измерениях скорости детонации можно обеспечить, применив осциллографы со спиральной разверткой (ИВ-13, ИВ-22 и ОК-15). В осциллографе ОК-15 полный оборот луча происходит за 1 мкс, поэтому временной интервал можно зафиксировать с точностью до 10^{-8} с.

Однако для измерения меняющихся по длине заряда скоростей детонации метод средних скоростей непригоден, а оптические методы не позволяют судить о процессах детонации заряда в непрозрачной оболочке.

Измерение скорости детонации с помощью реостатного датчика, сопротивление которого меняется по мере движения фронта детонации, обеспечивает непрерывное измерение меняющихся по длине заряда скоростей детонации.

Реостатный датчик представляет собой медный провод диаметром 1 мм с намотанной на него спиралью из эмалированного провода диаметром 0,1 мм с высоким удельным сопротивлением (рис. 9.3). При прохождении детонационной волны по заряду медный провод замыкается с проводом высокого удельного сопротивления через ионизационный промежуток. Так как сопротивление

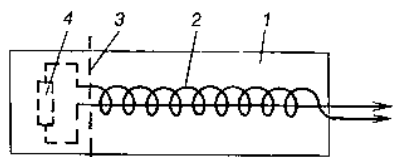


Рис. 9.3. Схема работы реостатного датчика:
1 — заряд ВВ; 2 — датчик сопротивления; 3 — фронт детонации; 4 — сопротивление ионизационного промежутка

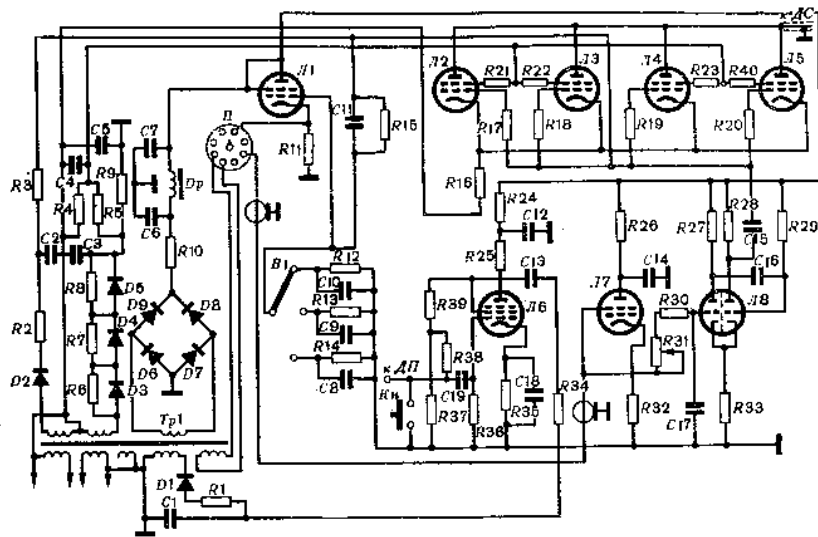


Рис. 9.4. Импульсная схема питания реостатного датчика

невелико и изменяется в незначительных пределах, скорость изменения сопротивления датчика определяет скорость детонации

$$D = \frac{1}{r} \frac{dR}{dt}, \quad (9.2)$$

где r — сопротивление единицы длины датчика; R — общее сопротивление датчика.

Выражение (9.2) можно записать в виде

$$D = \frac{1}{r} \frac{d}{dt} \left(-\frac{U}{i} \right);$$

$$\text{при } i = \text{const} \quad D = \frac{1}{ri} \frac{dU}{dt},$$

где U — напряжение, приложенное к датчику; i — ток, протекающий через датчик. Следовательно, скорость детонации в любой момент времени определяется тангенсом угла наклона кривой $U = f(t)$, фиксируемой осциллографом.

Таким образом, для измерения скорости детонации с помощью реостатного датчика необходимо обеспечить протекание через него постоянного тока, не зависящего от изменения сопротивления датчика.

Л. Н. Гальпериним и К. К. Шведовым предложена импульсная схема питания реостатного датчика (рис. 9.4), позволяющая измерить стационарную скорость детонации с погрешностью до

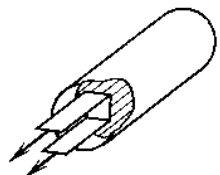


Рис. 9.5. Схема электромагнитного метода измерения массовой скорости

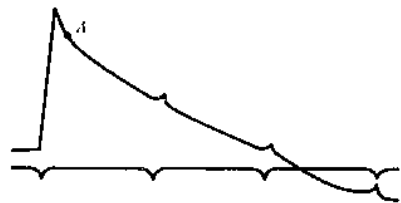


Рис. 9.6. Осциллограмма записи массовой скорости ПВ, определенная электромагнитным методом

2%. При измерении скорости неустановившегося процесса суммарная погрешность не превысит 3—4%.

Электромагнитный метод измерения массовой скорости потока ПВ, скорости детонации и времени реакции в детонационной волне впервые предложен Е. К. Завойским и в дальнейшем развит в работах К. К. Шведова, А. Н. Дремина, П. Ф. Похила и др.

Сущность электромагнитного метода измерения массовой скорости (рис. 9.5) состоит в том, что при движении проводника в магнитном поле в нем наводится электродвижущая сила (ЭДС) индукции, которая связана со скоростью движения проводника, его длиной и напряженностью магнитного поля соотношением

$$E = 8Nlu_{np}10^{-7},$$

где N — напряженность магнитного поля, А/м; l — длина проводника, см; u_{np} — скорость движения проводника, равная скорости ПВ, см/с.

В заряде ВВ помещается П-образный датчик из металлической фольги толщиной 0,05—0,3 мм. Заряд с таким датчиком помещается в однородное постоянное магнитное поле так, чтобы рабочая плоскость датчика при движении пересекала силовые линии. При прохождении детонационной волны по заряду датчик вовлекается в движение продуктами взрыва. ЭДС, наведенная на его концах, записывается на осциллографе. При постоянных l и N ЭДС является функцией только скорости движения датчика, которая при достаточно малой его массе совпадает со скоростью ПВ.

По характерной точке резкого перегиба A на осциллограмме записи $u=f(t)$ (рис. 9.6) определяют скорость ПВ U_1 в плоскости Чепмена-Жуге и время протекания химической реакции τ в детонационной волне.

Одновременно с измерением скорости ПВ возможно определение средней скорости детонации в одном опыте. Для этого изготовляют датчик специальной формы с двумя перекладками, отстоящими одна от другой на некотором расстоянии, являющемся базой измерения. При подходе детонационного фронта ко второй

перекладке на осциллограмме фиксируется резкий выброс скорости.

По найденным значениям u , D и τ можно определить показатель политропы продуктов взрыва n , ширину зоны химической реакции a :

$$n = D/u_1 - 1; \quad a = (D - u)\tau.$$

При расчете величины a средняя скорость u принимается равной $1,25u_1$, для большинства ВВ значение скорости ПВ на фронте детонационной волны составляет 1,5—1,6 u_1 .

Давление детонации конденсированных ВВ определяют либо непосредственным измерением, либо вычисляют на основе измерений других параметров детонации. Второй способ предшествовал первому и до недавнего времени был наиболее распространенным.

Наиболее надежно одновременное измерение скорости детонации и массовой скорости электромагнитным методом. В этом случае давление детонации рассчитывается по формуле $p = \rho_0 u D$, вытекающей из законов сохранения массы и импульса.

Широко применяется также метод откола, основанный на измерении скорости движения свободной поверхности тела, разгружающегося после выхода на поверхность ударной волны, и применении правила удвоения скоростей, согласно которому массовая скорость приблизительно равна половине скорости движения свободной поверхности. По этому методу к торцу взрываемого заряда исследуемого ВВ плотно прижата пластина из инертного вещества. После выхода детонационной волны на границу раздела ВВ — преграда по пластине начинает распространяться ударная волна, а по продуктам взрыва — отраженная волна. Если динамическая жесткость преграды больше динамической жесткости ВВ, т. е. $\rho_{0п} D_n > \rho_{0вв} D_{вв}$, то происходит торможение ПВ и возрастание давления, если же $\rho_{0п} D_n < \rho_{0вв} D_{вв}$, то они расширяются с уменьшением давления. Давление на фронте ударной волны в преграде можно вычислить по формуле

$$p_n = \rho_{0п} D_n U_n,$$

где $\rho_{0п}$ — плотность преграды; D_n — скорость ударной волны в преграде; U_n — массовая скорость вещества преграды.

Для определения давления детонационной волны в плоскости Чепмена — Жуге $p_{ж}$ снимают кривую торможения для различных преград, отличающихся от ВВ динамической жесткостью. Полученные результаты наносят на диаграмму $p-U$ (рис. 9.7) и проводят прямую $p = \rho_{0вв} D u$, являющуюся геометрическим местом точек, отвечающих заданной скорости детонации. Пересечение данной прямой с кривой торможения определяет давление и массовую скорость в детонационной волне. Таким образом, определение давления в плоскости Чепмена — Жуге связано с экспериментальным измерением скорости ударной волны и массовой скорости веще-

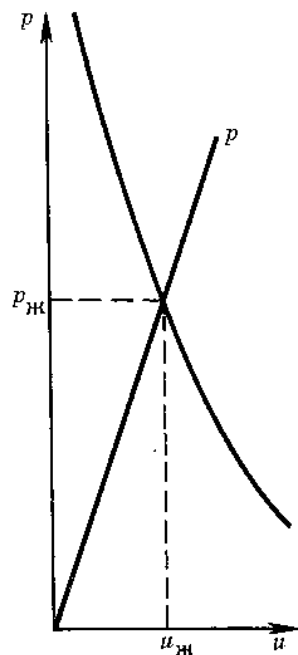


Рис. 9.7. Диаграмма к определению давления и массовой скорости в плоскости Чепмена — Жуге

ства в преграде, которую при давлениях в несколько сотен тысяч атмосфер можно определить по скорости движения свободной поверхности преграды после выхода на нее ударной волны по соотношению

$$\omega_n = 2U_n.$$

Скорость ударной волны в преграде и массовую скорость обычно измеряют с помощью электроконтактных датчиков (рис. 9.8). Пластины, оба экрана и кольцо изготовляют из одного и того же материала и плотно шлифуют друг к другу. Электроконтактные датчики представляют собой петли из провода ПЭВ толщиной 0,1—0,2 мм. Датчики первой пары через отверстия в экране и пластине упираются в поверхность экрана и замыкаются в момент выхода ударной волны на поверхность экрана. Датчики второй пары упираются в поверхность пластины и замыкаются в момент выхода ударной волны на поверхность пластины. Толщина пластины Δ является базой измерения скорости ударной волны. Датчики третьей пары устанавливаются так, чтобы они упирались в наружную поверхность экрана. Они срабатывают в момент выхода ударной волны из экрана, вызванной ударом по

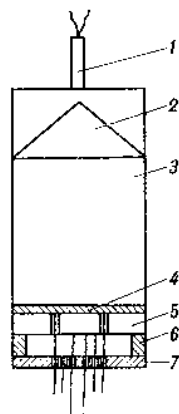


Рис. 9.8. Схема к определению скорости ударной волны и массовой скорости в преграде:

1 — ЭД; 2 — линза для создания плоского детонационного фронта; 3 — заряд ВВ; 4 — передний экран; 5 — пластина; 6 — кольцо; 7 — экран

нему откольной тарелочки. Высота кольца h является базой измерения скорости свободной поверхности пластины. Сигналы с датчиков записываются с помощью электронно-лучевого осциллографа ОК-15 с круговой ждущей разверткой.

Скорость ударной волны в преграде $D_n = \Delta/t_n$.

При измерении скорости свободной поверхности преграды фиксируется время t_n между срабатыванием датчиков второй и третьей пар, которое складывается из времени t_0 движения свободной поверхности на базе s и времени $t_{\Delta 2}$ движения ударной волны по экрану.

Высота кольца выбирается такой, чтобы время записи движения свободной поверхности преграды было меньше времени одной циркуляции волны в пластине толщиной Δ :

$$s/\omega_n \leq 2\Delta/D_n;$$

в противном случае произойдет ускорение свободной поверхности пластин.

Второй экран в 10 раз тоньше высоты кольца, поэтому, пренебрегая затуханием волны во втором экране, получим $t_{\Delta 2} = 2\Delta/D_n$. Скорость движения свободной поверхности преграды вычисляется по формуле

$$\omega_n = s/(t_n - t_{\Delta 2}),$$

а массовая скорость — по уравнению

$$u_n = \omega_n/2 = s/[2(t_n - t_{\Delta 2})].$$

Для вычисления давления проводят несколько измерений D_n и u_n в преградах разной толщины и экстраполируют полученные значения к нулевой толщине преграды.

Используя акустическое приближение, давление в падающей детонационной волне можно рассчитать по формуле

$$p = \frac{p_0}{2} \left(1 + \frac{t_0 D_{ВВ}}{\rho_n D_n} \right).$$

Измерения можно значительно упростить, поскольку для большинства материалов, используемых в качестве преград, известны ударные адиабаты, т. е. получена связь между скоростью ударной волны в преграде и массовой скоростью. Тогда для вычисления давления необходимо измерить D_n либо u_n .

Скорость ударной волны в преграде можно измерить и фотохронографическим методом (рис. 9.9). При фотографировании фиксируется последовательное прохождение ударной волны через зазоры на границе прозрачных плексигласовых блоков с преградой. Свечение возникает при вступлении ударной волны в зазор и прекращается через несколько наносекунд (10^{-9} с) при вхождении ее в плексигласовые блоки, теряющие свою прозрачность при ударе и являющиеся световыми затворами. Для интенсификации свече-

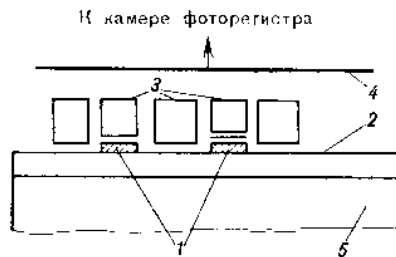


Рис. 9.9. Схема к измерению скорости ударной волны в преграде фотографическим методом:

1 — исследуемые образцы; 2 — зазоры; 3 — прозрачные блоки; 4 — экран со щелью; 5 — заряд ВВ

ния зазор заполняют аргоном. Скорость рассчитывают так же, как и в случае применения электроконтактных датчиков.

При определении давления детонации ВВ методом «аквариума» к торцу заряда исследуемого ВВ плотно приставляют пластину из оптически прозрачного инертного материала, например плексигласа. Когда детонационная волна, распространяющаяся по заряду, дойдет до границы раздела ВВ — инертная пластина, по пластине пойдет ударная волна, а по ПВ — отраженная волна. На границе раздела ПВ — пластина выполняются условия равенства давления и массовых скоростей:

$$p_2 = p_n; \quad u_2 = u_n,$$

где p_2 и u_2 — для ПВ; p_n и u_n — для пластины.

Закон сохранения импульса для детонационной волны, отраженной волны в ПВ и ударной волны в инертной пластине записывается в виде

$$p = \rho_0 D u; \quad p_2 - p = \rho D_2 (u - u_2); \\ p_n = \rho_n D_n u_n,$$

где p , D , u — соответственно давление, скорость детонации ВВ и массовая скорость ПВ; p_2 , D_2 — соответственно давление и скорость отраженной волны; p_n , D_n — соответственно давление и скорость ударной волны в инертной среде (в пластине); ρ_0 , ρ , ρ_n — плотность соответственно ВВ, ПВ и инертной среды.

Связь параметров детонации ВВ с параметрами ударной волны в инертной среде вытекает из соотношения

$$p = p_n \frac{\rho_0 D}{\rho_n D_n} \left(\frac{\rho_n D_n + \rho D_2}{\rho_0 D + \rho D_2} \right). \quad (9.3)$$

В акустическом приближении, означающем равенство динамических жесткостей падающей и отраженной волн, т. е. $\rho_0 D - \rho D_2$, уравнение (9.3) принимает вид

$$p = \frac{1}{2} p_n \left(1 + \frac{\rho_0 D}{\rho_n D_n} \right). \quad (9.4)$$

Связь массовых скоростей и скоростей детонации ВВ и ударной волны в пластине вытекает из уравнений (9.3) и (9.4) и может быть записана в виде

$$u = \frac{1}{2} u_n \left(1 + \frac{\rho_n D_n}{\rho_0 D} \right). \quad (9.5)$$

Таким образом, для нахождения давления и массовой скорости исследуемого ВВ в детонационной волне необходимо экспериментально определить скорость детонации ВВ, скорость ударной волны в инертной среде и массовую скорость в инертной среде.

На практике при методе «аквариума» в качестве инертной среды берется материал с известной ударной адиабатой. В таком случае достаточно измерить скорость детонации ВВ и скорость ударной волны в инертной среде, чтобы вычислить давление и массовую скорость в детонационной волне. В качестве инертной среды обычно используют воду (отсюда и название метода) или плексиглас, прохождение ударной волны по которым фиксируется оптическим методом.

При детонации исследуемого заряда свечение ПВ отражается от зеркала и просвечивает блок из инертного материала. Ударная волна, распространяющаяся по инертному материалу, резко изменяет его прозрачность, и на фотопленке на фоне подсветки фиксируется четкий след ударной волны.

Ударная адиабата для плексигласа может быть записана в виде

$$D_{пл} = 2,71 + 1,568 u_{пл} - 0,037 u_{пл}^2.$$

По измеренным скоростям детонации скорость ударной волны в плексигласе $D_{пл}$ и рассчитанной по уравнению (9.5) массовой скорости в плексигласе $u_{пл}$ и уравнениям (9.4) и (9.5) рассчитывают давление детонации исследуемого ВВ и массовую скорость ПВ.

Метод манганинового датчика позволяет непосредственно измерять давление в ударной и детонационной волнах [31]. Впервые предложен П. Дж. Фуллером и Дж. Х. Прайс в 1964 г. Основан на том, что электрическое сопротивление манганинового сплава увеличивается с увеличением давления, оказываемого на него окружающей средой.

Манганин хорошо подходит в качестве датчика давления, так как имеет достаточно высокий положительный коэффициент изменения сопротивления в зависимости от давления, и его характеристика почти линейная. Еще важнее то, что он имеет очень низкий коэффициент зависимости сопротивления от температуры, которая возникает из-за ударного разогрева. Однако на нем наблюдается слабый гистерезис, т. е. после ударного нагружения фиксируется остаточное изменение сопротивления.

9.2. МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ

Метод свинцовой бомбы (проба Трауцля) наиболее широко применяется для определения относительной работоспособности ВВ.

Принятая на II Международном конгрессе прикладной химии в качестве стандартной бомба Трауцля (ГОСТ 4546—81) представляет собой массивный свинцовый цилиндр с несквозным осевым каналом. Бомбы отливают из рафинированного свинца при температуре 390—400°C. На дно канала бомбы помещают заряд исследуемого ВВ массой 10 г в бумажной гильзе. Свободную часть канала бомбы засыпают сухим кварцевым песком. Заряд ВВ инициируют ЭД-8-Э. После взрыва в бомбе образуется характерное вздутие (рис. 9.10).

Расширение свинцовой бомбы в кубических сантиметрах за вычетом начального объема канала и расширения, производимого электродетонатором (30 см³), и является мерой относительной работоспособности ВВ. Величины работоспособности (см³), определенные этим методом для наиболее характерных веществ, следующие:

Тротил	285—310	Детонит М	440—460
Гексоген	475—495	Аммонит ПЖВ-20	265—290
Аммонит 6ЖВ	360—380	Угленит Э-6	130—170
Аммонал скальный № 3	460—480		

Для получения сравнимых результатов необходимо строго соблюдать стандартные условия испытания ВВ и изготовления бомб. Каждую партию свинцовых бомб перед испытанием тарируют по эталонному ВВ, в качестве которого служит дважды перекристаллизованный из спирта тротил.

Температура, при которой производятся испытания, также влияет на их результаты. За стандартную принимается температура +10°C. При изменении температуры в результате измерений вводят соответствующие поправки. При 0°C полученную величину расширения увеличивают на 5%, при +30°C — уменьшают на 6%.

Большое влияние на показатели пробы оказывает объем навески ВВ; заряды большей высоты легче деформируют свинец и при одинаковой массе дают большее расширение канала бомбы.

Этот простой и широко распространенный метод оценки работоспособности имеет вместе с тем ряд принципиальных недостатков. Работоспособность ВВ выражается в некоторых условиях единицах приращения объема, кроме того, по величине расширения нельзя количественно сравнивать ВВ, а можно лишь расположить их в некоторый относительный ряд, так как величина расширения связана с истинной работоспособностью ВВ нелинейной

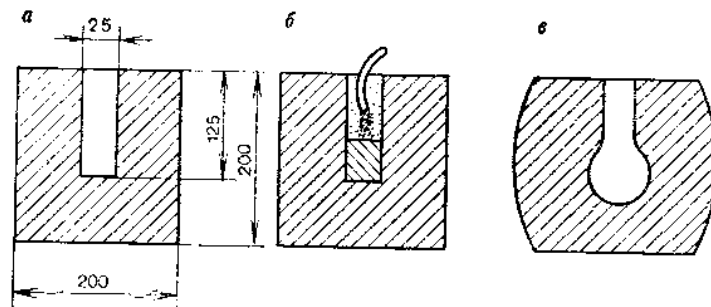


Рис. 9.10. Схема к определению работоспособности (фугасности) ВВ в свинцовой бомбе:
а — бомба до снаряжения; б — снаряженная бомба; в — бомба после взрыва

зависимостью. В работах А. Ф. Беляева показано, что когда расширение возрастает в 2 раза, работоспособность возрастает лишь в 1,7 раза. Эта нелинейность связана с уменьшением доли энергии, расходуемой на выброс забойки, газов и образование ударной волны в воздухе, а также с тем, что при увеличении расширения свинцовой бомбы стенки ее становятся тоньше и их сопротивление уменьшается.

В связи с этим А. Ф. Беляевым и Р. Х. Курбангалиной предложен для относительной оценки работоспособности метод эквивалентных зарядов, сущность которого заключается в определении эквивалентной массы аммонита 6ЖВ, производящей такое же расширение, как исследуемый заряд. Обязательным условием метода является использование зарядов равной высоты и равного объема. При соблюдении этого условия одинаковым расширениям должна соответствовать одинаковая работа $A = aG$, где a — работоспособность ВВ (работа, производимая единицей массы) и G — масса заряда. Поскольку массы зарядов подобраны так, что расширения одинаковы, то и работа одинакова:

$$A_x = A_6, \text{ или } a_x G_x = a_6 G_6; \quad a_x / a_6 = G_6 / G_x,$$

где a_x и a_6 — работоспособность соответственно исследуемого ВВ и аммонита 6ЖВ; G_x и G_6 — массы соответственно исследуемого ВВ и аммонита 6ЖВ.

Для ускорения расчета определена зависимость расширения свинцовой бомбы от массы заряда аммонита 6ЖВ (рис. 9.11). Полученным графиком легко пользоваться для нахождения величины G_6 по экспериментально определенной величине расширения канала бомбы при взрыве испытываемого ВВ. Соответствующие опытные данные приведены в табл. 9.1.

Метод баллистического маятника. Основой баллистического маятника является груз, подвешенный на жестких тягах к неподвижной опоре. При воздействии на маятник потока ПВ или

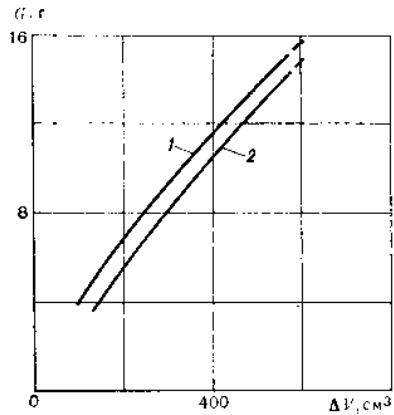


Рис. 9.11. Зависимость расширения свинцовой бомбы от массы взрывного заряда:
1 — с учетом действия ЭД; 2 — в расчете на чистую массу ВВ

Таблица 9.1

Вещество	Расширение в свинцовой бомбе, см³	Эквивалентный заряд аммонита 6ЖВ, г	Относительная работоспособность
Тротил	310	8,2	0,82
Динамов на древесной муке	350	9,0	0,9
Аммонит 6ЖВ	390	10	1
Гексоген	495	12,1	1,22
Тэн	500	12,3	1,23
Тетрил	390	10	1
62 %-ный динамит	410	10,4	1,04
Аммонал с 20 % алюминия	530	13	1,3

ударной волны он получает некоторое количество движения и отклоняется на некоторый угол. Конструкции баллистических маятников весьма разнообразны.

В одной из конструкций, наиболее простой, действие взрыва ВВ воспринимается торцом носка маятника (рис. 9.12, а). Заряд ВВ помещается на некотором удалении от носка маятника, а иногда непосредственно на торце. Если маятник под действием взрыва ВВ отклонился на угол φ , то импульс, воспринятый носком маятника, $I = M\sqrt{2gl}(1 - \cos \varphi)$, где M — масса маятника; g — ускорение свободного падения; l — длина подвеса. Эта формула справедлива для углов отклонения, не превышающих 20° . Если

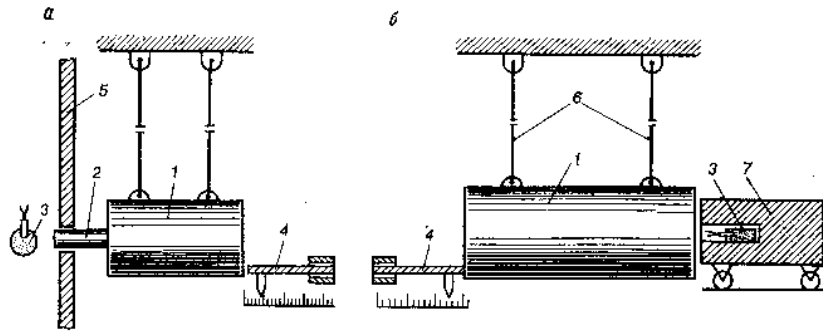


Рис. 9.12. Баллистический маятник:
1 — тело маятника; 2 — носок маятника; 3 — заряд ВВ; 4 — измеритель отклонений; 5 — защитный экран; 6 — подвесы; 7 — мортира

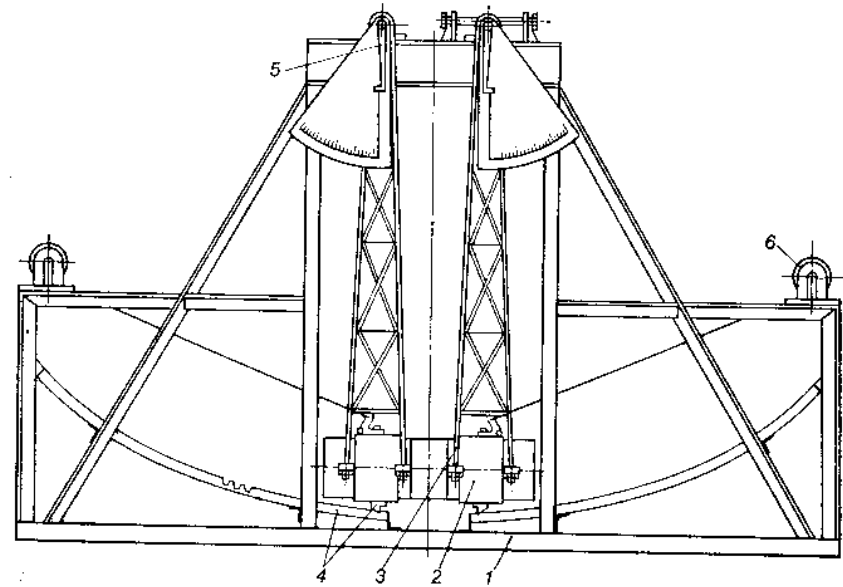
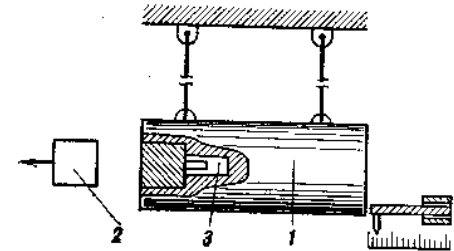


Рис. 9.13. Схема двухмаятниковой баллистической установки:
1 — основание; 2 — мортира; 3 — подвес; 4 — фиксатор; 5 — угломер; 6 — лабедка

Рис. 9.14. Схема баллистической мортиры:
1 — мортира; 2 — снаряд; 3 — заряд ВВ



вместо измерения угла отклонения маятника измерять горизонтальное перемещение маятника x , то для малых углов импульс $I = M2\pi x/T$, где T — период колебания маятника.

Работа взрыва $A = Mh$, где h — высота подъема центра тяжести маятника.

Тогда

$$A = MI(1 - \cos \varphi) = I^2/(2gM).$$

При несколько иной конструкции баллистического маятника взрыв заряда производится в стальной мортире, которая на тележке подкатывается вплотную к маятнику (рис. 9.12, б). Маятник в этом случае отклоняется продуктами взрыва, вылетающими из мортиры. При испытании обычно определяют заряд исследуемого ВВ, который дает отклонение маятника, равное отклонению при взрыве заряда стандартного ВВ (обычно тротила) массой 200 г. Достоинством этого метода является возможность взрыва-

ния больших зарядов ВВ (более 200 г). МакНИИ предложен двухмаятниковый способ определения работоспособности ВВ. Двухмаятниковая баллистическая установка представляет собой два снаренных маятника — мортиры массой по 178 кг (рис. 9.13). Заряд исследуемого ВВ массой 10 г взрывают в канале одной из мортир. Перед взрыванием мортиры плотно прижаты одна к другой, после взрывания фиксируется угол отклонения обеих мортир. Работу, производимую продуктами взрыва заряда ВВ, рассчитывают по формуле

$$A = 2Ml(1 - \cos \varphi),$$

где M — масса обеих мортир вместе с подвеской; φ — угол отклонения мортир.

Метод баллистической мортиры. В массивной стальной мортире, подвешенной в виде маятника (рис. 9.14), имеются взрывная камера, в которую помещают заряд испытываемого ВВ массой 100 г, и расширительная камера, в которой перед взрыванием помещается массивный поршень-снаряд.

Работа отклонения мортиры $A_1 = Mh = Ml(1 - \cos \varphi)$, где M — масса мортиры; $h = l(1 - \cos \varphi)$ — высота поднятия центра тяжести мортиры; l — длина подвеса мортиры.

Работа, затраченная на выброс поршня-снаряда,

$$A_2 = mv^2/(2g),$$

где m — масса поршня-снаряда; v — начальная скорость поршня-снаряда.

Так как определить опытным путем работу отклонения мортиры легче, чем работу выброса поршня-снаряда, полную работу вычисляют исходя из того, что количество движения, полученное мортирой Mu и снарядом mv , одинаково.

Скорость движения мортиры можно найти из соотношения

$$Ml(1 - \cos \varphi) = Mu^2/(2g),$$

$$\text{отсюда } u^2 = 2gl(1 - \cos \varphi).$$

$$\text{Так как } v = \frac{M}{m} u,$$

$$\text{то } v^2 = \frac{M^2}{m^2} 2gl(1 - \cos \varphi).$$

С учетом этого работа выброса поршня-снаряда

$$A_2 = \frac{mv^2}{2g} = \frac{M^2}{m} (1 - \cos \varphi).$$

Полная работа взрыва

$$A_M = A_1 + A_2 = Ml(1 - \cos \varphi) + \frac{M^2}{m} (1 - \cos \varphi)$$

$$\text{или } A_M = Ml \left(1 + \frac{M}{ml} \right) (1 - \cos \varphi).$$

Оценка работоспособности по воронке выброса удобна тем, что ее можно выполнять с зарядами большой массы, в частности с ВВ, имеющими большой критический диаметр (гранулированными, водосодержащими), для которых многие лабораторные методы малопригодны.

В песчаном грунте, на фиксированной для данной серии опытов глубине, зависящей от потенциальной энергии взрыва заряда испытываемого ВВ, взрывают заряды испытываемого и эталонного ВВ различной массы. При этом массы зарядов из эталонного ВВ подбирают таким образом, чтобы их потенциальная энергия перекрывала по возможности более широкую область, лежащую как ниже, так и выше значений потенциальной энергии взрыва зарядов испытываемого ВВ.

Испытания проводят с сосредоточенными зарядами ($h \leq 2d$). Глубина заложения зарядов 0,35 м. После подрыва каждого заряда измеряют глубину и диаметр воронки и рассчитывают ее объем, в предположении, что воронка имеет правильную коническую форму.

По результатам взрывов зарядов эталонного ВВ (аммонита 6ЖВ) определяют зависимость объема воронки выброса от массы заряда:

$$V = A(m - m_0)^n,$$

где V — объем воронки выброса, m^3 ; A — эмпирический коэффициент; m — масса заряда ВВ; m_0 — масса заряда ВВ, при которой наблюдается камуфлет; n — показатель степени.

Составляя значения объема воронки выброса для заряда испытываемого ВВ с калибровочной кривой, определяют эквивалентную массу заряда аммонита 6ЖВ, при взрыве которого образуется воронка такого же объема.

Критерием относительной работоспособности является отношение массы эквивалентного заряда (m_0) и массы заряда испытываемого ВВ ($m_{ВВ}$):

$$f = m_0/m_{ВВ}.$$

Мерой относительной работоспособности ВВ могут быть также величины тротилового эквивалента (см. подраздел 4.3), вычисленные по соответствующим формулам или полученные по экспериментальным измерениям параметров воздушных ударных волн. Такими параметрами могут быть импульс фазы сжатия волны или избыточное давление на ее фронте.

В качестве импульсометров используют маятниковые, поршневые и другие приборы. Избыточное давление измеряют пьезодатчиками или вычисляют по измеренной скорости ударных волн

$$\Delta p = \frac{2\rho_v}{k+1} (\omega^2 - c^2),$$

где ρ_v — плотность воздуха; ω — скорость ударной волны; c — скорость звука в воздухе.

Тротильные эквиваленты для различных промышленных ВВ принимают следующие значения:

Аммонит ПЖВ-20	0,57	Аммонит АП-5ЖВ	0,65
Угленит Э-6	0,39	Аммонит 6ЖВ	0,81
Аммонал скальный № 3	1,08		

9.3. МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ БРИЗАНТНОСТИ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ

Наиболее простым и распространенным методом испытания на бризантность является проба на обжатие свинцовых столбиков, или проба Гесса (рис. 9.15). Для испытаний применяется свинцовый столбик диаметром 40 мм и высотой 60 мм, который устанавливают на массивной стальной плите в вертикальном положении. На столбик помещают стальную пластинку толщиной 10 мм и диаметром 41 мм, на которой устанавливается заряд испытываемого ВВ массой 50 г в бумажной оболочке диаметром 40 мм. При взрыве заряда ВВ свинцовый столбик деформируется. Мерой бризантности ВВ является величина обжатия, т. е. разность высот столбика до и после обжатия.

Более точно оценивать бризантность, как это показано в работах П. Ф. Похила и М. А. Садовского, величиной

$$\alpha = \Delta h / (h_0 - \Delta h) = \Delta h / h_k,$$

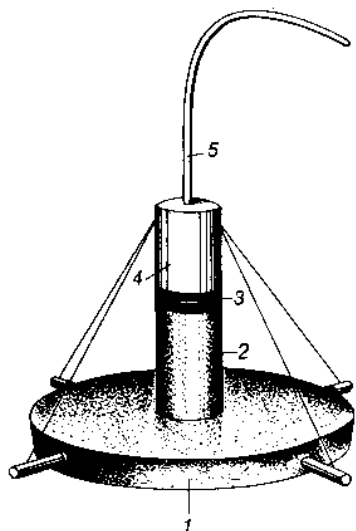


Рис. 9.15. Схема к определению бризантности по пробе Гесса:

1 — металлическая плита; 2 — свинцовый столбик; 3 — стальная пластинка; 4 — заряд ВВ; 5 — огнестойкий шнур

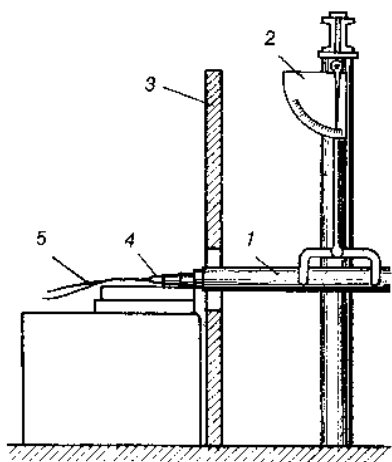


Рис. 9.16. Схема баллистического маятника для определения бризантности ВВ:

1 — маятник; 2 — угомер; 3 — щит; 4 — заряд ВВ; 5 — проводящий ЭД

где Δh — величина обжатия столбика (бризантность); h_0 — высота столбика до обжатия; h_k — высота столбика после обжатия.

Функция α учитывает увеличение сопротивления столбика по мере обжатия.

В табл. 9.2 приведены величины бризантности и показателя α для различных веществ при плотности 1 г/см³.

Величина обжатия свинцового столбика, особенно для промышленных ВВ, зависит от скорости детонации ВВ, которая возрастает с измельчением компонентов и увеличением гомогенности их смешивания. Поэтому проба Гесса широко распространена в качестве контрольной приемочной пробы.

Для ВВ с низкой детонационной способностью (гранулированных, водосодержащих), которые неспособны устойчиво детонировать в зарядах с бумажной оболочкой диаметром 40 мм и имеют большой участок разгона детонации, пробу Гесса несколько видоизменяют, помещая ВВ в стальные кольца, увеличивают длину заряда и его массу (до 100 г). При малой восприимчивости ВВ к капсулю-детонатору для возбуждения детонации применяют шашки из прессованного тетрила или другого мощного ВВ массой 5 г. Величина обжатия для гранулированных ВВ составляет 20—30 мм.

При оценке бризантного действия взрыва по испытанию на баллистическом маятнике заряд располагают непосредственно на торце носка маятника (рис. 9.16). Экспериментальное значение импульса рассчитывается по измеренному отклонению маятника.

Для приближения лабораторных условий опыта к производственным Л. И. Бароном, Б. Д. Росси и С. П. Левчиком предложен метод оценки бризантного действия промышленных ВВ по дроблению кубиков из горной породы (рис. 9.17). По этой методике заряд 2 испытываемого ВВ массой 20 г помещают в канал в центре кубика 3. Всю свободную часть канала заполняют забойкой 1. Перед началом опыта кубики тщательно взвешивают и взрывают в прочном стальном сосуде (типа бомбы Долгова).

Таблица 9.2

Показатели	Тротил	Аммониты				Детонит М
		6ЖВ	скальный	ПЖВ-20	АП-5ЖВ	
Бризантность, мм	16	14	18	13	14	17
	0,364	0,305	0,43	0,277	0,305	0,396

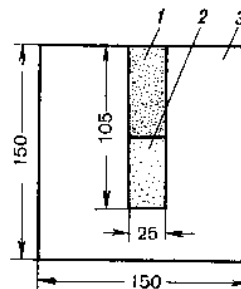


Рис. 9.17. Схема испытаний при дроблении породного блока

После взрыва весь разрушенный материал извлекают из бомбы и подвергают ситовому анализу. Обычно определяют суммарный выход (в процентах) фракции крупностью 5—7 мм.

9.4. МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕПЛОТЫ, ОБЪЕМА И СОСТАВА ПРОДУКТОВ ВЗРЫВА

Для оценки ВВ как источников энергии прежде всего необходимо знать количество энергии, выделяемой единицей массы ВВ в результате взрыва, объем и состав ПВ.

Экспериментально теплоту взрыва определяют в калориметрических установках, состоящих из толстостенной стальной бомбы объемом от нескольких сотен кубических сантиметров до 50 л и жидкостного калориметра. В калориметрической установке ИХФ АН СССР для определения теплоты взрыва (рис. 9.18) вместимостью до 5 л можно взрывать заряды в массивных оболочках. Перед опытом в калориметрической бомбе откачивают воздух, возможно также заполнение бомбы инертным газом, например азотом. Для определения количества тепла, выделившегося при взрыве, бомбу помещают в калориметр с точно отмеренным количеством калориметрической жидкости (обычно вода).

Теплоту взрыва вычисляют по формуле

$$Q_v = \frac{(Mc_b + mc_{ж}) (T_k - T_0)}{G} \cdot 1000,$$

где M — масса бомбы; c_b — удельная теплоемкость материала бомбы; m — масса калориметрической жидкости; $c_{ж}$ — удельная теплоемкость калориметрической жидкости; T_k и T_0 — соответственно конечная и начальная температуры калориметрической жидкости; G — масса взрываемого ВВ.

При определении «фугасной» теплоты навеску ВВ взрывают в тонкостенных оболочках из свинцовой фольги или стекла. При этом ПВ без существенного теплообмена с материалом оболочки свободно расширяются и отдают свое тепло калориметрической жидкости через стенки установки. При определении «детонационной» теплоты ВВ массой 10—40 г взрывают в толстостенной (7 мм) медной или латунной оболочке. В этом случае благодаря интенсивному теплообмену ПВ с разрушаемым материалом оболочки происходит быстрое охлаждение ПВ с «закалкой» ложного равновесия и фиксации их химического состава, близкого к начальному, т. е. в детонационной волне.

Применение жидкостных калориметров связано с созданием сложных и дорогостоящих установок внушительных размеров. Поэтому в ряде методик в качестве калориметра используют саму бомбу, причем температуру ее измеряют термометрами Бекмана, расположенным в разных точках, опыты проводят в стандартных бомбах Долгова или Бихеля.

Калориметрические бомбы обычно тарируют сжиганием в них навесок бензойной кислоты с точно определенной теплотой сгорания, при этом определяют так называемое тепловое значение калориметра, равное количеству тепла, поглощенного его массой при повышении температуры на 1 °С. Так, тепловое значение калориметрической установки ИХФ АН СССР равно 130 кДж/градус.

К моменту измерения конечной температуры калориметра практически вся вода, образовавшаяся при взрыве, находится в жидком состоянии. Поэтому непосредственные измерения относятся к воде жидкой. Во многих случаях необходимо знать теплоту взрыва при воде парообразной, так как при совершении работы продуктами взрыва вода находится в парообразном состоянии. Для пересчета экспериментально найденного значения теплоты взрыва при воде жидкой на теплоту взрыва при воде парообразной необходимо измерить количество выделившейся воды и от тепла, полученного в опыте, вычесть количество тепла, необходимого для ее испарения. Количество образующейся при взрыве воды обычно находят продуванием бомбы после взрыва сухим воздухом или азотом и последующим улавливанием воды хлористым кальцием или вымораживанием.

Объем и состав ПВ определяют в бомбах, аналогичных калориметрическим, или в бомбах Бихеля и Долгова.

Бомба Бихеля представляет собой толстостенный стальной сосуд вместимостью 20 л (бомба Долгова — 50 л), герметично закрывающийся крышкой, снабженной электропроводами для подключения ЭД и вентилями для вакуумирования бомбы и отбора проб. В бомбе обычно взрывают заряд ВВ массой 100 г в оболочке из кварцевого песка или других инертных материалов, реже — без оболочки. Само ВВ формируется в виде цилиндрического патрона диаметром 36 мм, гильза патрона выполняется из бумаги тех сортов, которые допущены для патронирования промышленных ВВ в соответствии с ГОСТ 14839.20—77Е, используют бумагу массой не более 3 г на 100 г ВВ. Для определения влияния на состав ПВ гидроизоляционного слоя испытывают патроны, покрытые парафин-петролатумом согласно ГОСТ 14839.20—77Е (2,5 г на 100 г ВВ). Перед взрыванием из бомбы выкачивают воздух (остаточное давление не более 6,65 кПа).

После взрывания бомбу охлаждают до комнатной температуры и измеряют давление ПВ в ней. При охлаждении ПВ вода конденсируется и в определяемый объем ПВ не входит.

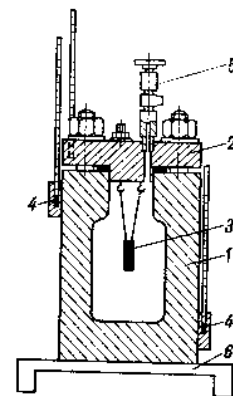


Рис. 9.18. Схема калориметрической установки:

1 — корпус установки; 2 — крышка; 3 — заряд ВВ; 4 — термометры; 5 — вентиль; 6 — подставка

Объем сухих газообразных продуктов, приведенных к нормальным условиям на 1 кг ВВ, вычисляют по формуле

$$V_r = \frac{V_6 (p - \omega_n) 273 \cdot 1000}{760TG}$$

где V_6 — объем бомбы; p — абсолютное давление в бомбе, равное $p_{\text{изб}} + p_{\text{атм}} - p_{\text{ост}}$; T — абсолютная температура тела бомбы в момент замера давления; ω_n — упругость водяных паров при температуре T ; G — масса навески испытываемого ВВ.

Состав газообразных ПВ определяется методами газового анализа. Наиболее распространен метод, основанный на последовательном поглощении газов различными химическими поглотителями.

В качестве поглотителей применяют: для углекислого газа — раствор щелочи, для окиси азота — раствор сернокислого железа, для кислорода — раствор пирогаллола, для окиси углерода — аммиачный раствор полухлористой меди.

Содержание водорода и метана определяют по уменьшению объема после сжигания газов в смеси с воздухом в сосуде для сжигания при пропускании их через нагреваемую электрическим током платиновую проволочку и поглощению образовавшегося при сжигании углекислого газа. Содержание азота вычисляют по разности между начальным объемом смеси и объемом других газов, составляющих смесь.

К вычисленному объему газов следует добавить объем паров воды. Для этого определяют количество жидкой воды продуванием бомбы сухим воздухом с последующим поглощением воды хлористым кальцием. Объем паров воды при нормальных условиях определяется по формуле

$$V_n = 22,4 \cdot 100b / (18G),$$

где b — количество воды.

Таблица 9.3

Показатели	Тротил	Тетрил	Гексоген	Тэв	Аммонит	
					6ЖВ	ПЖВ-20
Плотность, г/см	1,5	1,5	1,5	1,65	1,3	1
Удельный объем газообразных ПВ, л/кг	610/750	620/740	700/890	550/790	430/890	315/717

Примечание. В числителе приведены значения для воды, в знаменателе — для пара.

В табл. 9.3 приведены найденные экспериментально удельные объемы газообразных ПВ некоторых ВВ.

В последнее время для анализа ПВ применяют хроматографический метод, основанный на разделении компонентов газовой смеси с помощью различных адсорбентов и последующего определения разделенных компонентов.

9.5. МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ К ТЕПЛОВЫМ И МЕХАНИЧЕСКИМ ВОЗДЕЙСТВИЯМ

Чувствительность ВВ к тепловым воздействиям. Обычно тепловые воздействия подразделяются на гомогенный — равномерный прогрев всей массы ВВ до некоторой критической температуры (с незначительным температурным полем внутри массы ВВ к периферии) с развитием процесса разложения ВВ по законам теплового взрыва и локальный нагрев в виде поджигания со значительным градиентом температуры. Соответственно определяют чувствительность ВВ к прогреву и к поджиганию (воспламеняемость).

Определение температуры вспышки. Мерой чувствительности ВВ к нагреву обычно служит температура их вспышки, устанавливаемая при определенных условиях опыта.

Если поместить навеску ВВ в объем с достаточно высокой постоянной или медленно возрастающей температурой, то через некоторое время вещество прогревается до температуры окружающей среды и может произойти вспышка. Механизм вспышки в этих условиях соответствует механизму теплового взрыва и определяется соотношением теплоприхода в результате экзотермических реакций в нагретом веществе и теплоотвода в окружающую среду.

Температура вспышки ВВ зависит от количества испытываемого ВВ, скорости нагрева и других условий опыта, определяющих условия теплоприхода и теплоотвода.

Наиболее распространены два варианта определения температуры вспышки.

1. Определенное количество ВВ (обычно 0,05 г) в пробирке помещают в металлическую баню, заполненную легкоплавким сплавом Вуда и предварительно нагретую до 100°C. Дальнейший нагрев производится со скоростью 20°C в минуту. Отмечают температуру сплава в момент вспышки и характер вспышки ВВ.

2. Вторым методом заключается в установлении зависимости изменения периода индукции или задержки вспышки от температуры. По этому методу температуру сплава поддерживают постоянной и в предварительно вставленную нагревающую пробирку вводят навеску ВВ, измеряя время с момента помещения ВВ в пробирку до его вспышки. Этот метод позволяет полнее характеризовать отношение ВВ к тепловому воздействию, в частности, найти такие кинетические параметры, как энергия активации E

Таблица 9.4

Вещество	Температура вспышки (°C) при нагревании			
	со скоростью 20° в минуту	при постоянной температуре с задержкой		
		5 мин	1 мин	5 с
Нитроглицерин	200—205	200—205	—	222
Аммонит БЖВ	280—320	220—300	336	380—400
Тротил	295—300	300	309	475
Алюмотол	—	—	315	—
Аммонал скальный № 3	—	—	350	—
Аммонит ПЖВ-20	—	—	365	—

и предэкспоненциальный множитель V , характеризующие тепловую стабильность ВВ исходя из выражения

$$\tau = V e^{E/(RT)},$$

где T — температура вспышки ВВ (табл. 9.4).

Зависимость температуры вспышки ВВ от массы заряда объясняется тем, что теплоприход пропорционален объему ВВ, а теплоотвод — его поверхности. С увеличением массы ВВ температура вспышки снижается. С увеличением скорости нагрева навески ВВ температура вспышки возрастает. При слишком медленном нагреве большая часть ВВ успеет разложиться при низких температурах без вспышки. При быстром достижении температуры, превышающей температуру кипения ВВ, оно превращается в пар, вспышка которого вследствие их меньшей плотности и меньшего самоускорения распада возникает труднее.

Определение воспламеняемости ВВ. Одной из важнейших характеристик чувствительности ВВ к тепловым воздействиям является способность его воспламеняться от внешнего источника тепла и гореть.

Необходимое количество подводимого тепла зависит от свойств ВВ и внешних условий и определяется выражением

$$Q = \frac{\lambda}{u_r} (T_n - T_0),$$

где λ — коэффициент теплопроводности ВВ; u_r — скорость горения ВВ; T_0 — температура поверхности ВВ; T_n — начальная температура ВВ.

При порционном подводе тепла существенное значение имеет скорость его подвода к поверхности ВВ с учетом теплоотвода в глубь вещества, определяющего температуру на поверхности ВВ и ее градиент по толщине заряда. Исходя из этого, мерой чувствительности ВВ к поджигающему импульсу может быть либо минимальное количество тепла при заданной скорости его подвода, либо необходимое для поджигания при постоянных условиях опыта, либо какие-либо переменные величины, определяющие режим го-

рения при постоянном значении теплового источника. В качестве таких переменных величин могут быть использованы начальная температура ВВ или давление окружающей газовой среды, поскольку скорость горения большинства ВВ (обладающих летучестью) с давлением связана линейной зависимостью. Иногда применяют комбинированные критерии оценки воспламеняемости ВВ. В соответствии с указанным принципом созданы и развиваются экспериментальные методы оценки воспламеняемости ВВ.

Наиболее простым в экспериментальном исполнении является метод определения чувствительности ВВ к лучу огня от огнепроводного шнура. По этому методу в пробирку, укрепленную на штативе, помещают навеску испытываемого ВВ (обычно 1 г), вводят отрезок огнепроводного шнура длиной 5—10 см так, чтобы он касался поверхности ВВ. После зажигания огнепроводного шнура фиксируют воспламенение или невоспламенение ВВ. В другом варианте этого метода отрезок шнура помещают на некотором расстоянии от поверхности ВВ. Мерой воспламеняемости в этом случае служит максимальное расстояние, на котором еще воспламеняется ВВ.

К. К. Андреевым и П. П. Поповой предложено оценивать воспламеняемость ВВ по его критическому диаметру горения. По этому методу определяется минимальный диаметр заряда исследуемого ВВ в стеклянной оболочке, при котором в подожденном с торца заряде устойчиво распространяется горение. Критический диаметр горения определяют в среде сжатого азота при давлении 9,81—10,8 МПа в стальной бомбе. Заряд ВВ с торцевой поверхностью поджигается нихромовой спиралью накаливания. А. И. Романовым и Л. В. Дубновым предложена методика оценки воспламеняемости промышленных ВВ по так называемому давлению поджигания. Согласно этой методике, фиксируется то минимальное (критическое) давление среды, при котором поджигается и горит ВВ.

По этой методике заряд ВВ массой 100—120 г в бумажной или стеклянной оболочке диаметром 32—36 мм помещают в толстенную манометрическую бомбу, в которой с помощью сжатого азота создано некоторое давление (рис. 9.19). В качестве постоянного источника воспламенения используются прессованные шашки из малогазового состава массой в 1 г и диаметром, равным диаметру испытываемого заряда. Воспламенитель поджигается нихромовым мостиком накаливания.

К. К. Андреев, В. М. Рогожников и В. П. Лушкин предложили воспламеняемость ВВ оценивать по минимальной навеске воспламенителя, вызывающего устойчивое горение заряда при возрастающем давлении в манометрической бомбе, а также по изменению давления во времени. В данном случае меняются количество подводимого извне тепла и давление среды. По этой методике опыты выполняют в манометрической бомбе переменного давления

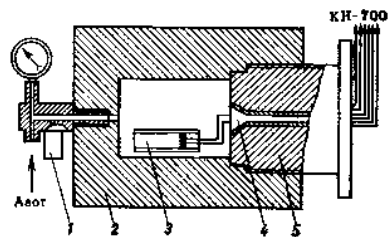


Рис. 9.19. Схема установки для определения критического давления поджигания:

1 — датчик давления; 2 — корпус бомбы; 3 — заряд ВВ; 4 — электровывод; 5 — затвор бомбы

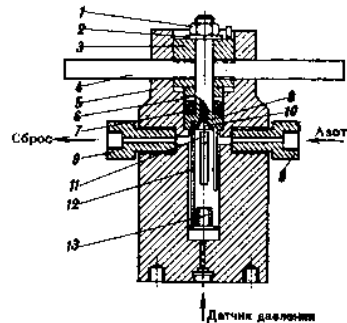


Рис. 9.20. Схема манометрической бомбы для оценки воспламеняемости промышленных ВВ:

1 — гайка; 2 — шайба; 3 — корпус затвора; 4 — рукоятка; 5 — корпус бомбы; 6 — кольцо; 7 — прокладка; 8 — стембель затвора; 9 — переходник; 10 — электронивод; 11 — воспламенитель; 12 — стойка; 13 — заряд

(рис. 9.20) и определяют воспламеняемость зарядов высокой и относительно малой плотности. Шашки массой 4 г высокой плотности получают прессованием на гидравлическом прессе в матрице диаметром 20—21 мм. Заряды относительно малой плотности помещают в стеклянный стаканчик того же диаметра, оклеенный прокаленным асбестом. Приготовленный таким образом заряд исследуемого ВВ помещают в манометрическую бомбу с внутренним объемом около 100 см³ на специальном металлическом столике, на который крепится асбоцементный диск. На расстоянии около 4 см от поверхности заряда ВВ помещают воспламенитель. Заряд ВВ воспламеняется смесью 50 : 50 пироксилина с тонкодисперсной аммиачной селитрой (размер частиц 20 мкм). Навеску воспламенителя при плотности 0,4—0,5 г/см³ помещают в гильзу из папиросной бумаги, через которую пропускается нихромовая проволока диаметром 0,1—0,15 мм, служащая для поджигания воспламенителя. Дополнительную характеристику воспламеняемости дает зависимость $p(t)$, записываемая при сгорании заряда в процессе опыта с помощью тензодатчика.

В практике нередко происходит поджигание заряда ВВ взрывными волнами от соседних зарядов, например, в шпурах, когда расстояние между зарядами превышает расстояние передачи детонации. Поэтому представляет интерес оценить воспламеняемость ВВ под воздействием такого рода импульсов.

Разработана методика оценки воспламеняемости ВВ под воздействием воздушной волны, получаемой в ударной трубе (рис. 9.21). По этой методике навеску исследуемого ВВ диаметром 10 мм и массой 10 г помещают в плексигласовую обойму, которую вставляют в секцию низкого давления ударной трубы с внутренним

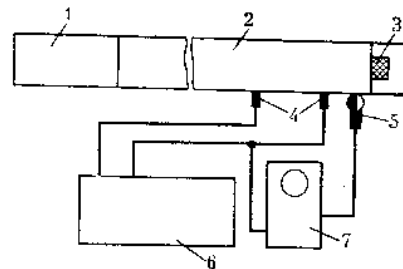


Рис. 9.21. Принципиальная схема установки для оценки воспламеняемости в ударной трубе:

1 — секция высокого давления; 2 — секция низкого давления; 3 — заряд ВВ; 4 — пьезодатчик; 5 — фотоэлемент; 6 — хронограф «Нептун»; 7 — осциллограф ОК-17М

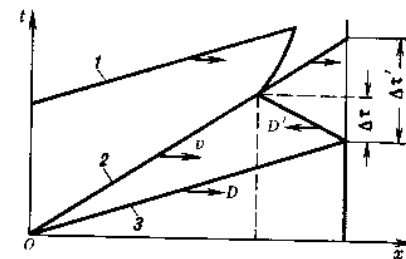


Рис. 9.22. Диаграмма течений газа в ударной трубе:

1 — фронт волны разрежения; 2 — контактная поверхность; 3 — фронт ударной волны; v — скорость контактной поверхности; D — скорость ударной волны; D' — скорость отраженной ударной волны; Δt — время от момента отражения ударной волны до встречи ее с контактной поверхностью; $\Delta t'$ — время стационарного состояния за фронтом отраженной ударной волны

диаметром 50 мм. Длина секций высокого и низкого давлений соответственно 1130 и 2730 мм. На конце секции низкого давления предусмотрен отсек с плексигласовыми смотровыми окнами, через которые вакуумным фотоэлементом СЦВ-4 фиксируется момент вспышки исследуемого ВВ. Сигнал от фотоэлемента через усилитель поступает на двухлучевой катодный осциллограф ОК-17М. В секции низкого давления размещены также датчики давления из титаната бария для измерения скорости движения ударной волны и запуска осциллографа. Сигналы с пьезодатчиков фиксируются электронным хронографом «Нептун». Скорость ударной волны измеряют на мерной базе длиной 1380 мм, причем последний по ходу ударной волны пьезодатчик служит одновременно для запуска осциллографа ОК-17М, на который подается сигнал с фотоэлемента СЦВ-4.

В опыте измеряют скорость ударной волны, по которой рассчитывают остальные параметры ударной волны, и величину задержки вспышки ВВ.

Секция низкого давления, в которой помещается навеска исследуемого ВВ, заполнена воздухом при атмосферном давлении. Секция высокого давления, отделяемая от секции низкого давления разрывной мембраной из отожженной меди, заполняется сжатым азотом или гелием до давления, при котором происходит разрыв мембраны, и в секции низкого давления формируется ударная волна.

При использовании этой методики для отраженных ударных волн необходимо знать время, в течение которого параметры потока будут соответствовать вычисленным. Это время, или, как его называют, время стационарного состояния, можно определить по

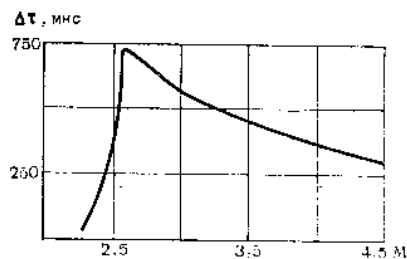


Рис. 9.23. Зависимость минимального времени стационарного состояния Δt от числа Маха падающей ударной волны M

за падающей ударной волной приведен по соотношениям для идеального газа (рис. 9.23).

В реальных газах из-за неидеальности течения время стационарного состояния за отраженной ударной волной обычно в 2—3 раза меньше расчетного. Таким образом, при использовании этой методики время задержки вспышки исследуемого образца не должно превышать время стационарного состояния за отраженной ударной волной.

В качестве критерия оценки воспламеняемости ВВ выбрано минимальное давление в отраженной ударной волне, еще вызывающей поджигание навески ВВ.

Давление p_2 и температуру газа T_2 за отраженной ударной волной можно рассчитать по экспериментально полученным значениям скорости падающей ударной волны D в соответствии с соотношениями:

$$\frac{p_2}{p_1} = \left\{ \frac{2\gamma M_1^2 - (\gamma - 1)}{\gamma + 1} \right\} \left\{ \frac{(3\gamma - 1) M_1^2 - 2(\gamma - 1)}{(\gamma - 1) M_1^2 + 2} \right\};$$

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{[2(\gamma - 1) M_1^2 + (3 - \gamma)][(3\gamma - 1) M_1^2 - 2(\gamma - 1)]}{(\gamma + 1)^2 M_1^2},$$

где $\gamma = c_p/c_v$ — отношение удельных теплоемкостей газа в камере низкого давления; $M = D/c$ — число Маха — отношение скорости ударной волны к скорости звука; p_1, T_1 — соответственно давление и температура перед фронтом падающей ударной волны.

Дополнительной характеристикой воспламеняемости ВВ является величина задержки: чем она меньше, тем легче воспламеняется испытываемое ВВ.

Чувствительность ВВ к механическим воздействиям. Чувствительность ВВ к удару определяют в основном на копрах. Копер для определения чувствительности ВВ к удару состоит из двух, иногда трех строго параллельных вертикальных

диаграмме течения в ударной трубе (рис. 9.22), из которой видно, что время стационарного состояния на торце за отраженной ударной волной при выбранных параметрах ударной трубы определяется интервалом между моментами отражения падающей ударной волны от торца и приходом первого возмущения, отраженного от контактной поверхности на торце. Расчет зависимости времени стационарного состояния Δt от числа Маха

направляющих, по которым свободно перемещается груз, производящий удар по ВВ. Груз в верхней части снабжен механическими или электромагнитными захватами, фиксирующими его на определенной высоте. На прочном фундаменте помещается массивная стальная наковальня, на которой располагается штемпельный прибор (№ 1 или № 2) с навеской ВВ. Прибор № 1 состоит из металлического поддона, направляющей обоймы и двух поршеньков, между торцами которых помещается навеска (обычно 0,02—0,05 г) исследуемого ВВ. В качестве поршеньков применяют ролики от подшипников, отличающиеся высокой степенью постоянства механических свойств и точностью размеров. Ролики в приборе № 1 точно пригнаны к каналу обоймы и не имеют фасок на торцах, так что ВВ при ударе будет сжиматься, не имея возможности свободно течь. Прибор № 2, предельный Н. В. Холево, отличается от прибора № 1 наличием кольцевой канавки в обойме на уровне расположения навески ВВ, что позволяет оценить чувствительность ВВ в условиях его течения.

Некоторые малотекучие, непластичные ВВ, такие, например, как пироксилин, не дающие взрывов в приборе № 1, т. е. в условиях затрудненного течения, обнаруживают высокую частоту взрыва в приборе № 2. Напротив, ВВ, обладающие высокой текучестью, могут проявлять большую чувствительность в приборе № 1, чем в приборе № 2.

Применяемый согласно ГОСТ 4545—80 прибор занимает некоторое промежуточное положение между приборами № 1 и 2, так как ролики имеют фаски на торцах. Фаски роликов в стандартном приборе в известной мере выполняют функцию канавки, имеющейся в приборе № 2.

При испытании жидких ВВ навеску помещают в чашечку из мягкого металла, чтобы исключить выплескивание ВВ из прибора № 3 при ударе.

Для определения чувствительности ВВ к удару в основном применяют три вида испытаний: по нижнему пределу в приборе № 2, по частоте взрывов в приборе № 2 и по частоте взрывов в стандартном приборе. Эти методы определения чувствительности ВВ к удару позволяют выявить влияние условий деформации вещества на вероятность возбуждения взрыва и правильно оценить относительную чувствительность ВВ при ударе.

При определении чувствительности к удару по нижнему пределу навеску испытываемого вещества (0,12 г) подпрессовывают в штемпельном приборе под давлением до 300 МПа. По этому методу определяют максимальную высоту падения груза массой 10 кг (нижний предел), при которой получают все отказы или не более одного взрыва из 25 определений. Взрывом обычно считают звуковой эффект, вспышку, дымообразование или обугливание испытываемого ВВ. В том случае, когда при падающем грузе массой 10 кг нижний предел меньше 30 мм, определяют нижний

Таблица 9.5

Вещество	Нижний предел в приборе № 2 при грузе массой 10 кг, мм	Частота взрывов при высоте падения груза 250 мм, %					
		Масса прибора № 2			Масса стандартного прибора		
		10 кг	5 кг	2 кг	10 кг	5 кг	2 кг
Детонит М	70	100	96	4	52	—	—
Динамит 62 %-ный	30	4	—	—	100	90	40
Тетрил эталонный	150	24	—	—	44	—	—
Аммонит ПЖВ-20	250	12	—	—	12	—	—
Тротил порошкообразный	500	0	—	—	28	—	—
Алюмотол	500	0	—	—	44	—	—
Аммонит 6ЖВ	500	0	—	—	20	—	—
Граммонит 79/21	500	0	—	—	4	—	—

предел с грузом массой 2 кг. При отсутствии взрывов с высоты падения груза 500 мм испытания прекращают и указывают, что нижний предел для испытываемого образца составляет более 500 мм. Кроме этого, высота падения груза не должна превосходить предела, при котором в элементах системы возникает остаточная деформация, в противном случае условия опыта становятся неопределенными.

При определении чувствительности к удару по частоте взрывов испытания выполняют при постоянной высоте падения груза, равной 250 мм. Навеска ВВ составляет 0,05—0,005 г. По этому методу чувствительность ВВ характеризуют частотой взрывов (%)

$$X = A \cdot 100/25,$$

где N — число взрывов; 25 — число определений.

Испытания начинают с грузом 10 кг. Если при испытаниях частота взрывов окажется равной 96—100 %, то проводят серию испытаний с грузом в 5 кг, если в этом случае получится 96—100 % взрывов, то груз уменьшают до 2 кг.

Результаты определения чувствительности некоторых веществ по трем описанным методикам приведены в табл. 9.5.

Для характеристики относительной чувствительности промышленных ВВ при ударных воздействиях, возникновение которых возможно при их применении (падение на жесткое основание, защемление между двумя жесткими поверхностями и др.), проводят испытания на большом копре БК-6. В этом случае навеску исследуемого ВВ массой 3 г диаметром 20 мм помещают между двумя стальными пластинками диаметром 41 мм и толщиной 10 мм. В качестве характеристики чувствительности принят ниж-

ний предел, выраженный максимальной высотой падения груза массой 24 кг, при которой не наблюдается разложения ВВ в 25 опытах. Иногда определяют частоту взрывов из 25 опытов при постоянной заданной высоте сбрасывания груза, например при высоте 2 м.

Характеристики относительной чувствительности некоторых веществ, определенные на большом копре БК-6, по частоте взрывов (%) при высоте падения груза 2000 мм массой 24 кг следующие:

Тэн	100	Тротил:	
Динамит 62 %-ный	100	чешуированный	20
Алюмотол	84	порошкообразный	24
Детонит М	84	Аммонит ПЖВ-20	28
Граммонит 79/21	48	Аммонит 6ЖВ	24 (0)
		Аммиачная селитра	0—4

Для большинства испытанных ВВ относительная чувствительность, определенная при испытаниях на большом копре БК-6, согласуется с рядом по чувствительности, полученным при испытаниях на копре с малыми навесками. В то же время у некоторых ВВ, например алюмотола, чувствительность к удару при испытаниях на большом копре БК-6 выше, чем при испытании на копре с малыми навесками.

В последнее время рядом исследователей разработаны методы оценки характеристик чувствительности ВВ к удару, связанных с передачей взрыва из-под бойка несжато му веществу. И. С. Ключковым и Л. С. Ильинским предложен метод определения чувствительности, учитывающий передачу взрыва в объем вещества. По этому методу навеску исследуемого ВВ помещают в приборчик таким образом, чтобы она полностью заполняла кольцевой канал и пространство между роликами. При ударе под бойком ВВ сжимается и вытесняется в кольцевой канал. Между роликами остается тонкий слой ВВ, в котором и возникает первичный очаг разложения. При испытаниях фиксируется, передается ли возникшее под роликами разложение в канал с ВВ или локализуется под роликами. Показателями чувствительности ВВ по этому методу служат предельный диаметр и минимальный подпор. Предельным диаметром называют минимальный диаметр ролика, при котором хотя бы в одном из десяти испытаний происходит взрыв. Подпор характеризует сопротивление ВВ вытеканию из-под роликов, его изменяют варьированием навески исследуемого ВВ, при которой получены взрывы:

$$p_{min} = (m_{min} - m_1) / (\rho V_k),$$

где m_{min} — минимальная навеска исследуемого ВВ, при которой происходит полный взрыв; V_k — объем кольцевого канала;

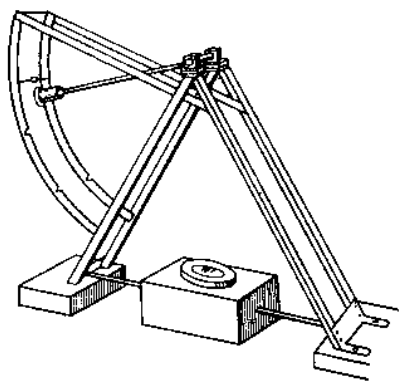


Рис. 9.24. Схема фрикционного маятника

ρ — плотность кристаллов ВВ. Для приборчиков с роликами диаметром 2 и 5 мм $m_1=0$, для приборчиков с роликами диаметром 10, 20 и 40 мм m_1 равно соответственно 0,1; 0,3 и 0,9 г.

Чувствительность ВВ к трению определяют применительно к требованиям техники безопасности при изготовлении и использовании ВВ. Применяемые методы определения чувствительности ВВ к трению в той или иной мере имитируют трение ВВ при смешивании, патронировании, транспортировании по трубам и шнекам и выполнении дру-

гих технологических операций.

В лабораторных условиях чувствительность к трению определяют в основном тремя методами: при помощи фрикционного маятника (рис. 9.24); на приборе Боудена—Козлова; истиранием ВВ между двумя стальными поверхностями, одна из которых вращается, например, на приборе И-6-2.

Фрикционный маятник состоит из стальной наковальни, на которой помещается навеска испытываемого ВВ (обычно 7 г), и маятника в виде стального стержня с укрепленным на конце его башмаком. На наковальне имеются три поперечные канавки, в которых удерживается ВВ при прохождении над ней башмака маятника. Башмаки применяются двух видов: стальной и с поверхностью из твердой фибры. Во время испытаний маятник, закрепленный на определенной высоте, освобождают от держателя. При прохождении башмака маятника над наковальней ВВ подвергается трению между поверхностями башмака и наковальней. Силу трения можно регулировать измерением высоты подъема маятника, массой добавочного груза и применением башмаков с трущей поверхностью из различных материалов. ВВ считается выдержавшим испытание, если оно в десяти опытах при башмаке с поверхностью из твердой фибры с дополнительным грузом массой 20 кг и высоте подвеса маятника 1,5 м не взрывается и не горит.

Обычно испытание начинают с башмаком со стальной поверхностью. Если в десяти опытах взрыв не возникает, испытание считают законченным. В противном случае повторяют испытание с башмаком с фибровой поверхностью, результат которого считается окончательным.

Результаты сравнительных испытаний некоторых веществ по этому методу приведены ниже.

Вещество	Тротил	Тетрил	Гексоген Тэн	Нитрогликоль	Динитроглицерин	Нитроглицерин
Число взрывов из 10 опытов	0	0	2	5	7	10

При испытании на приборе Боудена и Гартона навеску ВВ к верхней поверхности прямоугольного стержня прижимают стальным роликом, который, в свою очередь, прижимается болтом. Груз маятника поднимают на определенную высоту и затем дают ему свободно ударить по стержню, подвергая ВВ быстрому сдвигу. В видоизмененном приборе Козлова для поджатия ВВ применяется гидравлический пресс. Навеска ВВ сжимается между двумя стальными роликами диаметром 10 мм. Удар маятника передается верхнему подвижному ролику, который перемещается между неподвижными упорами и нижним роликом, закрепленным в муфте. Характеристикой чувствительности при этом испытании является давление прижатия ВВ при заданной частоте взрывов. Определение чувствительности ВВ к трению на приборе И-6-2 основано на истирании навески ВВ, помещенной в специальный прибор между двумя стальными плоскими или шарообразными поверхностями, одна из которых вращается с частотой 5,4 с⁻¹. При таком испытании навеску исследуемого вещества в измельченном виде массой 0,03±0,05 г помещают в сборку, закрепляемую в держателе. При этом создается нужное давление прижатия, измеряемое динамометром, после чего включают вращение пуансона, которое автоматически выключается по истечении 3 с. Испытания начинают со средних давлений прижатия и определяют то давление (но не более 300 МПа), при котором возникают взрывы. За характеристику чувствительности ВВ к трению принимают максимальное давление прижатия, при котором еще не возникает взрывного разложения в 10 последовательных определениях. В случае отсутствия взрывов при давлении 300 МПа испытания повторяют в более жестких условиях — с добавкой к ВВ кварцевого песка (в количестве 0,01 г).

В результате испытаний некоторых веществ с кварцевым песком по этому методу получены следующие величины нижнего предела чувствительности (МПа):

Тэн	31	Алюмотол	210
Гексоген	49	Аммонит ПЖВ-20	215
Тетрил	65	Детонит М	231
62 %-ный динамит	88,5	Граммонит 79/21	250
Тротил порошкообразный	190	Аммонит 6ЖВ	250
		Аммиачная селитра	300

Без кварцевого песка для тэна, гексогена и тетрила нижний предел чувствительности составил соответственно 170, 150 и 250 МПа, для остальных веществ — 300 МПа.

Чувствительность ВВ к разбуриванию имеет особенно важное значение, так как при взрывании в шахтах зачастую остаются так называемые «стаканы» с остатками отказавшего ВВ, не обнаруживаемые при осмотре забоя. При попадании бура на остатки ВВ во время бурения возможен взрыв ВВ. В МакНИИ предложен метод оценки чувствительности промышленных ВВ к разбуриванию, по которому в шпур, пробуренный в блоке песчанца, помещают патрон испытываемого ВВ массой 100—200 г. Сверху по направляющим в шпур опускается буровая штанга со стандартными угольными или породными коронками, приводимая во вращение электродвигателем. Установка позволяет вести разбуривание с частотой вращения 8,3; 16,6; 25 с⁻¹, т. е. позволяет испытывать ВВ при нормальных и форсированных режимах работы. Осевое усилие регулируется сменными грузами. Первоначальное осевое усилие (масса подвижной системы 35 кг) подобрано таким образом, что обеспечивается максимально возможная нагрузка на сверло, при которой частота вращения еще не снижается.

Результаты испытаний определяются частотой взрывов, число опытов выбирается в зависимости от требуемой точности оценки.

9.6. МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ К УДАРНОЙ ВОЛНЕ. ПЕРЕДАЧА ДЕТОНАЦИИ НА РАССТОЯНИИ

Оценка чувствительности промышленных ВВ к ударной волне, распространяющейся в среде, необходима при изучении передачи детонации от одного заряда к другому, проектировании складов и хранилищ ВВ, конструировании механизмов для работы с ВВ и т. п.

Обычно чувствительность ВВ к ударной волне характеризуют минимальным, или критическим, давлением $p_{кр}$ в ударной волне, инициирующей детонацию в заряде.

Для определения критического давления инициирования необходимо знать величину ударной адиабаты исследуемого ВВ, которая определяется как функция удельного объема вещества на ударном фронте $p=f(v)$. Часто ударную адиабату описывают зависимостью давление — массовая скорость вещества $p=f(u)$ или скорость ударной волны — массовая скорость вещества $D=f(u)$. Это объясняется тем, что параметры p , v , D , u связаны между собой уравнениями сохранения массы и количества движения в ударной волне:

$$v = v_0(1 - u/D); \quad p = \rho_0 D u.$$

Знание любой пары параметров достаточно для нахождения по уравнениям остальных двух.

В эксперименте обычно определяют скорость ударной волны и массовую скорость вещества. Экспериментальное определение ударных адиабат промышленных ВВ весьма трудоемко и не всегда дает удовлетворительные результаты вследствие неоднородности ВВ, особенно пористых многокомпонентных.

Определение осложняется еще и необходимостью использования методики измерения слабых (0,1—1 ГПа) ударных волн. В связи с этим при определении критического давления инициирования обычно предполагают, что ударные адиабаты большинства промышленных ВВ плотностью 0,8—1,3 г/см³ совпадают с ударной адиабатой порошкообразного тротила той же плотности, определенной экспериментально. Это допущение основано на том, что ударные адиабаты ряда пористых индивидуальных ВВ при равной плотности практически совпадают при ее изменении от 0,8 до 1,3 г/см³.

Для экспериментального определения критического давления инициирования обычно используется следующая схема опытов. С помощью линзы 4 в активном заряде 3 формируется детонационная волна с плоским фронтом (рис. 9.25, а). При ее столкновении с преградой из инертного материала 2 в преграду входит ударная волна, которая и воздействует на исследуемое взрывчатое вещество 1. Изменение интенсивности ударной волны, вошедшей в заряд исследуемого ВВ, достигается выбором ВВ активного заряда при постоянной толщине преграды (3—5 мм). Подбирают такой активный заряд, при котором еще возможно возбуждение детонации в заряде исследуемого ВВ. Если ударная адиабата исследуемого ВВ известна, то величина $p_{кр}$ определяется графическим способом (рис. 9.25, б). На графике в координатах давление — массовая скорость представлены ударные адиабаты I и II материала преграды и исследуемого ВВ. Пусть при взрыве активного заряда ВВ в преграду входит ударная волна с известным давлением p , соответствующим точке А. Построив из точки А изоэнтропу расширения материала преграды, являющуюся зеркальным отражением кривой ОА, находим точку В пересечения изоэнтропы расширения с ударной адиабатой II исследуемого ВВ. Точке В отвечает давление ударной волны, вошедшей в исследуемое ВВ.

При другом способе определения критического давления инициирования по заряду исследуемого ВВ ударяет летящая металлическая пластина (рис. 9.26). В момент удара пластины по заряду ВВ в него входит ударная волна с прямоугольным профилем давления. Давление в исследуемом ВВ сохраняется неизменным до момента прихода волны разрежения с тыльной поверхности ударяющей пластины. Давление рассчитывается графически по схеме, аналогичной приведенной на рис. 9.25, б, с той лишь разницей, что построение изоэнтропы начинается от точки $u = w' = 2u_1$, где w' — скорость полета пластины; u_1 — массовая скорость в пластине.

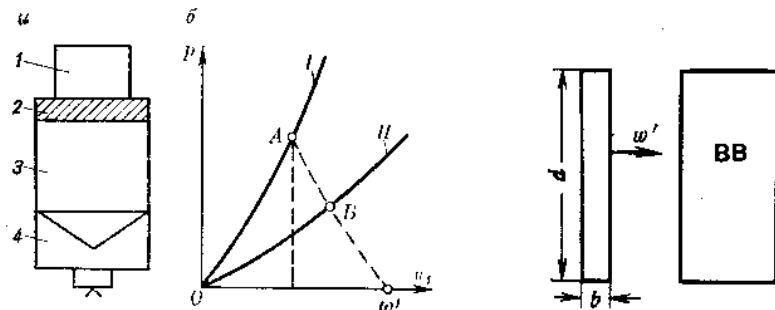


Рис. 9.25. К определению критического давления инициирования ВВ по параметрам ударной волны (u_1 — массовая скорость в пластине; w' — скорость свободной поверхности пластины)

Рис. 9.26. К определению критического давления инициирования методом удара пластины по заряду: b и d — соответственно толщина и диаметр пластины

На величину критического давления инициирования сильно влияют диаметр исследуемого заряда (боковые волны разгрузки) и спад давления за фронтом инициирующей ударной волны (продольные волны разгрузки). Боковая волна разгрузки достигает оси заряда и полностью разгружает вещество за время $t = d/(2c)$, где c — скорость звука в веществе. Таким образом, каждому значению d соответствует определенное значение p . С увеличением диаметра пластины критическое давление инициирования уменьшается, значения критического давления для кристаллического гексогена при диаметрах пластин 7; 10 и 14 мм составляют соответственно 17,3; 16,8 и 16,5 ГПа.

В практических целях часто определяют давление в падающей ударной волне, расчет которого упрощается, так как отпадает необходимость в определении ударной адиабаты инициируемого ВВ. Давление в падающей ударной волне является достаточно надежным относительным показателем чувствительности ВВ к импульсу ударной волны.

Одной из форм проявления чувствительности ВВ к ударной волне является передача детонации на расстоянии. Критические расстояния, на которых пассивному заряду передается или не передается детонация от активного заряда, определяются массой G активного заряда (энергией), чувствительностью пассивного заряда к ударной волне и свойствами передающей среды, определяющими диссипативные потери энергии ударной волны.

Так как из закона геометрического подобия давление в ударной волне на равных расстояниях пропорционально $G^{1/3}$, критическое его значение, соответствующее условию инициирования пас-

сивного заряда, достигается на расстоянии $R = k\sqrt[3]{G}$, где k — коэффициент, характеризующий свойства среды и чувствительность ВВ пассивного заряда.

Обтекание воздушной ударной волной пассивного заряда и ограниченный разлет ПВ активного заряда при расположении зарядов на поверхности земли или вблизи нее учтены уравнением (5.10), предложенным И. И. Тамм и М. А. Садовским.

С уменьшением чувствительности ВВ пассивного заряда, его поперечного размера и длины волны, на инициирующую способность этой волны начинает влиять импульс, изменение которого на заданном расстоянии пропорционально величине $G^{2/3}$. Средний показатель степени между $1/3$ и $2/3$ отвечает равной значимости обоих параметров ударной волны (p и I), что приводит к зависимости вида $R = k\sqrt{G}$, хорошо согласующейся с опытом для не слишком больших зарядов. Для аммонита 6ЖВ $k = 0,48$, для цешиурованного тротила $k = 0,24$.

Для активных зарядов, сильно различающихся по форме от сферических, значение k может меняться в зависимости от взаимного расположения активного и пассивного зарядов.

В связи с тем что передача детонации на расстоянии имеет вероятностный характер, на практике в зависимости от поставленной задачи различают три характерных расстояния: отвечающее 100 %-ной вероятности передачи детонации, 50 %-ной и нулевой. Нулевое расстояние часто называют безопасным по передаче детонации расстоянием. По опытным данным, различие значений для двух крайних случаев составляет около 10 %.

Если один из зарядов углублен или между зарядами имеется преграда в виде земляного вала, то коэффициент k при расчете безопасных расстояний уменьшается примерно в 1,35 раза (по зависимости $R_0 \approx G^{1/3}$).

Малые заряды цилиндрической формы (патроны) испытывают на передачу детонации, укладывая два патрона ВВ на плотный грунт на некотором расстоянии один от другого таким образом, чтобы ось одного патрона служила продолжением оси другого. Один из патронов (боевик) снабжается электродетонатором. Таким способом определяется максимальное расстояние между патронами, при котором в двух параллельных опытах детонация передается от патрона-боевика к пассивному патрону.

Недостатком этого метода испытания является то, что нет точного определения полноты детонации пассивного заряда. Для устранения этого недостатка в МакНИИ предложен трехпатронный метод определения чувствительности ВВ к передаче детонации, сущность которого состоит в том, что в качестве «свидетеля» полноценной или неполноценной детонации пассивного патрона в обычной схеме испытания за ним на некотором расстоянии, равном промежутку между патроном-боевиком и пассивным па-

троном, располагается третий патрон из того же ВВ. За критерий чувствительности ВВ к передаче детонации по этому методу принимается максимальное расстояние между патронами, при котором в двух параллельных опытах детонируют все три патрона.

9.7. ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ К ИНИЦИИРУЮЩЕМУ ИМПУЛЬСУ

Минимальный инициирующий импульс определяют следующим образом: навеска инициирующего ВВ (обычно гремучей ртути), взвешенная с точностью $\pm 0,01$ г, запрессовывается в латунную чашечку диаметром 6 мм под давлением 18 МПа. Чашечку с навеской ВВ помещают в медную гильзу от КД-8С, сверху вставляют отрезок огнепроводного шнура до соприкосновения с ВВ. Изготовленный таким образом детонатор помещают в заряд исследуемого ВВ диаметром 40 мм массой 50 г, который устанавливается на свинцовый цилиндр, как при определении бризантности. За величину минимального инициирующего импульса принимают ту наименьшую навеску ВВ, при инициировании которой заряд исследуемого ВВ дает обжатие свинцового столбика, близкое к обжатию, полученному по стандартной пробе Гесса. Величины минимальных импульсов для некоторых промышленных ВВ, по данным Э. В. Постниченко, следующие: 0,14 г для нитроглицериновых ВВ (детониты, углениты, динамиты); 0,14—0,15 г для гексогена, тэна, тетрила; 0,17—0,19 г для аммонитов; 0,25 г для аммоналов; 0,28 г для предохранительного аммонита ПЖВ-20.

Определение минимального инициирующего импульса, выражаемого массой инициирующего ВВ, способного возбуждать устойчивую детонацию во вторичном ВВ, возможно только для ВВ, чувствительных к первичным средствам инициирования. Для трудно-возбуждаемых промышленных ВВ (гранулированных, водосодержащих) определяют величину промежуточного детонатора из другого вторичного ВВ, чувствительного к средствам инициирования, обеспечивающего полноту детонации в заряде возбуждаемого ВВ с диаметром больше критического.

Критический диаметр определяют несколькими методами. Согласно одному из них, исследуемое ВВ помещают в оболочку из бумаги, изготовленную в виде конуса с углом при вершине 8—10°, и инициируют его с широкого конца. За критический диаметр принимают диаметр конуса, на котором произошел обрыв детонации. Результаты, полученные по этому методу, несколько занижены вследствие прогона детонации по коническому заряду. Более точным является метод, при котором исследуемое ВВ взрывают в цилиндрических зарядах разного диаметра и определяют каждый раз полноту детонации. Наименьший диаметр заряда, при котором еще возможна устойчивая детонация, принимают за критический.

Таблица 9.6

Вещество	Плотность, г/см ³	$d_{кр}$, мм
Нитроглицерин	1,59	2,0
Гексоген	1,2	1,0—1,5
Тротил порошкообразный	1,0	8—10
Тротил литой	1,46	31
Аммонит 6ЖВ	1,0	9
Аммонит с добавкой гексогена	1,0	6
Аммонит ПЖВ-20	1,0	13
Угленит Э-6	1,02	8
Граммонит 79/21	0,9	100
Гранулит АС-8В	0,85	120

В опытах при определении $d_{кр}$ необходимо, чтобы затухание детонации было следствием неспособности ВВ к распространению детонации в заряде данного диаметра, а не недостаточной мощности детонатора. Кроме того, длина заряда должна составлять не менее 10 диаметров заряда, так как влияние детонатора сказывается на длине до 5 диаметров.

Для определения критического диаметра применяют метод телескопических зарядов, в котором сочетаются достоинства описанных методов. Согласно этому методу набор цилиндрических зарядов разного диаметра и длиной не менее 10 диаметров составляют таким образом, чтобы ось одного заряда служила продолжением оси другого. Такой составной заряд инициируют со стороны большого диаметра и определяют, на какой ступени затухла детонация. Величины критических диаметров и плотность для некоторых веществ приведены в табл. 9.6.

9.8. МЕТОДЫ ИСПЫТАНИЙ ПРЕДОХРАНИТЕЛЬНЫХ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ

Методы оценки предохранительных свойств ВВ. На безопасность по газу (метану) и угольной пыли предохранительные ВВ обычно испытывают в стендовых условиях, в опытных штреках (ГОСТ 7140—81, ОСТ 84—1382—76, ОСТ 84—1383—76).

Опытный штрек представляет собой стальную трубу диаметром 1,5—1,8 м и длиной 15—25 м, закрытую с одного торца прочным стальным днищем с отверстием диаметром 300—400 мм для mortarы (рис. 9.27). Опытный штрек бумажной диафрагмой или механическим шторным затвором разделен на две неравные части. Участок от днища до диафрагмы объемом около 10 м³ называется взрывной камерой, в которой перед испытаниями создается метано-воздушная смесь взрывоопасной (8—10 % по объему) кон-

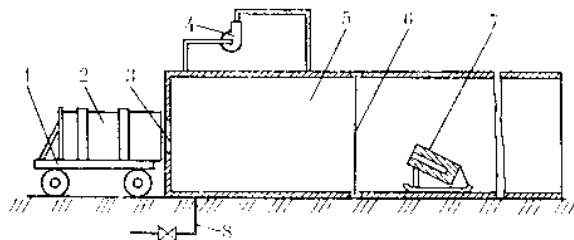


Рис. 9.27. Схема опытного штрека:

1 — тележка; 2 — мортира; 3 — люк; 4 — вентилятор; 5 — взрывная камера; 6 — диафрагма; 7 — пылераспылительная мортира; 8 — трубопровод с газом

центрации. Равномерная концентрация метана в смеси обеспечивается лопастью мешалкой, установленной во взрывной камере, или наружным замкнутым вентиляционным устройством.

Для создания взрывоопасной смеси газа с воздухом используется природный газ с содержанием метана не менее 90 %, этана, бутана, пропана и других высших углеводородов не более 8 %, углекислого газа не более 1 % и при полном отсутствии водорода.

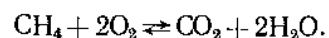
Концентрацию газа во взрывной камере опытного штрека измеряют дистанционным электрическим газоанализатором ГЭУК-21, ГМТ-3 или с помощью пипетки Зегера.

Действие электрических газоанализаторов ГЭУК-21 и ГМТ-3 основано на различной теплопроводности газов. Относительные теплопроводности некоторых газов (теплопроводность воздуха принята за единицу) приведены ниже.

Газ	N ₂	O ₂	CO ₂	CO	CH ₄	H ₂
Относительная теплопроводность	1	1,01	0,59	0,96	1,26	7,3

Теплопроводности исследуемой смеси газов и воздуха сравниваются с помощью мостика Уитстона. Шкала газоанализатора ГЭУК-21 градуируется в процентах измеряемого компонента газовой смеси.

Измерение концентрации метана с помощью пипетки Зегера основано на реакции окисления метана, продуктами которой являются углекислый газ и водяные пары:



Для выполнения анализа пипетку Зегера заполняют водой и, открывая оба крана, набирают в нее анализируемую газовую смесь. Затем закрывают оба крана и помещают пипетку между контактами индукторной машинки. При вращении ротора индукторной машинки между контактами пипетки проскакивает искра, воспламеняющая газовую смесь. Затем пипетку погружают в вер-

тикальном положении в сосуд с водой и открывают нижний кран. В результате конденсации водяных паров при охлаждении в пипетке создается разрежение и внутрь ее засасывается вода, по объему которой можно определить концентрацию горючего компонента по формуле (%)

$$K = 50V_{\text{в}}/V_{\text{п}},$$

где $V_{\text{в}}$ — объем воды, засосанной в пипетку; $V_{\text{п}}$ — объем пипетки.

С внешней стороны дна опытного штрека к люку на специальной тележке подкатывается мортира, имитирующая единичный шпур. Мортира представляет собой стальную (обычно из легированной стали марок 20Х, 30Х, 20ХМ, 30ХМ, 35ХГ2, 18ХГМ, 40ХН, 38ХНВА и др.) толстостенную болвапку длиной 1200 мм и диаметром 550 мм с несквозным каналом диаметром 55 мм и длиной 900 мм.

Для создания в опытном штреке взрывоопасной (400—600 г/м³) взвеси угольной пыли в опытном штреке на расстоянии 8—11 м от дна, в зависимости от диаметра опытного штрека, под углом 20° к горизонтальной оси штрека устанавливается пылераспылительная мортира, на дно которой помещают заряд испытываемого ВВ с массой 50 г с электродетонатором мгновенного действия и поверх него насыпают 6 кг угольной пыли (рис. 9.28).

Угольную пыль распыляют за 2—10 с до взрыва основного испытываемого заряда.

Концентрацию пыли в воздухе периодически измеряют с помощью мембранных пылеотборников, помещаемых во взрывной камере и представляющих собой цилиндрические металлические сосуды, из которых выкачан воздух (рис. 9.29). Сверху над целлофановой мембраной расположен пружинный нож, удерживаемый во взведенном состоянии тонкой медной проволочкой. Над ножом помещается предварительно взвешенный на аналитических весах с точностью до 0,0001 г фильтр из ткани ФПП-15. При подаче напряжения на проволочку-фиксатор она перегорает, пружинный нож пробивает мембрану и в цилиндр засасывается точно известное количество воздуха. Фильтр после опыта взвешивается и определяется количество угольной пыли, осевшей на фильтре. Зная объем прососанного через фильтр воздуха, можно легко вычислить концентрацию пылевоздушной смеси. Использование большого количества пробоотборников позволяет получить полную картину распределения концентрации угольной пыли во времени и пространстве.

Для испытаний используется угольная пыль, содержащая летучих не менее 29—35 %, золы не более 9 %, и с влажностью до 2 %.

Методики испытаний на безопасность воспламенения метано-воздушной и пылевоздушной смеси несколько различаются в зависимости от класса предохранительных ВВ.

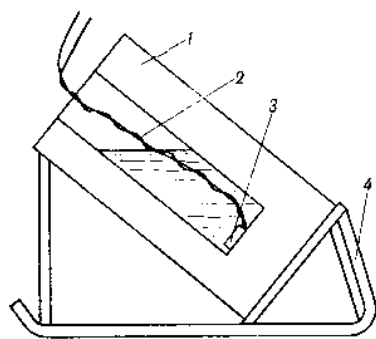


Рис. 9.28. Схема пылераспылительной mortar:
1 — mortar; 2 — пыль; 3 — заряд ВВ; 4 — подставка

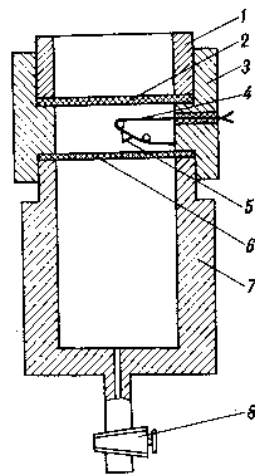


Рис. 9.29. Схема мембранного пылосборника:
1 — гайка; 2 — фильтр; 3 — переходник; 4 — медная проволока; 5 — нож; 6 — целлюлозная мембрана; 7 — корпус; 8 — кран

Предохранительные ВВ класса III, применяемые в чистородных забоях, испытываются на воспламенение газа по методике ГОСТ 7140—81, которая заключается в следующем. В канал mortar помещают три патрона испытываемого ВВ массой по 200 г или два патрона массой по 300 г. В один из патронов, ближний к устью mortar, помещают электродетонатор. Устье mortar закрывается глиняной забойкой толщиной 10 мм. Mortar подкачивается вплотную к люку в днище взрывной камеры штрека, в которой создается взрывоопасная метано-воздушная смесь. ВВ считается выдержавшим испытание, если в 10 опытах заряд массой 600 г не воспламеняет метано-воздушную смесь. При испытании валовых партий предохранительных ВВ на заводах-изготовителях число параллельных опытов уменьшается до трех. Предохранительные ВВ класса III по угольной пыли не испытывают.

Предохранительные ВВ класса IV на безопасность воспламенения метано-воздушной смеси испытывают аналогичным образом. Их испытывают также на безопасность воспламенения взвеси угольной пыли в воздухе. При этих испытаниях в mortar помещают заряд ВВ массой 700 г без забойки. ВВ считается выдержавшим испытание на безопасность в отношении пылевоздушной смеси, если оно в 10 опытах не воспламеняет угольную пыль.

Высокопредохранительные ВВ классов V и VI испытывают на безопасность воспламенения метано-воздушной смеси взрыванием свободно подвешенных зарядов во взрывной камере опытного штрека. ВВ класса V не должны воспламенять метано-воздушную смесь зарядами массой 200 г, а ВВ класса VI — зарядами массой

1000 г в 10 опытах. Кроме этого, ВВ класса VI факультативно испытывают в так называемой угольной mortar с отражательной стенкой (рис. 9.30).

Угольная mortar представляет собой стальной цилиндр диаметром 230 мм и длиной 2000 мм с продольным прямоугольным пазом глубиной 90—100 мм. Угольная mortar помещается во взрывной камере опытного штрека параллельно его оси. Сбоку от угольной mortar на некотором расстоянии укрепляется стальная отражательная стенка размером 1×2 м. Колонку патронов испытываемого ВВ помещают в паз угольной mortar и взрывают. ВВ класса VI считаются выдержавшими испытание, если заряд массой 1 кг не воспламеняет метано-воздушную смесь в 10 последовательных опытах при расстоянии от угольной mortar до отражательной стенки 20 см.

Перечисленные методики испытаний ВВ на предохранительность имеют один общий недостаток: все они основаны на статистическом методе оценки, так как требуют некоторого качественного результата опыта (невоспламенение газа или пыли) при заданных условиях взрывания заряда ВВ или нулевой вероятности воспламенения газа (пыли) при заданном числе опытов. Вместе с тем малое число параллельных опытов в серии обуславливает малую достоверность получаемого результата. С этой точки зрения предпочтительны методы испытаний, которые основаны на определении частоты воспламенения газа (пыли) при заданных условиях опыта и сопоставлении ее с частотой воспламенения, полученной при взрывании эталонного ВВ, или нахождении какой-либо переменной характеристики (массы заряда, расстояния до отражательной стенки, толщины инертной оболочки и т. п.), при которой частота воспламенения отвечает заданной вероятности.

Вторая возможность более строгой оценки степени предохранительности ВВ состоит в том, что измеряются одна или несколько количественных характеристик ВВ, определяющие предохранительные свойства ВВ.

Статистические методы оценки предохранительности ВВ предлагались различными исследователями и в разных вариантах. В наиболее законченном виде одна из таких методик отработана в МакНИИ. Она заключается в определении частоты воспламенения метано-воздушной смеси при взрывании в ней свободно подвешенных зарядов в оболочках из кварцевого песка. По этой

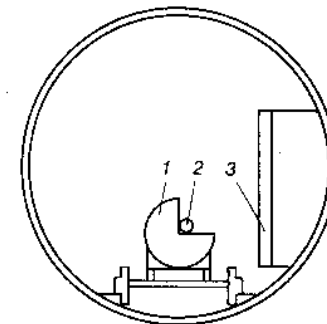


Рис. 9.30. Схема угольной mortar с отражательной стенкой в опытном штреке:
1 — угольная mortar; 2 — заряд ВВ; 3 — отражательная стенка

методике патрон испытываемого ВВ массой 250 г в бумажной парафинированной гильзе диаметром 36 мм с электродетонатором мгновенного действия помещают в оболочку из сухого кварцевого песка. Толщина стенок оболочки составляет 8—9 мм. Спаряженный таким образом заряд подвешивают вдоль оси взрывной камеры опытного штрека и выполняют 80—100 взрываний, фиксируя число случаев воспламенения газа. По данной методике в зависимости от температуры и относительной влажности воздуха частота воспламенения метано-воздушной смеси составляет 0—0,22 для аммонита ПЖВ-20 и 0,35—0,6 для аммонита АП-5ЖВ. Для воспроизводимости результатов испытаний данная методика требует регламентации температуры газовой смеси и по возможности ее относительной влажности.

Другой вариант статистического метода состоит в определении массы заряда P_{50} , соответствующей 50 %-ной вероятности воспламенения газа. Вероятность находится методом «вверх — вниз». Суть метода состоит в том, что если в очередном опыте газ воспламенился, то в последующем опыте заряд уменьшают на некоторую постоянную долю (обычно на 0,066 логарифма начальной величины). Заряды испытываемого ВВ заданной геометрической формы помещают в оболочку из кварцевого песка толщиной 5 мм. По данной методике для ВВ в патронах диаметром 36 мм P_{50} составляет 277 г для аммонита ПЖВ-20 и 207 г для аммонита АП-5ЖВ.

Помимо статистических методов оценки воспламеняющей способности ВВ, основанной на прямых опытах по воспламенению газо- или пылевоздушных смесей при взрыве заданной массы ВВ, в разное время предлагались методы оценки предохранительных ВВ по тем или иным расчетным или экспериментальным характеристикам ВВ. В качестве таких характеристик предлагались, например, температура взрыва, удельное теплосодержание в продуктах взрыва, размеры пламени взрыва и др.

В последнее время МакНИИ разработана и предложена методика оценки предохранительных свойств ВВ по величине предвзрывного разогрева горючей газовой смеси при взрыве некоторой заданной массы предохранительного ВВ. Метод исходит из предположения, что при взрыве заряда ВВ в метано-воздушной смеси любой концентрации возникает и развивается экзотермическая реакция окисления метана, поддерживаемая горячими ПВ. Эта начальная реакция при определенных условиях может перейти во взрыв (вспышку) газа. Однако, независимо от того, закончится ли она воспламенением газа или затухнет, температура газовой смеси должна повыситься до значений, превышающих исходную температуру ПВ в этой же точке камеры при отсутствии реакционной среды, т. е. в чистом воздухе. Таким образом, метано-воздушная смесь подвергается термохимической активации (возбуждению) при взрыве в ней заряда ВВ. Степень этого воз-

Таблица 9.7

ВВ	Кислородный баланс, %	Расчетная теплота взрыва, кДж/кг	Расчетная температура взрыва, °С	Относительный показатель предохранительности
Аммонит 6ЖВ	-0,42	4326	2940	0,57/0,45
Аммонит Т-19	-2,41	3440	2240	0,8/1,24
Аммонит ПЖВ-20	+0,4	3360	2195	1/1
Угленит Э-6	+0,53	2659	1790	4,33/3

Примечание. В числителе приведены значения для подвешенных зарядов в камере штрека, в знаменателе — уложенные в канале mortarы.

буждения тем выше, чем агрессивнее взрываемое ВВ по отношению к метано-воздушной смеси.

О предохранительных свойствах ВВ можно судить по степени термохимического возбуждения метано-воздушной смеси при взрыве в ней зарядов испытываемого ВВ без воспламенения, регистрируемого тем или иным способом. Так, количественной характеристикой степени активации метано-воздушной смеси может быть ее температура, измеренная в зоне термохимического возбуждения, либо интенсивность ее теплового (инфракрасного) излучения. Температура активированной метано-воздушной смеси измеряется с помощью проволочного датчика, работающего в режиме термометра сопротивления. В качестве чувствительного элемента используется вольфрамовая проволочка диаметром 30—50 мкм. Датчик устанавливается на расстоянии 60 см от взрываемого заряда. Концентрация метана в смеси составляет 14 %.

Степень термохимического возбуждения метано-воздушной смеси для исключения влияния внешних условий на результаты опытов можно определять его относительным показателем

$$W_t = \Delta t_n / \Delta t_s,$$

где Δt_n и Δt_s — приращения температуры возбужденной смеси при взрыве соответственно исследуемого ВВ и эталонного ВВ (аммонит ПЖВ-20).

Так как предохранительные свойства ВВ тем выше, чем ниже степень возбуждения метано-воздушной смеси, величину, обратную показателю термохимического возбуждения, можно принять в качестве относительного показателя предохранительности ВВ:

$$p_t = 1/W_t = \Delta t_s / \Delta t_n.$$

Относительные показатели предохранительности наиболее распространенных ВВ приведены в табл. 9.7.

Показателем, характеризующим степень термохимического возбуждения метано-воздушной смеси при взрыве в ней зарядов ВВ,

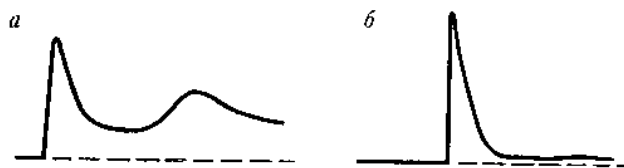


Рис. 9.31. Осциллограммы инфракрасного излучения метано-воздушной смеси

может служить также интенсивность ее инфракрасного излучения, измеряемая с помощью фотодиодов с эбонитовым светофильтром. На типичной осциллограмме инфракрасного излучения метано-воздушной смеси (14 % CH_4) при взрывании в ней свободно подвешенного заряда аммонита ПЖВ-20 массой 200 г (рис. 9.31, а) отчетливо виден второй максимум излучения, характеризующий термохимическое возбуждение метано-воздушной смеси. На осциллограмме инфракрасного излучения взрыва такого же заряда ВВ в воздухе (рис. 9.31, б) второй максимум отсутствует.

Как и в первом случае, при определении предохранительных свойств ВВ используется относительный показатель предохранительности

$$p_k = \Delta U_a / \Delta U_b,$$

где ΔU_a и ΔU_b — приращение фото-ЭДС при взрыве соответственно эталонного ВВ и исследуемого ВВ.

Таким образом, исследуемые ВВ по предохранительности, выраженной через интенсивность инфракрасного излучения, располагаются в такой же последовательности, как и по температуре возбуждения. При этом количественный показатель предохранительности по инфракрасному излучению имеет несколько более растянутую шкалу, чем по температуре, что удобнее для количественного сравнения ВВ.

Методы оценки детонационной способности предохранительных ВВ. Детонационная способность предохранительных ВВ может значительно измениться при хранении и применении ВВ. Одной из основных причин изменения их детонационной способности является уплотнение зарядов вследствие откольных явлений, канального эффекта, подвигания массива, прорыва ПВ к еще не детонировавшему заряду и т. п. Поэтому разработаны методы оценки детонационной способности предохранительных ВВ, уплотненных как статическими, так и динамическими нагрузками.

По методу оценки уплотняемости предохранительных ВВ под воздействием динамических нагрузок в стальную матрицу помещают навеску ВВ (20 ± 1 г). Динамическое воздействие осуществляется зарядом ВВ обычно из аммонита ПЖВ-20 диаметром 40 мм и массой 100 г.

После взрывания обжимающего заряда измеряется конечная плотность исследуемого ВВ. Кроме этого, зная, на какую глубину пуапсон в процессе обжатия вдвигался в матрицу, можно рассчитать плотность исследуемого ВВ в процессе обжатия.

Ниже приведены значения плотности для некоторых ВВ, полученные взрывом обжимающего заряда из аммонита ПЖВ-20 массой 100 г.

ВВ	Аммонит ПЖВ-20	Угленит Э-6	Аммиачная селитра
Плотность ВВ после динамического обжатия в матрице, г/см^3	1,52	1,48	1,42/1,49*

* В числителе — водоустойчивая, в знаменателе — кристаллическая.

Для оценки уплотняемости ВВ под воздействием динамических нагрузок по методу обжатия их зарядов взрывной волной в водной или песчаной среде патрон исследуемого ВВ диаметром 36 мм массой 200 г помещают в оболочку из тонкой жести диаметром 100 мм. Пространство между патроном и жестяной оболочкой засыпают измельченным углем. Снаряженный таким образом заряд помещают в вертикальном положении в яму с песком или водой на глубину не менее 0,5 м. По бокам исследуемого заряда на одном уровне с ним вертикально помещают три обжимающие патрона из аммонита ПЖВ-20 диаметром 36 мм и массой 200 г с электродетонаторами мгновенного действия. После подрыва обжимающих зарядов исследуемый заряд извлекают из оболочки и определяют его плотность. Плотности некоторых ВВ, уплотненных по этому методу в емкости с водой (расстояние от обжимающих зарядов до исследуемого 300 мм), следующие: 1,65 г/см^3 для аммонита ПЖВ-20 и 1,55 г/см^3 для угленита Э-6.

Метод оценки сопротивляемости предохранительных ВВ канальному эффекту. В стальную трубу длиной 1,25 м, внутренним диаметром 36 мм и толщиной стенок 3,5 мм помещают впритык один к другому пять патронов исследуемого ВВ в бумажной оболочке диаметром 20 мм и длиной 25 см (рис. 9.32). В первый патрон вставляют электродетонатор мгновенного действия и производят подрыв. Мерой сопротивляемости ВВ канальному эффекту служит длина участка детонации взрываемого заряда (до затухания). Для аммонита ПЖВ-20 длина участка детонации составляет 76—79 см, а для угленита Э-6 — 35 см.

Вместо стальной трубы можно пользоваться стеклянной, но диаметр трубы и диаметр заряда в этом случае должны быть уменьшены (при условии, что $d > d_{кр}$).

Метод оценки устойчивости детонации зарядов предохранительных ВВ при воздействии на них динамических (взрывных) нагрузок в лабора-

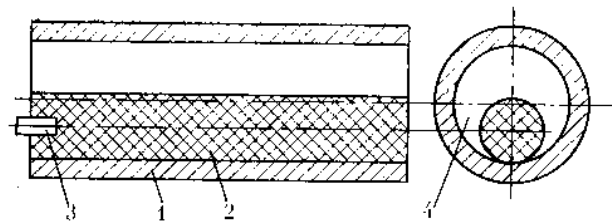


Рис. 9.32. Схема установки для определения канального эффекта:

1 — труба; 2 — заряд ВВ; 3 — ЭД; 4 — воздушный зазор

торных условиях предложен В. Г. Хотиним. В оболочке из плексигласа или цемента параллельно один другому на строго фиксированном расстоянии располагаются два заряда исследуемого ВВ (рис. 9.33).

Один из зарядов взрывается раньше, другой — с некоторым замедлением. Заряды в сечении имеют форму квадрата со стороной 10 мм. Замедление создается с помощью отрезков ДШ разной длины, взрывааемых одним электродетонатором.

Определяется максимальное время задержки инициирования второго заряда, в течение которого он еще в состоянии детонировать. При увеличении расстояния между зарядами это время возрастает и, наконец, при достаточно большом расстоянии между зарядами воздействие активного заряда будет столь слабым, что второй заряд будет способен детонировать при любом времени задержки.

В координатах «время задержки — расстояние» между зарядами можно выделить область, в которой детонация второго за-

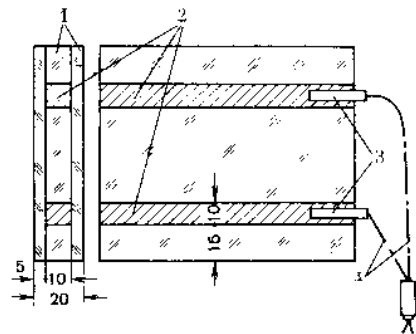


Рис. 9.33. Схема установки для определения устойчивости детонации ВВ под воздействием динамических нагрузок:

1 — плексигласовые пластинки; 2 — заряды ВВ; 3 — детонатор; 4 — детонирующий шнур

350

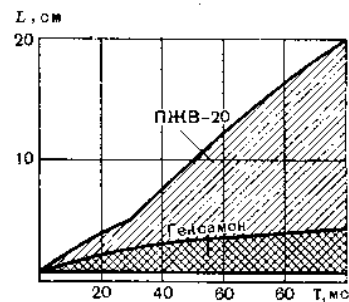


Рис. 9.34. График времени задержки инициирования для различных расстояний между зарядами

ряда будет невозможной (рис. 9.34). Положение этой области, ее площадь, а также минимальное расстояние, на котором взрыв первого заряда еще способен оборвать детонацию второго заряда, характеризует вероятность затухания детонации исследуемого ВВ под воздействием взрыва соседнего заряда.

В. И. Зениным и Б. И. Вайнштейном предложена лабораторная методика определения устойчивости детонации ВВ в условиях моделирующих групповое неодновременное взрывание в шахтных условиях. По этой методике исследуемое ВВ испытывают в углещементном блоке. Блок изготавливается из смеси угля, глиноземистого цемента и воды в соотношении 13:9:6. Такое соотношение компонентов обеспечивает близость физико-механических свойств углещементных блоков к свойствам каменного угля. Углещементный блок изготавливается в виде цилиндра диаметром 250 мм и длиной 500 мм с одним каналом (шпуром) диаметром 44 мм для исследуемого ВВ и двумя каналами (шпурами) диаметром 25 мм для уплотняющих зарядов. Блок вставляют в толстостенную стальную обойму со свободно входящим дном. Заряд испытываемого ВВ состоит из двух патронов диаметром 36 мм и длиной 155 мм в оболочке из патронировочной бумаги. Верхний патрон снабжен электродетонатором ЭД-КЗ-ПМ, второй патрон — ионизационными датчиками для измерения скорости детонации. Одновременно в этот же канал вставляется латунная трубка «свидетель». Уплотняющие заряды диаметром 15—23 мм и длиной 320 мм изготавливаются из аммонита 6ЖВ плотностью 1,05 г/см³. Уплотняющие заряды инициируют детонирующим шнуром и электродетонатором мгновенного действия. Свободную верхнюю часть шпуров-каналов заполняют песчано-глиняной забойкой. Сверху на обойму помещают крышку-груз массой 1000 кг, препятствующую истечению основной массы ПВ обжимающих зарядов из обоймы до взрыва испытываемого заряда.

Таким образом, подпрессовывающий и испытываемый заряды взрывают в среде, по физико-механическим свойствам близкой к углю в неразрушенном массиве, имитируемым обоймой. К моменту взрыва испытываемый заряд находится под влиянием упругих сил, обусловленных давлением газообразных ПВ, еще не истекших из обоймы с блоком.

Степень уплотнения исследуемого заряда подчиняется закону подобия в геометрической форме и является функцией безразмерной переменной (приведенного расстояния $\bar{R} = L/R$, где L — расстояние между уплотняющим и исследуемым зарядами; R — радиус уплотняющего заряда).

Поскольку приведенное расстояние определяет степень уплотнения исследуемого ВВ, устойчивость детонации принято характеризовать критическим, т. е. наименьшим приведенным, расстоянием, при котором еще сохраняется устойчивая детонация ВВ.

351

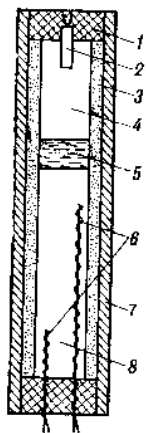


Рис. 9.35. Схема установки для определения склонности ВВ к выгоранию в свинцовой трубке:

1 — пластилиновая пробка; 2 — ЭД; 3 — угольная пыль; 4 — активный заряд; 5 — преграда на воду; 6 — ионизационные датчики; 7 — свинцовая трубка; 8 — пассивный заряд

Чем меньше эта величина, тем выше устойчивость детонации ВВ.

Критические приведенные расстояния в углецементных блоках для аммонитов ПЖВ-20, Т-19 и угленита Э-6 составляют соответственно 10,6; 7,5 и 13,2.

Методы оценки склонности предохранительных ВВ к выгоранию. Методы оценки детонационной способности ВВ при динамическом уплотнении еще не дают полной оценки их склонности к выгоранию, так как не учитывают горючести ВВ. Предложена комплексная лабораторно-полигонная методика оценки склонности ВВ к выгоранию. По этой методике заряд исследуемого ВВ диаметром 30 мм, состоящий из активной и пассивной частей, в бумажной парафинированной оболочке помещают в свинцовую трубку внутренним диаметром 45 мм и толщиной стенок 3—4 мм (рис. 9.35). Зазор между зарядом ВВ и стенками свинцового цилиндра заполняется угольной пылью. Масса активной части заряда составляет 60 г, пассивной — 100 г. Верхний и нижний торцы свинцового цилиндра закрываются пластилиновыми пробками толщиной 20 мм. Снаряженный таким образом заряд помещают по центру в вертикальном положении в бумажный парафинированный цилиндр диаметром 100 мм, наполненный водой, таким образом, чтобы уровень воды находился на 50 мм выше верхнего торца свинцового цилиндра. На расстоянии 5 см от стенок бумажного цилиндра (рис. 9.36) под углом 120° в вертикальном положении располагают три обжимающих заряда из того же ВВ, что и исследуемое, в виде патронов диаметром 36 мм и массой 200 г, снабженных электродетонаторами мгновенного действия.

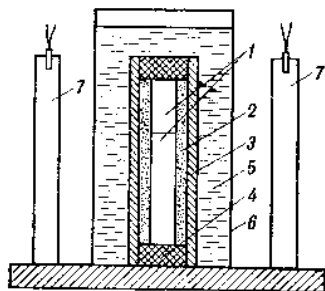


Рис. 9.36. Схема установки для определения динамического уплотнения зарядов в свинцовой трубке:

1 — заряды ВВ; 2 — угольная пыль; 3 — свинцовая трубка; 4 — пластилиновая пробка; 5 — вода; 6 — бумажный цилиндр; 7 — обжимающие заряды

Таблица 9.8

ВВ	Среднее расстояние, мм		Показатель склонности предохранительных ВВ к выгоранию
	передачи детонации	возбуждения горения	
Аммонит ПЖВ-20	12	40	2,33
Нитроэфиросодержащее ПВВ	17	154	4,71

После подрыва обжимающих зарядов исследуемый заряд извлекается из свинцовой оболочки, пассивная часть заряда снабжается ионизационными датчиками и помещается в алебастровую оболочку диаметром 55 мм таким образом, чтобы между активной и пассивной частями заряда остался воздушный зазор. Подготовленный таким образом заряд, снабженный электродетонатором, помещается в толстостенную мортиру, где определяют средние величины воздушного зазора между активной и пассивной частями заряда, которые соответствуют 50 %-ной вероятности передачи детонации на расстоянии L_1 , и возбуждения горения на расстоянии L_2 в пассивной части заряда. Критерием оценки склонности ВВ к выгоранию по данной методике может являться величина

$$\psi = (L_2 - L_1)/L_1.$$

Средние расстояния передачи детонации и возбуждения горения для уплотненных зарядов и показатель склонности двух типов предохранительных ВВ к выгоранию приведены в табл. 9.8.

МакНИИ предложена методика оценки склонности предохранительных ВВ к выгоранию в шахте, суть которой сводится к следующему. В угольном пласте выбурируют три параллельных шпура диаметром 45—47 мм и длиной 1,8 м на расстоянии один от другого 0,3—0,4 м. Во все три шпура помещают заряды исследуемого ВВ в виде двух патронов диаметром 36 мм и массой 200 г.

Заряды в двух шпурах, называемые обжимающими, инициируют электродетонатором короткозамедленного действия с временем замедления 25 мс. Определяют скорость и характер взрыва ВВ в исследуемом шпуре, подверженного предварительному воздействию обжимающих зарядов с помощью ионизационных датчиков и латунной трубки («свидетеля»). ВВ, не давшее ни в одном из 10 опытов заниженной скорости взрыва, считается устойчиво детонирующим в условиях группового взрывания и мало склонным к выгоранию.

Достоинство данной методики заключается в том, что испытания проводятся в условиях, максимально приближенных к практическим условиям применения ВВ. Однако эти опыты весьма трудоемки и плохо воспроизводимы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Адушкин В. А., Когарко С. М., Лямин А. Г. Расчет безопасных расстояний при газовых взрывах в атмосфере. — В кн.: Взрывное дело, 75/32. М., Недра, 1975, с. 82—93.
2. Айзенштадт И. Н. Метод расчета идеальной скорости детонации конденсированных взрывчатых веществ. — Физика горения и взрыва, 1976, т. 12, № 5, с. 754—757.
3. Александров В. Е., Петров И. Г. О совершенствовании буровзрывного способа проведения выработок. — Уголь, 1983, № 9, с. 33—34.
4. Александров В. Е., Трубников В. Н. О реологических свойствах водонаполненных ВВ. — В кн.: Взрывное дело, 84/41. М., Недра, 1982, с. 154—161.
5. Александров В. Е., Шевцов Н. Р., Вайнштейн Б. И. Безопасность взрывных работ в угольных шахтах. М., Недра, 1986.
6. Амосов А. П. Тепловая теория самовоспламенения, Куйбышев, КуАИ, 1982.
7. Андреев С. Г., Соловьева В. С., Лазарев В. В. Развитие представлений о разложении тротила при динамических воздействиях. — В кн.: Детонация и ударные волны. Черноголовка, ИХФ АН СССР, 1986, с. 42—46.
8. Андреев К. К., Беллев А. Ф. Теория взрывчатых веществ. М., Оборонгиз, 1960.
9. Анизотропия поля ударных волн неферрических источников/В. Ю. Вершинин, Л. В. Дубнов, В. Е. Клаповский, В. Н. Минеев. — Физика горения и взрыва, 1984, т. 20, № 3, с. 56—60.
10. Анискин А. И. Детонация смесей взрывчатых веществ с алюминием. — В кн.: Детонация и ударные волны. Черноголовка, ИХФ АН СССР, 1986, с. 26—31.
11. Анников В. Э., Капустин П. П., Кондриков Б. Н. О влиянии начальной температуры на детонационную способность водонаполненных смесей. — В кн.: Взрывное дело, 84/41. М., Недра, 1982, с. 35—38.
12. Афанасьева Г. Г., Боболев В. Н. Иницирование твердых взрывчатых веществ ударом. М., Наука, 1968.
13. Баранов Е. Г., Оберемок О. Н., Семенюк Е. А. О роли поверхностной энергии в механизме разогрева взрывчатых веществ при ударных воздействиях. — Физика горения и взрыва, 1981, т. 17, № 5, с. 112—115.
14. Безопасность применения карбатов/О. Г. Чулков, Т. К. Рагозина, Т. А. Рыжкова и др. — Безопасность труда в промышленности, 1984, № 1, с. 39—40.
15. Взрывные работы в опасных условиях угольных шахт/Б. Н. Кутузов, А. Н. Бутуков, Б. И. Вайнштейн и др. М., Недра, 1979.
16. Викторов С. Д., Демидюк Г. П. Простейшие взрывчатые вещества. Вестн. АН СССР, 1985, № 7, с. 102—111.
17. Влияние элементарного состава на детонационные свойства взрывчатых веществ/М. Фингер, Е. Ли, Ф. Хельм и др. — В кн.: Детонация и взрывчатые вещества, М., Мир, 1981, с. 52—75.
18. Воскобойников И. М., Котомин Л. А. Расчет параметров детонации смесевых взрывчатых веществ с инертными добавками. — Физика горения и взрыва, 1985, т. 21, № 5, с. 93—97.
19. Гадакчан Н. П., Хуснутдинов Г. З., Кочегаров В. П. Параметры воздушных смесей. — В кн.: Технология и разработка месторождений полезных ископаемых. Тр. Грузинского политехнического института. Тбилиси, 1978, № 6, с. 207—214.
20. Глазкова А. П. Катализ горения взрывчатых веществ. М., Наука, 1976.
21. Губин С. А., Одинцов В. В., Пелекин В. И. Термодинамические работы детонации конденсированных веществ. Черноголовка, ИХФ АН СССР, 1986.
22. Демидюк Г. П., Викторов С. Д., Закалинский В. М. Повышение эффективности взрывных работ на основе механизированного применения металлизированных простейших и водосодержащих взрывчатых смесей. — В кн.: Взрывное дело, 87/44, М., Недра, 1985, с. 133—140.
23. Детонационные волны в конденсированных средах/А. Н. Дремин, С. Д. Сауров и др. М., Наука, 1970.
24. Дубовик А. В., Боболев В. К. Чувствительность жидких взрывчатых веществ к удару. М., Наука, 1978.
25. Дубовик А. В., Лисанов М. В. Расчет критических параметров иницирования твердых взрывчатых веществ ударом на копре. — Физика горения и взрыва, 1985, т. 21, № 4, с. 87—93.
26. Дубовик А. В., Лисанов М. В. Тепловая неустойчивость детонации и воспламенения зарядов реакционноспособных веществ при ударе. — В кн.: Детонация и ударные волны. Черноголовка, ИХФ АН СССР, 1986, с. 6—9.
27. Егупов А. А. Комплексная механизация взрывных работ при разработке многолетних мерзлых россыпей. — Горный журнал, 1982, № 7, с. 54—57.
28. Единые правила безопасности при взрывных работах. М., Недра, 1976.
29. Ерофеев И. Е. Состояние и развитие комплексной механизации взрывных работ. — Горный журнал, 1982, № 2, с. 40—44.
30. Зельдович Я. Б., Компанец А. С. Теория детонации. М., Гостехиздат, 1955.
31. Измерение давления и массовой скорости в твердых телах при динамическом нагружении/П. А. Уртыев, Р. М. Эрикссон и др. — Физика горения и взрыва, 1986, т. 22, № 5, с. 113—126.
32. Исследование ближней зоны взрыва с помощью манганиновых датчиков/А. Н. Ханукаев, В. А. Вирченко и др. — Физика горения и взрыва, 1984, т. 20, № 3, с. 23—26.
33. Исследование процесса окисления алюминия при взрыве с помощью импульсомера/Г. В. Струков, Л. Т. Еременко, Л. В. Дубнов и др. — В кн.: Детонация. Черноголовка, ИХФ АН СССР, 1980, с. 24—27.
34. Кондриков Б. Н. Химическая термодинамика горения и взрыва. М., МХТИ, 1980.
35. Кондриков Б. Н., Сумин А. И. Уравнение состояния газов при высоком давлении. — Физика горения и взрыва, 1987, т. 23, № 1, с. 114—123.
36. Кривченко А. Л. Метод расчета параметров детонации конденсированных взрывчатых веществ. — Физика горения и взрыва, 1984, т. 20, № 3, с. 83—86.
37. Кук М. А. Наука о промышленных взрывчатых веществах. М., Недра, 1980.
38. Кукиб Б. Н., Росси Б. Д. Высокопредохранительные взрывчатые вещества. М., Недра, 1980.
39. Кутузов Б. Н. Совершенствование ассортимента промышленных взрывчатых веществ для карьеров. — Горный журнал, 1983, № 4, с. 29—30.
40. Мейдер Ч. Численное моделирование детонации. М., Мир, 1985.
41. Макгайр Р., Орнелъяс Д., Акст И. Химия детонационных процессов: диффузионные явления в неидеальных взрывчатых веществах. — В кн.: Детонация и взрывчатые вещества. М., Мир, 1981, с. 160—169.
42. Мержанов А. Г., Абрамов В. Г. Тепловой взрыв взрывчатых веществ и порохов. Черноголовка, ИХФ АН СССР, 1979.
43. Метод расчета скорости детонации индивидуальных взрывчатых веществ/С. П. Смирнов, В. И. Пелекин, Е. В. Калганов и др. — В кн.: Детонация и ударные волны. Черноголовка, ИХФ АН СССР, 1986, с. 38—41.
44. Об опасности электризации граммонитов при пневмозарядании шпуров и скважин/И. С. Таубкин, Н. М. Кармазинов и др. — В кн.: Взрывное дело, 80/37. М., Недра, 1978, с. 221—228.
45. О возможности расчета параметров детонации высоконаполненных металлизированных взрывчатых веществ/В. Ю. Давыдов, Л. В. Дубнов, Н. И. Фео-

доритов и др. — В кн.: Вопросы теории конденсированных взрывчатых систем. М., МХТИ, 1980, с. 130—134.

46. Орлова Е. Ю. Химия и технология бризантных взрывчатых веществ. Л., Химия, 1981.

47. Пелекин В. И., Кузнецов Н. М., Лебедев Ю. А. О взаимосвязи параметров детонации с химическим составом взрывчатых веществ. — Докл. АН СССР, 1977, т. 234, № 1, с. 105—108.

48. Пелекин В. И., Лебедев Ю. А. Критерии оценки параметров детонации взрывчатых веществ. — Докл. АН СССР, 1977, т. 234, № 6, с. 1391—1394.

49. Савенко С. К., Гукин А. А., Малый П. С. Ударные воздушные волны в подземных выработках. М., Недра, 1976.

50. Самовозгорание и взрывы пыли натуральных топлив/В. В. Померанцев, С. Л. Шаталова, В. А. Резник и др., Л., Энергия, 1978.

51. Светлов Б. Я., Яременко П. Е. Теория и свойства промышленных взрывчатых веществ. М., Недра, 1973.

52. Совершенствование ассортимента промышленных взрывчатых веществ в зарубежных странах/В. М. Скоробогатов, Б. Н. Кукиб, З. Г. Поздняков и др. — В кн.: Взрывное дело, 87/44, М., Недра, 1985, с. 174—182.

53. Термодинамический расчет сложных химических систем при повышенном давлении и с частичным несравновесием/В. А. Борисов, С. А. Губин, В. В. Одинцов, В. И. Пелекин. — Химическая физика, 1984, т. 3, № 7, с. 1042—1046.

54. Термостойкие взрывчатые вещества в условиях глубоких скважин/Под ред. Л. А. Шипицина. М., Недра, 1984.

55. Техника и технология взрывных работ на рудниках/Г. П. Демидюк, Л. В. Дубнов, В. В. Стоянов и др. М., Недра, 1978.

56. Технология аммиачной селитры/Под ред. В. М. Олевского, М., Химия, 1978.

57. Технология зарядания обводненных скважин неводоустойчивыми взрывчатыми веществами/А. А. Воробский, А. Н. Петров, А. И. Дремин и др. — Горный журнал, 1981, № 6, с. 35—36.

58. Трофимов В. С. Принципиальные вопросы построения количественной теории детонации конденсированных взрывчатых веществ. — В кн.: Детонация и ударные волны. Черноголовка, ИХФ АН СССР, 1986, с. 59—65.

59. Трофимов В. С. О критическом диаметре стационарной детонации конденсированных взрывчатых веществ в связи с возможностью их разложения в ударном скачке. — Физика горения и взрыва, 1982, т. 18, № 1, с. 136—139.

60. Уткин А. В., Канель Г. И. Исследование кинетики разложения тротила и флегматизированного гексогена в ударных и детонационных волнах. — В кн.: Детонация и ударные волны. Черноголовка, ИХФ АН СССР, 1986, с. 13—16.

61. Физика взрыва/Ф. А. Баум, Л. П. Орленко, К. П. Станюкович и др. М., Наука, 1975.

62. Ханукаев А. Н. Физические процессы при отбойке горных пород взрывом. М., Недра, 1974.

63. Хотин В. Г. Методы расчета скорости детонации конденсированных смесей, способных к экзотермическому превращению. М., МХТИ, 1985.

64. Шведов К. К. Об определении работоспособности взрывчатых веществ. — Физика горения и взрыва, 1984, т. 20, № 3, с. 60—64.

65. Шведов К. К. О причинах разброса экспериментальных данных по давлению и показателю политропы продуктов детонации конденсированных взрывчатых веществ и возможности их точного определения. Черноголовка, ИХФ АН СССР, 1985.

66. Шведов К. К. О регистрации параметров Чепмена — Жуге при детонации конденсированных взрывчатых веществ. — Физика горения и взрыва, 1987, № 4, с. 94—103.

67. Шведов К. К., Дремин А. Н. О параметрах детонации промышленных взрывчатых веществ и их сравнительной оценке. — В кн.: Взрывное дело, 76/33. М., Недра, 1976, с. 137—150.

68. Щелкин К. И., Трошин Я. К. Газодинамика горения. М., Наука, 1963.

69. Юхансон К., Персон П. Детонация взрывчатых веществ. М., Мир, 1985.

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие	3
1. Общая характеристика промышленных ВВ, их классификация и история развития	5
1.1. ВВ как химическая система. Основные формы превращения	5
1.2. Классификация ВВ	7
1.3. Краткая история развития промышленных ВВ	14
2. Термодинамика взрыва	26
2.1. Теплота взрыва, состав продуктов взрыва	26
2.2. Параметры состояния продуктов взрыва	46
2.2.1. Температура продуктов взрыва	46
2.2.2. Давление продуктов взрыва	49
2.3. Работа взрыва. Работоспособность ВВ	53
2.3.1. Тротильный эквивалент. Закон подобия взрывных волн	57
3. Детонация ВВ	63
3.1. Явление детонации. Параметры детонационной волны. Основные соотношения	63
3.2. Критические условия распространения детонации. Идеальный и неидеальный режимы детонации	72
3.3. Возбуждение детонации	79
3.4. Особенности детонации смесевых промышленных ВВ	83
4. Формы работы взрыва. Техничко-экономическая эффективность промышленных ВВ	96
4.1. Методы оценки технической эффективности промышленных ВВ	96
4.2. Критерии экономической эффективности ВВ	102
5. Безопасность при перевозке, хранении и обращении с ВВ	105
5.1. Чувствительность ВВ к механическим воздействиям	105
5.2. Чувствительность ВВ к тепловым формам воздействия. Тепловой взрыв. Горение ВВ. Переход горения во взрыв	109
5.3. Выгорание (дефлаграция) ВВ	115
5.4. Чувствительность ВВ к разрядам статического электричества	135
5.5. Токсичность ВВ и продуктов взрыва	139
5.6. Безопасные расстояния по действию воздушной ударной волны и передаче детонации	143
6. Основы теории предохранительных ВВ	148
6.1. Горючие газы и пыль в шахтной атмосфере	148
6.2. Взрывы газа и пыли в шахтах	150
6.3. Катализ и ингибирование взрывных реакций окисления горючих газов	167
6.4. Воспламенение горючих шахтных сред взрывным импульсом	172
6.5. Современные принципы создания предохранительных ВВ	177
7. Физико-химические свойства промышленных ВВ и методы их определения	187
7.1. Водоустойчивость	187
7.2. Физическая стабильность	193

7.3. Химическая стабильность	203
7.4. Физико-механические свойства	208
7.5. Реологические свойства	209
7.6. Старение	210
8. Основные типы промышленных ВВ и их свойства	213
8.1. Общие технические требования к промышленным ВВ	213
8.2. Нитросоединения и их применение в народном хозяйстве	214
8.2.1. Тротил и его применение в народном хозяйстве	215
8.2.2. Гексоген и октоген	223
8.2.3. Тэв	224
8.2.4. Нитроглицерин, нитроглицоли	224
8.2.5. Динитронафтали	226
8.2.6. Нитрометан	226
8.3. ВВ на основе аммиачной селитры	227
8.3.1. Аммиачная селитра и ее свойства	227
8.3.2. Металлические горючие в составе промышленных ВВ	235
8.3.3. Простейшие гранулированные ВВ	236
8.3.4. Гранулированные аммониты и граммоналы	249
8.3.5. Порошкообразные ВВ	253
8.3.6. Водосодержащие ВВ	259
8.4. Другие типы ВВ для горнорудной промышленности	275
8.4.1. Нитроэфиросодержащие ВВ	275
8.4.2. ВВ на основе твердых и жидких окислителей	277
8.4.3. Смеси на основе жидких нитропарафинов и солей гидразина (астралиты)	280
8.5. Предохранительные ВВ	283
8.5.1. Способы регулирования энергетических характеристик предохранительных ВВ	283
8.5.2. Пламегасители в составе предохранительных ВВ	287
8.5.3. Особенности селективно-детонирующих предохранительных ВВ	289
8.5.4. Детонационная способность предохранительных ВВ	290
8.5.5. Горючесть предохранительных ВВ и другие эксплуатационные качества	291
8.5.6. Классификация предохранительных ВВ	293
8.5.7. Свойства предохранительных ВВ отечественного ассортимента	295
8.5.8. Свойства предохранительных ВВ зарубежного ассортимента	300
8.6. Шапки-детонаторы и заряды вторичного дробления	301
8.7. ВВ для обработки металлов взрывом	302
9. Методы испытания промышленных взрывчатых веществ	304
9.1. Измерение параметров детонации	304
9.2. Методы определения работоспособности взрывчатых веществ	314
9.3. Методы определения бризантности взрывчатых веществ	320
9.4. Методы измерения теплоты, объема и состава продуктов взрыва	322
9.5. Методы оценки чувствительности взрывчатых веществ к тепловым и механическим воздействиям	325
9.6. Методы оценки чувствительности взрывчатых веществ к ударной волне. Передача детонации на расстояние	336
9.7. Чувствительность взрывчатых веществ к инициирующему импульсу	340
9.8. Методы испытаний предохранительных взрывчатых веществ	341
Список литературы	354

Дубнов Л. В., Бахаревич Н. С., Романов А. И.

Д79 Промышленные взрывчатые вещества.— 3-е изд., перераб. и доп.— М.: Недра, 1988.— 358 с: ил.

ISBN 5—247—00285—7

Изложены основы теории и свойства промышленных взрывчатых веществ (ВВ), применяемых в различных отраслях народного хозяйства. Рассмотрены эксплуатационные качества и детонационные характеристики взрывчатых веществ, описаны принципы оценки и методики расчетов технико-экономической эффективности их. Третье издание (2-е изд.— 1982) дополнено материалами о суспензионных и эмульсионных ВВ. Освещены вопросы безопасности при обращении с промышленными ВВ.

Для инженерно-технических работников, занимающихся использованием энергии взрыва в промышленности и строительстве.

Д 250200000—279 224—88
043(01)—88

ББК 33.133

ПРОИЗВОДСТВЕННОЕ (ПРАКТИЧЕСКОЕ) ИЗДАНИЕ

Дубнов Лев Владимирович
Бахаревич Нелли Семеновна
Романов Анатолий Иванович

ПРОМЫШЛЕННЫЕ ВЗРЫВЧАТЫЕ ВЕЩЕСТВА

Заведующий редакцией *Т. И. Королева*
Редактор издательства *Е. Н. Волков*
Переплет художника *И. А. Слюсарева*
Художественный редактор *О. Н. Зайцева*
Технический редактор *Н. В. Жидкова*
Корректоры *Е. В. Королева, Г. Л. Петушкова*
ИБ № 7340

Сдано в набор 17.03.88. Подписано в печать 22.07.88. Т-06131. Формат 60×90^{1/8}. Бумага книжно-журнальная. Гарнитура Литературная. Печать высокая. Усл.-печ. л. 22,05. Усл. кр.-отт. 22,30. Уч.-изд. л. 26,44. Тираж 16 000 экз. Заказ № 800/1411—9. Цена 1 р. 70 к.

Ордена «Знак Почета» издательство «Недра», 125047, Москва,
пл. Белорусского вокзала, 3

Ленинградская типография № 4 ордена Трудового Красного Знамени Ленинградского объединения «Техническая книга» им. Евгении Соколовой Союзполиграфпрома при Государственном комитете СССР по делам издательства, полиграфии и книжной торговли. 19126. Ленинград, Социалистическая ул., 14.

