



В.А. Белин
М.Г. Горбонос
Г.С. Нутфуллоев
Ш.Ш. Заиров
А.Б. Тухташев

БУРОВЗРЫВНЫЕ РАБОТЫ



**В.А. Белин, М.Г. Горбонос, Г.С. Нутфуллоев,
Ш.Ш. Заиров, А.Б. Тухташев**

БУРОВЗРЫВНЫЕ РАБОТЫ

Ответственный редактор:

доктор технических наук, профессор Ю.Д. Норов

Издательство «Бухоро» – 2017

Белин В.А., Горбонос М.Г., Нутфуллоев Г.С., Заиров Ш.Ш., Тухташев А.Б. Буровзрывные работы. Отв. ред.: Норов Ю.Д. – Бухоро, изд-во «Бухоро», 2017. – 136 с.

Учебное пособие предназначено для выполнения практических и самостоятельных работ бакалаврами направлений 5311600 – «Горное дело» и 5321100 – «Техника и технология добычи, переработки руд редких и радиоактивных металлов» и подготовлен на основании Государственного образовательного стандарта Республики Узбекистан к необходимому содержанию и уровню подготовленности бакалавров и типовой учебной программы дисциплины «Буровзрывные работы». Будет полезен инженерно-техническим работникам горнодобывающих предприятий, исследовательских и проектных институтов, а также преподавателям и студентам горных вузов и факультетов.

Учебное пособие обсуждено и одобрено на заседаниях кафедры «Горное дело», горного факультета и совета Навоийского государственного горного института.

О т в е т с т в е н н ы й р е д а к т о р:
доктор технических наук, профессор Норов Ю.Д.

Р е ц е н з е н т ы:

Заведующий кафедрой «Горное дело» Ташкентского государственного технического университета им. И.А.Каримова, доктор технических наук Насиров У.Ф.

Доцент кафедры «Горное дело» Навоийского государственного горного института, кандидат технических наук Назаров З.С.

© Издательство «Бухоро», 2017 г.

О Г Л А В Л Е Н И Е

Введение	7
1. Основы теории взрывчатых веществ	8
2. Кислородный баланс индивидуальных и смесевых (многокомпонентных) взрывчатых веществ	18
2.1. Общие сведения	18
2.2. Кислородный баланс ВВ	19
2.3. Классификация ВВ по величине кислородного баланса	25
3. Принципы составления реакций взрывчатого превращения взрывчатых веществ	27
3.1. Метод максимального энергосвечения (принцип Бертелло) для ВВ с нулевым или положительным кислородным балансом	27
3.2. Методы составления реакций взрывчатого превращения для ВВ с отрицательным кислородным балансом.....	28
3.2.1. Метод максимального газообразования (принцип Ле- Шателье-Малляра)	30
3.2.2. Методика расчета состава продуктов взрыва по Бринкли- Вильсону	31
4. Расчет термодинамических характеристик взрывчатых веществ...	35
4.1. Расчет теплового эффекта реакции взрывчатого превращения ВВ.....	35
4.1.1. Закон Гесса. Расчет теплоты взрыва ВВ.....	35
4.1.2. Закон Гесса. Расчет теплоты взрыва ВВ.....	37
4.1.3. Аддитивный метод оценки теплоты взрыва смесевых ВВ.	40
4.2. Расчет температуры газообразных продуктов взрыва	40

4.3. Определение объема газообразных продуктов взрыва	43
4.4. Расчет давления газообразных продуктов взрыва.....	44
4.5. Расчет идеальной работоспособности ВВ и полного термодинамического КПД взрыва.....	46
4.5.1. Расчет идеальной работоспособности ВВ.....	46
4.5.2. Расчет полного термодинамического КПД взрыва	48
4.5.3. Баланс энергии при взрыве ВВ.....	50
5. Расчет детонационных характеристик взрывчатых веществ	55
5.1. Общие сведения	55
5.2. Расчет скорости детонации ВВ.....	56
5.3. Расчет идеальной скорости детонации	58
5.4. Расчет детонационного давления (давление в точке Чепмена– Жуге).....	59
5.5. Расчет плотности продуктов взрыва в детонационной волне	61
5.6. Расчет скорости разлета ПВ.....	61
6. Расчет параметров сосредоточенных зарядов выброса	63
6.1. Общие положения	63
6.2. Расчет массы ВВ сосредоточенного заряда выброса	64
6.3. Расчет основных параметров воронки выброса.....	68
6.4. Расчет необходимого объема зарядной камеры для сосредоточенного заряда выброса.....	71
6.5. Самостоятельная работа	75
7. Расчет параметров буровзрывных работ при скважинной отбойке на карьерах	77
7.1. Общие сведения	77
7.2. Расчет параметров скважинных зарядов	80

8. Расчет безопасных расстояний при ведении взрывных работ на карьерах	105
8.1. Расчет безопасных расстояний по разлету отдельных кусков породы	105
8.2. Расчет безопасных расстояний по действию ударной воздушной волны	109
8.3. Расчет безопасных расстояний по сейсмическому действию	113
8.4. Расчет безопасных расстояний по действию ядовитых газов при взрыве зарядов на выброс.....	120
9. Расчет параметров накладных и шпуровых зарядов для дробления негабарита.....	122
9.1. Общие сведения	122
9.2. Дробление негабарита шпуровыми зарядами	122
9.3. Дробление негабарита накладными и кумулятивными зарядами	124
9.4. Самостоятельная работа	127
Список использованной литературы	129
Приложения.....	131

ВВЕДЕНИЕ

Поиск эффективных путей снижения энергоемкости разрушения горных пород является одним из основных направлений современных научных исследований в горной науке. Ведущую роль в общем технологическом комплексе процессов горного производства занимает процесс рыхления горных пород буровзрывным способом.

При руководстве взрывными работами горный инженер контролирует правильность составления проектов массовых взрывов, расчеты зарядов ВВ и определение размеров охраняемых опасных зон безопасности при производстве взрывных работ. Кроме того, он осуществляет: инженерное руководство техникой и технологией заряжения, контроль монтажа взрывной сети, ее исправность и контроль производства взрыва.

Опыт, полученный при чтении курса «Буровзрывные работы», свидетельствует о целесообразности ведения такой системы занятий для всех горных специальностей, изучение данного курса позволяет после прохождения специальных курсов и стажировки на производстве сдать экзамены на получение «Единой книжки взрывника».

Следует подчеркнуть, что на лабораторные и практические работы затрачиваются существенно больше времени, чем запланировано на изучение курса. Поэтому преподаватели ВУЗов имеют возможность выбрать темы, с учетом специфики лабораторной базы института и возможностей производственных практик.

1. ОСНОВЫ ТЕОРИИ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ

Взрывчатые вещества (ВВ), являясь единственным высококонцентрированным источником энергии, широко применяются в различных областях деятельности человека.

История развития взрывчатых веществ начиналась с использования селитр содержащих смесей в качестве зажигательных составов и фейерверков и позднее открытого китайцами дымного (черного) пороха. В настоящее время разработаны и широко применяются в промышленности десятки типов ВВ, представляющих собой многокомпонентные смеси, отличающиеся как по химическому составу компонент, так и по своим физическим и взрывчатым свойствам.

Широкий ассортимент типов ВВ, применяемых в промышленности, обусловлен многообразием задач и условий применения энергии взрыва: дробление горных пород на карьерах и при подземной разработке месторождений, взрывы на выброс и сброс, борьба с лесными пожарами, взрывные работы в нефтяных и газовых скважинах, резка и обработка металлов, синтез новых материалов и многое другое.

Взрыв представляет собой процесс весьма быстрого физического или химического превращения системы, сопровождающийся переходом ее потенциальной энергии в механическую работу.

Наиболее существенным признаком взрыва является резкий скачек давления в среде, окружающей место взрыва, который и является непосредственной причиной разрушающего действия.

По своей природе существуют следующие виды взрывов.

Физические взрывы, при которых не происходят изменения химического состава вещества, а лишь изменение их физического состояния.

Примерами физических взрывов могут быть: взрыв парового котла при преодолении сопротивления стенок котла вследствие быстрого

перехода перегретой воды в парообразное состояние; взрыв нагретого баллона с сжиженным газом; взрывы металлических проводников (проволочек) под действием электрического тока высокого напряжения обусловлены быстрым переходом металла в парообразное состояние.

В последнем случае мгновенный нагрев ($10^{-6} \div 10^{-7}$ с) до высоких температур (десятки тысяч градусов) приводит к возрастанию давления воздуха в месте разряда и распространению интенсивного возмущения в окружающей среде.

Взрывы, основанные на подобных физических явлениях, находят ограниченное применение, например, для моделирования действия химических взрывов в среде.

Ядерные взрывы, при которых происходят цепные реакции деления ядер с образованием новых элементов. Существуют два способа выделения атомной энергии при взрыве: деление тяжелых атомных ядер урана и плутония (радиоактивный распад) и образование из легких ядер тяжелого водорода более тяжелых элементов (синтез атомных ядер, например, гелия). Эти взрывы являются наиболее мощными из применяемых и известных человечеству. В настоящее время в связи с запретом испытаний ядерного оружия этот вид взрывов практического применения не имеет.

Химические взрывы, при которых происходят чрезвычайно быстрые окислительные химические реакции с образованием новых соединений, выделением значительного количества тепла и газообразных продуктов детонации (взрыва).

В промышленности для разрушения горных пород применяются взрывы, связанные с химическим превращением взрывчатых веществ.

Взрывчатыми веществами называются химические соединения или их смеси (сплавы), способные под действием внешнего импульса (механический удар, нагрев, инициирующий импульс и др.) взрываться (детонировать) с выделением со сверхзвуковой скоростью значительного количества тепловой энергии, образованием большого количества

газообразных ПВ, находящихся при высоком начальном давлении в объеме заряда ВВ.

В термодинамическом смысле взрывчатые вещества представляют собой относительно неустойчивые химические системы, которые способны под влиянием внешних воздействий (удар, трение, нагрев, импульс инициирования и т.п.) к весьма быстрым химическим превращениям с выделением тепловой энергии и образованием нагретых до высоких температур газообразных продуктов взрыва.

Известно большое число химических соединений и смесей, которые способны под воздействием внешнего импульса взрываться, но к промышленным ВВ (допущенным Госгортехнадзором РФ для применения в промышленности) относятся соединения и смеси, достаточно безопасные в изготовлении и обращении, эффективные в применении, технически и экономически доступные в изготовлении, не меняющие своих свойств при длительном хранении и применении.

В соответствии с **основными областями применения** принято различать четыре группы ВВ:

- *инициирующие ВВ;*
- *бризантные ВВ;*
- *метательные ВВ;*
- *пиротехнические составы.*

Иницирующие ВВ применяются для возбуждения детонационных процессов в промышленных ВВ. По чувствительности (восприимчивости) к внешним воздействиям иницирующие ВВ подразделяются:

- *первичные иницирующие ВВ*, отличающиеся высокой чувствительностью, но небольшой мощностью: гремучая ртуть, ТНРС (тринитрорезорцинат свинца), азид свинца и др., применяемые в средствах взрывания – капсуль-детонаторах (КД), электродетонаторах (ЭД). Эти ВВ при поджигании небольших масс (доли грамма) детонируют, точнее – возникающее горение быстро переходит в детонацию. Детонация в них

возбуждается и при механическом воздействии (ударе, трении), что используется в капсюлях-воспламенителях (КВ);

- *вторичные инициирующие ВВ* – менее чувствительные, но более мощные ВВ: тетрил, ТЭН. Детонация в них возбуждается при контактном взрыве некоторой массы первичного инициирующего ВВ ($\approx 0,5$ г), помещенного в КД или ЭД.

К бризантным относятся ВВ, способные к устойчивой детонации в шпуровых, скважинных или котловых (камерных) зарядах и используемые в промышленности для дробления (разрушения) горных пород, сооружений, конструкций и др. Для возбуждения детонации в этих ВВ необходимо применение средств взрывания – КД (ЭД) или детонирующих шнуров (ДШ), в состав которых входят инициирующие ВВ (ТЭН, гексоген).

По характеру воздействия на окружающую среду бризантные ВВ делятся на:

- *высокобризантные*, имеющие скорость детонации $D > 4,5$ км/с;
- *бризантные* – $3,5 < D < 4,5$ км/с;
- *низкобризантные* – $2 < D < 3,5$ км/с.

К метательным относятся пороха и ракетные топлива (скорость взрывного горения $D < 2$ км/с) способные к нормальному горению и применяемые в огнестрельном оружии, при добыче штучного камня, в огнепроводных шнурах, замедлителях и т.п.

В отдельную группу выделяют **пиротехнические составы**, представляющие собой механические смеси химических соединений, имеющих признаки взрывчатости и способных к взрывчатому горению (фотосмеси, осветительные и шумовые составы, фейерверки). Во взрывном деле пиротехнические составы применяются для замедляющих элементов в ЭД короткозамедленного и замедленного действия (ЭДКЗ, ЭДЗД) и пиротехнических замедлителях для ДШ. Основным видом взрывчатого превращения этих составов является высокоскоростное горение.

По числу компонентов взрывчатые вещества подразделяются на:

– **индивидуальные химические соединения** (тротил, гексоген, нитроэфиры: нитроглицерин и нитроглицоль, перхлораты и хлораты аммония, щелочных металлов и др.), которые применяются самостоятельно (например, гранулотол) или в качестве компонент смесевых ВВ (тротил, гексоген). В индивидуальных ВВ процесс взрывчатого превращения протекает одностадийно;

– **смесевые многокомпонентные ВВ**, состоящие из окислителя, горючего, сенсibilизаторов, в т.ч. индивидуальных ВВ и различного рода добавок, обеспечивающих заданные технологические и эксплуатационные свойства. В отличие от индивидуальных ВВ взрывчатое превращение многокомпонентных ВВ происходит в две стадии. В первой стадии происходит взрывчатое разложение или газификация одного или нескольких компонентов, во второй – взаимодействие продуктов разложения (газификации) между собой и с другими частицами не разлагающихся компонент, например, металлов. При этом компоненты смеси могут быть как взрывчатыми, так и невзрывчатыми. Основная часть тепловой энергии при взрыве таких ВВ выделяется на второй стадии в результате вторичных реакций взаимодействия в газовой фазе или взвеси;

– **смесевые ВВ, представляющие собой одно или несколько индивидуальных ВВ с добавлением различного рода добавок**. ВВ этого типа komponуются для получения каких-либо специальных свойств ВВ. Например, гексоген, октоген плавятся при высокой температуре – выше 200°C с разложением. В смеси с тротилом (температура плавления которого около 80°C) получают литьевой состав и делают отливки нужной формы – промежуточные шашки-детонаторы (например, ТГ-500). При добавлении в мощные индивидуальные ВВ 4-8% низкоплавких углеводородов (парафины, воски и др.), называемых флегматизаторами, снижается их чувствительность к механическим воздействиям (например,

флегматизированный гексоген в ДШ).

Необходимо отметить, что во многих случаях взрывчатые смеси имеют признаки обоих типов, т.е. их можно отнести к смешанному типу. Примером таких ВВ могут быть современные нитроглицериновые ВВ, представляющие собой смеси жидкого или желатинизированного нитроглицерина с окислителем (аммиачной селитрой или другими нитратами) и горючих добавок (древесная мука и др.). В таких ВВ нитроглицерин выполняет несколько функций: мощный взрывчатый компонент, пластификатор, сенсibilизатор. К такому же смешанному типу можно отнести предохранительные аммониты, взрывчатой основой которых является смесь АС с тротилом, а третьим компонентом является пламегаситель, обеспечивающий необходимые предохранительные свойства ВВ.

Смесевые ВВ, состоящие из окислителя, горючих и другие специальные добавок, имеют ряд преимуществ перед индивидуальными ВВ. Они, как правило, более экономичны (дешевле) и безопаснее в применении. Использование различных соотношений компонентов ВВ позволяет регулировать термодинамические характеристики (тепловые, детонационные и др.), состав продуктов взрыва.

К общим недостаткам смесевых многокомпонентных ВВ можно отнести пониженную детонационную способность (для инициирования необходим мощный промежуточный детонатор) и меньшую физическую стабильность в сравнении с индивидуальными ВВ типа химических соединений.

Классификация ВВ по химическому составу основных компонент приведена в табл. 1.1.

Таблица 1.1

Тип ВВ по химическому составу	Основная компонента	Типы ВВ
Аммиачно-селитренные ВВ	Аммиачная селитра (нитрат аммония) NH_4NO_3	Аммиачная селитра является наиболее распространенной компонентой промышленных ВВ, входит в состав аммонитов и аммоналов, граммонитов, гранулитов, карботолов, водосодержащих и эмульсионных ВВ.
ВВ на основе жидких нитроэфиров. Содержат нитратную группу $-\text{ONO}_2$	Нитроглицерин (глицеринтринитрат) $\text{C}_3\text{H}_5(\text{ONO}_2)_3$ Нитроглицоль (этиленгликольдинитрат) $\text{C}_2\text{H}_4(\text{ONO}_2)_2$ ТЭН (пентаэритриттетранитрат) $\text{C}_5\text{H}_8(\text{ONO}_2)_4$	Динамиты, детониты, некоторые типы предохранительных ВВ. В составах ВВ обычно применяется смесь нитроглицерина и нитроглицоля. ТЭН применяется для изготовления ДШ, промежуточных детонаторов в сплаве с тротилом (пентолит).
ВВ на основе нитросоединений: - содержащие нитрогруппу $-\text{NO}_2$	Тротил (тринитротолуол) $\text{C}_6\text{H}_2(\text{NO}_2)_3\text{CH}_3$ Динитронафталин $\text{C}_{10}\text{H}_6(\text{NO}_2)_2$ Пикриновая кислота (тринитрофенол) $\text{C}_6\text{H}_2(\text{NO}_2)_3\text{OH}$ Нитрометан CH_3NO_2	Гранулотол, алюмотол (гранулированный сплав ТНТ и порошка алюминия). Тротил является компонентой аммиачно-селитренных тротилсодержащих ВВ: аммонитов и аммоналов, граммонитов, водосодержащих ВВ типа акватолов и др. Изделия, содержащие прессованный, литой тротил и его сплавы с гексогеном, ТЭНом, порошками алюминия и др. Динитронафталин входил в состав ВВ – динафталит.
- содержащие нитраминную группу $-\text{N}-\text{NO}_2$	Гексоген (триметилентринитрамин) $\text{C}_4\text{H}_8\text{N}_8\text{O}_6$ Октоген (циклотетраметилентетранитрамин) $\text{C}_4\text{H}_8\text{N}_8\text{O}_8$	Гексоген является компонентой мощных аммиачно-селитренных ВВ: скальных аммонитов и аммоналов. Флегматизированный гексоген применяется для изготовления детонирующих шнуров, в сплаве с тротилом, алюминием – для изготовления промежуточных шашек-детонаторов и др.
- содержащие как нитрогруппу $-\text{NO}_2$, так и нитраминную группу $-\text{N}-\text{NO}_2$	Тетрил (тринитрофенилметилнитрамин) $\text{C}_6\text{H}_2(\text{NO}_2)_4\text{NCH}_3$	Тетрил применяется в качестве вторичного ВВ при изготовлении капсюль-детонаторов (КД и ЭД), тетриловых шашек.
Хлоратные и перхлоратные ВВ, содержат соли хлорноватой (HClO_3) и хлорной (HClO_4) кислот	Хлораты: Калия KClO_3 Натрия NaClO_3 Перхлораты: Калия KClO_4 Аммония NH_4ClO_4	В 20-30 гг. прошлого столетия выпускались промышленные ВВ: хлоратиты и перхлоратиты. Хлораты и перхлораты применяются как компоненты смесевых твердых ракетных топлив (СТРТ), составные части пиротехнических составов и т.п.

Тип ВВ по химическому составу	Основная компонента	Типы ВВ
		В настоящее время в Японии выпускаются хлоратные ВВ «Карлиты». В России ведутся разработки газогенерирующих составов на основе хлората натрия для добычи штучного камня.

Для изготовления средств инициирования – капсюль-детонаторов и электродетонаторов применяются инициирующие ВВ:

- соли тяжелых металлов гремучей кислоты – гремучая ртуть - $\text{Hg}(\text{ONC})_2$;
- соли азотистоводородной кислоты (азиды) – азид свинца - PbN_6 ;
- соли стифниновой кислоты – стифнат или тринитрорезорцинат свинца (ТНРС) $\text{C}_6\text{H}(\text{NO}_2)_3\text{O}_2\text{Pb}\cdot\text{H}_2\text{O}$ и др.

К вышеперечисленному можно добавить деление ВВ на взрывчатые вещества *заводского изготовления*, получаемые горными предприятиями в готовом к употреблению виде, и ВВ, *изготавливаемые на местах ведения взрывных работ* на стационарных пунктах изготовления (СПИ) гранулированных и водосодержащих ВВ, в т.ч. эмульсионных (промежуточных смесей) или в специальных смесительно-зарядных машинах (СЗМ).

Ко второй группе относятся ВВ, представляющие смеси холодного смешения гранулированной АС с жидкими и твердыми нефтяными, порошкообразными или другого происхождения невзрывчатыми горючими веществами, а также водосодержащие смеси-сuspензии или эмульсии на основе раствора аммиачной селитры или раствора ее с добавлением кальциевой, натриевой селитры или карбамида с порошкообразными и жидкими невзрывчатыми горючими компонентами.

По агрегатному состоянию компонентов возможны следующие виды ВВ:

– *твердые соединения и их смеси (основная группа промышленных ВВ);*

– *смеси твердых и жидких компонент;*

– *жидкие компоненты и их смеси;*

– *газовые смеси;*

– *смеси твердых, жидких и газообразных компонент;*

– *смеси твердых и газообразных компонент.*

Практическое применение в качестве промышленных ВВ имеют первые две группы, относящиеся к т.н. конденсированным ВВ.

По физическому состоянию различают следующие разновидности промышленных ВВ: порошкообразные, гранулированные, чешуйчатые, прессованные, литые, льющиеся (текучие), горячельющиеся, пластичные. Компоненты гранулированных ВВ имеют размер гранул 1-3 мм; водосодержащие ВВ имеют слаботекущую медообразную консистенцию за счет добавления в раствор аммиачной селитры загустителей и структурирующих агентов; льющиеся ВВ имеют легкоподвижную консистенцию, что позволяет транспортировать их по шлангам.

Основные виды химического превращения ВВ. В зависимости от условий возбуждения химической реакции, характера (типа) ВВ и других факторов процессы взрывчатого превращения в массе ВВ могут распространяться с различными скоростями. В табл. 1.2 приведены формы химического превращения ВВ, отличающиеся характером и скоростью протекания процесса.

Переходные взрывные процессы могут возникать, в отличие от детонационных, в зарядах меньших размеров и при меньшем уровне внешнего воздействия. Типичным примером является низкоскоростной режим взрывчатого превращения, опасный сам по себе и ввиду способности перехода в режим нормальной детонации.

Все процессы, сопровождающиеся образованием в окружающей среде скачка давления (ударной волны), обобщенно называют взрывом. К

этому типу химического превращения относятся детонация ВВ, скорость распространения которой сверхзвуковая, и взрывное горение, распространяющееся с дозвуковой скоростью. При взрывном горении энергия переносится продуктами реакции взрывчатого превращения, а при детонации – ударной волной, к которой примыкает зона химической реакции. В настоящее время в большинстве видов взрывных работ используются ВВ в режиме детонации.

Таблица 1.2

Медленное химическое превращение ВВ	Процесс термического разложения (распада), протекающий по всему объему ВВ при относительно низких температурах. Медленно протекающий процесс (месяцы, годы), связанный с физической и химической стойкостью ВВ. При достижении некоторых критических условий нагрева процесс термического разложения самоускоряется и переходит во взрыв (тепловой).
Горение ВВ <i>Стационарное или нормальное горение</i>	Возникает при поджигании ВВ. Горение - самораспространяющийся сравнительно медленно протекающий процесс с переменной скоростью от 10^{-1} до 10^3 см/с. Тепло передается путем теплопередачи в достаточно узкой зоне вещества (послойно в результате прогрева последующих слоев). Способность к послойному горению зависит от структуры ВВ и характерно для малопористых или сильно уплотненных ВВ. Скорость процесса зависит от внешнего давления (p): $u = A + Bp^v$. Здесь: A, B – постоянные для данного ВВ величины, $v \leq 1$. На открытом воздухе этот процесс протекает сравнительно вяло и не сопровождается сколько-нибудь значительным звуковым эффектом. В ограниченном объеме процесс горения сопровождается возрастанием давления и способностью газообразных продуктов горения производить работу метания, как при выстреле. Так называемое диффузионное горение, протекающее со скоростями 100 и более м/с, характерно для высокопористых ВВ, например, порохов. 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, интенсивность которой меньше, чем при детонации. По этой причине этот процесс называют взрывным горением.
Взрыв, низкоскоростной нестационарный режим протекания детонации	Особенностью этого процесса является переменная нестационарная сверхзвуковая скорость распространения процесса. Скорость процесса измеряется тысячами метров в секунду и сравнительно мало зависит от внешних условий. Характер воздействия взрыва – резкий удар ПВ по окружающей среде, вызывающий деформацию и разрушение объекта на небольших расстояниях.
Нормальная детонация	Распространение взрыва по заряду ВВ с постоянной и максимальной для данного ВВ и данных условий взрывания скоростью, превышающей скорость звука в данном веществе. Детонация есть стационарная форма взрыва. В условиях детонации достигается максимальное разрушительное действие взрыва.

2. КИСЛОРОДНЫЙ БАЛАНС ИНДИВИДУАЛЬНЫХ И СМЕСЕВЫХ (МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ) ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ

2.1. Общие сведения

Различают индивидуальные ВВ, типа химических соединений и смесевые многокомпонентные ВВ, состоящие, по крайней мере, из двух, химически не связанных друг с другом, компонентов.

Взрывчатые вещества типа химических соединений представляют собой неустойчивые термодинамические системы, при детонации которых происходит полный разрыв внутримолекулярных связей и последующая рекомбинация свободных атомов (или ионов) в конечные ПВ, представляющие собой устойчивые термодинамические соединения.

Индивидуальные ВВ, в большинстве своем, представляют собой кислородосодержащие органические соединения. Кислород, являющийся составной частью химического соединения, обеспечивает полное или частичное внутримолекулярное горение (окисление) горючих элементов.¹

Смесевые многокомпонентные ВВ состоят, как правило, из веществ, богатых кислородом – окислителей, горючих компонент, сенситизаторов и различного рода добавок, не содержащих в своем составе кислорода или его содержащих, но в недостаточном количестве для полного окисления горючих элементов, однако необходимых для обеспечения заданных технологических и эксплуатационных свойств смесевых ВВ.

Обеспеченность состава ВВ кислородом характеризуют кислородным балансом ВВ (K_0) или кислородным коэффициентом (α_k),

¹ Имеется достаточное количество взрывчатых соединений, не содержащих кислорода и разлагающихся при взрыве на свои составные элементы. Примером такого соединения может быть азид свинца, разлагающийся при взрыве на свинец и азот, с выделением энергии, равной энергии образования данного соединения $Pb(N_3)_2 \rightarrow Pb + 3N_2$. Подобные соединения обладают недостаточно прочной молекулярной структурой и повышенной чувствительностью к внешним воздействиям. Примером таких соединений могут служить галоидные и сернистые соединения азота (NCl_3 , NHJ_2 , N_4S_4), которые легко взрываются от ничтожных механических воздействий. Особенностью таких соединений, согласно Вант-Гоффу, является присутствие в их молекулах особых, т.н. эксплозифорных, соединений [1].

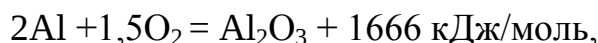
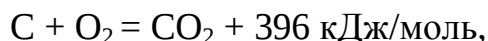
которые в относительных единицах выражают избыток или недостаток кислорода, необходимого для полного окисления горючих элементов ВВ (углерода, водорода, металлов) до их высших окислов.

2.2. Кислородный баланс ВВ

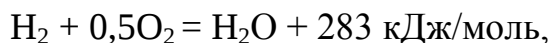
По определению, кислородным балансом называется отношение избытка или недостатка кислорода во взрывчатом веществе, необходимого для полного окисления горючих элементов до их высших окислов, выраженного в грамм-атомах, к грамм-молекулярной массе ВВ. Обычно величина кислородного баланса выражается в процентах.

Под полным окислением горючих элементов понимается окисление водорода в воду, углерода в двуокись углерода (углекислый газ), а металла (алюминия) в его высший окисел.

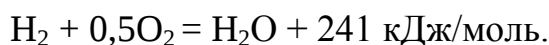
Реакции полного окисления основных горючих элементов ВВ выглядят следующим образом:



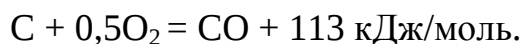
для жидкого агрегатного состояния воды



или для парообразного состояния воды



При окислении углерода при недостатке кислорода в составе ВВ до окиси углерода (угарный газ) выделяется меньшее количество тепла



Взрывчатые вещества, состоящие из углерода, водорода, азота и кислорода (большинство индивидуальных ВВ), можно представить в виде так называемой условной (брутто) формулы $\text{C}_a\text{H}_b\text{N}_c\text{O}_d$, тогда кислородный баланс можно определить по формуле

$$K_{\sigma} = \frac{[d - (2a + b/2)] \cdot 16}{M_{\text{ВВ}}} \cdot 100\%, \quad (2.1)$$

где a, b, c, d - количество атомов углерода, водорода, азота и кислорода в составе ВВ соответственно.

Молекулярная масса ВВ определяется как сумма

$$M_{\text{ВВ}} = 12a + b + 14c + 16d.$$

Здесь 12, 1, 14 и 16 – атомные массы углерода, водорода, азота и кислорода в составе ВВ.

Кислородный коэффициент определяется по формуле

$$\alpha_{\kappa} = \frac{d}{2a + b/2}. \quad (2.2)$$

Сбалансированность химического состава ВВ по кислороду отвечает значениям $K_{\sigma} = 0\%$ и $\alpha_{\kappa} = 1$.

Пример 2.1. Определить K_{σ} и α_{κ} для тринитротолуола (тротила) $\text{C}_7\text{H}_5(\text{NO}_2)_3$, молекулярная масса которого $M_{\text{ВВ}} = 227$ г-моль.

Приводя химическую формулу к виду условной (брутто-формуле) - $\text{C}_7\text{H}_5\text{N}_3\text{O}_6$, определяем кислородный баланс и кислородный коэффициент ВВ

$$K_{\sigma} = \frac{[6 - (2 \cdot 7 + 5/2)] \cdot 16}{227} \cdot 100\% = -74\%,$$

$$\alpha_{\kappa} = \frac{6}{2 \cdot 7 + 5/2} = 0,364.$$

Пример 2.2. Рассчитать кислородный баланс наиболее распространенной компоненты промышленных ВВ - аммиачной селитры NH_4NO_3 , молекулярная масса которой $M_{\text{АС}} = 80$ г-моль.

$$K_{\sigma} = \frac{[3 - (2 \cdot 0 + 4/2)] \cdot 16}{80} \cdot 100\% = +20\%.$$

Как видно из расчета, аммиачная селитра содержит избыток кислорода $K_{\bar{o}} > 0$, вследствие чего она используется в большинстве промышленных смесевых ВВ как окислитель.

Для смесевых многокомпонентных ВВ, содержащих также алюминиевую пудру, обычно используется такая последовательность расчета:²

- вычисляется количество каждого из элементов, содержащихся в 1 кг смеси (в грамм-атомах);

- составляется условная (брутто) формула вида



- рассчитываются $K_{\bar{o}}$ и α_k :

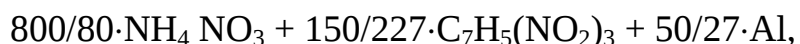
$$K_{\bar{o}} = \frac{[d - (2a + 0,5b + 1,5e)] \cdot 16}{1000} \cdot 100\%, \quad (2.3)$$

$$\alpha_k = \frac{d}{2a + 0,5b + 1,5e}. \quad (2.4)$$

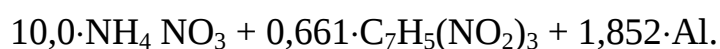
Пример 2.3. Составить условную (брутто) формулу, определить $K_{\bar{o}}$ и α_k для смесового трехкомпонентного ВВ, состоящего из 80% аммиачной селитры ($M=80$ г-моль), 15% тротила ($M=227$ г-моль) и 5% алюминия ($M=27$ г-моль).

Рассчитаем элементарный состав (брутто-формулу) 1 кг такого ВВ.

В 1 кг ВВ, согласно процентному содержанию, содержится 800 г аммиачной селитры, 150 г тротила, 50 г алюминия. Откуда получаем грамм-молекулярный состав ВВ (левая часть реакции взрывчатого превращения ВВ):



или



² Для смесевых многокомпонентных ВВ реакции взрывчатого превращения, необходимые для расчета термодинамических характеристик (теплоты взрыва, давления и объема газообразных продуктов взрыва и др.), составляются для 1 кг ВВ.

Откуда суммарное количество грамм-атомов элементов в условной (брутто) формуле:

$$\Sigma N = 10 \cdot 2 + 0,661 \cdot 3 = 21,98;$$

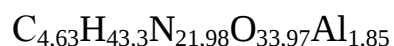
$$\Sigma C = 0,661 \cdot 7 = 4,634$$

$$\Sigma H = 10 \cdot 4 + 0,661 \cdot 5 = 43,3;$$

$$\Sigma O = 10 \cdot 3 + 0,661 \cdot 6 = 33,966;$$

$$\Sigma Al = 1,852.$$

Условная (брутто) формула для ВВ имеет вид



Проверяется суммарная масса условной (брутто) формулы, которая должна быть равна ≈ 1 кг (≈ 1000 г)

$$M_{ВВ} = 4,63 \cdot 12 + 43,3 \cdot 1 + 21,98 \cdot 14 + 33,97 \cdot 16 + 1,85 \cdot 27 = 1000,05 \text{ г.}$$

Кислородный баланс ВВ равен

$$K_o = \frac{[33,96 - (2 \cdot 4,63 + 0,5 \cdot 43,3 + 1,5 \cdot 1,85)] \cdot 16}{1000} \cdot 100\% = +0,6\%.$$

Кислородный коэффициент ВВ

$$\alpha_k = \frac{33,96}{2 \cdot 4,62 + 0,5 \cdot 43,3 + 1,5 \cdot 1,85} = 1,009.$$

Для удобства составления условной (брутто) формулы можно воспользоваться табличной формой записи (табл. 2.1)

Таблица 2.1

Компоненты ВВ	К-во г-молей в 1 кг ВВ	C_a^{12}	H_b^1	O_c^{16}	N_d^{14}	Al_e^{27}
Аммиачная селитра NH_4NO_3	10,0	-	40,0	30,0	20,0	-
Тротил (ТНТ) $C_7H_5N_3O_6$	0,661	4,627	3,3	3,97	1,983	-
Алюминий Al	1,852	-	-	-	-	1,852
Итого в 1 кг ВВ		4,63	43,3	33,97	21,98	1,85

Количество молей компоненты в составе 1 кг ВВ определяется по ее процентному содержанию (доле) в ВВ. Количество грамм-молей компоненты равно

$$m_i = \frac{10 \cdot \chi_i}{M_i}, \quad (2.5)$$

где M_i – молекулярная масса i -й компоненты ВВ, г-моль;

χ_i – процентное содержание i -й компоненты ВВ.

При известных значениях K_{δ} компонентов ВВ кислородный баланс смесового (многокомпонентного) ВВ может быть определен по их процентному содержанию.

Пример 2.4. Определить K_{δ} для двухкомпонентного ВВ граммонита 30/70, состоящего из 30% аммиачной селитры $K_{\delta} = +20\%$ и 70% тротила $K_{\delta} = -74\%$:

$$K_{\delta} = \frac{30 \cdot (+20) + 70 \cdot (-74)}{100} = -45,8\%,$$

или, выражая содержание компонентов в долях, получаем

$$K_{\delta} = 0,3 \cdot (+20) + 0,7 \cdot (-74) = -45,8\%.$$

Пример 2.5. Определить K_{δ} для трехкомпонентного ВВ гранулита АС-8, состоящего из 90% аммиачной селитры, 2% индустриального масла, 8% алюминия.

Определим K_{δ} для алюминия, высшим окислом которого является Al_2O_3 :

$$K_{\delta} = \frac{[0 - (2 \cdot 0 + 0,5 \cdot 0 + 1,5 \cdot 1,0)] \cdot 16}{27} \cdot 100\% = -88,89\%.$$

Рассчитаем кислородный баланс индустриального масла, имеющего формулу $C_{12}H_{26}$ и молекулярную массу $M_{ВВ} = 170$ г-моль:

$$K_{\delta} = \frac{[0 - (2 \cdot 12 + 0,5 \cdot 26)] \cdot 16}{170} \cdot 100\% = -348,2\%,$$

откуда кислородный баланс АС- 8 равен

$$K_{\delta} = 0,9 \cdot (+20) + 0,02 \cdot (-348,2) + 0,08 \cdot (-88,89) = +3,92\%.$$

Можно решать обратную задачу, т.е., задаваясь нужным кислородным балансом для смесового ВВ, по известным значениям K_{δ} для компонент ВВ определяется их процентное содержание.

Пример 2.6. Определить процентное соотношение компонент ВВ с нулевым кислородным балансом ($K_{\delta} = 0$), состоящего из аммиачной селитры ($K_{\delta} = +20\%$) и тротила ($K_{\delta} = -74\%$).

Примем за x процентное содержание тротила в ВВ, тогда аммиачной селитры в составе ВВ будет $(100-x)\%$, откуда записывается следующее уравнение:

$$K_{\delta} = \frac{(100-x) \cdot (+20) + x \cdot (-74)}{100} = 0\%.$$

Решая данное уравнение, находим состав ВВ:

$x \approx 21\%$ - содержание тротила в составе ВВ;

$100-x \approx 79\%$ - содержание аммиачной селитры.

Такому составу соответствуют два типа промышленных ВВ: порошкообразный аммонит 6ЖВ и гранулированный граммонит 79/21. Здесь в числителе - содержание гранулированной аммиачной селитры в составе граммонита, а в знаменателе – содержание гранулированного тротила.

Соотношение компонентов в ВВ, отвечающих нулевому кислородному балансу смеси, называют **стехиометрическим**.

При составлении рецептуры промышленных ВВ обычно состав подбирается таким образом, чтобы ВВ имело нулевой или близкий к нулю кислородный баланс. Для патронированных ВВ, и в первую очередь - применяемых на подземных горных работах при добыче полезных ископаемых и проходке выработок различного назначения, кислородный баланс должен быть несколько больше нуля ($K_{\delta} \approx 1 \div 2\%$), что необходимо для окисления бумажной оболочки патронов и гидроизолирующих покрытий (воска, парафина и т.п.). Для подземных горных работ

допускается при взрыве 1 кг ВВ образование ядовитых окислов в пересчете на условную окись углерода не более 40 литров.

Количество кислорода в составе ВВ в значительной степени определяет характер реакции взрывчатого превращения ВВ, т.е. состав продуктов взрыва (ПВ) и, следовательно, значение термодинамических характеристик, таких, как теплота, температура, объем и давление газообразных продуктов взрыва и др.

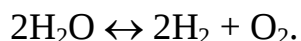
2.3. Классификация ВВ по величине кислородного баланса

По величине кислородного баланса, в зависимости от соотношения между a , b и d , все промышленные ВВ принято подразделять на три группы.

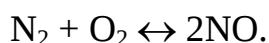
1. *Первая группа* - ВВ с положительным или нулевым K_o , т.е. с количеством кислорода в составе ВВ, достаточным для полного окисления горючих элементов:

$$d \geq 2a + b/2, \text{ откуда } K_o \geq 0, \alpha_k \geq 1. \quad (2.6)$$

В этом случае в составе ПВ в основном содержатся газообразные CO_2 , H_2O , N_2 и частично продукты диссоциации углекислого газа и воды (водяных паров):



При значительном избытке кислорода возможно образование окислов азота NO , NO_2 и др., имеющих характерный желто-бурый цвет (NO_2):



Типичным представителем ВВ данной группы является нитроглицерин (глицеринтринитрат) – $\text{C}_3\text{H}_5(\text{ONO}_2)_2$ $K_o = + 3,5\%$.

2. **ВВ с отрицательным K_o** , т.е. с количеством кислорода, недостаточным для полного окисления горючих элементов, $K_o < 0$, $\alpha_k < 1$.

При этом принято различать:

2.1. **Вторая группа** - ВВ с отрицательным K_6 , но с количеством кислорода, достаточным для полного газообразования:

$$a + b/2 \leq d < 2a + b/2. \quad (2.7)$$

Как правило, в этом случае образуются следующие ПВ: CO_2 , CO , H_2O , H_2 , N_2 .

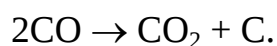
2.2. **Третья группа** - ВВ с существенно отрицательным K_6 , при котором в составе ПВ может присутствовать чистый углерод (C) в виде сажи (исследования показывают, что в составе ПВ может содержаться некоторое количество H_2 и CO_2):

$$d < a + b/2. \quad (2.8)$$

При $d < a$ образование свободного углерода неизбежно и ПВ состоят, в основном, из CO , C, H_2O , H_2 , N_2 .

Известно, что невозможно установить точную границу между ВВ первой, второй и третьей группы [1, 2]. Одно и то же ВВ в зависимости от условий взрывания может детонировать либо с образованием газообразных ПВ или с частичным выделением свободного углерода. При прочих равных условиях с увеличением плотности заряда ВВ вероятность образования свободного углерода возрастает.

По мере уменьшения кислорода в составе ВВ реакция генераторного газа сдвигается вправо, т.е. взрывчатое превращение происходит с выделением чистого углерода (C):



Существует ряд ВВ с таким соотношением горючих элементов и кислорода, которое позволяет отнести их ко второй группе при любых обстоятельствах: ТЭН, гексоген, при взрывании которых всегда образуются одни газообразные продукты. Типичным ВВ третьей группы является тротил ($K_6 = -74\%$).

3. ПРИНЦИПЫ СОСТАВЛЕНИЯ РЕАКЦИЙ ВЗРЫВЧАТОГО ПРЕВРАЩЕНИЯ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ

3.1. Метод максимального энергосодержания (принцип Бертелло) для ВВ с нулевым или положительным кислородным балансом

Для ВВ первой группы с $K_6 \geq 0$ ($d \geq 2a + b/2$) реакции взрывчатого превращения составляются исходя из образования высших окислов всех горючих элементов, содержащихся в ВВ, а именно CO_2 , H_2O , Al_2O_3 (принцип Бертелло – максимального энергосодержания). Избыток кислорода выделяется в виде собственно O_2 или расходуется на образование окислов азота: NO , NO_2 , N_2O_5 и др.

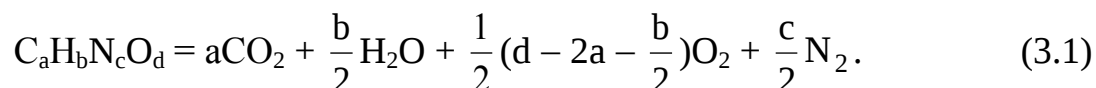
При высоких начальных температуре и давлении в начальный момент взрыва возможна частичная диссоциация CO_2 и H_2O , а также образование эндотермических соединений NO и C_2N_2 и др.:



При практических расчетах для ВВ с $K_6 \geq 0$ в процессе взрывчатого превращения рассматриваются реакции с наибольшим выделением тепла, при этом не учитывается частичная диссоциация продуктов полного окисления, а возможностью образования NO пренебрегают.

Типичными представителями таких ВВ являются нитроглицерин $\text{C}_3\text{H}_5(\text{ONO}_2)_3$ - $K_6 = +3,5\%$, нитроглицерин $\text{C}_3\text{H}_5(\text{ONO}_2)_2$ - $K_6 = 0$.

Составление реакции взрывчатого превращения (правой части реакции) для таких ВВ не представляет сложности и схема имеет следующий вид:

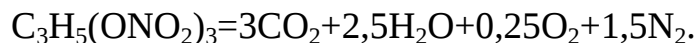


Пример 3.1. Рассмотрим реакцию взрывчатого превращения нитроглицерина $\text{C}_3\text{H}_5(\text{ONO}_2)_3$, имеющего положительный K_6 :

$$K_{\bar{o}} = \frac{[9 - (2 \cdot 3 + 5/2)] \cdot 16}{227} \cdot 100 = +3,52\%,$$

$$\alpha_{\kappa} = \frac{9}{2 \cdot 3 + 5/2} = 1,06.$$

Реакция взрывчатого превращения нитроглицерина имеет следующий вид:



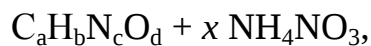
Для смесевого двухкомпонентного ВВ, состоящего из первой компоненты с недостатком кислорода и второй с положительным $K_{\bar{o}}$, условие получения сбалансированного по кислороду ВВ ($K_{\bar{o}}=0$) можно записать в общем виде



откуда значение x легко определяется из уравнения

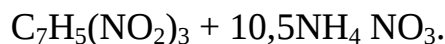
$$2a + \frac{b}{2} - d = x(d_1 - 2a_1 - \frac{b_1}{2}). \quad (3.3)$$

Для смесей органических ВВ с аммиачной селитрой



$$x = 2a + \frac{b}{2} - d. \quad (3.4)$$

Для смеси аммиачной селитры с тротилом, имеющей $K_{\bar{o}}=0$, молекулярное уравнение имеет вид

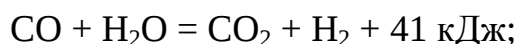


3.2. Методы составления реакций взрывчатого превращения для ВВ с отрицательным кислородным балансом

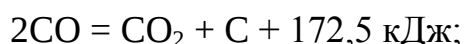
Более сложным является составление реакций взрывчатого превращения для ВВ, имеющих отрицательный кислородный баланс ($K_{\bar{o}} < 0$). В этом случае для менее точных оценок и решения ряда прикладных задач взрывного дела пользуются приближенными методами

расчета термодинамических характеристик ВВ, основанных на различных принципах определения состава ПВ. В этих методах предусматривается различная последовательность расходования кислорода в составе ВВ на окисление горючих компонент, а также возможность протекания ряда равновесных реакций в ПВ[1, 2], основными из которых являются:

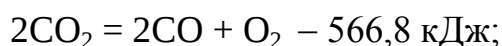
1. Водяного газа



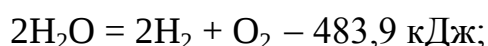
2. Генераторного газа



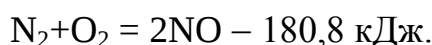
3. Диссоциация углекислого газа



4. Диссоциация воды (водяных паров)



5. Окисление азота



При взрыве ВВ с $K_0 < 0$ повышение их плотности заряжания приводит к повышению давления ПВ и усилению экзотермической (происходящей с выделением тепла) реакции генераторного газа.

Однако при последующем расширении ПВ экзотермический эффект пропадает, т.к. равновесие сдвигается в сторону продуктов с большим объемом, т.е. образованием окиси углерода.

С увеличением температуры (начальный этап взрыва) равновесные реакции сдвигаются в сторону продуктов, образующихся с поглощением тепла (реакция диссоциации углекислого газа).

Еще более сложные реакции протекают при взрыве многокомпонентных (смесевых) ВВ. При взрыве таких ВВ первоначально разлагаются взрывчатые компоненты. Кроме того, возможны процессы газификации, пиролиза органических невзрывчатых компонентов, таких, как древесная мука, парафин и т.п. Затем происходит взаимодействие

между продуктами разложения как взрывчатых, так и невзрывчатых компонентов.

Остающиеся не окисленными горючие элементы и свободный азот могут вступать в экзотермические реакции с образованием метана или аммиака. Обычно при составлении реакций взрывчатого разложения этими реакциями, как и реакцией образования нитридов алюминия, при его избытке в составе ВВ пренебрегают в силу их малости.

Для решения прикладных задач термодинамики ВВ часто используются приближенные методы расчета теплоты взрыва, при которых состав ПВ определяется на основе некоторых эмпирических зависимостей или каких-либо общих термодинамических принципов.

Ниже рассмотрены некоторые наиболее известные приближенные методы составления реакций взрывчатого превращения для ВВ с отрицательным кислородным балансом.

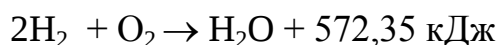
3.2.1. Метод максимального газообразования (принцип Ле-Шателье-Малляра)

Метод предусматривает, что конечный состав ПВ по окончании расширения должен отвечать максимальному объему газов (или максимальному числу молей газообразных ПВ).

Расчет состава продуктов взрыва по принципу Ле-Шателье-Малляра для ВВ, не содержащих алюминия, предусматривает последовательность:

- в момент взрыва весь углерод окисляется до окиси углерода (CO);
- оставшаяся часть кислорода равными долями расходуется на окисление водорода (H) до воды (H₂O) и окиси углерода до двуокиси (CO→CO₂);
- при недостатке кислорода выделяются свободные элементы (H₂, C).

Предложенный принцип не обоснован и базируется на правиле, при котором протекание реакций:

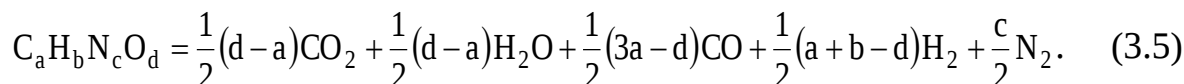


является равновероятным (вода рассматривается в жидкой фазе).

Этот метод часто успешно применяется для ВВ с отрицательным K_6 , но с количеством кислорода, достаточным для полного газообразования - вторая группа ВВ по K_6 : $a + b/2 \leq d < 2a + b/2$.

В этом случае образуются следующие ПВ: CO_2 , CO , H_2O , H_2 , N_2 .

Схема написания реакции взрывчатого превращения по этой методике имеет следующий вид:



В соответствии с этим принципом реакции взрывчатого превращения имеют вид:

- для гексогена ($K_6 = -21,6\%$)



- для ТЭНа ($K_6 = -10,1\%$)



Недостатком этой методики является неучет влияния охлаждения газов в процессе их расширения на ход протекания равновесных реакций.

3.2.2. Методика расчета состава продуктов взрыва по Бринкли-Вильсону

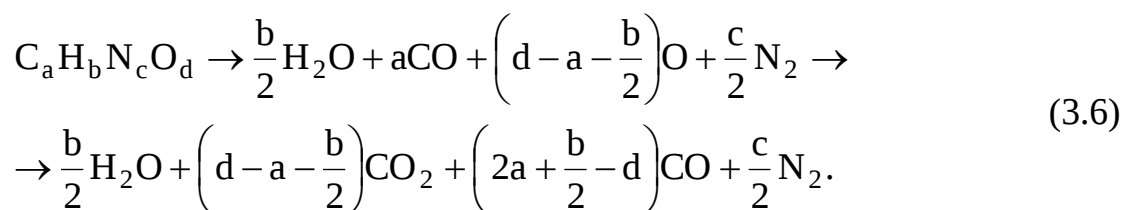
Установлено, что при одинаковых давлениях и температурах диссоциация CO_2 развита в большей степени, чем диссоциация H_2O , вследствие этого реакция образования H_2O будет превалировать над реакцией образования CO_2 .

Согласно методике Бринкли-Вильсона для малых степеней расширения ПВ учитывается приоритет реакций с максимальным энерговыделением, вместе с тем, учитываются равновесные реакции с участием углеродосодержащих соединений и при полном пренебрежении диссоциацией паров воды.

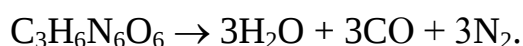
При составлении правой части реакции взрывчатого превращения по этому методу распределение кислорода происходит в две стадии. В составах, не содержащих алюминиевую пудру, кислород сначала окисляет весь водород в H_2O и углерод в CO , а оставшаяся часть кислорода используется на доокисление CO в CO_2 .

Данный метод используется для ВВ 3-й группы, однако он является приемлемым и для ВВ 2-й группы.

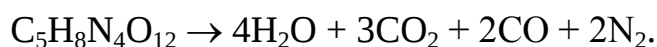
Для условия полного газообразования $d \geq a + b/2$



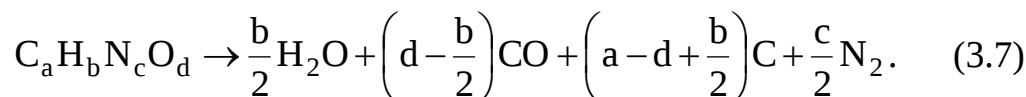
По этой методике реакция взрывчатого превращения для гексогена $C_3H_6N_6O_6$ ($d = 6 \geq 3 + 0,5 \cdot 6 = 6$) имеет вид



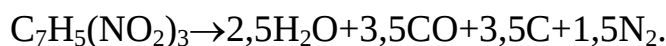
Для ТЭНа - $C_5H_8N_4O_{12}$ ($d = 12 \geq 5 + 0,5 \cdot 8 = 9$),



Для условия неполного газообразования $b/2 < d < a + b/2$



Реакция взрывчатого превращения для тротила $C_7H_5(NO_2)_3$ ($0,5 \cdot 5 = 2,5 < d = 6 < 7 + 0,5 \cdot 5 = 9,5$) имеет вид



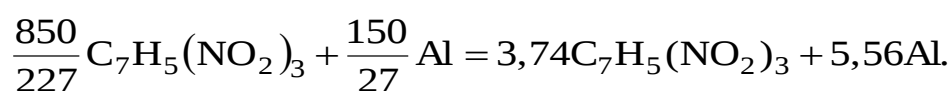
Для алюмосодержащих смесевых ВВ сначала алюминий окисляется в Al_2O_3 , а водород - в воду (H_2O), углерод C - в CO . Оставшийся кислород

идет на доокисление CO в CO₂. Если кислорода до полного окисления не хватает, тогда Al вступает в реакцию с азотом с образованием нитрида алюминия (AlN).

Для практических расчетов термодинамических характеристик многокомпонентных ВВ реакции взрывчатого превращения составляются по вышеперечисленным методикам для 1 кг ВВ. По известному процентному содержанию компонентов в смесевом ВВ определяется количество г-молей компонентов в 1 кг ВВ, после чего составляется условная (брутто) формула ВВ и правая часть химической реакции взрыва.

Пример 3.2. Составить реакцию взрывчатого превращения алюмотола ($K_6 < 0$), представляющего собой гранулированный сплав тротила - 85% и 15% алюминиевой пудры.

Молекулярное уравнение (левая часть) имеет вид



Определим поэлементный состав ВВ:

$$\sum \text{N} = 3,744 \cdot 3 = 11,23;$$

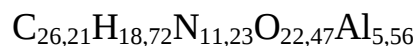
$$\sum \text{C} = 3,744 \cdot 7 = 26,21;$$

$$\sum \text{H} = 3,744 \cdot 5 = 18,72;$$

$$\sum \text{O} = 3,744 \cdot 6 = 22,47;$$

$$\sum \text{Al} = 5,56.$$

Условная (брутто) формула алюмотола имеет вид



Проверка суммарной массы для условной (брутто) формулы

$$\sum M_{\text{ВВ}} = 26,21 \cdot 12 + 18,72 \cdot 1 + 11,23 \cdot 14 + 22,47 \cdot 16 + 5,56 \cdot 27 = 1000,1 \text{ г.}$$

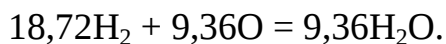
Кислородный баланс алюмотола

$$K_6 = \frac{[22,47 - (2 \cdot 26,21 + 0,5 \cdot 18,72 + 1,5 \cdot 5,56)] \cdot 16}{1000} \cdot 100\% = -76,24\%.$$

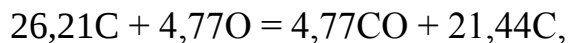
Согласно принципу Бринкли-Вильсона, сначала окисляется алюминий до окисла Al₂O₃:



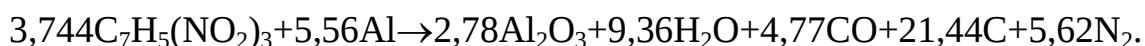
Далее водород окисляется до воды



Определяем остаток кислорода $22,47 - (8,34 + 9,36) = 4,77$, который идет на окисление углерода



откуда реакция взрывчатого превращения алюмотола в соответствии с принципом Бринкли-Вильсона имеет следующий вид:



Проверка суммарной массы продуктов взрыва:

$$\Sigma M_{\text{ВВ}} = 2,78 \cdot 102 + 9,36 \cdot 18 + 4,77 \cdot 28 + 21,44 \cdot 12 + 5,62 \cdot 28 = 1000,24 \text{ г}.$$

Методы определения состава ПВ, основанные на рассмотренных выше принципах составления реакций взрывчатого превращения ВВ, могут быть использованы лишь для оценки теплоты взрыва $Q_{\text{взр}}$.

Существуют более точные методы определения состава продуктов взрыва, определения теплоты взрыва и других термодинамических характеристик ВВ (полуэмпирический метод Г.А. Авакяна; метод, основанный на учете констант равновесия диссоциации H_2O и CO_2 и др.). Эти методы в настоящем пособии не рассматриваются и для их изучения можно рекомендовать источники, приведенные в списке литературы [1, 3].

4. РАСЧЕТ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ

4.1. Расчет теплового эффекта реакции взрывчатого превращения ВВ

4.1.1. Закон Гесса. Расчет теплоты взрыва ВВ

Одной из основных термодинамических характеристик ВВ является теплота взрыва – теплота взрывчатого превращения ВВ (его компонент) в процессе детонации, определяющая как взрывчатые, так и детонационные характеристики ВВ.

В термодинамике ВВ различают следующие тепловые эффекты:

– **теплота образования** – тепловой эффект (экзотермический или эндотермический) при образовании одного моля химического соединения из свободных элементов при стандартных условиях (25°C и 1 атм. = 760 мм рт. ст.);

– **теплота сгорания** – количество тепла, выделяемое при сгорании вещества в атмосфере кислорода;

– **теплота взрыва** – количество тепла выделяющегося при взрыве одного моля ВВ или 1 кг ВВ, что чаще используется для практического сравнения энергии взрыва различных ВВ.

Основной сложностью расчета теплоты взрыва является определение истинного состава продуктов взрыва, который значительно изменяется от некоторого **начального** в самой детонационной волне до **конечного** состава ПВ после завершения процесса их расширения.

Это очевидно для смесевых многокомпонентных ВВ, у которых продукты детонации взрывчатых компонентов в газовой фазе вступают во взаимодействие между собой и также с продуктами газификации (сублимации) невзрывчатых компонент. Вторичные реакции, т.н.

обратимые (равновесные), характерны и для индивидуальных ВВ типа химических соединений.

Равновесное состояние этих реакций определяется параметрами состояния ПВ – их температурой и давлением. При этом каждому текущему, т.н. «замороженному», состоянию ПВ соответствует их определенный состав. Эти отличия состава ПВ зависят от химического состава ВВ и его компонентов, кислородного баланса ВВ. Большие различия в составе начальных и конечных ПВ характерны для ВВ с недостатком в их составе кислорода для полного окисления горючих элементов (водорода, углерода, металлов) до высших окислов (ВВ с отрицательным кислородным балансом $K_o < 0$). Для ВВ с положительным кислородным балансом $K_o > 0$ эти отличия состава ПВ существенно меньше.

При расчете теплоты взрыва необходимо определиться с некоторым конечным состоянием ПВ. Обычно рассматриваются два возможных значения $Q_{взр}$, отвечающих следующим состояниям ПВ:

- в начальный момент взрыва, т.е. в самой детонационной волне после завершения реакций взрывчатого превращения ВВ (точка Чепмена-Жуге);
- при расширении ПВ до момента уравнивания их давления с давлением окружающей среды (воздушной, водной, горные породы).

Соответствующие этим состояниям ПВ теплоты условно называются «детонационная» $Q_{дет}$ и «фугасная» $Q_{ф}$ (Апин А.Я., Лебедев Ю.А.). Вместе с тем значения этих теплот не являются некоторыми константами, характеризующими энергетику ВВ – детонационная теплота зависит от давления в детонационной волне, а фугасная – от условий протекания процесса расширения ПВ, т.е. от давления внешней среды.

Поэтому в термодинамике ВВ в качестве критерия теплового эффекта взрыва ВВ рассматривается теплота взрыва Q_{max} ,

соответствующая максимально возможному тепловому эффекту, который достигается при образовании высших окислов горючих элементов в составе ВВ: углерода (С), водорода (Н), металлов (Al). Q_{max} является величиной постоянной, зависящей только от химического состава ВВ.

4.1.2. Закон Гесса. Расчет теплоты взрыва ВВ

В основе расчета теплового эффекта взрывчатого превращения ВВ используется закон Гесса (1840 г.), основанный на первом начале термодинамики.

По этому закону тепловой эффект некоторой последовательности химических реакций не зависит от пути превращения исходных веществ в конечные продукты, а определяется только начальным и конечным состояниями системы.

На рис. 4.1 приведено схематическое изображение состояния системы – треугольник Гесса.

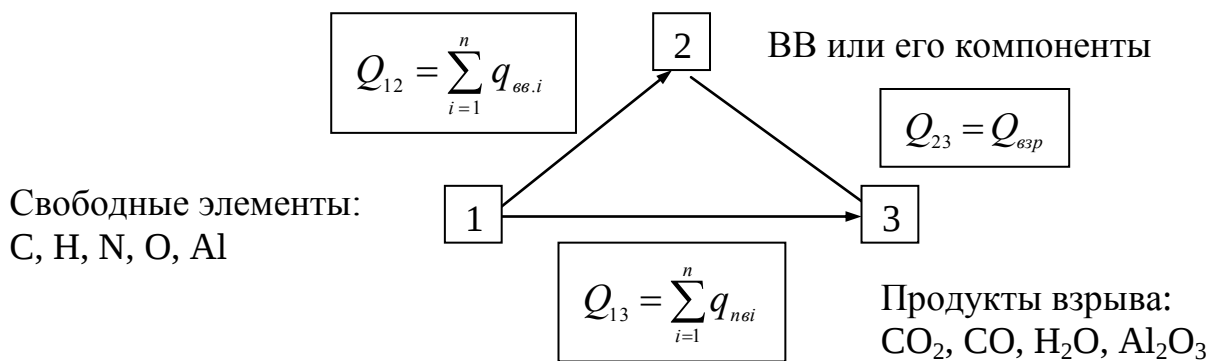


Рис. 4.1. Треугольник Гесса

По известным значениям теплоты образования ВВ (индивидуального) или компонентов смесового ВВ и теплоты образования продуктов взрыва тепловой эффект реакции взрыва определяется по формуле

$$Q_{23} = Q_{13} - Q_{12}, \quad (4.1)$$

где $Q_{23} = Q_{взр}$ – теплота взрыва ВВ, кДж/моль;

$$Q_{13} = \sum_{i=1}^n q_{пв\ i} - \text{суммарная теплота образования продуктов взрыва } (q_{пв\ i})$$

с учетом числа их грамм-молей – n_i , кДж/моль;

$$Q_{12} = \sum_{i=1}^n q_{вв\ i} - \text{суммарная теплота образования компонентов ВВ } (q_{вв\ i}) \text{ с}$$

учетом числа их грамм-молей – n_i , кДж/моль.

Значение теплоты взрыва $Q_{взр} = Q_{max}$ будет тем выше, чем ниже теплота образования ВВ или его компонентов и чем выше теплоты образования ПВ (теплотворная способность горючих элементов).

Теплоты образования компонентов ВВ и продуктов взрыва приводятся в термохимических таблицах.

При этом образование продуктов взрыва, в т.ч. высших окислов, зависит от обеспеченности ВВ кислородом, величина которого определяет состав ПВ.

Применение закона Гесса требует, чтобы реакции велись при одинаковых условиях (V –const или P –const).

Так как взрыв происходит практически при неизменном объеме вещества, то теплоту взрыва следует рассчитывать при постоянном объеме (Q_v).

Для этого необходимо знать теплоты образования продуктов детонации и компонентов ВВ при постоянном объеме (приложения 1, 2).

Разность тепловых эффектов при постоянном объеме и давлении определяется выражением

$$Q_v - Q_p = p \cdot \Delta V, \quad (4.2)$$

или для условия постоянства температуры до и после реакции можно переписать

$$Q_v - Q_p = p (V_2 - V_1), \text{ или } Q_v = Q_p + p \cdot V(n_2 - n_1), \quad (4.3)$$

где V_1 и V_2 – начальный и конечный объем ПВ;

V – объем, занимаемый одним грамм–молем газа, 22,42 л;

n_1 и n_2 – количество грамм–молей в начале и конце процесса.

Можно преобразовать уравнение

$$Q_v = Q_p + \Delta n \cdot R \cdot T, \quad (4.4)$$

где R – универсальная газовая постоянная, $R = 8,3169 \text{ Дж} \cdot \text{К}^{-1} \cdot \text{моль}^{-1}$,

($R = 1,987 \text{ кал} \cdot \text{К}^{-1} \cdot \text{моль}^{-1}$);

$$\Delta n = n_1 - n_2.$$

Так, при конечной температуре $t = 25^\circ \text{C}$ или $T = 298 \text{ K}$, получаем

$$R \cdot T = 2,479 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1} \text{ или } 0,592 \text{ ккал} \cdot \text{моль}^{-1},$$

откуда

$$Q_v = Q_p + 2,479 \cdot \Delta n, \text{ кДж} \quad (4.5)$$

или

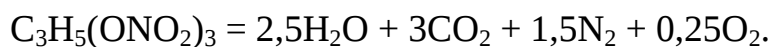
$$Q_v = Q_p + 0,592 \cdot \Delta n, \text{ ккал.} \quad (4.6)$$

Для случая взрыва ВВ, состоящих из твердых или жидких компонентов, числом их молей (n_1) можно пренебречь по сравнению с изменением объема газообразных компонентов реакции, т.е.

$$Q_v = Q_p + R \cdot T \cdot n_{\text{ПВ}} = Q_p + 2,479 n_{\text{ПВ}}, \quad (4.7)$$

где $n_{\text{ПВ}}$ – количество молей газообразных продуктов взрыва.

Пример 4.1. Рассчитать теплоту взрыва нитроглицерина, реакция взрывчатого превращения которого имеет вид



В приложении 2 находим теплоту образования нитроглицерина, равную $Q_{12} = 344,5 \text{ кДж/моль}$.

Определяем суммарную теплоту образования ПВ для парообразного состояния воды в ПВ (Q)

$$Q_{13} = 2,5 \cdot q_1 + 3 \cdot q_2 = 2,5 \cdot 240,6 + 3 \cdot 395,6 = 1788,3 \text{ кДж/г–моль}.$$

Здесь q_1 – теплота образования H_2O в парообразном состоянии, кДж/моль (приложение 1);

q_2 – теплота образования CO_2 , кДж/моль (приложение 1).

Откуда теплота взрыва нитроглицерина

$$Q_{23} = Q_{13} - Q_{12} = 1443,8 \text{ кДж/моль},$$

или для 1 кг ВВ осуществляется перерасчет по формуле

$$Q_{B3P} = \frac{Q_{23}}{M_{ВВ}} \cdot 1000 = \frac{1443,8}{227} \cdot 10^3 = 6360,4, \text{ кДж/кг}.$$

Здесь $M_{ВВ} = 227$ г–моль – молекулярный вес нитроглицерина.

Для многокомпонентных ВВ, если реакция взрывчатого превращения составлена не для 1 кг ВВ, грамм–молекулярная масса ВВ определяется выражением

$$M_{ВВ} = M_1 m_1 + M_2 m_2 + \dots + M_n m_n,$$

где $M_1, M_2, \dots$ – грамм–молекулярные веса компонентов ВВ;

$m_1, m_2, \dots$ – число молей компонентов ВВ.

4.1.3. Аддитивный метод оценки теплоты взрыва смесевых ВВ

Для смесевых ВВ для грубой оценки теплоты взрыва $Q_{взр}$ можно воспользоваться правилом аддитивности, полагая, что каждый компонент вносит вклад в теплоту взрыва пропорционально своему содержанию в смеси

$$Q_{взр} = \sum v_i \times Q_{i\text{взр}}, \quad (4.8)$$

где v_i и $Q_{i\text{взр}}$ (кДж/кг или ккал/кг) – весовая доля и теплота взрыва i -го компонента в смеси.

4.2. Расчет температуры газообразных продуктов взрыва

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

$$-dE = dQ + pdV.$$

Здесь $E = C_V T_{\text{взр}}$ – внутренняя энергия ПВ; $p dV$ – работа расширения газов.

Начальная температура ПВ, отвечающая моменту их образования и условно называемая температурой взрыва ($T_{\text{взр}}$), рассчитывается из условия $dV=0$, т.е. предполагается, что ПВ образуются практически в исходном объеме ВВ.

Тогда изменение внутренней энергии газообразных продуктов

$$-\Delta E = -\sum (C_{V1} \cdot T_{\text{взр}} - C_{V2} \cdot T_2) \cdot n_i = Q_{\text{взр}}.$$

Здесь ΔE – изменение внутренней энергии взрыва в интервале температур от начальной $T_{\text{взр}}$ до $T_2 = 291^\circ K$ ($18^\circ C$);

n_i – число молей i -го компонента ПВ;

C_{V1} – молярная теплоемкость i -го компонента ПВ при $T_{\text{взр}}$;

C_{V2} – то же при T_2 (конечной температуре ПВ).

Принимая, что величина $C_{V2} T_2$ достаточно мала в сравнении с $C_{V1} T_{\text{взр}}$, получаем

$$Q_{\text{взр}} = \sum C_{V1} \cdot T_{\text{взр}} \cdot n_i,$$

откуда

$$T_{\text{взр}} = \frac{Q_{\text{взр}}}{\sum C_{vi} \cdot n_i}. \quad (4.9)$$

Известно, что зависимость теплоемкости i -го компонента ПВ от температуры $C_v(T)$ или $C_p(T)$ можно представить в виде полинома – формулы Г. Каста:

$$C_v = a + bT + cT^{-2} + \dots, \quad (4.10)$$

где a, b, c – некоторые эмпирические коэффициенты.

Обычно для несложных расчетов ограничиваются первыми двумя членами полинома

$$C = a + bT, \quad (4.11)$$

или с учетом числа молей образующихся ПВ

$$\sum C_i n_i = \sum a_i n_i + (\sum b_i n_i) T_{взр}, \quad (4.12)$$

где a_i и b_i – эмпирические коэффициенты i -го компонента ПВ;

n_i – число молей i -го компонента ПВ

Решая полученное квадратное уравнение относительно $T_{взр}$, получаем расчетное выражение

$$T_{взр} = \frac{-a + \sqrt{a^2 + 4bQ_{взр} \cdot 10^3}}{2b} \quad (4.13)$$

или

$$T_{взр} = \frac{-\sum n_i a_i + \sqrt{(\sum n_i a_i)^2 + 4 \sum n_i b_i Q_{взр} \cdot 10^3}}{2 \sum n_i b_i}, \quad (4.14)$$

где $T_{взр}$ – температура продуктов взрыва, °С;

n_i – число молей одноименных газов;

$Q_{взр}$ – теплота взрыва, кДж/моль.

Примечание: в расчетах теплоты взрыва получаемое значение $Q_{взр}$ обычно в кДж/кг, поэтому в формулах (4.13) и (4.14) значение $Q_{взр}$ умножено на 10^3 .

В табл. 4.1 приведены значения эмпирических коэффициентов a и b , предложенные Г. Кастом.

Таблица 4.1

Тип газа	a , Дж/моль·°С (кал/моль·°С)	b , Дж/моль·°С (кал/моль·°С)
Двухатомные (CO, H ₂ , O ₂ , N ₂ , NO)	20,1 (4,8)	$18,86 \cdot 10^{-4}$ ($4,5 \cdot 10^{-4}$)
Трехатомные (CO ₂ , NO ₂)	41,1 (9,8)	$24,30 \cdot 10^{-4}$ ($5,8 \cdot 10^{-4}$)
Четырехатомные	41,9 (10,0)	$18,86 \cdot 10^{-4}$ ($4,5 \cdot 10^{-4}$)
Пятиатомные	50,28 (12,0)	$18,86 \cdot 10^{-4}$ ($4,5 \cdot 10^{-4}$)
Пары воды (H ₂ O)	16,76 (4,0)	$90,10 \cdot 10^{-4}$ ($21,5 \cdot 10^{-4}$)
Твердые компоненты ПВ (C, Al ₂ O ₃)	24,97 (5,96)	0

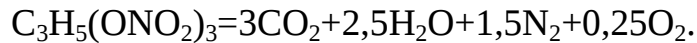
Для твердых компонентов, содержащихся в ПВ, в первом приближении считают теплоемкость не зависящей от температуры (т.е. $b = 0$):

$$C_v = 3 \cdot n_i \cdot R = n_i \cdot 24,97, \quad (4.15)$$

где n_i – число молей твердых компонентов (например Al_2O_3 , С).

Пример 4.2. Определить температуру продуктов взрыва ($T_{\text{взр}}$) при взрыве нитроглицерина.

Реакция взрывчатого превращения нитроглицерина



Находим

$$\sum n_i a_i = 3 \cdot 41,1 + 2,5 \cdot 16,76 + 1,5 \cdot 20,1 + 0,25 \cdot 20,1 = 200,38,$$

$$\sum n_i b_i = 10^{-4} \cdot (3 \cdot 24,3 + 2,5 \cdot 90,1 + 1,5 \cdot 18,86 + 0,25 \cdot 18,86) = 331,12 \cdot 10^{-4}.$$

Так как $Q_{\text{взр}} = 1443,8$ кДж/моль или $1443,8 \cdot 10^3$ Дж/моль, получаем температуру продуктов взрыва в градусах Цельсия:

$$T_{\text{взр}} = \frac{-200,38 + \sqrt{(200,38)^2 + 4 \cdot 331,12 \cdot 10^{-4} \cdot 1444 \cdot 10^3}}{2 \cdot 331,12 \cdot 10^{-4}} = 4237, \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Температура взрыва (ПВ) для большинства промышленных ВВ находится в диапазоне $2600 \div 4200^\circ\text{C}$.

4.3. Определение объема газообразных продуктов взрыва

Объем газообразных продуктов взрыва ПВ определяется по реализации взрывчатого превращения ВВ на основе закона Авогадро, согласно которому объем, занимаемый одним молем газа при температуре 0°C и давлении $1,01 \cdot 10^5$ Па, равен 22,4 л.

Отсюда получаем выражение для определения объема ПВ ($\text{м}^3/\text{кг}$)

– для одного моля индивидуального ВВ

$$V_{\text{ПВ}} = \frac{22,4 \cdot (n_1 + n_2 + \dots + n_n)}{M_{\text{ВВ}}}, \text{ м}^3/\text{кг}, \quad (4.16)$$

где $M_{\text{ВВ}}$ – молекулярная масса ВВ, г·моль.

Для многокомпонентного смесового ВВ

$$V_{\text{пв}} = \frac{22,4 \cdot (n_1 + n_2 + \dots + n_n)}{M_1 m_1 + M_2 m_2 + \dots + M_n m_n}, \text{ м}^3/\text{кг}. \quad (4.17)$$

Здесь $n_1, n_2, \dots$ – количество грамм–молекул газообразных ПВ;

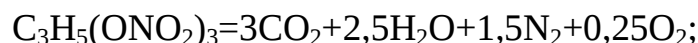
$m_1, m_2, \dots$ – количество грамм–молекул составных частей ВВ;

$M_1, M_2, \dots$ – молекулярные массы составных частей ВВ.

Очевидно, что при составлении реакции взрывного превращения для 1 кг ВВ расчет объема ПВ (в $\text{м}^3/\text{кг}$) осуществляется по формуле

$$V_{\text{пв}} = \frac{22,4 \cdot (n_1 + n_2 + \dots + n_n)}{1000}, \text{ м}^3/\text{кг}. \quad (4.18)$$

Пример 4.3. Определить объем ПВ при взрыве нитроглицерина ($K_d > 0$, $M_{\text{ВВ}} = 227$ г–моль):



а) объем ПВ для парообразного состояния воды

$$V_{\text{пв}} = \frac{22,4 \cdot (3 + 2,5 + 1,5 + 0,25)}{227} = 0,716, \text{ м}^3/\text{кг};$$

б) объем ПВ для жидкого состояния воды

$$V_{\text{пв}} = \frac{22,4 \cdot (3 + 2,5 + 0,25)}{227} = 0,469, \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Примечание: в расчете объема ПВ учитываются только газообразные продукты взрыва (Al_2O_3 , С, NaCl , Na_2O и др. являются твердыми продуктами взрыва).

4.4. Расчет давления газообразных продуктов взрыва

При решении различных инженерных задач взрывного дела можно выделить следующие характерные значения давлений ПВ:

– давление ПВ в объеме заряда ВВ или давление взрыва, отвечающего как бы мгновенному взрыву всей массы ВВ ($P_{\text{взр}}$);

– давление в детонационной волне, отвечающее точке Чепмена–Жуге ($P_{\text{ж}}$);

- среднее давление ПВ в зарядной камере до начала ее разрушения;
- давление ПВ, отвечающее некоторой степени их расширения, т.е. при заданном отношении V_2/V_1 . Здесь V_1 и V_2 – начальный и конечный объем ПВ.

Рассмотрим расчет давления продуктов взрыва в объеме заряда ВВ ($P_{взр}$).

Давление газов в зарядной камере при взрыве конденсированных ВВ может быть определено, исходя из объединенных законов Бойля–Мариотта и Гей–Люссака с поправкой Ван–дер–Ваальса:

$$P = \frac{P_0 V_{ПВ} T_{взр}}{273 \cdot (V - \alpha)}, \quad (4.19)$$

где P_0 – атмосферное давление газов при 0°C , $P_0 = 1,01 \cdot 10^5$ Па;

$T_{взр}$ – температура взрыва в градусах по Кельвину, К:

$$T_{взр} = T(^{\circ}\text{C}) + 273^{\circ};$$

V – объем зарядной камеры (заряда ВВ), м^3 ;

$V_{ПВ}$ – объем ПВ, м^3 ;

α – поправка, учитывающая собственный объем молекул продуктов взрыва – несжимаемая часть газа или коволюм, м^3 .

Заменяем в формуле $V = 1/\Delta$, т.е. на объем, занимаемый 1 кг ВВ при плотности Δ , получаем

$$P = \frac{P_0 V_{ПВ} T_{взр}}{273 \cdot (1/\Delta - \alpha)} = \frac{P_0 V_{ПВ} T_{взр} \Delta}{273 \cdot (1 - \alpha \Delta)}. \quad (4.20)$$

Сложность расчета по формуле (4.20) связана с неопределенностью величины коволюма α ³⁾. Наибольшие трудности при расчете давления ПВ при высоких плотностях заряжения ($\Delta > 1000$ кг/м^3) представляет нахождение величины коволюма газообразных ПВ (несжимаемая часть

³⁾ Имеется несколько подходов к оценке величины коволюма, которые, как правило, основываются на сопоставлении каких-либо расчетных величин, в которые входит коволюм, в том числе давление ПВ с точными экспериментальными измерениями. Из сопоставления расчетных и экспериментальных данных установлено, что коволюм является величиной непостоянной. Так, при увеличении давления коволюм уменьшается.

объема газов)²⁾. Если плотность заряжения ВВ не высока ($\Delta < 1000 \text{ кг/м}^3$) и давление не превышает нескольких сотен мегапаскаль, приближенно можно принять $\alpha = 0,001 \cdot V_{\text{ПВ}}$. Для более высоких плотностей ($\Delta > 1000 \text{ кг/м}^3$) для расчетов принимают $\alpha = 0,0006 \cdot V_{\text{ПВ}}$. Здесь Δ – плотность заряжения ВВ, кг/м^3 .

Пример 4.4. Определить давление продуктов взрыва нитроглицерина при плотности $\Delta = 1,6 \text{ г/см}^3$, $V_{\text{ПВ}} = 0,716 \text{ м}^3$; $T_{\text{взр}} = 4237^\circ\text{C}$, $\alpha = 0,0006 V_{\text{ПВ}}$.

Откуда получаем

$$P = \frac{1,01 \cdot 10^5 \cdot 0,716 \cdot 4510 \cdot 1600}{273 \cdot (1 - 0,0006 \cdot 0,716 \cdot 1600)} = 6,1 \cdot 10^9, \text{ Па.}$$

4.5. Расчет идеальной работоспособности ВВ и полного термодинамического КПД взрыва

4.5.1. Расчет идеальной работоспособности ВВ

Из первого закона термодинамики следует, что изменение внутренней энергии газов равно количеству тепла, сообщенного окружающей среде и произведенной работе:

$$-dE = dQ + pdV.$$

Если техническим назначением взрыва ВВ является производство механической работы, то затраты на теплообмен продуктов взрыва (ПВ) с окружающей средой являются энергетическими потерями (dQ). Эти потери называются термодинамическими.

Идеальным с точки зрения отсутствия термодинамических потерь является адиабатический процесс расширения ПВ, т.е. $dQ = 0$.

²⁾ Если в ПВ содержатся твердые вещества, то коволюм складывается из несжимаемой части газов и объема твердых частиц [6].

В этом случае изменение внутренней энергии ПВ равно количеству работы, совершаемой газами, т.е.

$$-dE = pdV = dA.$$

В реальных условиях взрывания наиболее близким к адиабатическому процессу является взрыв ПВ в воздушной среде, а, например, в горных породах термодинамические потери возрастают. Они существенно выше в пористых, хрупких, легко дробимых породах и минимальны в пластичных средах типа глин.

Мерой идеальной работоспособности ВВ может служить максимальная работа, которую совершают ПВ при своем адиабатическом расширении до давления окружающей среды (воздушной, водной, горной), т.е. когда остаточное давление ПВ уравнивается противодействием среды атмосферным, гидростатическим или горным давлением.

Идеальная работоспособность ВВ является одной из важнейших энергетических характеристик ВВ. Она дополняет теплоту взрыва, показывая теоретическую возможность реализации энергетического потенциала ВВ в механическую работу.

Идеальную работоспособность (полную идеальную работу взрыва) можно определить как разность между значениями внутренней энергии ПВ в момент их образования и к концу расширения:

$$A_{и} = \int dE = \int_{T_1}^{T_2} \bar{C}_V dT = \bar{C}_V \cdot (T_1 - T_2) = \bar{C}_V T_1 \left(1 - \frac{T_2}{T_1}\right) = Q_{взр} \left(1 - \frac{T_2}{T_1}\right), \quad (4.21)$$

где $\bar{C}_V$ – средняя теплоемкость продуктов взрыва в интервалах изменения температуры взрыва от T_1 до T_2 ;

T_1 – начальная температура взрыва;

T_2 – конечная температура ПВ.

Для газовых взрывааемых систем, расширение ПВ которых происходит вдоль изоэнтропы вида $pV^\gamma = \text{const}$, пользуясь уравнением Клайперона ($PV^\gamma = RT$), получаем

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{\gamma-1} = \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}$$

Окончательно получаем

$$A_u = Q_{\text{взр}} \left(1 - \frac{T_2}{T_1} \right); \quad (4.22)$$

$$A_u = Q_{\text{взр}} \left[1 - \left(\frac{V_2}{V_1} \right)^{\gamma-1} \right]; \quad (4.23)$$

$$A_u = Q_{\text{взр}} \left[1 - \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right], \quad (4.24)$$

где $Q_{\text{взр}}$ – потенциальная энергия ВВ (полная тепловая энергия), кДж/кг;

V_1 и V_2 – начальный и конечный удельные объемы ПВ, м³/кг;

P_1 и P_2 – начальное и конечное давление ПВ, Па;

$\gamma = C_p/C_v$ – показатель адиабаты.

Эти же формулы могут быть использованы для расчета A_u конденсированных ВВ.

При взрыве в воздухе ($P_2 = 1,01 \cdot 10^5$ Па) полная идеальная работа взрыва определяется

$$A_u = Q_{\text{взр}} \left[1 - \left(\frac{1,01 \cdot 10^5}{P_{\text{пв}}} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right], \text{ кДж/кг.} \quad (4.25)$$

4.5.2. Расчет полного термодинамического КПД взрыва

Вышеприведенную формулу (4.25) можно представить в виде

$$A_u = Q_{\text{взр}} - q_{\text{т}}. \quad (4.26)$$

Здесь величина $q_{\text{т}} = Q_{\text{взр}} - A_u = C_{v2} \cdot T_2$ – термодинамические потери энергии ВВ в продуктах взрыва по достижении ими атмосферного давления. Это остаточное тепло идет на свечение ПВ после их расширения.

Отношение идеальной работоспособности к выделившейся тепловой энергии взрыва называется идеальным термодинамическим КПД взрыва

$$\eta = \frac{A_u}{Q_{взр}} \quad (4.27)$$

или с учетом формулы (3.24)

$$\eta = 1 - \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{(\gamma-1)}{\gamma}}. \quad (4.28)$$

Идеальный термодинамический КПД взрыва определяет часть тепловой энергии, которая может быть использована для совершения механической работы взрыва.

Величины идеальной работоспособности (A_u) и полного термодинамического КПД (η) существенно зависят от свойств продуктов взрыва, влияющих на показатель адиабаты, $\gamma = C_p/C_v$. Если в ПВ содержится 2/3 молекул двухатомных газов и 1/3 – одноатомных (гексоген), то $\gamma = 1,25$. Если в ПВ содержится 2/3 трехатомных газов и 1/3 двухатомных (нитроглицерин), то $\gamma = 1,2$. Величина γ снижается (соответственно снижается A_u и η), если в ПВ содержатся четырех и пятиатомные газы, а также твердые продукты (NaCl, Al₂O₃ и др.). В этих случаях $\gamma = 1,15, 1,1$ и $1,05$.

Пример 4.5. Определить полную идеальную работоспособность и термодинамический КПД аммонита 6ЖВ при плотности заряжания 900 кг/м³ и следующих параметрах взрывного превращения:

$$V_{пв} = 0,86 \text{ м}^3/\text{кг};$$

$$Q_{взр} = 4300 \text{ кДж/кг};$$

$$T_{взр} = 2600 \text{ }^\circ\text{К}.$$

Для расчета показатель адиабаты принимается $\gamma=1,25$.

Определение давления ПВ при взрыве аммонита 6ЖВ:

$$P = \frac{1,01 \cdot 10^5 \cdot 0,86 \cdot (2600) \cdot 900}{273 \cdot (1 - 0,001 \cdot 0,86 \cdot 900)} \cong 3,3 \cdot 10^9$$

откуда полная идеальная работоспособность

$$A_u = Q_{взр} \left[1 - \left(\frac{1,01 \cdot 10^5}{P_{пв}} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right] =$$

$$= 4300 \cdot \left[1 - \left(\frac{1,01 \cdot 10^5}{3,3 \cdot 10^9} \right)^{\frac{1,25-1}{1,25}} \right] = 3762,2 \text{ кДж/кг.}$$

Полный термодинамический КПД взрыва

$$\eta = \frac{A_u}{Q_{взр}} = \frac{3762,2}{4300} = 0,875$$

или $\eta = 87,5\%$

4.5.3. Баланс энергии при взрыве ВВ

На рис. 4.2 приведен баланс энергии при взрыве ВВ. Наибольший уровень соответствует потенциальной химической энергии ВВ (E_n). **Химические потери** обусловлены неполнотой взрывчатого превращения компонентов ВВ и частичным разбросом непрореагировавшего ВВ.

Полная фактическая тепловая энергия ($Q_{взр}$) меньше потенциальной энергии ВВ на величину химических потерь $q_{хим}$, которые составляют (3÷5%):

$$Q_{взр} = E_n - q_{хим} = (0,95 \div 0,97) E_n . \quad (4.29)$$

Полная фактически выделившаяся энергия взрыва – идеальная работоспособность ВВ (A_u) меньше полной тепловой энергии на величину т.н. **термодинамических потерь** q_t , включающих нагрев разрушаемой среды и остаточную энергию в ПВ (свечение газов)

$$A_u = Q_{\text{взр}} - q_T = \eta \cdot Q_{\text{взр}}. \quad (4.30)$$

Здесь η – термодинамический КПД, составляющий для промышленных ВВ $\approx 70 \div 85\%$, т.е. q_T составляют $15 \div 30\%$.

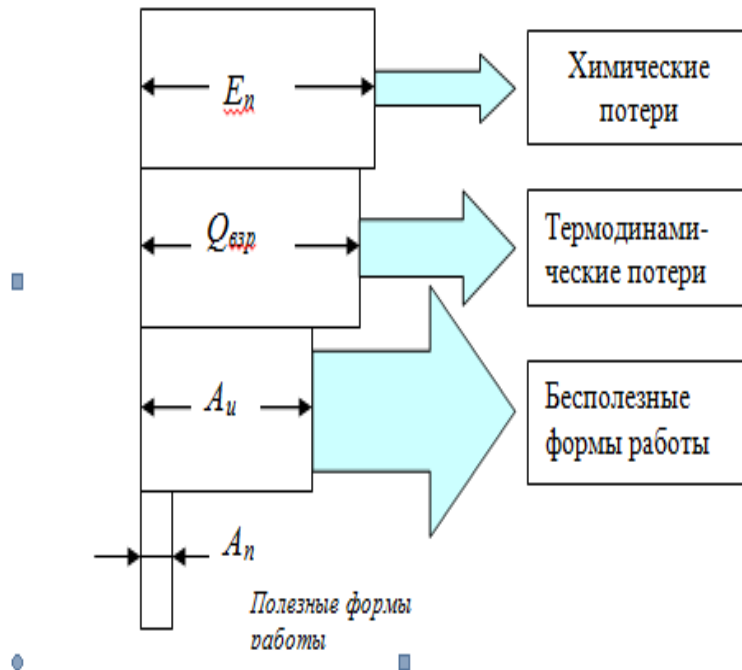


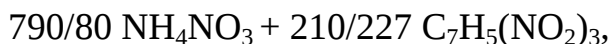
Рис. 4.2. Схема баланса энергии взрыва ВВ (по А.Ф.Беляеву)

Полная фактическая (идеальная) работа расходуется на различные формы бризантного и фугасного действия взрыва. В зависимости от цели взрывных работ, часть энергии расходуется на бесполезные формы работы. Например, при взрывных работах на карьерах с целью взрывного дробления (разрушения) горных пород (полезного ископаемого) для дальнейшего передела (обогащения) происходит переизмельчение породы, ее перемещение и разброс, что составляет бесполезные формы работы ВВ.

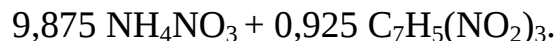
Оценка полезной формы работы (A_n) теоретически и практически затруднительна. Величина полезного КПД взрыва по разным оценкам изменяется от долей процента до 10–15%.

Пример 4.6. Рассчитать основные термодинамические характеристики граммонита 79/21 (для 1 кг ВВ). Состав ВВ: аммиачная селитра – 79 % , тротил – 21 %, плотность заряжания $\Delta = 850 \text{ кг/м}^3$.

1. С учетом процентного содержания компонентов составляем левую часть уравнения реакции взрывчатого превращения ВВ:



откуда



2. Определение условной (брутто) формулы ВВ:

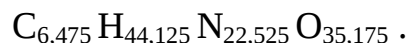
$$\Sigma C = 0,925 \cdot 7 = 6,475;$$

$$\Sigma H = 9,875 \cdot 4 + 0,925 \cdot 5 = 44,125;$$

$$\Sigma N = 9,875 \cdot 2 + 0,925 \cdot 3 = 22,525;$$

$$\Sigma O = 9,875 \cdot 3 + 0,925 \cdot 6 = 35,175,$$

откуда получаем брутто–формулу для граммонита 79/21 следующего вида:



3. Проверка суммарной массы по брутто–формуле ВВ

$$\Sigma M_{\text{ВВ}} = 6,475 \cdot 12 + 44,125 \cdot 1 + 22,525 \cdot 14 + 35,175 \cdot 16 = 999,975 \approx 1000 \text{ г.}$$

4. Определение кислородного баланса

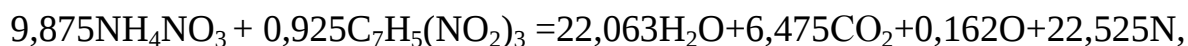
$$K_{\text{O}} = \frac{\left[35,175 - \left(2 \cdot 6,475 + \frac{44,125}{2} \right) \right] \cdot 16}{1000} \cdot 100 = +0,26\%.$$

и кислородного коэффициента

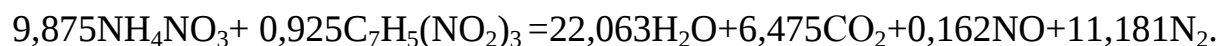
$$\alpha_{\text{K}} = \frac{35,175}{2 \cdot 6,475 + 0,5 \cdot 44,125} = 1,005 \approx 1,0.$$

5. Составление правой части реакции взрывного разложения.

Так как кислородный баланс граммонита 79/21 положительный то весь углерод окисляется в углекислый газ CO_2 , а водород в воду H_2O и выделяется кислород, который взаимодействует с азотом с образованием окислов азота, например, NO :



откуда получаем реакцию взрывного разложения граммонита 79/21



6. Проверка суммарной массы продуктов взрыва (ПВ):

$$\Sigma M_{\text{ПВ}} = 22,063 \cdot 18 + 6,475 \cdot 44 + 0,162 \cdot 30 + 11,181 \cdot 28 = 999,976 \approx 1000 \text{ г.}$$

7. Расчет энергии, выделяющейся при взрыве 1 кг ВВ (теплоты взрыва).

В соответствии с законом Гесса $Q_{\text{взр}} = Q_{\text{ПВ}} - Q_{\text{ВВ}}$.

7.1. Определяется суммарная теплота образования продуктов взрыва (воды в парообразном состоянии, углекислого газа, окиси азота):

$$Q_{\text{ПВ}} = 22,063 \cdot 240,6 + 6,475 \cdot 395,6 + 0,162 \cdot (-90,4) = 7855,223 \text{ кДж/кг.}$$

7.2. Определяется суммарная теплота образования компонентов ВВ (тротила и аммиачной селитры):

$$Q_{\text{ВВ}} = 9,875 \cdot 354,8 + 0,925 \cdot 56,5 = 3555,913 \text{ кДж/кг.}$$

7.3. Теплота взрыва 1 кг граммонита 79/21 равна

$$Q_{\text{взр}} = 7855,223 - 3555,913 = 4299,31 \text{ кДж/кг или } 1026,09 \text{ ккал/кг.}$$

8. Определение объема газообразных продуктов взрыва:

$$V_{\text{ПВ}} = \frac{22,4 \cdot (22,483 + 6,475 + 0,162 + 11,181)}{1000} = 0,903 \text{ м}^3/\text{кг.}$$

9. Определение температуры продуктов взрыва (температуры взрыва).

9.1. Определение значения коэффициента $\sum n_i a_i$ для продуктов взрыва:

$$\sum n_i a_i = 22,063 \cdot 16,76 + 6,475 \cdot 41,1 + 0,162 \cdot 20,1 + 11,181 \cdot 20,1 = 863,893.$$

9.2. Определение значения коэффициента $\sum n_i b_i$ для продуктов взрыва

$$\sum n_i b_i = (22,063 \cdot 90,1 + 6,475 \cdot 24,3 + 0,162 \cdot 18,86 + 11,181 \cdot 18,86) 10^{-4} = 2359,148 \cdot$$

$$10^{-4}, \sum n_i b_i \approx 0,236$$

Откуда

$$T = \frac{-863,893 + \sqrt{(863,893)^2 + 4000 \cdot 0,236 \cdot 4299,31}}{2 \cdot 0,236} = 2813,78 \text{ }^\circ\text{C.}$$

10. Определение давления газообразных продуктов взрыва:

$$P = \frac{1,01 \cdot 10^5 \cdot 0,903 \cdot (2813,78 + 273) \cdot 850}{273 \cdot (1 - 0,001 \cdot 0,903 \cdot 850)} = 3,771 \cdot 10^9 \text{ Па.}$$

11. Определение идеальной работоспособности ВВ:

$$A_u = 4299,31 \cdot \left[1 - \left(\frac{1,01 \cdot 10^5}{3,771 \cdot 10^9} \right)^{\frac{1,25-1}{1,25}} \right] = 3775,74 \text{ кДж/кг.}$$

12. Определение полного термодинамического КПД:

$$\eta = A_u / Q_{\text{exp}} = \frac{3775,74}{4299,31} = 0,878 \approx 88,0\%.$$

5. РАСЧЕТ ДЕТОНАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ

5.1. Общие сведения

Согласно гидродинамической теории детонации ударная волна постоянной амплитуды, распространяясь с постоянной сверхзвуковой скоростью по ВВ, обеспечивает возникновение за ее передним фронтом зоны химического превращения. При этом возникающие диссипативные потери энергии, сопровождающие ударное сжатие ВВ, компенсируются теплотой реакции взрывчатого превращения ВВ.

В теоретических исследованиях принято, что плоский фронт детонационной волны, распространяясь по заряду, сжимает впереди лежащие слои ВВ и вызывает их химическое превращение с образованием продуктов детонации (взрыва). Такой, гомогенный, процесс детонации характерен для однородных бризантных ВВ типа тротил, гексоген, ТЭН и т.п.

Промышленные многокомпонентные смесевые ВВ содержат высокоактивные индивидуальные ВВ (тротил, нитроглицерин, гексоген), взрывчатое превращение которых в детонационной волне происходит с высокими скоростями (5–7 км/с), вещества со слабовыраженными взрывчатыми свойствами (аммиачная и натриевая селитры), разлагающиеся при детонации со скоростью в 3–5 раз меньшей, чем мощные ВВ, а также горючие материалы (алюминий, древесная мука, твердые и жидкие нефтепродукты), которые не обладают взрывчатыми свойствами. Более того, в ВВ используются инертные добавки, не принимающие участия в реакции химического превращения, а лишь меняющие свое агрегатное состояние, переходя из твердого или жидкого состояния в газообразное (например, пламегасители в предохранительных ВВ, вода в водосодержащих ВВ и др.).

Очевидно, что механизм детонации многокомпонентных промышленных ВВ отличается от гомогенного и их взрывчатое превращение происходит в несколько стадий. Разработка теории детонации грубодисперсных многокомпонентных смесевых ВВ продолжается и в настоящее время.

В общем виде скорость детонации ВВ определяется соотношением, постулированным Е. Жуге и доказанным позднее Я.Б. Зельдовичем:

$$D = u + c, \quad (5.1)$$

где u – массовая скорость продуктов детонации за ударным фронтом;

c – местная скорость звука в продуктах детонации (ПД).

5.2. Расчет скорости детонации ВВ

Для расчета скорости детонации в инженерной практике используют различные приближенные методы, основанные на полуэмпирических уравнениях состояния продуктов детонации или на корреляционных зависимостях параметров детонации от каких-либо известных свойств ВВ [2, 3].

При этом для высокоплотных ВВ при расчете используется уравнение состояния продуктов взрыва в виде политропы

$$PV^n = \text{const}, \quad (5.2)$$

где P – давление продуктов взрыва ВВ, Па;

V – объем продуктов взрыва, м³;

n – показатель политропы продуктов взрыва, зависящий от начальной плотности ВВ (табл. 5.1).

Таблица 5.1

n	1,3	1,6	2,2	2,8	3,0	3,2	3,4
Плотность ВВ, т/м ³	0,1	0,25	0,5	0,75	1,0	1,25	1,75

Формула расчета скорости детонации, выраженная через показатель политропы n и теплоту взрыва при постоянном объеме $Q_{взр}$, имеет вид

$$D = 31,56 \sqrt{(n^2 - 1) \cdot Q_{взр}}. \quad (5.3)$$

Полученная для газов, данная формула дает завышенные результаты для конденсированных (твердых) ВВ. Поэтому для приближенной оценки скорости детонации можно воспользоваться выражением

$$D = D'_{эт} \cdot \sqrt{\frac{Q_{ВВ}}{Q_{эт}}}, \quad (5.4)$$

где D – скорость детонации ВВ, м/с;

$D'_{эт}$ – скорость детонации эталонного ВВ при соответствующей плотности заряжания, м/с;

$Q_{ВВ}$ – теплота взрыва ВВ, кДж/кг;

$Q_{эт}$ – теплота взрыва эталонного ВВ, кДж/кг.

Скорость детонации эталонного ВВ (аммонита 6ЖВ), равная 3600 м/с при плотности заряжания 1 г/см³, пересчитывается с учетом реальной плотности заряда ВВ по формуле

$$D'_{эт} = D_{эт} + 3500(\Delta - 1). \quad (5.5)$$

Здесь Δ – плотность заряжания ВВ, г/см³.

Пример 5.1. Определить скорость детонации гранулита игданита при плотности заряжания $\Delta = 0,85$ г/см³. Теплота взрыва – ≈ 3800 кДж/кг (900–920 ккал/кг).

$$D'_{эт} = 3600 + 3500(0,85 - 1) = 3075 \text{ м/с.}$$

По формуле (5.4) рассчитаем скорость детонации гранулита игданита

$$D = 3075 \cdot \sqrt{\frac{3800}{4315}} \approx 2885, \text{ м/с.}$$

Здесь принята энергия взрыва аммонита 6ЖВ, равная 4315 кДж/кг (1030 ккал/кг).

При пневматическом зарядании гранулит игданит имеет плотность зарядания $\Delta = 1,1 \text{ г/см}^3$. Тогда скорость детонации будет равна

$$D'_{\text{эт}} = 3600 + 3500(1,1 - 1) = 3950 \text{ м/с},$$

$$D = 3950 \cdot \sqrt{\frac{3800}{4315}} \approx 3707 \text{ м/с}.$$

Из расчета видно, что при увеличении Δ с 0,85 до 1,1 г/см³ скорость детонации возрастает на 28–29 %. Согласно [2] при увеличении плотности ВВ на 0,1 г/см³ скорость детонации возрастает на 300 – 400 м/с.

5.3. Расчет идеальной скорости детонации

Идеальная скорость детонации (максимально возможная при заданной плотности ВВ) может быть определена по формуле, предложенной китайскими исследователями [7, 8]:

$$D_u = 2641 + 3,231 \cdot \Delta \cdot \sqrt{\omega}, \text{ м/с}, \quad (5.6)$$

где Δ – плотность ВВ, г/см³,

ω – так называемое *характеристическое произведение теплоты взрыва на объем ПВ*, предложенное Бертло (1883 г.) для оценки эффективности ВВ

$$\omega = Q_{\text{взр}} \cdot V_{\text{ПВ}}, \quad (5.7)$$

где $Q_{\text{взр}}$ – теплота взрыва, ккал/кг;

$V_{\text{ПВ}}$ – объем продуктов взрыва, л.

Теплота взрыва в ккал/кг определяется делением значения $Q_{\text{взр}}$ в кДж/кг на коэффициент 4,19 (механический эквивалент тепловой энергии).

Пример 5.2. Для условий примера 5.1 определить идеальную скорость детонации гранулита игданита. Объем продуктов взрыва равен для игданита $V_{\text{ПВ}} = 0,98 \text{ м}^3/\text{кг}$ или 980 л.

Рассчитывается характеристическое выражение Бертло (5.7):

$$\omega = Q_{\text{взр}} \cdot V_{\text{пв}} = 900 \cdot 980 = 8,82 \cdot 10^5.$$

Откуда идеальная скорость детонации гранулита игданита

$$D_u = 2641 + 3,231 \cdot 0,85 \cdot \sqrt{8,82 \cdot 10^5} = 5220 \text{ м/с}^3.$$

5.4. Расчет детонационного давления (давление в точке Чепмена–Жуге)

Величина детонационного давления (давление в точке Чепмена–Жуге) определяется по формуле

$$P_{\text{жс}} = \frac{\Delta \cdot D^2}{n + 1} \cdot 10^{-3}, \text{ МПа.} \quad (5.8)$$

Для условия $n = 3$, характерного для большинства конденсированных ВВ,

$$P_{\text{жс}} = 2,5 \cdot 10^{-4} \cdot \Delta \cdot D^2, \quad (5.9)$$

где $P_{\text{жс}}$ – детонационное давление, МПа;

D – скорость детонации ВВ, м/с;

Δ – плотность ВВ, г/см³.

Давление в ударной волне связано с ее скоростью (D) и массовой скоростью (u) соотношением

$$P_{\text{жс}} = D \cdot \Delta \cdot u. \quad (5.10)$$

Откуда массовая скорость определяется:

$$u = \frac{P_{\text{жс}}}{\Delta \cdot D} \cdot 10^{-3}, \text{ м/с.} \quad (5.11)$$

По известному значению массовой скорости (u) рассчитывают показатель политропы

³ В проведенном американскими исследователями уникальном взрыве ANFO диаметром 5,5 м и массой заряда около 109 т идеальная скорость детонации не была достигнута. Измеренная величина скорости детонации составила 4,74 км/с, тогда как расчетная величина D_u равна 5,3 км/с.

$$n = \frac{D}{u} - 1. \quad (5.12)$$

Пример 5.3. Для условий примера 5.1 рассчитать детонационное давление для гранулита игданита:

$$P_{жс} = 2,5 \cdot 10^{-4} \cdot \Delta \cdot D^2 = 2,5 \cdot 10^{-4} \cdot 0,85 \cdot 2885^2 = 1770 \text{ МПа}.$$

В табл. 5.2 приведены значения детонационного давления для различных видов ВВ.

Таблица 5.2

Тип ВВ	Плотность, г/см ³	Средняя скорость детонации, м/с	Детонационное давление, МПа
По данным компании Nitro Nobel Ltd			
Динамиты (Dynamex M)	1,4	4700	7700
ЭВВ (Emulit-150)	1,2	5000	7500
ANFO (AC-ДТ) (Prillit A)	0,85	3000	2000
Пенталит (PENT)	1,6	8000	25600
Расчетные значения			
ВВВ	1,45	5000	9000
Скальный аммонит №1	1,5	6000	13500
Тротил (литой)	1,66	7000	20300
Гексоген	1,81	8800	35000

Характеристическое произведение Бергло (ω) может быть использовано для расчета детонационного давления :

$$P_{\partial} = 1596 + 9,378 \cdot 10^{-3} \cdot \Delta^2 \cdot \omega, \text{ МПа}. \quad (5.13)$$

Пример 5.4. Для условий примера 18 и 19 по формуле (5.13) определить детонационное давление:

$$P_{\partial} = 1596 + 9,378 \cdot 10^{-3} \cdot 0,85^2 \cdot 900 \cdot 980 = 7572 \text{ МПа}.$$

5.5. Расчет плотности продуктов взрыва в детонационной волне

Плотность продуктов взрыва в детонационной волне определяется по формуле

$$\rho_{\text{пв}} = \frac{n+1}{n} \cong \frac{4}{3} \rho_{\text{вв}} \quad (5.14)$$

5.6. Расчет скорости разлета ПВ

Массовая скорость движения продуктов взрыва за фронтом детонации определяется выражением

$$u = \frac{D}{n+1}, \text{ м/с.} \quad (5.15)$$

Здесь n – показатель политропы.

Известно, что для большинства бризантных ВВ $n = 3$, откуда

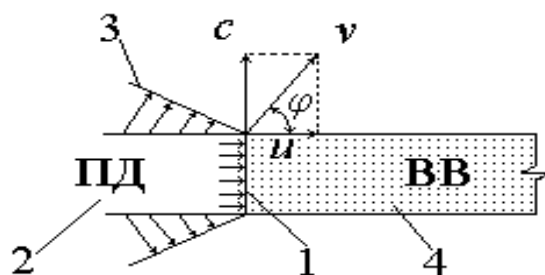
$$u \cong \frac{D}{4}, \text{ м/с.} \quad (5.16)$$

При взрыве в воздухе открытого заряда продукты детонации, не встречая заметного сопротивления, начинают интенсивно расширяться.

При распространении детонации по достаточно длинному заряду направление максимальной плотности потока в детонационной волне (направление перемещения частиц с массовой скоростью u) и разлетающиеся в перпендикулярном оси (поверхности) заряда направлении со скоростью звука продукты взрыва определяют некоторый угол φ результирующей скорости движения ПВ (рис. 5.1).

Скорость разлета ПВ из поверхностного слоя заряда, направленная перпендикулярно к оси заряда, определяется выражением

$$C = \frac{2 \cdot n \cdot D_u}{n^2 + 1}, \text{ м/с.} \quad (5.17)$$



1 – фронт детонации; 2 – продукты детонации; 3 – фронт расширяющихся продуктов детонации; 4 – взрывчатое вещество

Рис. 5.1. Схема движения продуктов детонации при взрыве прямолинейного открытого заряда ВВ

Тогда можно принять

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{u}{c}, \text{ или } \operatorname{tg} \varphi = \frac{n-1}{2n} \quad (5.18)$$

Для конденсированных ВВ $n=3$, откуда $\operatorname{tg} \varphi = \frac{1}{n} = \frac{1}{3}$, что соответствует углу $\varphi = \operatorname{arctg} \frac{1}{3} = 18^\circ 43'$.

Пример 5.5. Для условий примера 5.5 определить массовую скорость молекул в направлении распространения детонации и во фронте расширения ПВ:

$$u = \frac{D}{4} = \frac{2885}{4} = 721,25 \text{ м/с.}$$

Скорость молекул ПВ во фронте расширения ПВ

$$v = \frac{u}{\sin \varphi} = \frac{721,25}{0,316} = 2281,14 \text{ м/с.}$$

6. РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ СОСРЕДОТОЧЕННЫХ ЗАРЯДОВ ВЫБРОСА

6.1. Общие положения

Заряды выброса (взрывы на выброс) используются при строительстве гидротехнических и гидромелиоративных объектов: каналов, траншей, котлованов; при строительстве выемок под земляное полотно автомобильных и железных дорог; въездных траншей на карьерах.

Взрывы на выброс в зависимости от конструкции заряда ВВ принято подразделять на следующие виды:

- взрывание сосредоточенных зарядов ВВ, размещенных в зарядных камерах, пройденных из шурфов, либо штолен;
- взрывание скважинных зарядов, в т.ч. котловых;
- взрывание удлиненных зарядов ВВ (линейно–протяженные штольневые или траншейные заряды), которые подразделяются на:
 - а) траншейные заряды, применяемые для строительства каналов и котлованов в грунтах I–IV категории по СНиП;
 - б) щелевые заряды, применяемые для строительства каналов и котлованов глубиной до 5 м в грунтах до IV категории СНиП, в мерзлых грунтах;
 - в) штольневые заряды, применяемые для строительства каналов и котлованов в полускальных и скальных грунтах.

При расчете сосредоточенных зарядов выброса принимается, что форма воронки выброса (выброса и разрушения) конусообразная. На практике такое допущение не приводит к грубым ошибкам в расчетах.

Объем такой воронки (объем конуса) определяется по формуле

$$V = \frac{1}{3} \pi \cdot r^2 \cdot W, \text{ м}^3, \quad (6.1)$$

где r – радиус воронки выброса, м;

W – ЛНС, глубина заложения заряда ВВ, м

При значении угла раствора при вершине $2\alpha = 90^\circ$ воронка выброса называется нормальной и в этом случае

$$r = W ,$$

откуда, принимая, что $\pi \approx 3$,

$$V = W^3 . \quad (6.2)$$

Отношение $\frac{r}{W}$ называется показателем действия взрыва

$$n = \frac{r}{W} = \operatorname{tg} \alpha . \quad (6.3)$$

Здесь α – угол полураствора воронки выброса, град.

Значения $n > 1$, $r > W$, $2\alpha \geq 90^\circ$ определяют параметры воронки усиленного выброса, при $n < 1$, $r < W$, $2\alpha < 90^\circ$ – воронки уменьшенного выброса. При $n < 0,75$ показатель действия взрыва теряет физический смысл, так как в этом случае видимая воронка не образуется.

6.2. Расчет массы ВВ сосредоточенного заряда выброса

Масса заряда ВВ нормального выброса определяется формулой

$$Q = q_n \cdot W^3 , \text{ кг}, \quad (6.4)$$

где q_n – расчетный удельный расход ВВ для нормальной воронки выброса, кг/м³.

Для количественной оценки действия взрыва зарядов может быть использован т.н. коэффициент относительной массы заряда N_q , который равен отношению массы данного заряда q_n к массе заряда нормального действия q_n при одной и той же величине ЛНС:

$$N_q = \frac{q_n}{q_n} . \quad (6.5)$$

Здесь принято, что удельный расход ВВ на образование нормальной воронки выброса ($r=W$, $2\alpha=90^\circ$, $n=1$) для каждой породы является величиной постоянной.

В табл. 6.1 приведена классификация зарядов ВВ по наружному действию взрыва в зависимости от величины коэффициента относительной массы.

Таблица 6.1

Коэффициент относительной массы заряда N_q	Вид заряда
$N_q \geq 1$ $N_q > 1$ $N_q = 1$	Заряд выброса Усиленного выброса Нормального выброса
$0,2 \leq N_q \leq 1$	Рыхление
$0,35 \leq N_q \leq 1$	Усиленного рыхления (уменьшенного выброса)
$N_q = 0,35$	Нормального рыхления
$0,2 \leq N_q \leq 0,35$	Уменьшенного рыхления
$N_q \leq 0,2$	Заряд камуфлета

Установлено, что при уменьшении или увеличении заряда нормального выброса (принятого за эталон) соответственно уменьшается или увеличивается показатель действия взрыва. При сравнении расчетных данных и экспериментальных получено, что разрушение породы при $n < 1$ происходит с меньшими удельными расходами ВВ, а при $n > 1$ – с существенно большими по сравнению со стандартными удельными расходами.

Для учета влияния показателя действия взрыва в расчетную формулу массы заряда ВВ вводится функция показателя действия взрыва $f(n)$

$$Q = f(n) \cdot q_n \cdot W^3, \quad (6.6)$$

при $n > 1$ $f(n) > 1$;

при $n = 1$ $f(n) = 1$;

при $n < 1$ $f(n) < 1$.

В настоящее время из большого числа предложенных выражений для $f(n)$ наиболее часто используется формула М.М. Борескова:

$$f(n) = 0,4 + 0,6 \cdot n^3. \quad (6.7)$$

Откуда

$$Q = (0,4 + 0,6 \cdot n^3) \cdot q_n \cdot W^3. \quad (6.8)$$

На практике часто при взрывании на выброс значение показателя действия взрыва n принимают в пределах 1,5–3,0. В табл. 6.2 приведены значения функции показателя действия взрыва при $n = 1 \div 3$.

Таблица 6.2

n	1	1,25	1,5	1,75	2,0	2,25	2,5	2,75	3,0
$0,4 + 0,6 \cdot n^3$	1,0	1,57	2,43	3,62	5,2	7,23	9,78	12,9	16,6

Величины расчетных удельных расходов ВВ (q_n) для взрывания на выброс приведены в табл. 6.3.

При значениях ЛНС более 25 м формула М.М. Борескова дает заниженные результаты величин зарядов ВВ. Поэтому для условий взрывания при $W > 25$ м вводится, предложенная проф. Г.Н. Покровским, поправка $\sqrt{\frac{W}{25}}$, откуда

$$Q = (0,4 + 0,6 \cdot n^3) \cdot q_n \cdot W^3 \cdot \sqrt{\frac{W}{25}}, \text{ кг.} \quad (6.9)$$

Введение такого поправочного коэффициента обусловлено необходимостью придать массе выбрасываемого грунта скорость, достаточную для его выброса за пределы контура воронки взрыва.

Таблица 6.3

Величина расчетного удельного расхода взрывчатого вещества
(для аммонита 6ЖВ)

Наименование породы	Группа (категория) грунтов и пород по СНиП	Коэфф. крепости f по проф. М.М.Прото- дьяконову	Средний объемный вес породы, кг/м ³	Расчетный удельный расход ВВ, кг/м ³	
				для зарядов рыхления, q	для зарядов выброса, q_n
Песок	I	–	1500	–	1,6–1,8
Песок плотный или влажный	I–II	–	1650	–	1,3–1,3
Суглинок тяжелый	II	–	1750	0,35–0,4	1,2–1,5
Глина ломовая	III	–	1950	0,35–0,45	1,0–1,4
Лесс	III–IV	–	1700	0,3–0,4	0,9–1,2
Мел, выщелоченный мергель	IV–V	0,8–1,0	1850	0,25–0,3	0,9–1,2
Гипс	IV	1,0–1,5	2250	0,35–0,45	1,1–1,5
Известняк–ракушечник	V–VI	1,5–2,0	2100	0,35–0,6	1,4–1,8
Опока, мергель	IV–VI	1,0–1,5	1900	0,3–0,4	1,0–1,3
Туфы трещиноватые, плотные, тяжелая пемза	V	1,5–2,0	1100	0,35–0,5	1,2–1,5
Конгломерат, брекчии на известковом и глинистом цементе	IV–VI	2,3–3,0	2200	0,35–0,45	1,1–1,4
Песчаник на глинистом цементе, сланец глинистый, слюдястый, серицитовый мергель	VI–VII	3–6	2200	0,4–0,5	1,2–1,6
Доломит, известняк, магнезит, песчаник на известковом цементе	VII–VIII	5–6	2700	0,4–0,5	1,2–1,8
Известняк, песчаник, мрамор	VII–IX	6–8	2800	0,45–0,7	1,2–2,1
Гранит, гранодиорит	VII–X	6–12	2800	0,5–0,7	1,7–2,1
Базальт, диабаз, андезит, габбро	IX–XI	6–18	3000	0,6–0,75	1,7–2,2
Кварцит	X	12–14	3000	0,5–0,6	1,6–1,9
Порфирит	X	16–20	2800	0,7–0,75	2,0–2,2

Примечание. В случае применения других ВВ приведенные в табл. 6.3 значения q и q_n следует умножить на переводной коэффициент работоспособности применяемого ВВ.

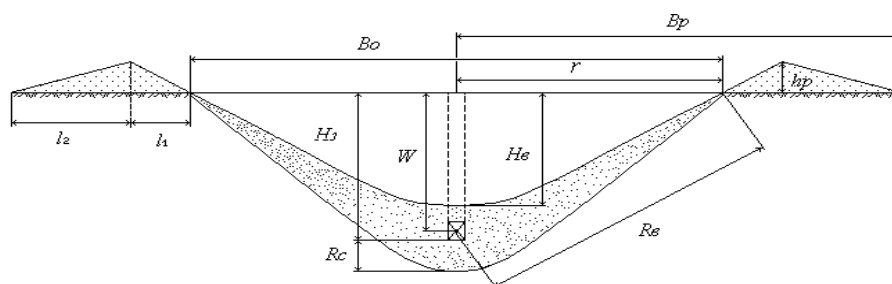
Значения поправки на глубину расположения зарядов приведены в табл. 6.4.

Таблица 6.4

W	25	30	35	40	50
$\sqrt{W/25}$	1,0	1,09	1,18	1,27	1,41

6.3. Расчет основных параметров воронки выброса

Основные параметры воронки выброса приведены на рис. 6.1.



H_g – видимая глубина воронки выброса; R_c – величина сжатия грунта; R_g – радиус действия взрыва; B_o – диаметр воронки выброса; W – ЛНС; r – радиус воронки выброса; B_p – ширина развала; h_p – высота развала; H_z – глубина заложения заряда ВВ

Рис. 6.1. Параметры воронки выброса

Радиус воронки выброса

$$r = n \cdot W. \quad (6.10)$$

Ширина выемки поверху

$$B_o = 2nW. \quad (6.11)$$

Радиус действия взрыва

$$R_g = W\sqrt{1+n^2}. \quad (6.12)$$

При взрыве на выброс рассчитывается видимая глубина воронки выброса (фактическая глубина без учета обратно упавшего грунта).

Для нескальных пород и грунтовых массивов

$$H_g = \alpha \cdot W \cdot (2n - 1), \text{ м}, \quad (6.13)$$

где α – эмпирический коэффициент, учитывающий условия производства взрывов на выброс:

- для нескальных пород $\alpha = 0,33$;
- для водонасыщенных грунтов – глины, суглинки, $\alpha = 0,45$.

Для скальных пород:

при $n < 2$

$$H_{\varepsilon} = 0,33 \cdot W \cdot (2n - 1); \quad (6.14)$$

при $n > 2$

$$H_{\varepsilon} = W(0,135n + 0,8). \quad (6.15)$$

Фактическая глубина воронки выброса, без учета обратно упавшего грунта, определяется выражением

$$H_{\phi} = W + R_c, \quad (6.16)$$

здесь R_c – радиус сферы сжатия (камуфлетной полости), определяемый выражением

$$R_c = 0,0623 \sqrt{\Pi_{np} \cdot Q}, \quad (6.17)$$

где Π_{np} – показатель простреливаемости пород, принимаемых по данным табл. 6.5, дм³/кг;

Q – масса сосредоточенного заряда выброса, кг.

Максимальная ширина развала породы от оси воронки до конца развала

$$B_p = 5 \cdot n \cdot W, \text{ м.} \quad (6.18)$$

Средняя высота навала взорванной породы оценивается по формуле

$$h_{cp} = 0,5 H_{\varepsilon}, \text{ м.}$$

Крутизна навала по бортам выемки определяется для внутреннего откоса как 1:1,3, для обратного откоса навала приблизительно 1:4÷1:5 и определяется по величине B_p .

Таблица 6.5

Ориентировочные значения показателя простреливаемости $\Pi_{пр}$

(по данным ЦПЭССЛ ФГУП «Союзвзрывпром»)

Горная порода	Группа грунтов и пород по СНиП	Пределы показателя простреливаемости $\Pi_{пр}$, дм ³ /кг
Глина пластичная моренная	II	900–1400
Глина черная	III	400–600
Глина моренная	III	220–530
Глина желто–бурая жирная	III	220–270
Глина темно–красная жирная	III	170–250
Мергель мягкий трещиноватый	IV	100–170
Мергель мягкий сильно трещиноватый	IV	180–280
Глина ломовая темно–синяя	IV	100–150
Суглинок тяжелый, глина песчанистая	IV	70–190
Мел мягкий, известняк–ракушечник	V	35–65
Мергель средней крепости, доломит мергелистый, известняк мягкий сильно трещиноватый	V–VI	≈20, (большой разброс значений)
Гипс плотный, мелкозернистый, сланцы глинистые крепкие, гранит сильно трещиноватый, фосфориты средней крепости, силициды, известняки средней трещиноватости	VI–VIII	3–15
Гранит средней трещиноватости, кварциты плотные железистые, кварциты плотные серые, апатито–нефелиновая руда, известняк плотный, змеевики с включением асбеста, песчаник, доломит	VII–IX	2–10
Роговики, скарны, мрамор, кремль пластовый, известняки крепкие, гранит крупнозернистый и среднезернистый, фосфориты крепкие, доломит крепкий	VII–XI	0,2–5

При строительстве протяженных выемок заряды выброса располагаются по оси строящейся выработки. Расстояние между зарядами выброса a в ряду определяется по формуле

$$a = 0,55W(n + 1), \text{ м}, \quad (6.19)$$

что соответствует значениям, приведенным в табл. 6.6.

Число зарядов выброса (шурфов) по длине выемки $l_{выр}$ при их однорядном расположении определяем по формуле

$$N_{зар} = \frac{l_{выр}}{a}. \quad (6.20)$$

Таблица 6.6

n	2,0	2,5	3,0
a	1,6W	2,0W	2,2W

6.4. Расчет необходимого объема зарядной камеры для сосредоточенного заряда выброса

Обычно сосредоточенные заряды выброса располагаются в камерах, пройденных из шурфов или штолен.

Форма камер и размеры их поперечного сечения устанавливаются проектом. В зависимости от величины заряда ВВ и условий залегания горных пород она может быть кубической, в виде параллелограмма или фигурной.

Подводящие выработки к зарядным камерам должны иметь сечение в свету не менее: для шурфов – 1 м² (1,0×1,0); для штолен – 1,2 м² (1,5×0,8). Устье шурфа должно быть закреплено сплошной венцовой крепью на глубину не менее 3 м. Зарядные камеры должны сопрягаться с шурфами.

Заряды выброса массой до 5 т обычно располагают в камерах кубической формы. Размеры сторон кубической камеры определяют по формуле

$$h_k = \sqrt[3]{V_k}, \quad (6.21)$$

где V_k – требуемый объем зарядной камеры, м³.

Глубина шурфов определяется по формуле

$$l_u = W + \frac{h_k}{2}, \text{ м.} \quad (6.22)$$

Требуемый объем зарядной камеры вчерне рассчитывается по формуле

$$V_k = k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot \frac{Q}{\Delta}, \quad (6.23)$$

где k_1 – поправочный коэффициент на крепление камеры, равный отношению сечения камеры в черне к сечению камеры в свету. Для камер, проходимых без крепления, $k_1=1$; с использованием сплошного крепления – $k_1=1,45$;

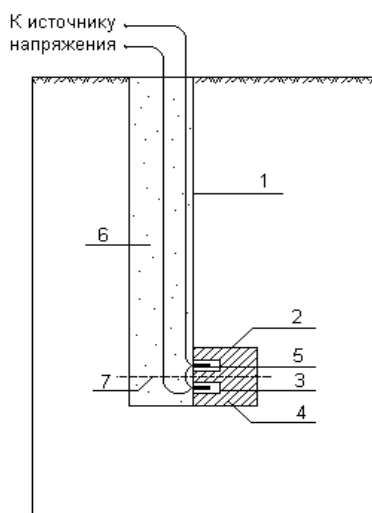
k_2 – поправочный коэффициент на тару ВВ, изменяющийся от 1,1–1,4. Для ВВ, заряжаемых россыпью, $k_2=1$; для ВВ в мешках $k_2=1,3$;

k_3 – коэффициент резерва, учитывающий наличие в камере участков, труднодоступных для заряжания, $k_3=1,1\div 1,2$;

Q – расчетная масса сосредоточенного заряда выброса, т;

Δ – плотность заряжания. Для условий заряжания ВВ россыпью (граммониты, гранулиты, аммониты) принимается $\Delta=0,8\div 0,85$ т/м³.

На рис. 6.2 приведена схема расположения сосредоточенного заряда в камере, пройденной из шурфа.



1 – шурф; 2 – зарядная камера; 3 – боевик; 4 – заряд ВВ; 5 – ЭД; 6 – забойка; 7 – проектный контур выемки по дну

Рис. 6.2. Схема расположения сосредоточенного заряда в камере, пройденной из шурфа

На рис. 6.3 приведена схема построения профиля воронки выброса при взрывании в суглинках.

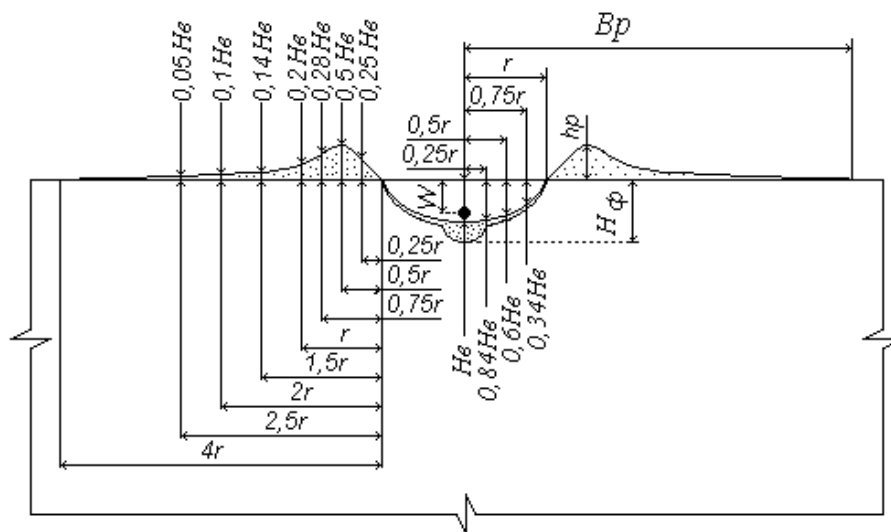


Рис. 6.3. Параметры воронки выброса
(построение профиля воронки выброса)

Пример 6.1. Взрывом сосредоточенных шурфовых зарядов на выброс требуется образовать выемку длиной 50 м и шириной поверху 16 м. Необходимо определить массу сосредоточенного заряда ВВ, параметры воронки выброса, расстояние между зарядами выброса и их общее количество, общий расход ВВ. Глубина заложения шурфового заряда $W = 4$ м в песчаниках VII категории по СНиП.

По табл. 6.2 определяем удельный расход нормального выброса для песчаника VII категории по СНиП:

$$q_n = 1,3 \div 1,7, \text{ кг/м}^3,$$

принимаем $q_n = 1,5 \text{ кг/м}^3$.

Определяем показатель действия взрыва

$$n = \frac{8}{4} = 2.$$

Масса заряда усиленного выброса для $n = 2$

$$Q = (0,4 + 0,6n^3) \cdot q_n \cdot W^3 = (0,4 + 0,6 \cdot 2^3) \cdot 1,5 \cdot 4^3 = 540 \text{ кг}.$$

Радиус воронки усиленного выброса

$$r_{\epsilon} = n \cdot W = 2 \cdot 4 = 8 \text{ м.}$$

Видимая глубина воронки при усиленном выбросе $n = 2$

$$H_{\epsilon} = W(0,135 \cdot 2 + 0,8) = 4,28 \text{ м.}$$

Рассчитываем радиус сферы сжатия грунта

$$R_c = 0,062 \sqrt[3]{\Pi_{np} \cdot Q}.$$

Для песчаника (см. табл.5.5) $\Pi_{np} = 7 \div 10 \text{ дм}^3/\text{кг}$, в расчете принимаем $\Pi_{np} = 8 \text{ дм}^3/\text{кг}$.

Откуда

$$R_c = 0,062 \cdot \sqrt[3]{8 \cdot 540} = 1,01 \text{ м.}$$

Фактическая глубина воронки выброса

$$H_{\phi} = 4 + 1,01 \approx 5,0 \text{ м.}$$

Ширина развала взорванной породы

$$B_p = 5 \cdot 2 \cdot 4 = 40 \text{ м.}$$

Расчетная средняя высота навала взорванной породы

$$h_p = 0,5 \cdot 4,3 = 2,15 \text{ м.}$$

Определяем расстояние между зарядами выброса:

$$a = 0,55 \cdot 4(2 + 1) = 6,6 \text{ м.}$$

Определяем число шурфов (зарядов выброса) по длине выемки:

$$N_{зар} = \frac{50}{6,6} = 7,6.$$

Принимаем 8 шурфовых зарядов выброса.

Общий расход ВВ составит

$$Q_{ВВ} = 540 \cdot 8 = 4320 \text{ кг.}$$

Определяем необходимый объем зарядной камеры без крепления

($k_1 = 1$) для размещения заряда граммонита 79/21, россыпью $k_2 = 1,1$:

$$V_K = 1 \cdot 1,1 \cdot 1,2 \cdot \frac{540}{800} = 0,89 \text{ м}^3,$$

Определяем размер стороны зарядной камеры кубической формы:

$$h_k = \sqrt[3]{0,89} = 0,96 \approx 1 \text{ м.}$$

Определяем глубину заложения шурфа:

$$l_{ш} = 4 + \frac{h_k}{2} = 4,5 \text{ м.}$$

6.5. Самостоятельная работа

Исходные данные для расчета приведены в табл. 6.7. Номер варианта задания соответствует порядковому номеру по журналу посещаемости занятий.

Графическая часть работы включает схему расположения сосредоточенного заряда, параметры воронки выброса и развала взорванной горной массы (см. рис. 6.3). Графическая часть выполняется на миллиметровой бумаге с соблюдением масштаба.

Таблица 6.7

Исходные данные для самостоятельной работы

№ п/п	Тип породы	Категория по СНиП	Тип ВВ	W, м	Показатель действия взрыва	
					п	п
1	2	3	4	5	6	7
1	Известняк	VII	Гранулит игданит	3,5	1,0	2,1
2	Песчаник	VI	Гранулит АС-8	5,0	1,0	2,2
3	Песок влажный	II	Граммонит 79/21	4,5	1,0	2,5
4	Песок	I	Аммонит 6ЖВ	6,0	1,0	2,0
5	Гипс	IV	Гранулит игданит	4,0	1,0	2,5
6	Опока	IV	Граммонит 79/21	5,5	1,0	2,4
7	Песчаник	VII	Гранулит АС-8	3,0	1,0	2,2
8	Сланец	VI	Гранулит игданит	4,5	1,0	2,0
9	Туфы	V	Гранулит игданит	5,5	1,0	2,3
10	Известняк	VI	Гранулит АС-8	3,5	1,0	2,5
11	Лесс	IV	Гранулит М	4,0	1,0	2,0
12	Мел	IV	Гранулит игданит	4,5	1,0	2,4
13	Глины	II	Гранулит М	2,5	1,0	2,6
14	Мергель	IV	Гранулит АС-4	3,5	1,0	2,4
15	Суглинок	II	Гранулит игданит	6,0	1,0	2,5
16	Доломит	VII	Аммонит 6ЖВ	2,5	1,0	2,0
17	Лесс	III	Игданит	4,0	1,0	2,4
18	Мрамор	VII	Гранулит АС-4	4,5	1,0	2,0
19	Глины креп.	III	Гранулит игданит	3,5	1,0	2,5

1	2	3	4	5	6	7
21	Туфы	IV	Аммонит 6ЖВ	3,0	1,0	2,5
22	Сланец	VII	Гранулит игданит	4,0	1,0	2,0
23	Конгломерат	IV	Аммонит 6ЖВ	3,5	1,0	1,8
24	Мергель	VI	Гранулит игданит	6,0	1,0	2,0
25	Суглинок	II	Гранулит М	5,0	1,0	2,4
26	Известняк	VIII	Гранулит АС-4	4,5	1,0	1,8
27	Порфирит	X	Граммонит 79/21	4,0	1,0	2,0
28	Гранит	VIII	Аммонит 6ЖВ	5,5	1,0	1,8
29	Базальт	IX	Граммонит 30/70	4,5	1,0	2,2
30	Андезит	VIII	Граммонит 50/50	5,0	1,0	2,0

7. РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ БУРОВЗРЫВНЫХ РАБОТ ПРИ СКВАЖИННОЙ ОТБОЙКЕ НА КАРЬЕРАХ

7.1. Общие сведения

В соответствии с «Техническими правилами ведения взрывных работ на дневной поверхности» под расчетом зарядов ВВ понимается определение всех параметров (вес, форма, глубина заложения заряда, взаимное расположение зарядов, перебур, длина забойки, расчетный удельный расход ВВ и т.п.), обеспечивающих техническое решение задачи, поставленной перед взрывом.

При производстве взрывных работ используются различные методы ведения взрывных работ: шпуровыми, котловыми, камерными и малокамерными, скважинными и другими зарядами. Наиболее широко на горных предприятиях на открытых горных работах и в строительстве применяется метод скважинных зарядов.

Метод скважинных зарядов при взрывании на карьерах является основным и наиболее распространенным. Для разрушения массива породы заряды ВВ размещаются в вертикальных или наклонных скважинах диаметром 100÷360 мм и глубиной 5÷20 и более м. На уступе скважины располагают в один (однорядное взрывание), два и более рядов (многорядное взрывание).

Расположение скважин на уступах карьеров характеризуется следующими параметрами: диаметр скважины (заряда) $d_{скв}$; высота уступа H , м; сопротивление по подошве (СПП) W , м; расстояние между скважинами в ряду a , м; расстояние между рядами b , м; безопасное расстояние до верхней бровки уступа C , м; длина (глубина) скважины $l_{скв}$ м; длина забойки $l_{заб}$, м; длина перебура $l_{пер}$, м; угол откоса уступа α ; угол наклона скважин β (рис. 7.1).

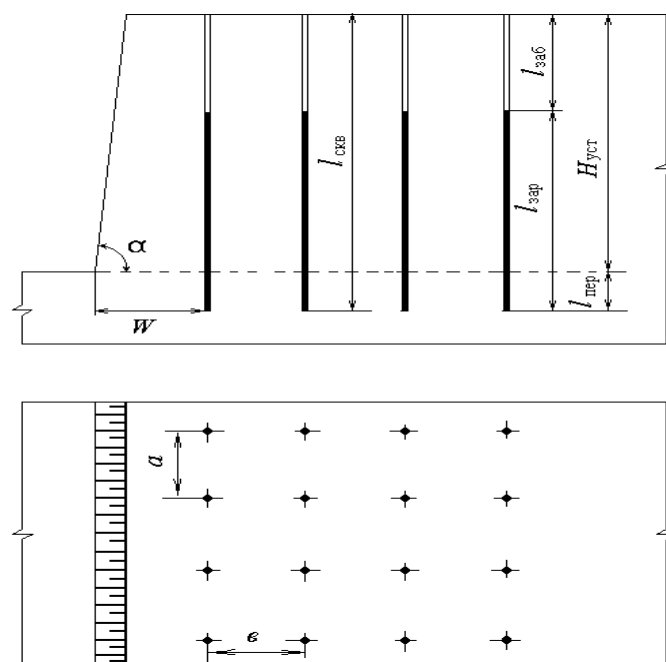


Рис. 7.1. Параметры расположения скважинных зарядов на взрываемом уступе

Массовые взрывы зарядов ВВ на земной поверхности проводятся в соответствии с требованиями и нормами проектирования: «Единых правил безопасности при взрывных работах», «Единых правил безопасности при разработке месторождений полезных ископаемых открытым способом», «Технических правил ведения взрывных работ на дневной поверхности», «Типовой инструкции по безопасному проведению массовых взрывов на земной поверхности», «Правил перевозки опасных грузов автомобильным транспортом», «Инструкции по предупреждению, обнаружению и ликвидации отказавших зарядов взрывчатых веществ на земной поверхности и в подземных выработках» и другими нормативными документами.

На карьерах составляется и утверждается в установленном порядке **Типовой проект производства взрывных работ**, который периодически пересматривается с учетом меняющихся горно–геологических условий разработки и совершенствования технологии ВР.

В типовом проекте приводятся: кратная геологическая характеристика пород месторождения, классификация пород (руд) по взрываемости, типы буровых станков, виды ВВ, способы взрывания, конструкция зарядов, параметры расположения скважин на уступах в зависимости от категории пород, высоты уступа и т.д., расчетные показатели взрыва (удельный расход ВВ, выход горной массы с 1 м скважины, вместимость 1 пог. м скважины, величина забойки, перебура и др.), схемы взрывной сети, интервалы замедления, расчеты зарядов ВВ, расчет сейсмически безопасных расстояний, безопасных расстояний по разлету кусков взорванной горной массы, по действию УВВ, организация ведения взрывных работ и мероприятия по вопросам безопасности.

Массовый взрыв на карьерах выполняется по **проекту массового взрыва**, разрабатываемого для конкретных условий на каждый взрыв на основе Типового проекта.

Для составления технических расчетов и схем расположения скважин на уступе маркшейдерской службой предприятия составляются планы разрабатываемых горизонтов и выкопировки взрываемых блоков в масштабе 1:500 (1:1000), а также профили характерных разрезов блока с указанием свойств пород и руд (трещиноватости, крепости, рудоносности и т.п.). По данным профилей выполняется первичное определение значений СПП, глубины скважины, величины перебура, расстояний между скважинами и их рядами, удаление скважин от верхней бровки уступа, а также производится предварительный расчет зарядов. После бурения скважин на основе маркшейдерской съемки их расположения определяется фактическое значение СПП, глубины скважин и другие параметры и на основании этих данных рассчитывают заряды ВВ по тем же формулам, а после этого составляют (корректируют) проект взрыва.

7.2. Расчет параметров скважинных зарядов

Выбор диаметра скважинных зарядов ВВ

Диаметр вертикальных скважин, при котором обеспечивается нормальная проработка подошвы уступа при заданных высоте и угле откоса уступа, определяется из равенства безопасно допустимого сопротивления по подошве СПП (W_{δ}) и предельно преодолеваемого значения СПП (W_{np})

$$W_{\delta} = W_{np}. \quad (7.1)$$

Величина безопасного расстояния по условиям установки бурового станка на уступе определяется выражением

$$W_{\delta} = H \operatorname{ctg} \alpha + 2,5, \text{ м}, \quad (7.2)$$

где α – угол откоса уступа, град.

Предельно преодолеваемое значение СПП для одиночного скважинного заряда определяется по формуле С.А.Давыдова

$$W_{np} = 53 \cdot K_T \cdot d_{скв} \cdot \sqrt{\frac{\Delta}{K_{ВВ} \cdot \rho}}, \text{ м}. \quad (7.3)$$

С учетом взаимодействия зарядов значение СПП

$$W_{np} = 53 \cdot K_T \cdot d_{скв} \cdot \sqrt{\frac{\Delta}{K_{ВВ} \cdot \rho}} (1,6 - 0,5 \cdot m), \quad (7.4)$$

где K_T – коэффициент, учитывающий трещиноватость взрываемого массива:

– для пород I–II категории трещиноватости по МКВД $K_T = 1,2$;

– для пород категории III $K_T = 1,1$;

– для пород IV–V категории $K_T = 1,0$;

$d_{скв}$ – диаметр скважинного заряда ВВ, м;

$K_{ВВ}$ – коэффициент, учитывающий относительную работоспособность ВВ (табл. 7.2);

ρ – плотность породы, кг/м³;

Δ – плотность заряжения ВВ, кг/м³;

m – коэффициент сближения, $m \leq 1,2$.

Откуда, принимая $m = 1$, получаем

$$d_{скв} = \frac{H \cdot ctg \alpha + c}{53K_T} \cdot \sqrt{\frac{K_{вв} \cdot \rho}{\Delta}}, \text{ м.} \quad (7.5)$$

Известны эмпирические формулы для определения диаметра скважинных зарядов в зависимости от масштаба взрывных работ:

$$d_{скв} \approx 125 \sqrt[4]{P_{год}}, \quad (7.6)$$

или высоты взрывающегося уступа

$$d_{скв} \approx (0,01 \div 0,02)H, \quad (7.7)$$

где $P_{год}$ – годовая производительность карьера, млн. м³.

Опыт ведения буровзрывных работ показывает, что на карьерах с производственной мощностью по горной массе 2-3 млн. м³ в год и более применяются станки СБШ–250МН, СБШ–270И с диаметром применяемых шарошечных долот 244,5 и 269,9 мм. На карьерах средней мощности с $P_{год}$ от 0,5 до 2,0 млн. м³ применяются станки типа 2СБШ–200Н (диаметр долот: 190, 215,9 мм) или станки БТС–150 с шарошечными долотами диаметром 160 мм. На карьерах небольшой производительности в относительно слабых породах используются станки вращательного бурения: СБВ–2, СБР–125, СБР–160, БТС–150, СБР–160Т; в крепких породах – станки ударно–вращательного бурения: СБУ–100, СБУ–125, СБУ–160.

В зависимости от трещиноватости (блочности) массива взрываемых пород при выборе бурового оборудования необходимо руководствоваться следующим.

В породах I–II категории трещиноватости диаметр заряда может выбираться возможно большим – 270÷360 мм. При этом необходимо руководствоваться технологическими соображениями:

производительностью станка, мощностью карьера, устойчивостью пород уступа.

В породах III÷IV категории трещиноватости целесообразно использовать многорядное взрывание скважин диаметром от 200 до 250 мм.

В исключительно крупноблочных породах V категории, а также в породах IV категории при взрывании сложноструктурных, неоднородных массивов, при взрывании на узких рабочих площадках следует применять скважинные заряды уменьшенного диаметра 150÷200 мм.

Зарубежный опыт свидетельствует о высокой эффективности применения в крупноблочных массивах скважин диаметром от 90 до 125 мм. Для бурения таких скважин применяются станки с выносными гидроударниками и с погружными пневмоударниками, которые выпускаются фирмами «Атлас–Копко», «Тамрок», «Гарднер–Денвер» и др.

Выбор типа ВВ

Выбор и обоснование рационального ассортимента промышленных ВВ, как заводского изготовления, так и изготавливаемых на местах, является сложной технико–экономической задачей, исходные данные в которой изменяются по мере развития горных работ на предприятии, совершенствования ассортимента ВВ, а также изменения стоимости ВМ, условий их транспортировки, складирования и т.п.

Основными свойствами массивов, определяющими выбор ВВ, являются прочностные характеристики горных пород – коэффициент крепости по шкале проф. М.М.Протоdjаконова или группа пород по СНиП¹⁾, трещиноватость (блочность) массивов и степень их обводненности.

При использовании неводоустойчивых ВВ для заряжания обводненных скважин возможно применение гидроизолирующих оболочек – полиэтиленовых рукавов. Заряжание в рукава производится на месте

взрывных работ вручную или с использованием пневматических зарядчиков, допущенных для механизированного заряжания скважин.

При зарядании скважин, в т. ч. частично обводненных, возможно применение комбинированных зарядов – в обводненной части скважины с перекрытием на 1–1,5 м применяется водоустойчивое ВВ, а в верхней – неводоустойчивое. При отбойке комбинированными зарядами боевик устанавливается в каждом из ВВ.

В табл. 7.1 приведены ВВ, рекомендуемые для применения на открытых горных разработках.

Таблица 7.1

Условие размещения ВВ	Коэффициент крепости по шкале проф. М.М.Протоdje-яконова, f	Рекомендуемые ВВ	
		заводского изготовления	изготавливаемые на местах ведения взрывных работ
Сухие скважины	До 12	Гранулит М Гранулит АС–4 Гранулит АС–4В Граммонит 82/18 Граммонит 79/21 Гранулит С–6М	Гранулит игданит Гранулит Игданит П Гранулит УП–1 Гранулит УП–2 Гранулит ПС–1, ПС–2 Гранулит Д–5
	Более 12	Аммонит 6ЖВ Гранулит АС–8 Гранулит АС–8В Граммонит 50/50	Акватор Т–20 Ифзанит Т–20 Карботол ГЛ–10 Порэмит 1, 1А
Обводненные скважины	До 12	Гранипор ФМ; БП–1 Грамотол 10; 15; 20 Граммонит РЗ–30ПР Граммонит 79/21 ПР Граммонит 82/18 ПР	Сибирит 1200 Акватор Т–10МС; Т–10ВИ Акванал (Ипконит) Гранэмит И–70
	Более 12	Гранулотол Алюмотол Граммонит 30/70 Граммонит 50/50 Гранулит АС–8ПР	Акватор Т–20ГК; Т–20М Ифзанит Т–20; Т–60; Т–80 Порэмит 1, 1А Сибирит 1000; 1200 Гранэмиты И–30; И–50

Допускается применение других ВВ, допущенных Ростехнадзором к постоянному применению на открытых горных работах.

Таблица 7.2

Расчетные коэффициенты эквивалентных зарядов ВВ по идеальной работе взрыва (эталонное ВВ – аммонит 6ЖВ)

ВВ	Расчётные коэффициенты ВВ по идеальной работе взрыва	ВВ	Расчётные коэффициенты ВВ по идеальной работе взрыва	ВВ	Расчётные коэффициенты ВВ по идеальной работе взрыва
Акватол М–15	0,76	Акватол АМВ	0,95	Игданит	1,13
Граммонал А–45	0,79	Гранулит АС–4	0,98	Акватол АВ	1,20
Карбатол ГЛ–10В	0,79	Аммонит 6ЖВ	1,0	Гранулотол	1,2 ²⁾
Граммонал А–8	0,80	Граммонит 79/21	1,0	Ифзанит Т–20	1,20
Аммонит скальный №1 ¹⁾	0,8	Граммонит 50/50	1,01	Граммонит 30/70	1,26 ³⁾
Аммонал скальный №3 ¹⁾	0,8	Динафталит ¹⁾	1,08	Карбатол 15Т	1,42
Детонит М ¹⁾	0,82	Ифзанит Т–80	1,08	Акватол Т–20	1,06
Алюмотол	0,83	Граммонал А–50	1,08	Акватол Т–10	1,17
Гранулит АС–8	0,89	Акватол 65/35	1,10	Порэммит	1,19
Аммонал водоустойчивый ¹⁾	0,9	Ифзанит Т–60	1,10	Гранипор ФМ	1,15
Акватол МГ	0,93	Гранулит М	1,13		

Примечания: ¹⁾ – патронированные ВВ; ²⁾ – $K_{ВВ} \cong 1,0$ при взрывании в обводненных условиях; ³⁾ – $K_{ВВ} \cong 1,04$ при взрывании в обводненных условиях.

Определение удельного расхода ВВ

Расчетный удельный расход ВВ является одной из важнейших характеристик взрывных работ. Для определения его величины могут быть использованы расчетные выражения, приведенные в рекомендованных учебных пособиях.

В более общем виде с учетом диаметра скважинных зарядов, коэффициента крепости порода и поправки на кондиционный кусок величина расчетного удельного расхода определяется по формуле

$$q = 0,13 \cdot \sqrt[4]{f} (0,6 + 3,3 \cdot d_o \cdot d_z) \cdot \left(\frac{0,5}{d_n} \right)^{2/5} \cdot K_{ВВ} \cdot \rho, \quad (7.8)$$

где ρ – плотность взрываваемой породы, т/м³;

f – коэффициент крепости породы по проф. М.М. Протодяконову;

d_3 – диаметр скважины (заряда), м;

d_o – средний размер отдельности во взрываемом массиве, м;

d_n – предельный размер кондиционного куска во взорванной горной массе, м;

$K_{\text{ВВ}}$ – коэффициент относительной работоспособности ВВ (табл. 7.2).

Принимаемый размер негабаритного куска (максимальный размер кондиционного куска) определяется из вместимости ковша экскаватора (или погрузчика) E , м³,

$$d_n \leq 0,75 \cdot \sqrt[3]{E}, \quad (7.9)$$

или транспортного средства (кузов автосамосвала) V_T , м³,

$$d_n \leq 0,5 \cdot \sqrt[3]{V_T}. \quad (7.10)$$

Допустимый размер кусков при погрузке в перегрузочные бункеры, приемные воронки дробилок, грохотов и т.п. принимают по формуле

$$d_n \leq (0,75 \div 0,85) \cdot B, \text{ м}, \quad (7.11)$$

где B – ширина приемного отверстия, м.

При взрывании пород I–II категории по МКВД для расчетов может быть принято $d_n = 0,5$ м; для III категории – $d_n = 1,0$ м; для IV ÷ V – $d_n = 1,25$ м.

Вышеприведенная формула для расчета удельного расхода ВВ справедлива в диапазоне диаметров скважин 100÷400 мм и размера кондиционного куска 0,25÷2 м. Расчет по ней обеспечивает (при равномерном размещении ВВ в массиве) выход негабарита до 3 % от его содержания в массиве до взрыва.

В табл. 7.3 приведены величины расчетных удельных расходов ВВ (для аммонита 6ЖВ или граммонита 79/21) для зарядов рыхления (q) и выброса ($q_{\text{в}}$), на которые необходимо ориентироваться при расчете удельного расхода ВВ, при этом необходимо учитывать коэффициент относительной работоспособности ВВ – $K_{\text{ВВ}}$ (табл. 7.2).

При многорядном взрывании удельный расход во втором и последующих рядах скважин в породах I–III категории трещиноватости по МКВД увеличивается на 5÷10 %, а в породах IV–V категорий – на 10÷15 %.

Таблица 7.3

Расчетный удельный расход ВВ для зарядов рыхления и выброса

Наименование породы	Группа (категория) грунтов и пород по классификации СНиП	Коэффиц. крепости f по проф. М.М. Протоdjак онову	Средний объемный вес породы, кг/м ³	Расчетный удельный расход ВВ, кг/м ³	
				для зарядов рыхления, q	для зарядов выброса, $q_{\text{в}}$
Песок	I	–	1500	–	1,6–1,8
Песок плотный или влажный	I–II	–	1650	–	1,3–1,3
Суглинок тяжелый	II	–	1750	0,35–0,4	1,2–1,5
Глина ломовая	III	–	1950	0,35–0,45	1,0–1,4
Лесс	III–IV	–	1700	0,3–0,4	0,9–1,2
Мел, выщелоченный мергель	IV–V	0,8–1,0	1850	0,25–0,3	0,9–1,2
Гипс	IV	1,0–1,5	2250	0,35–0,45	1,1–1,5
Известняк–ракушечник	V–VI	1,5–2,0	2100	0,35–0,6	1,4–1,8
Опока, мергель	IV–VI	1,0–1,5	1900	0,3–0,4	1,0–1,3
Туфы трещиноватые, плотные, тяжелая пемза	V	1,5–2,0	1100	0,35–0,5	1,2–1,5
Конгломерат, брекчии на известковом и глинистом цементе	IV–VI	2,3–3,0	2200	0,35–0,45	1,1–1,4
Песчаник на глинистом цементе, сланец глинистый, слюдистый, серицитовый мергель	VI–VII	3–6	2200	0,4–0,5	1,2–1,6
Доломит, известняк, магнезит, песчаник на известковом цементе	VII–VIII	5–6	2700	0,4–0,5	1,2–1,8
Известняк, песчаник, мрамор	VII–IX	6–8	2800	0,45–0,7	1,2–2,1
Гранит, гранодиорит	VII–X	6–12	2800	0,5–0,7	1,7–2,1

Базальт, диамаз, андезит, габбро	IX–XI	6–18	3000	0,6–0,75	1,7–2,2
Кварцит	X	12–14	3000	0,5–0,6	1,6–1,9
Порфирит	X	16–20	2800	0,7–0,75	2,0–2,2

Определение вместимости 1 пог. м скважины

Вместимость 1 пог. м. скважины определяется выражением

$$p = \frac{\pi d_{скв}^2}{4} \cdot \Delta, \text{ кг/м}, \quad (7.12)$$

где $d_{скв}$ – диаметр скважины (заряда), м;

Δ – плотность заряжения ВВ, кг/м³.

При известном диаметре бурового инструмента диаметр скважины определяется с учетом коэффициента разбуривания пород K_p

$$d_{скв} = K_p d_{инс}, \quad (7.13)$$

где $K_p = 1,02 \div 1,07$;

$d_{инс}$ – диаметр бурового инструмента, м.

С учетом разбуривания диаметры скважинных зарядов при заряжении гранулированными, водосодержащими и эмульсионными ВВ принимают равными диаметрам скважин ($d_з = d_{скв}$): 110, 125, 150, 160, 190, 200, 220, 250, 270 мм.

При использовании порошкообразных ВВ типа аммонит 6ЖВ, гранулированных граммонитов, гранулитов, игданита плотность заряжения принимается равной насыпной плотности ВВ $\Delta = 850\text{--}900$ кг/м³, откуда, например, для скважин диаметром 160 мм

$$p = \frac{\pi \cdot 0,160^2}{4} \cdot 850 = 17,58, \text{ кг/м}.$$

Принимаем $p \approx 18$ кг/м.

Вместимость 1 пог. м скважины (шпура) может быть определена по табличным данным, приводимых в справочниках по буровзрывным работам.

Расчет сопротивления по подошве (СПП)

Линия сопротивления по подошве для скважин первого ряда определяется по фактически полученной конфигурации забоя (линии скважин последнего ряда предыдущего взрыва), при этом величина максимально преодолеваемого сопротивления по подошве уступа (СПП) рассчитывается по формуле

$$W_p = \frac{\sqrt{0,56p^2 + 4qpHl_{скв}} - 0,75}{2qH}, \text{ м}, \quad (7.14)$$

или по упрощенной формуле, рекомендуемой «Техническими правилами ведения взрывных работ на дневной поверхности»

$$W_p = 0,9 \cdot \sqrt{\frac{p}{q \cdot m}}, \text{ м}, \quad (7.15)$$

где q – расчетный расход ВВ, кг/м³;

p – вместимость 1 пог. м скважины, кг;

H – высота взрываемого уступа, м;

$l_{скв}$ – глубина скважины, м;

m – коэффициент сближения скважин. Для расчета коэффициент сближения принимается равным $m = 1$.

Для обеспечения безопасной установки буровых станков у верхней бровки уступа определяется т.н. безопасное значение СПП:

$$W_{\sigma} = H \operatorname{ctg} \alpha + 2,5 \text{ м}, \quad (7.16)$$

где α – угол откоса уступа, град.

Величина расчетной или фактической СПП не должна быть меньше W_{σ}

$$W_p \geq W_{\sigma}. \quad (7.17)$$

Предельно преодолеваемое значение СПП определяется по ранее приведенной формуле С.А.Давыдова с учетом взаимодействия скважинных зарядов.

Когда невозможно соблюдение данного условия или когда фактическое значение СПП больше W_p , рекомендуется:

- увеличить диаметр скважин первого ряда;
- применить наклонное бурение:

$$W'_p = \frac{1}{\sin \beta} \cdot W_p, \text{ м},$$

где β – угол наклона скважин к горизонту, град.

В случае, если нет возможности увеличить диаметр скважин или применить наклонное бурение, в первом ряду бурят парносближенные скважины на расстоянии одна от другой $a_1 = (4 \div 6) d_{скв}$. В этом случае максимально преодолеваемая СПП и расстояние между парами скважин в ряды возрастают в 1,4 раза:

$$W_{nc} = 0,9 \sqrt{\frac{2p}{q}} = \sqrt{2} W = 1,4 \cdot W, \quad (7.18)$$

$$a_{nc} = \sqrt{2} a = 1,4 a. \quad (7.19)$$

Здесь a_{nc} – расстояние между парносближенными скважинами, м.

Расчет по формулам (7.14 и 7.15) справедлив для условий, когда

$$W \leq 0,8H.$$

Для условий, когда $W > 0,8H$ – взрывание невысоких уступов, принимается следующая методика расчета W .

Величина СПП принимается равной:

$$W = (0,6 \div 0,8) \cdot H. \quad (7.20)$$

В тех случаях, когда заряд в скважине близок к сосредоточенному, величина СПП может быть увеличена:

$$W = (0,9 \div 1,0) \cdot H, \text{ м}. \quad (7.21)$$

Расчет параметров сетки скважин

Расположение скважин на уступе принимается квадратное, прямоугольное или шахматное.

Расстояние между скважинами в ряду a и расстояние между рядами скважин b принимаются равными СПП:

$$a = b = W, \quad (7.22)$$

или рассчитываются с учетом коэффициента сближения m .

Расстояние между скважинами в ряду

$$a = m \cdot W = (0,8 \div 1,4) \cdot W, \text{ м.} \quad (7.23)$$

Здесь m – коэффициент сближения скважин ($m = \frac{a}{W}$). Меньшие значения m принимаются для крепких горных пород.

Расстояние между рядами скважин (b) определяется по формуле

$$b = m \cdot W = (0,85 \div 1,0) \cdot W, \text{ м.} \quad (7.24)$$

При многорядном расположении зарядов расстояние между рядами принимается равным $(0,85 \div 1,0)W$ при короткозамедленном взрывании (КЗВ) и $0,85W$ – при мгновенном взрывании.

Для условий, когда $W > 0,8H$, значения параметров сетки скважин выбирают с учетом вышеуказанных коэффициентов сближения.

Расчет длины перебура

Для условий $W < 0,8H$ глубина перебура принимается в пределах

$$l_{пер} = (8 \div 15) d_{зар}, \text{ м.} \quad (7.25)$$

При наличии в подошве уступа развитой системы горизонтальных трещин или прослоев мягких легковзрываемых пород глубина перебура уменьшается:

$$l_{пер} = (2 \div 3) d_{зар}, \text{ м.} \quad (7.26)$$

Перебур не следует делать при взрывании, если уступ подстилается нескальной породой.

В соответствии с [5] длина перебура может определяться по формуле

$$l_{пер} = 0,5qW. \quad (7.27)$$

Для условий взрывания невысоких уступов ($W > 0,8H$) величина перебура определяется выражением

$$l_{пер} = 0,2H, \text{ м.} \quad (7.28)$$

Величина перебура не должна превышать 3–4 м, так как дальнейшее увеличение перебура не приводит к увеличению преодолеваемого СПП.

Глубина скважины с учетом перебура

$$l_{скв} = H + l_{пер}. \quad (7.29)$$

Расчет длины забойки

Как правило, рациональная длина забойки заключается в пределах

$$l_{заб} = (15 \div 30) d_{скв}, \text{ м.} \quad (7.30)$$

Расчет может выполняться по формуле

$$l_{заб} = (0,6 \div 0,8) W, \text{ м.} \quad (7.31)$$

Величина забойки должна быть не менее 1/3 глубины скважины. Для обеспечения минимальной ширины развала длину забойки увеличивают до $(0,8 \div 1,0) W$.

Ограничения, учитываемые при выборе длины заряда и его конструкции, следующие:

– для качественной проработки подошвы уступа

$$l_{заб} \geq W;$$

– для качественного дробления массива

$$l_{заб} \leq W;$$

– для исключения прорыва газов взрыва в зоне устья скважин

$$l_{заб} \geq 20 \cdot d_{зар}.$$

В случае если длина забойки больше величины W , следует применять рассредоточенные заряды. Длина нижней части заряда должна составлять не менее $1,2W$. При хорошо выраженном напластовании рассредоточенные части заряда располагаются напротив наиболее трудно дробимых пластов.

Суммарная длина промежутка между нижней и верхней частями заряда должна составлять 0,17–0,35 длины всего заряда в скважине (меньшие значения относятся к более крепким породам). Промежуток

подлежит заполнению забоечным материалом. Минимальная длина забойки в устье скважины в случае отбойки рассредоточенными зарядами может быть уменьшена до $0,8W$.

Инициирование всех частей заряда производится отдельными боевиками, введенными в каждую часть заряда.

Расчет массы скважинного заряда ВВ

Необходимая величина заряда в скважине для условий $W < 0,8H$ определяется выражением

$$Q = q \cdot V_{скв} = q \cdot a \cdot W \cdot H, \text{ кг.} \quad (7.32)$$

Здесь $V_{скв} = a \cdot W \cdot H$ – объем горной породы, взрывааемый одной скважиной, м^3 .

Для условий $W > 0,8H$ согласно [5]

$$Q = q \cdot W^3, \text{ кг.} \quad (7.33)$$

Длина заряда ВВ в скважине

С учетом вместимости 1 пог.м скважины длина заряда ВВ

$$l_{зар} = \frac{Q}{p}, \text{ м.} \quad (7.34)$$

Тогда фактическая длина забойки

$$l_{заб}^{\phi} = l_{скв} - l_{зар} = (H + l_{пер}) - l_{зар}, \text{ м.} \quad (7.35)$$

Величина забойки должна соответствовать величине, указанной выше ($\approx 1/3$ глубины скважины). Если данное условие не выполняется – слишком велика длина заряда ВВ ($l_{зар}$), необходимо уменьшить длину колонки заряда, т.е. уменьшить массу ВВ в скважине, определенной по формулам (7.32, 7.33).

Для этого можно уменьшить расстояние между скважинами в ряду a за счет изменения коэффициента сближения зарядов m

$$a = \frac{Q}{q \cdot W \cdot H}. \quad (7.36)$$

Откуда

$$m = \frac{a}{W}. \quad (7.37)$$

При это должно выполняться условие (см. табл. 7.4)

$$m_{\min} < m < m_{\max}. \quad (7.38)$$

Минимальное расстояние между зарядами, взрывающимися одновременно (с интервалом замедления), определяется по формуле

$$a_{\min} \geq 25 \cdot d_{\text{зар}}, \text{ м.} \quad (7.39)$$

Выбор коэффициента сближения зарядов

Вследствие взаимодействия соседних зарядов величина преодолеваемого СПП возрастает до 20% при мгновенном взрывании зарядов в ряду с $m = 0,6$.

Здесь $m = \frac{a}{W}$, где a – расстояние между скважинами в ряду. Обычно на практике расстояние между скважинами в ряду для вертикальных скважин принимают $m = 0,8 \div 1,1$, для наклонных – $m = 0,9 \div 1,3$.

При многорядном расположении зарядов расстояние между рядами принимается равным $(0,85 \div 1,0) W$ при КЗВ и $0,85W$ – при мгновенном взрывании.

При диагональных схемах взрывания фактические значения m_{ϕ} увеличиваются в 2–3 раза. При этом скважины располагаются, как правило, в шахматном порядке.

Таблица 7.4

Взрываемость пород	Тип скважин	
	Вертикальные	Наклонные
Легковзрываемые породы	1,1÷1,2	1,2÷1,3
Средневзрываемые породы	1,0÷1,1	1,1÷1,2
Трудно– и весьма трудновзрываемые породы	0,85÷1,0	0,9÷1,0

Параметры взрываемого блока

При расчете ширины взрываемого блока используется два подхода.

Число рядов скважин (n_p) и ширина блока ($B_{\text{бл}}$) определяются исходя из заданной (желаемой) ширины развала. Ширина развала лимитирована при взрывании в стесненных условиях или она определяется рациональным количеством экскаваторных заходов шириной A . Например, при применении автомобильного транспорта:

$$A = (1,2 \div 1,5) \cdot R_{\text{ч.у.}}, \text{ м}; \quad (7.40)$$

$$B_{\text{бл}} = (2 \div 3) \cdot A, \text{ м}. \quad (7.41)$$

Здесь $R_{\text{ч.у.}}$ – радиус черпания экскаватора на горизонте установки, м.

Когда ширина рабочей площадки не ограничивается, ширина и длина взрываемого блока определяются из объема горной массы – $V_{\text{бл}}$:

– ширина взрываемого блока

$$B_{\text{бл}} = W + (n_p - 1)e, \text{ м}; \quad (7.42)$$

– длина взрываемого блока

$$L_{\text{бл}} = \frac{V_{\text{бл}}}{B_{\text{бл}} \cdot H}, \text{ м}, \quad (7.43)$$

где n_p – число рядов скважин на блоке.

Число рядов скважин для расчета принимается $n_p = 3, 4, 5$ и более.

Число скважин на взрываемом блоке

Число скважин в ряду ($N_{\text{скв } p}$) определяется

$$N_{\text{скв } p} = \frac{L_{\text{бл}}}{a}. \quad (7.44)$$

Общее число скважин на взрываемом блоке

$$N_{\text{скв}} = \frac{V_{\text{бл}}}{V_{\text{скв}}} = n_p \cdot N_{\text{скв } p}. \quad (7.45)$$

Параметры развала взорванной горной массы

Ширина развала взорванной горной массы определяется выражением:

– для однорядного взрывания, считая от линии скважин

$$B_o = 5q\sqrt{WH} \text{ , м;} \quad (7.46)$$

– для многорядного взрывания

$$B_m = B_o + (n_p - 1)e \text{ , м,} \quad (7.47)$$

где q – удельный расход ВВ, кг/м³;

W – сопротивление по подошве, м;

H – высота взрываемого уступа, м;

n_p – число рядов скважин на блоке.

Высота развала $H_{раз}$ может ориентировочно приниматься равной

$$H_{раз} = (0,6 \div 0,8)H. \quad (7.48)$$

Конструкция заряда

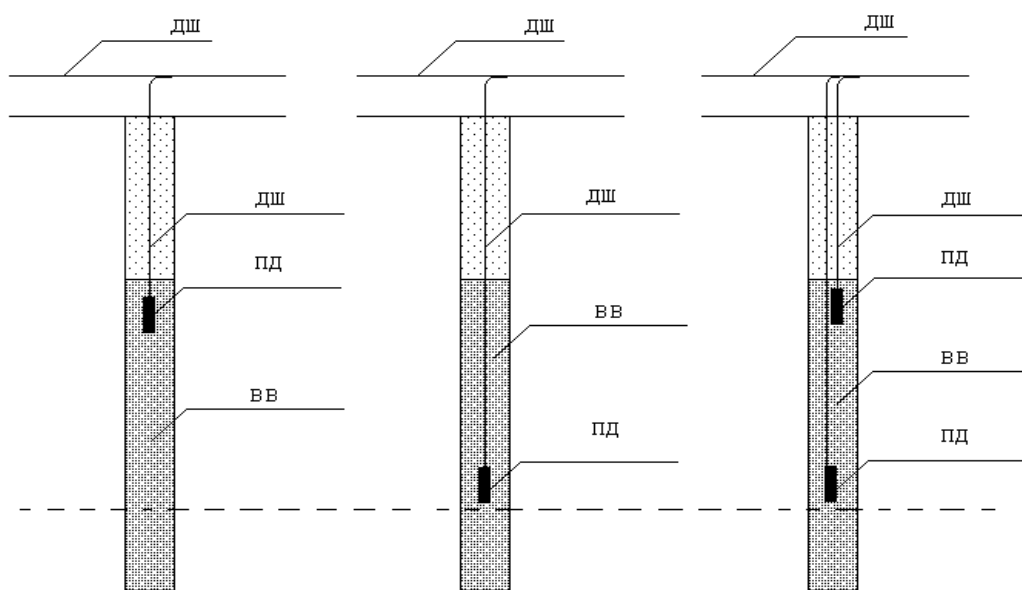
Для максимального использования выбуренного объема скважин и увеличения выхода горной массы с 1 м скважин, как правило, применяют сплошные заряды ВВ.

Патрон–боевик при сплошной колонке заряда обычно устанавливается при верхнем инициировании, ниже уровня забойки на 1÷1,5 м; при нижнем – на 1÷1,5 м выше уровня подошвы уступа (рис. 7.1).

В тех случаях, когда объем скважин используется не полностью, а также при взрывании неоднородных по взрываемости пород (например, при наличии трудновзрываемых прослоек пород в верхней части массива), целесообразно применение рассредоточенных зарядов с воздушным или инертным промежутком.

Длина воздушного промежутка между частями заряда в большинстве случаев устанавливается опытным путем. Суммарную длину воздушных промежутков обычно принимают в пределах:

- для некрепких пород – 0,3-0,4 длины заряда;
- для пород средней крепости – 0,2-0,3 длины заряда;
- для пород крепких – 0,15-0,2 длины заряда.



а – верхнее инициирование; б – нижнее инициирование;
в – двустороннее инициирование

Рис. 7.1. Конструкции скважинных зарядов

Обычно заряд ВВ рассредоточивают на две части – в нижней части размещается 60–70% расчетной величины заряда, в верхней – 30-40%. При общей длине воздушного промежутка 3,5-4,0 и более метров следует рассредоточить заряд на несколько частей. Каждая часть рассредоточенного заряда инициируется отдельным боевиком.

Для заряжания обводненных скважин с устойчивым уровнем воды применяются комбинированные заряды, в которых нижняя обводненная часть заряжается водоустойчивым ВВ с перекрытием уровня воды на 1 м, а оставшая часть дозаряжается неводоустойчивым ВВ (рис. 7.2).

Применение современных смесевых эмульсионных ВВ, например гранэммитов И–30, И–50 и И–70, позволяет создавать в скважинах комбинированные заряды, когда нижняя обводненная часть скважины заряжается водоустойчивым гранэммитом И–30, а верхняя часть гранэммитом И–50 или И–70, обладающим меньшей водоустойчивостью, чем И–30.

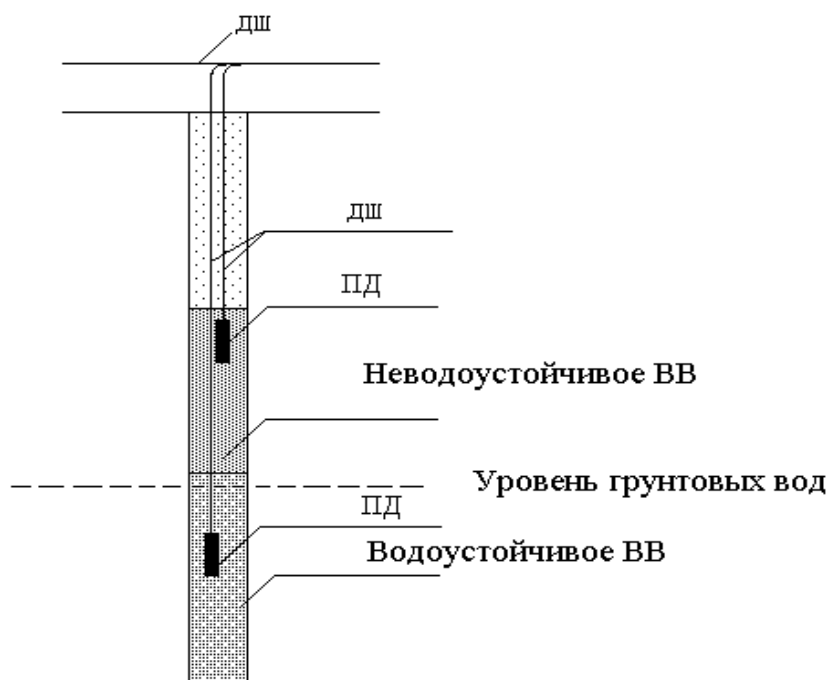


Рис. 7.2. Конструкция комбинированного заряда ВВ при зарядании обводненных скважин

Выбор схем взрывания

При взрывных работах на карьерах и добыче полезных ископаемых в подземных условиях широко применяется многорядное короткозамедленное взрывание (КЗВ). Наиболее широко применяются порядные, порядно–врубовые, диагональные схемы взрывания. На предприятиях применяется большое число разнообразных схем КЗВ: трапецевидные, клиновые, волновые, радиальные, комбинированные, которые по существу являются той или иной разновидностью вышеперечисленных схем.

Выбор той или иной схемы КЗВ для заданных в проекте конкретных условий должен быть обоснован анализом имеющихся в литературе данных и производственного опыта ведения взрывных работ в аналогичных горно–геологических условиях.

Основными критериями при выборе схем взрывания являются:

- высокая надежность, исключая появление отказов зарядов ВВ;
- обеспечение заданной степени дробления горных пород;

– отсутствие выброса в тыльную часть уступа и минимальный развал породы;

– минимальный сейсмический эффект и обеспечение сохранности объектов вблизи взрываемого блока.

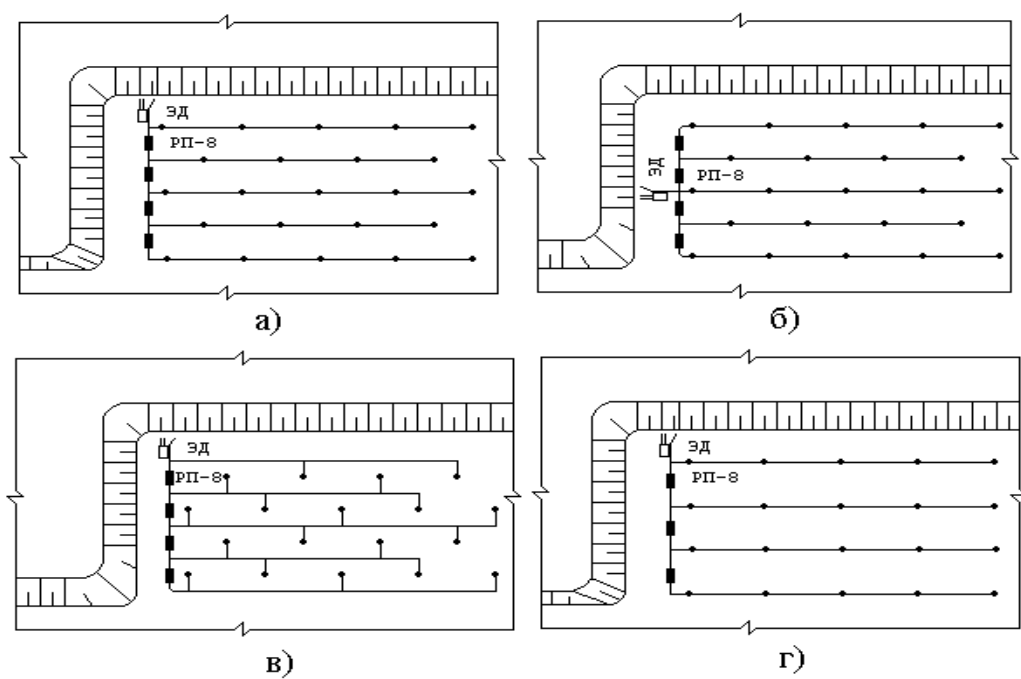
Повышение надежности взрывания с помощью ДШ осуществляется дублированием главной и секционной магистралей, применением закольцованных схем (при этом расход ДШ увеличивается).

Сейсмобезопасность применяемых схем взрывания обеспечивается одновременным взрыванием в одной ступени замедления не более $2,5 \div 10$ т ВВ. Учитывая, что количество зарядов в одной ступени $4 \div 8$ при массе ВВ в скважине не более $500 \div 800$ кг, одновременно взрываемая масса зарядов не превышает $3 \div 5$ т. Исходя из этого наиболее употребимы диагональные схемы взрывания.

При электрическом способе взрывания рассчитывается сопротивление электровзрывной сети, определяемое схемой соединения (последовательная, параллельно–последовательная, последовательно–параллельная, пучковая и др.), сопротивлениями ЭД, концевых, участковых, соединительных и магистральных проводов. Исходными данными для расчета являются: количество ЭД, длина и сечения проводов, напряжение питающей сети (источника тока), гарантийный ток, сопротивления ЭД.

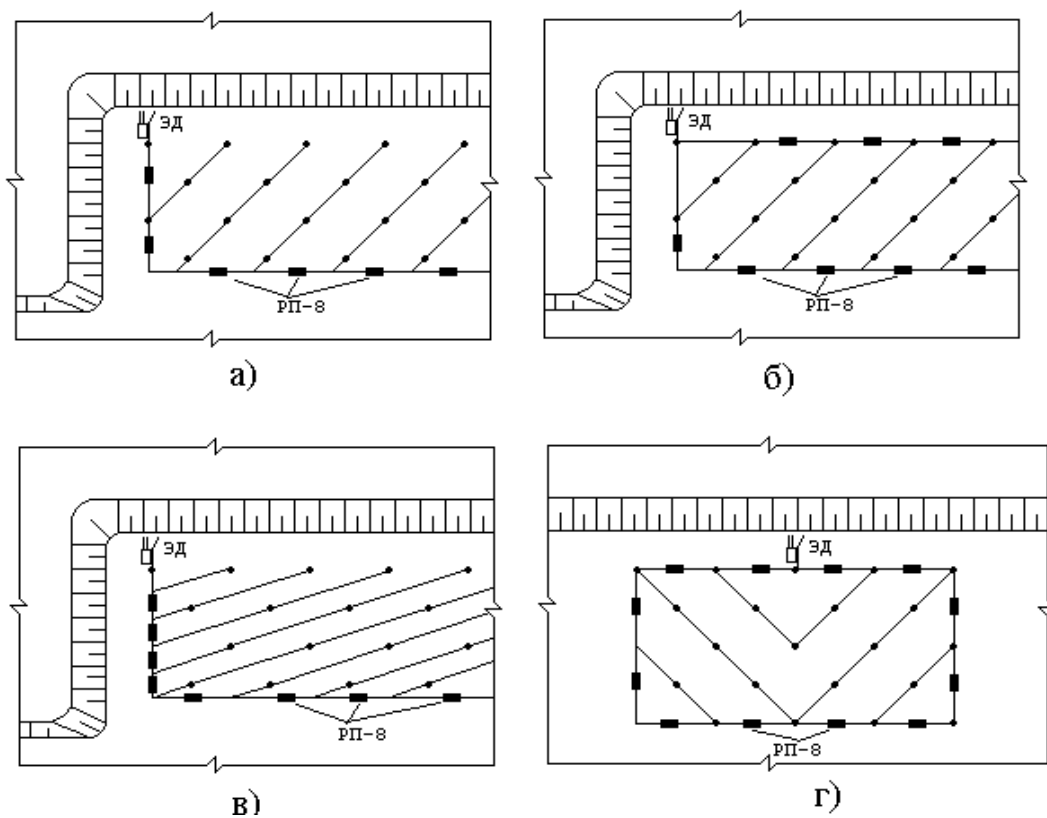
Некоторые схемы взрывания скважинных зарядов с использованием ДШ приведены на рис. 7.3 и 7.4. Инициирование ДШ осуществляется двумя ЭД мгновенного действия.

На рис 7.5 и 7.6 приведены схемы взрывания при использовании неэлектрических систем инициирования (НСИ). Параметры НСИ типа СИНВ, «Эдилин» и «Нонель» приведены в справочниках.



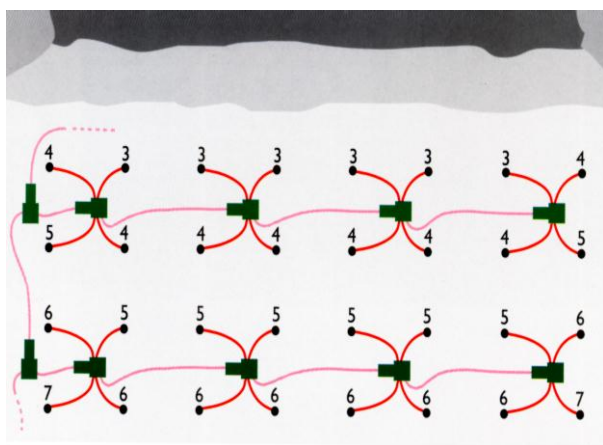
а, в, г – порядные; б – порядно-врубовая

Рис. 7.3. Порядные схемы взрывания с ДШ

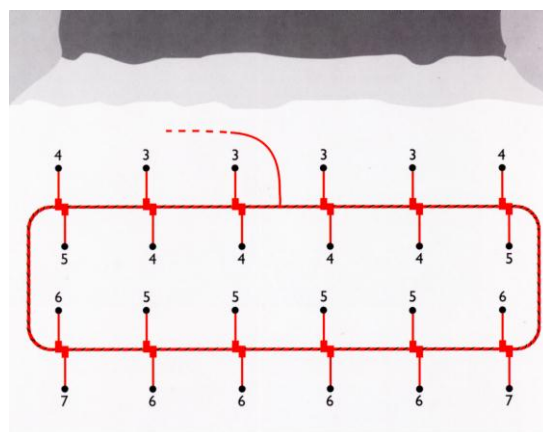


а, б, в, г – V-образная схема

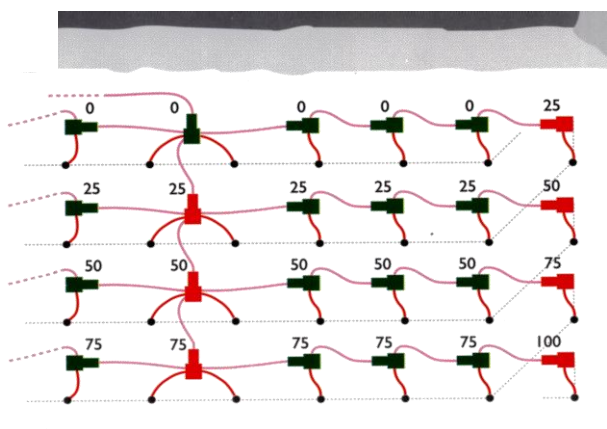
Рис. 7.4. Диагональные схемы взрывания с ДШ



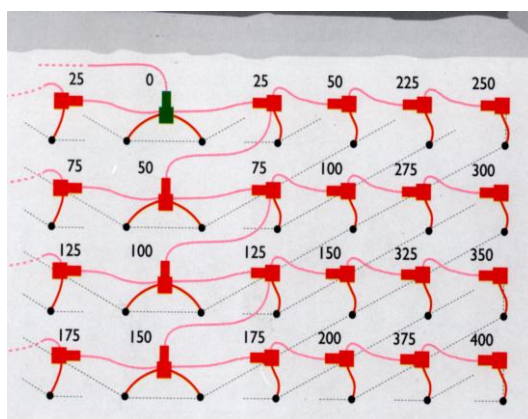
а



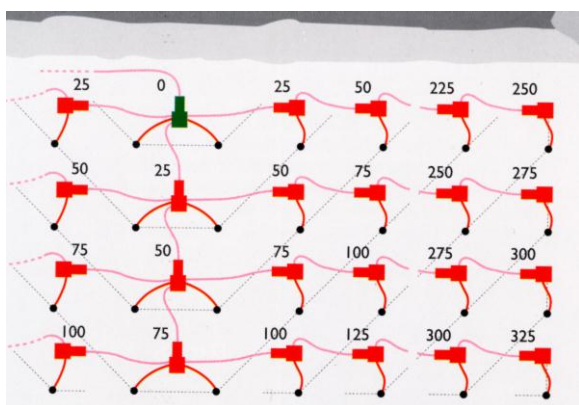
б



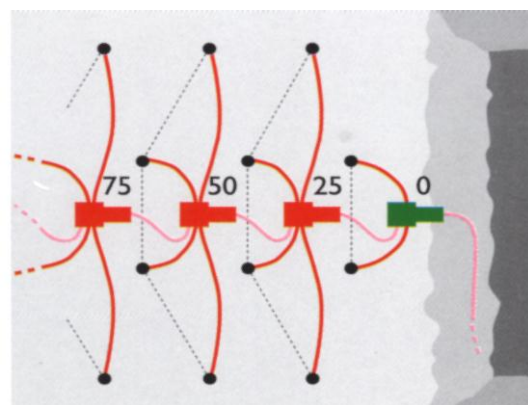
в



г



д



ж

Рис. 7.5. Схемы взрывания с применением неэлектрических систем инициирования (Nonel) а) порядная (Nonel MS); б) порядная комбинированная – магистраль ДШ (Nonel MS); в) порядная (Nonel Unidet); г) диагональная (Nonel Unidet); д) V-образная (Nonel Unidet) ж) поперечная (проходка траншей)

Определение интервала замедления при КЗВ

Оптимальный по дроблению интервал замедления определяется по формуле

$$t = A \cdot W_p, \quad (7.49)$$

где W_p – расчетное или фактическое СПП, м;

A – эмпирический коэффициент, зависящий от крепости и взрываемости пород, мс/м;

$A=3$ мс/м – для весьма крепких пород (граниты, крепкие руды, диабазы и т.п., $f > 14$);

$A=4$ мс/м – для крепких горных пород (песчаники, крепкие сланцы, железистые кварциты; $8 \leq f \leq 14$);

$A=5$ мс/м – для пород средней крепости (известняки, серпентиниты, магнетиты; $5 \leq f \leq 8$);

$A=6$ мс/м – для мягких пород (мергель, мел, глинистые сланцы, $f \leq 4$).

Полученный интервал замедления округляют до 5 мс, в соответствии с ним или кратно ему выбирают стандартные интервалы замедления при взрывании с ДШ для РП–8 (10–20–35–50–75 мс), электродетонаторов типа ЭДКЗ, системы «Нонель» или ее отечественных аналогов СИНВ, «Эдилин» и др.

Выход горной массы с 1 м скважины

$$B_{скв} = \frac{V_{скв}}{l_{скв}}, \text{ м}^3/\text{м}, \quad (7.50)$$

или

$$B_{скв} = \frac{V_{бл}}{L_{бур}}, \text{ м}^3/\text{м}, \quad (7.51)$$

где $V_{скв}$ – объем породы взрываваемый одной скважиной, м³;

$V_{бл}$ – объем взрываемого блока, м³.

Средний выход горной массы с 1 пог. м скважины

$$B_{скв}^{cp} = aH \frac{(n_p - 1)b + W}{l_{скв} n_p}, \text{ м}^3/\text{м}. \quad (7.52)$$

Общий объем буровых работ на блоке

$$L_{бур} = K_n \cdot l_{скв} \cdot N_{скв}, \text{ м}. \quad (7.53)$$

где K_n – коэффициент потерь скважин, $K_n = 1,1$.

Расход ВВ на массовый взрыв

Расход ВВ на массовый взрыв определяется по каждому типу ВВ исходя из количества взрывааемых скважин и массы ВВ в них

$$Q_{мас} = N_{скв} \cdot Q_1 \cdot 10^{-3}, \text{ т}. \quad (7.54)$$

Расчет расхода средств инициирования на массовый взрыв

С учетом принятых параметров расположения скважин на уступе ($a \times b$), числа рядов, конструкции заряда ВВ и схемы взрывания рассчитывается расход ДШ (м), ЭД (шт.), РП–8 (шт.), патронов–боевиков из патронированных ВВ или промежуточных шашек–детонаторов (в шт. и кг).

Общее количество промежуточных детонаторов (боевиков) определяется по формуле

$$n_{пд} = n_{\delta} \cdot n_{ш} \cdot N_{скв}, \text{ шт.}, \quad (7.55)$$

где n_{δ} – количество боевиков в скважине: при одностороннем нижнем или верхнем инициировании $n_{\delta} = 1$; при двухстороннем $n_{\delta} = 2$;

$n_{ш}$ – количество шашек в боевике: $n_{ш} = 2$ при использовании шашек Т–400Г, ТГ–500; $n_{ш} = 1$ – при использовании шашек Т–900Г, ТГФ–850;

$N_{скв}$ – количество скважин на взрываемом блоке.

Масса ВВ в промежуточных детонаторах

$$Q_{пд} = n_{пд} \cdot m_{ш}, \text{ кг}, \quad (7.56)$$

где $m_{ш}$ – масса шашки–детонатора, кг.

Общая длина ДШ, необходимая для коммутации и инициирования зарядов в скважинах, определяется:

$$L_{\text{дш}} = L_{\text{дш скв}} + L_{\text{дш сек}} + L_{\text{дш маг}}, \text{ м}, \quad (7.57)$$

где $L_{\text{дш маг}}$ – длина магистральных ДШ, м;

$L_{\text{дш сек}}$ – длина секционных ДШ, м.

$L_{\text{дш скв}}$ – длина ДШ в скважинах, м;

$L_{\text{дш скв}}^6 = (l_{\text{заб}} + 2)N_{\text{скв}}$ – при одностороннем верхнем инициировании;

$L_{\text{дш скв}}^H = (H_{\text{уст}} + 1)N_{\text{скв}}$ – одностороннем нижнем инициировании. При

двухстороннем инициировании – $L_{\text{дш скв}}^0 = (H_{\text{уст}} + l_{\text{заб}} + 3)N_{\text{скв}}$, м. Здесь учтено, что при нижнем инициировании боевик устанавливается на 1,0 – 1,5 м выше уровня подошвы уступа.

При дублировании ДШ в скважинах полученное значение $L_{\text{дш скв}}$ удваивается.

При определении необходимой длины магистрального и секционных ДШ исходят из схемы коммутации скважинных зарядов:

– при порядной схеме взрывания

$$L_{\text{дш маг}} + L_{\text{дш сек}} = 2 \cdot L_{\text{бл}} \cdot n_p, \text{ м}, \quad (7.58)$$

– при диагональной схеме взрывания

$$L_{\text{дш маг}} = 2 \cdot L_{\text{бл}}, \text{ м}. \quad (7.59)$$

Количество диагональных секций, взрываемых на блоке, определяется выражением

$$N_{\text{сек}} = \frac{L_{\text{бл}}}{a}, \text{ шт.} \quad (7.60)$$

Общая длина дублированных секционных ДШ определяется по формуле

$$L_{\text{сек}} = 2 \cdot (n_p - 1) \cdot \sqrt{(k \cdot a)^2 + \vartheta^2} \cdot \frac{L_{\text{бл}}}{a}, \text{ м}. \quad (7.61)$$

Длина секционных ДШ зависит от схемы взрывания – пологими или крутыми диагоналями, когда фактическое значение коэффициента сближения составляет $m_{\phi} = \frac{a_{\phi}}{W_{\phi}} = 4 \div 8$. В этом случае коммутация скважинных зарядов осуществляется через 1, 2 или 3 скважины (соответственно: $k = 1, 2$ или 3).

В сложных условиях суммарная длина секционных и магистральных ДШ может быть рассчитана непосредственно по схеме коммутации зарядов ВВ на уступе, вычерченной в масштабе.

Расход НСИ типа СИНВ, «Эдилин» и «Нонель» рассчитывается по числу комплектов скважинных детонаторов с учетом одностороннего или двухстороннего инициирования и поверхностных соединительных элементов.

8. РАСЧЕТ БЕЗОПАСНЫХ РАССТОЯНИЙ ПРИ ВЕДЕНИИ ВЗРЫВНЫХ РАБОТ НА КАРЬЕРАХ

8.1. Расчет безопасных расстояний по разлету отдельных кусков породы

Расстояние, опасное для людей по разлету отдельных кусков породы при взрывании скважинных зарядов, рассчитанных на разрыхляющее (дробящее) действие, определяется по формуле:

$$R_{разл} = 1250\eta_z \sqrt{\frac{f}{1 + \eta_{заб}} \cdot \frac{d}{a}}, \quad (8.1)$$

где η_z – коэффициент заполнения скважины взрывчатым веществом;

$\eta_{заб}$ – коэффициент заполнения скважины забойкой;

d – диаметр взрывааемых скважин, м;

a – расстояние между скважинами, м.

f – коэффициент крепости породы по шкале проф. М.М. Протоdjаконова.

Для известной категории породы по СНиП коэффициент крепости может быть рассчитан по формуле

$$f = (F/2,5)^2. \quad (8.2)$$

Здесь F – категория породы по СНиП.

Коэффициент заполнения скважин ВВ определяется по формуле

$$\eta_z = \frac{l_{зар}}{l_{скв}}, \quad (8.3)$$

где $l_{зар}$ – длина заряда ВВ в скважине, м;

$l_{скв}$ – глубина скважины, м.

Коэффициент заполнения скважины забойкой

$$\eta_{заб} = l_{заб} / l_n, \quad (8.4)$$

где $l_{заб}$ – длина забойки, м;

l_n – длина незаряженной верхней части скважины, м.

При взрывании без забойки $\eta_{заб} = 0$, а при полном заполнении свободной от заряда верхней части скважины $\eta_{заб} = 1$.

При взрывании серии скважинных зарядов одинакового диаметра с переменными параметрами a , $\eta_{заб}$, η_z расчет безопасного расстояния должен проводиться по наименьшим значениям a , $\eta_{заб}$ и наибольшему η_z из всех имеющихся в данной серии.

Если взрываемый участок массива представлен породами с различной крепостью, следует в расчете принимать максимальное значение коэффициента крепости грунта f . При взрывании параллельно сближенных (кустов, пучков) скважинных зарядов диаметром d принимается их эквивалентный диаметр

$$d_{\text{э}} = d \sqrt{N_{n-c}}, \quad (8.5)$$

где N_{n-c} – число параллельно сближенных скважин в кусте.

При определении опасных расстояний необходимо учитывать возможные в процессе производства буровзрывных работ отклонения отдельных параметров взрывания скважинных зарядов a , $\eta_{заб}$, η_z от принятых проектных значений. Поэтому расчет следует проводить с определенным запасом, принимая для этого минимально возможные в процессе производства взрывных работ значения параметров a , $\eta_{заб}$ и максимально возможное значение η_z .

При производстве взрывов на косогорах, а также в условиях превышения верхней отметки взрываемого участка над участками границы опасной зоны более чем на 30 м размеры опасной зоны $R_{разл}$ в направлении вниз по склону должны быть увеличены

$$R_{разл} = r_{разл} \cdot K_p, \quad (8.6)$$

где $R_{разл}$ – опасное расстояние по разлету отдельных кусков породы в сторону уклона косогора или местности, расположенной ниже 30 м, считая от верхней отметки взрываемого участка; K_p коэффициент, учитывающий особенности рельефа местности. При взрывании на косогоре

$$K_p = 1 + \operatorname{tg} \beta, \quad (8.7)$$

где β – угол наклона косогора к горизонту, градус.

В тех случаях, когда вместо угла β известно превышение места взрыва над границей опасной зоны,

$$K_p = 0,5 \left(1 + \sqrt{1 + \frac{4H}{R_{\text{разл}}}} \right), \quad (8.8)$$

где H – превышение верхней отметки взрываемого участка над участком границы опасной зоны, м.

Расчетное значение опасного расстояния округляется в большую сторону до значения, кратного 50 м.

Окончательно принимаемое безопасное расстояние не должно быть меньше минимальных расстояний, указанных в ЕПБ и приведенных в табл. 8.1.

Таблица 8.1

№ пп	Метод взрывных работ	Максимально допустимые радиусы опасных зон, м
1.	Наружных зарядов, в том числе кумулятивных	300 по проекту
2.	Шпуровых зарядов	200*
3.	Котловых шпуров	200*
4.	Малокамерных зарядов (рукавов)	200*
5.	Скважинных зарядов	Не менее 200**
6.	Котловых скважин	Не менее 300
7.	Камерных зарядов	Не менее 300

* При взрывании на косогорах в направлении вниз по склону величина радиуса опасной зоны должна приниматься не менее 300 м.

** Радиус опасной зоны указан для взрывания зарядов с забойкой.

Для уменьшения дальности разлета кусков породы в сторону охраняемых объектов необходимо ориентировать направление отбойки при использовании различных схем КЗВ в противоположную сторону от объектов. Необходимо также учитывать силу ветра в направлении охраняемых объектов.

Пример 8.1. Определить безопасное расстояние при взрывании породы на карьере. Крепость пород по М.М. Протодяконову $f = 12$, высота уступа $H = 8$ м, диаметр скважин $d = 0,15$ м, число рядов скважин – 3. Параметры сетки скважин в ряду – 4,5 м, расстояние между рядами – 5 м, длина заряда $l_{зар} = 6$ м, глубина скважины $l_{скв} = 9,5$ м.

Верхняя часть скважины заполняется до устья забойкой $l_{заб} = l_n = 3,5$ м и, следовательно, $\eta_{заб} = 1$. Коэффициент заполнения скважины взрывчатым веществом

$$\frac{l_{зар}}{l_{скв}} = \frac{6}{9,5} = 0,63$$

Расстояние между скважинами a принимается равным 4,5 м.

Расчетное значение составляет

$$R_{разл} = 1250 \cdot 0,63 \sqrt{\frac{12}{1+1} \cdot \frac{0,15}{4,5}} = 325,5 \text{ м}$$

Найденное расчетное значение безопасного расстояния округляется до $R_{разл} = 350$ м.

Пример 8.2. Определить безопасное расстояние по разлету отдельных кусков породы при взрывании на косогоре с углом наклона к горизонту $\beta = 30^\circ$. Расчетный радиус опасной зоны $r_{разл} = 350$ м.

Коэффициент, учитывающий рельеф местности, определяется по формуле

$$K_p = 1 + \operatorname{tg} 30^\circ = 1,58$$

Тогда безопасное расстояние составит

$$R_{разл} = 350 \cdot 1,58 = 553 \text{ м.}$$

Найденное расчетное значение $R_{разл} = 550$ м.

Пример 8.3. Определить безопасное расстояние для нижележащих горизонтов карьера по разлету кусков породы при взрыве серии скважинных зарядов рыхления в условиях превышения верхней отметки

взрывающего участка над участками границы опасной зоны на $H = 50$ м.
Расчетное значение радиуса опасной зоны $r_{разл} = 200$ м.

Определяем коэффициент, учитывающий рельеф местности

$$K_p = 0,5 \left(1 + \sqrt{1 + \frac{4 \cdot 50}{200}} \right) = 1,21.$$

Расчетное безопасное расстояние по разлету отдельных кусков породы для нижележащих горизонтов составляет $R_{разл} = 200 \cdot 1,21 = 248$ м.
Окончательное безопасное расстояние принимается равным:

- в сторону дневной поверхности карьера $R_{разл} = 200$ м;
- в сторону выработанного пространства $R_{разл} = 250$ м.

8.2. Расчет безопасных расстояний по действию ударной воздушной волны

Ударные воздушные волны (УВВ), возникающие при взрывах наружных зарядов и скважинных (шпуровых) зарядов рыхления, представляют опасность для зданий и сооружений и в первую очередь застекления. В проекте взрывных работ определяется безопасное расстояние по действию УВВ, на котором исключается разрушение стекол.

При одновременном взрывании группы скважинных зарядов рыхления безопасные расстояния по действию УВВ при дроблении пород VI–VIII групп по СНиП определяются формулами:

$$R_{увв} = 200 \sqrt[3]{Q_3}, \text{ м} \quad \text{— при } 5000 > Q_3 \geq 1000 \text{ кг}; \quad (8.9)$$

$$R_{увв} = 65 \sqrt{Q_3}, \text{ м} \quad \text{— при } 1000 > Q_3 \geq 2 \text{ кг}; \quad (8.10)$$

$$R_{увв} = 63 \sqrt[3]{Q_3^2}, \text{ м} \quad \text{— при } Q_3 < 2 \text{ кг}, \quad (8.11)$$

где Q_3 – эквивалентная масса заряда ВВ, кг.

Эквивалентная масса заряда определяется следующим образом:

- для условий взрывания при длине заряда более 12 своих диаметров

$$Q_э = 12 p d_{скв} K_э N, \text{ кг}; \quad (8.12)$$

– для условий взрывания при $l_{зар} < 12d_{зар}$:

$$Q_э = p l_{зар} K_э N, \text{ кг}, \quad (8.13)$$

где p – вместимость 1 пог. м скважины, кг;

$d_{скв}$ – диаметр скважины (заряда – $d_{зар}$), м;

N – число одновременно взрываемых скважин (в группе);

$K_э$ – коэффициент забойки, определяемый в зависимости от отношения длины забойки к диаметру скважины (шпура) $l_{заб} / d_{скв}$. При отсутствии забойки – зависит от отношения свободной от заряда части скважины l_n к диаметру $d_{скв}$ (табл. 8.2).

Таблица 8.2

$l_{заб} / d_{скв}$	0	5	10	15	20
$K_э$	1	0,15	0,02	0,003	0,002
$l_n / d_{скв}$	0	5	10	15	20
$K_э$	1	0,3	0,07	0,02	0,004

Для случая инициирования скважинных зарядов с помощью ДШ необходимо добавить суммарную массу ВВ в поверхностной сети ДШ к значению $Q_э$ (при короткозамедленном взрывании определяется суммарная масса ВВ в ДШ) в одной серии замедления.

$$Q_э = Q_{эскв} + Q_{дш}, \text{ кг}. \quad (8.14)$$

Здесь $Q_{дш}$ – суммарная масса ВВ в ДШ в одной серии замедления

$$Q_{дш} = \sum l_{дш} \cdot p_{дш} K_{вв}, \text{ кг}, \quad (8.15)$$

где $\sum l_{дш}$ – суммарная длина ДШ в серии замедления, м;

$p_{дш}$ – навеска ВВ на 1 пог.м ДШ. Обычно $p_{дш} = 0,012$ или $0,006$ г/пог. м);

$K_{вв}$ – коэффициент, учитывающий мощность ВВ, используемого в ДШ. Для расчетов можно принять $K_{вв} = 1,5 \div 1,6$ (для гексогена или тэна).

При наличии нескольких групп зарядов, взрываемых с замедлениями, к расчету принимается группа с максимальной $Q_э$.

Приведенные формулы для расчета безопасных расстояний используются при интервале замедления между группами не менее 50 мс.

В зависимости от интервала замедления безопасное расстояние должно быть увеличено:

- в 2 раза при интервалах замедления от 10 до 20 мс;
- в 1,5 раза при интервалах замедления 20 – 30 мс;
- в 1,2 раза при интервалах замедления 30–50 мс.

При взрывании пород IX группы и выше по СНиП радиус опасной зоны должен быть увеличен в 1,5 раза, а при взрывании пород V группы и ниже радиус опасной зоны может быть уменьшен в 2 раза.

Если взрывные работы проводятся при отрицательных температурах воздуха, расчетное расстояние должно быть увеличено в 1,5 раза.

Суммарная масса зарядов и число групп замедления не ограничиваются.

В табл. 8.3 приведены предельно допустимые эквивалентные массы скважинных зарядов и поверхностной сети ДШ в зависимости от расстояний от места взрыва до охраняемых объектов.

При проектировании параметров конкретного массового взрыва в соответствии ЕПБ определяется допустимое число одновременно взрываемых скважин, с учетом расстояния до охраняемых от воздействия УВВ объектов (табл. 8.3).

Таблица 8.3

Расстояние от места взрыва до охраняемых объектов, м	Эквивалентная масса заряда, кг
100 – 150	2,34 – 5,33
150 – 200	5,33 – 9,47
200 – 250	9,47 – 14,79
250 – 300	14,79 – 21,3
300 – 350	21,3 – 28,99
350 – 400	28,99 – 37,87

Безопасное расстояние по действию УВВ на человека при взрывании наружных зарядов определяется по формуле

$$R_{мин} = 15\sqrt[3]{Q},$$

где Q – масса взрывающегося наружного заряда, кг.

Эта формула используется в условиях необходимости максимального приближения персонала к месту взрыва. В остальных случаях полученное расстояние следует увеличить в 2–3 раза.

Пример 8.4. Определить радиус опасной зоны по действию УВВ при взрыве наружного заряда массой 84 кг без забойки. Взрывающиеся породы – известняки IV группы по СНиП.

Поскольку масса заряда $Q_з = 84$ кг (менее 1000 кг), для определения радиуса опасной зоны воспользуемся формулой

$$R_{увв} = 65\sqrt{Q_з}.$$

При положительной температуре воздуха

$$R_{увв} = 65\sqrt{84} = 596 \text{ м.}$$

При отрицательной температуре воздуха радиус опасной зоны должен быть увеличен в 1,5 раза и $R_{увв}$ составит 894 м.

Пример 8.5. Определить радиус опасной зоны по действию УВВ при взрыве серии скважинных зарядов общей массой 25228 кг. Заряды (одной и той же массы в каждой скважине) взрывают тремя группами с интервалом замедления между ними 25 мс. В первой группе взрывают 20, во второй 40, в третьей 10 скважин. Диаметр скважин – 0,22 м, глубина скважин – 15 м, длина забойки – 4,4 м.

Взрывающиеся породы представлены гранитами X группы по СНиП. Взрывные работы проводятся при отрицательной температуре воздуха.

Поскольку взрывание проводится с интервалом замедления между группами 25 мс, к расчету принимается группа с максимальным числом скважин $N = 40$.

Значения расчетных параметров будут следующие:

$$p = 34 \text{ кг/м}, l_{заб} / d_{скв} = 20 \text{ и } K_з = 0,002.$$

Длина заряда 10,6 м т.е. больше 12 диаметров скважин, поэтому эквивалентный заряд определяется по формуле (8.12)

$$Q_3 = 12 P d_{скв} K_3 N, \text{ кг.}$$

Откуда эквивалентный заряд без учета поверхностной сети ДШ

$$Q_3 = 12 \cdot 34 \cdot 0,22 \cdot 0,002 \cdot 40 = 7,2 \text{ кг}$$

С учетом крепости пород (граниты X группы), интервала замедления между группами и отрицательной температуры воздуха радиус опасной зоны по действию УВВ определяется следующим образом

$$R_{увв} = 65 \cdot 1,5 \cdot 1,5 \cdot 1,5 \cdot \sqrt{7,2} = 589 \text{ м.}$$

8.3. Расчет безопасных расстояний по сейсмическому действию

Сейсмическая безопасность зданий и сооружений при взрывах предполагает отсутствие повреждений, нарушающих нормальное их функционирование.

В качестве параметра, определяющего степень сейсмического воздействия на здания и сооружения, М.А. Садовским было предложено использовать максимальную векторную скорость смещения грунта у основания сооружения. Экспериментально было подтверждено, что этот параметр лучше других (например, амплитуды, ускорения, смещения, периода колебаний) коррелируется с массой заряда ВВ, расстоянием до места взрыва, началом повреждения охраняемых зданий и сооружений. При этом этот параметр слабо реагирует на вариации геологического строения массива.

М.А. Садовский исходя из теории подобия предложил соотношение между векторной скоростью ($V_{см}$), массой заряда (Q) и расстоянием (r) в следующем виде

$$V_{см} = K \left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{r} \right)^n, \quad (8.16)$$

где v – скорость смещения частиц грунта, см/с;

K и n – соответственно коэффициент и показатель степени;

Q – масса заряда ВВ, кг;

r – расстояние до места взрыва, м.

Это предложение М.А. Садовского принято и учтено при разработке практических методик расчета сейсмически безопасных расстояний.

Согласно ЕПБ [10], при одновременном (без замедления) взрывании группы из N зарядов общей массой Q в тех случаях, когда расстояния от охраняемого объекта до ближайшего и наиболее удаленного заряда различаются не более чем на 20 %, безопасное расстояние определяется по формуле

$$R_c = N^{1/6} K_r K_c \alpha \sqrt[3]{Q}. \quad (8.17)$$

В соответствии с ЕПБ при неодновременном взрывании N зарядов общей массой Q со временем замедления между взрывами каждой группы не менее 20 мс, безопасное расстояние определяется по формуле

$$R_c = \frac{K_r K_c \alpha}{N^{1/4}} \cdot \sqrt[3]{Q}, \quad (8.18)$$

где R_c – безопасное расстояние от места взрыва до охраняемого здания (сооружения), м;

K_r – коэффициент, зависящий от свойств грунта в основании охраняемого здания (сооружения) (табл. 8.4);

K_c – коэффициент, зависящий от типа здания и сооружения (табл. 8.5);

α – коэффициент, зависящий от условий взрывания (для зарядов рыхления $\alpha=1$);

Q – масса заряда, кг.

Таблица 8.4

Коэффициент геологических условий, K_T

Скальные породы плотные, ненарушенные	5
Скальные породы нарушенные, неглубокий слой мягких грунтов на скальном основании	8
Необводненные песчаные и глинистые грунты глубиной не более 10 м	12
Почвенные обводненные грунты и грунты с высоким уровнем грунтовых вод	15
Водонасыщенные грунты	20

Таблица 8.5

Значения коэффициента K_c

Одиночные здания и сооружения производственного назначения с железобетонным металлическим каркасом	1,0
Одиночные здания высотой не более 2–3-х этажей с кирпичными и подобными стенами	1,5
Небольшие жилые поселки	2,0

С учетом реальных условий взрывания, допустимых скоростей смещения грунта для зданий и сооружений, жилых домов поселков и т.п. в проекте производства взрывных работ определяются предельно допустимые массы зарядов при мгновенном Q_{max} (кг) и короткозамедленном взрывании в зависимости от расстояния между охраняемыми объектами и местом взрыва одновременно взрываемых зарядов в зависимости от расстояния до охраняемых объектов R_c (м).

Расчет сейсмобезопасного расстояния по вышеприведенным формулам выполняется из предположений, что охраняемые здания и сооружения находятся в удовлетворительном техническом состоянии.

При наличии в зданиях и сооружениях повреждений (трещины в стенах, фундаменте и т.п.) безопасное расстояние должно быть увеличено, что устанавливается по заключению специализированной организации. Рассмотренная методика расчета сейсмобезопасного расстояния также неприменима для зданий и сооружений уникального характера (башни, высотные здания и т.п.) и для ответственных инженерных сооружений.

Для определения расчетной величины скорости смещения при производстве массовых взрывов на карьере с использованием короткозамедленного взрывания (КЗВ) предельная скорость смещения ($V_{см}$) определяется по формуле

$$V_{см} = \frac{K}{B} \left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{r} \right)^{1,5}, \text{ см/с}, \quad (8.19)$$

где K – коэффициент сейсмичности;

Q – общая масса ВВ, кг;

r – расстояние до точки наблюдения, м;

B – коэффициент, учитывающий степень снижения сейсмического эффекта при КЗВ:

$$B = \sqrt{\frac{2}{3}} n. \quad (8.20)$$

Здесь n – число групп одновременно взрываваемых зарядов.

Значение коэффициента сейсмичности K изменяется в диапазоне от 100 до 400, при этом при значении $K = 400$, фактические значения v будут с вероятностью 84% ниже, чем определяемые по вышеприведенной формуле.

Для многократных взрывов (массовые взрывы на карьерах) на стадии проектирования для расчета радиуса сейсмобезопасной зоны принимается верхнее значение коэффициента $K = 400$. При однократном взрыве можно принять среднее значение $K = 250$.

Выражение $B = \sqrt{\frac{2}{3}} N$ определяет степень снижения сейсмического эффекта при короткозамедленном взрывании, по которому могут определяться предельно допустимая масса заряда ВВ и радиус сейсмобезопасной зоны с учетом предельно допустимых скоростей смещения $V_{кр}$.

В соответствии с (8.19) сейсмобезопасное расстояние определяется по формуле

$$r_c = \left(\frac{K}{V_{кр} B} \right)^{\frac{2}{3}} \cdot \sqrt[3]{Q} \quad (8.21)$$

Предельно допустимая масса заряда

$$Q_{max} = \left[\left(\frac{v_{кр} B}{K} \right)^{\frac{2}{3}} \cdot r \right]^3, \text{ кг.} \quad (8.22)$$

Значения допустимых и предельных критических скоростей (большее значение) и характер вызываемых ими нарушений приведены в табл. 8.6. Здесь же приводятся шкала балльности, принятая при оценке силы землетрясения.

Таблица 8.6

Баллы	Характеристика колебаний и вызываемых ими нарушений	Допустимая скорость, см/с
1	Колебания отмечаются только приборами	0,2
2	Колебания ощущаются в отдельных случаях в тишине	0,2 – 0,4
3	Колебания ощущаются некоторыми людьми или знающими о взрыве	0,4 – 0,8
4	Колебания ощущаются многими людьми, дребезжание стекол	0,8 – 1,5
5	Осыпание побелки, повреждение ветхих зданий	1,5 – 3
6	Тонкие трещины в штукатурке; повреждение зданий, имевших деформации	3 – 6
7	Повреждение зданий, находящихся в удовлетворительном состоянии; трещины в штукатурке, падение кусков штукатурки, тонкие трещины в стенах, трещины в печах, трубах	6 – 12
8	Значительные повреждения зданий: трещины в несущих конструкциях и стенах, большие трещины в перегородках, падение труб, обвалы штукатурки	12 – 24
9	Разрушение зданий: большие трещины в стенах, расслоение кладки, падение некоторых участков стен	24 – 48
10–12	Большие разрушения и обвалы зданий	48

Выбор критической скорости является определяющим фактором при расчете сейсмобезопасных расстояний. В большинстве случаев при однократном взрыве в качестве нормативной критической скорости смещения грунта может приниматься $v_{кр} = 10 \text{ см/с}$.

Многолетняя практика ЦПЭС показывает, что для обычных зданий и сооружений, находящихся в исправном состоянии, без каких-либо повреждений основных конструктивных элементов (несущих конструкций) при многократных взрывах $V_{кр} = 3$ см/с. Для промышленных зданий, являющихся более прочными, в которых нет аппаратуры или оборудования, особо чувствительных к вибрациям, можно принять $V_{кр} = 5$ см/с. Для зданий, имеющих значительные нарушения в виде трещин, $V_{кр} = 1$ см/с.

Учитывая психологическое воздействие взрыва на людей, не связанных со взрывными работами (население поселков, городов, в которых также расположены больницы, детские учреждения и др.), можно предложить в качестве критической по психологическому фактору $V_{кр} = 1$ см/с.

В табл. 8.7 приведены предельно допустимые скорости колебания грунта в основании некоторых типов зданий и сооружений при многократном и однократном воздействии.

Таблица 8.7

Тип сооружения	Допустимые скорости колебаний, см/с	
	при многократных взрывах	при однократных взрывах
Крупнопанельные жилые здания; ветхие каменные здания; исторические и архитектурные памятники	1–1,5	3
Жилые общественные здания всех типов, кроме крупнопанельных; административно-бытовые и промышленные здания, имеющие деформации; котельные	3	6
Административно-бытовые и промышленные здания промплощадки; высокие трубы; железнодорожные тоннели; транспортные эстакады	5	10
Одноэтажные каркасные промышленные здания; металлические и монолитные железобетонные сооружения; гидротехнические тоннели; шахтные копры башенного типа с металлическим каркасом и навесными панелями	12	24
Легкие деревянные здания	5	10
Лечебные и детские учреждения (сады, ясли и др.)	1	—
Здания, стоящие на оползнях или просадочных грунтах	1	—

Выбор для расчетов предельной критической скорости смещения и, следовательно, определение предельно допустимых масс зарядов ВВ при оценке сейсмического воздействия особенно для зданий и сооружений уникального характера или имеющих те или иные повреждения должен рассматриваться каждый раз конкретно, причем иногда это сопряжено с определенными трудностями. Так, наиболее трудными являются случаи, когда необходимо установить значение критической скорости смещения для поврежденных зданий и сооружений, у которых по той или иной причине исчерпана часть их несущей способности.

Пример 8.6. Определить сейсмобезопасные массы зарядов ВВ для охраняемых объектов – жилых зданий, находящихся на расстоянии ≈ 600 м, и производственных зданий и сооружений (на расстоянии 200 м) от места производства взрывных работ. На предприятии применяется короткозамедленное взрывание скважинных зарядов общей массой 10000 кг. Схема взрывания порядная. Число групп замедлений – 10, масса ВВ в одной группе замедления – 1000 кг.

Для охраняемых объектов в соответствии с табл. 8.7 принимаем следующие предельно допустимые скорости колебаний:

- для производственных зданий и сооружений – $V_{кр} = 5$ см/с;
- жилые общественные здания всех типов $V_{кр} = 3$ см/с.

По формуле (8.23) определяется допустимая (сейсмобезопасная) масса взрывааемых зарядов при различных значениях $V_{кр}$, в зависимости от расстояния.

Определим по формуле (8.24) скорость в основании охраняемого объекта,

При максимально возможном коэффициенте сейсмичности $K = 400$ скорость смещения составит

$$V_{см} = \frac{400}{\sqrt{\frac{2}{3}} 10} \left(\frac{\sqrt[3]{10000}}{600} \right)^{1,5} = 1,05 \text{ см/с.}$$

Тоже для производственных зданий и сооружений, находящихся на расстоянии 200 м от места производства взрывных работ

$$V_{см} = \frac{400}{\sqrt{\frac{2}{3}}10} \left(\frac{\sqrt[3]{10000}}{200} \right)^{1,5} = 5,48 \text{ см/с.}$$

Для промышленных зданий и сооружений скорость смещения выше допустимой – 5 см/с. Определим предельно допустимую массу заряда ВВ

При короткозамедленном взрывании определяем

$$B = \sqrt{\frac{2}{3}}10 = 2,58.$$

Откуда

$$Q_{max} = \left[\left(\frac{5 \cdot 2,58}{400} \right)^{\frac{2}{3}} \cdot 200 \right]^3 = 8378 \text{ кг.}$$

Таким образом максимально допустимая масса заряда не должна превышать 8378 кг. Следовательно, при сохранении 10–ти групп замедлений, необходимо уменьшить массу ВВ в одной группе с 1000 кг до 837,8 кг или увеличить число групп замедления $N > 10$.

8.4. Расчет безопасных расстояний по действию ядовитых газов при взрыве зарядов на выброс

При одновременном взрывании зарядов выброса массой более 200 тонн должна быть учтена газоопасность взрыва и установлено безопасное расстояние R_r , за пределами которого содержание ядовитых газов (в пересчете на условную окись углерода) не должно превышать предельно–допустимые концентрации ПДК.

Безопасное по действию ядовитых газов расстояние в условиях отсутствия ветра или в направлении, перпендикулярном к распространению ветра, при взрыве зарядов на выброс определяется по формуле

$$R_{\Gamma} = 160\sqrt[3]{Q}, \quad (8.29)$$

где Q – суммарная масса взрывааемых зарядов, т.

В направлении, противоположном распространению ветра, радиус газоопасной зоны следует принимать также равным R_{Γ} . По направлению ветра радиус газоопасной зоны определяется по формуле

$$R_{\Gamma} = 160\sqrt[3]{Q(1 + 0,5V_{\text{в}})}, \text{ м}, \quad (8.30)$$

где $V_{\text{в}}$ – скорость ветра перед взрывом, м/с.

Пример 8.7. Определить безопасные расстояния по действию ядовитых газов при взрыве серии камерных зарядов выброса с суммарной массой $Q = 1000$ т. Скорость ветра перед взрывом $V_{\text{в}} = 3$ м/с.

В направлении, перпендикулярном направлению ветра, значение R_{Γ} рассчитывается по формуле

$$R_{\Gamma} = 160\sqrt[3]{1000} = 1600 \text{ м}.$$

В направлении, противоположном направлению ветра, радиус газоопасной зоны принимается также равным $R_{\Gamma} = 1600$ м.

Безопасное расстояние в направлении ветра рассчитывается по формуле

$$R_{\Gamma} = 160\sqrt[3]{1000(1 + 0,5 \cdot 3)} = 4000, \text{ м}$$

9. РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ НАКЛАДНЫХ И ШПУРОВЫХ ЗАРЯДОВ ДЛЯ ДРОБЛЕНИЯ НЕГАБАРИТА

9.1. Общие сведения

При производстве взрывных работ с применением скважинных зарядов рыхления выход негабаритных кусков, особенно в трудновзрываемых породах, достигает 10% и более. Повышенный выход негабарита ухудшает технико-экономические показатели работы предприятия вследствие снижения производительности процессов погрузки, транспортирования, дробления. Кроме того, дополнительные затраты на вторичное дробление повышают себестоимость добычи полученного ископаемого.

На горных предприятиях для дробления негабарита применяются в основном взрывные и механические способы. Ограниченное применение имеют термические, электрофизические и комбинированные способы.

При взрывном способе дробления негабаритных кусков широко используются методы шпуровых и наружных (накладных) зарядов ВВ.

9.2. Дробление негабарита шпуровыми зарядами

Для взрывания негабарита используются шпуры диаметром 36–42 мм, пробуренные на глубину

$$l_{шп} = (0,3 \div 0,5)d_n, \quad (9.1)$$

где d_n – средний диаметр (толщина) негабарита;

$l_{шп}$ – глубина шпура, м.

Общая масса заряда ВВ определяется по формуле

$$Q = q V_n, \text{ кг}, \quad (9.2)$$

где V_n – объем негабаритного куска, м³;

q – удельный расход ВВ для шпуровых зарядов дробления негабарита, кг/м³.

Удельный расход ВВ для взрывания негабарита шпуровыми зарядами принимают от 0,2 до 0,5 кг/м³, в зависимости от крепости пород (табл. 9.1).

Таблица 9.1

Типы зарядов ВВ	Группа пород по СНиП							
	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI
Шпуровые	140	180	230	280	330	380	440	480
Накладные	720	950	1200	1425	1700	1920	2150	2400
Кумулятивные	400	500	600	700	800	900	1000	1100

Примечание. Для определения q для 1 м³ (кг/м³) значение делится на 1000.

Масса заряда ВВ в шпуре (кг) определяется выражением

$$Q_{шт} = \frac{\pi d_{шт}^2}{4} \cdot \Delta \cdot l_{шт} \cdot K_3, \quad (9.3)$$

где $d_{шт}$ – диаметр шпура, м;

Δ – плотность заряжения ВВ, кг/м³;

$K_3 = 2/3$ – коэффициент заполнения шпура.

При значительном объеме или вытянутой форме негабарита в нем бурятся несколько шпуров, равномерно распределяемых по куску.

Положение шпуров определяется:

для одного шпура – $\frac{l_n}{2}$;

для двух шпуров – $\frac{l_n}{3}$;

для трех шпуров – $\frac{l_n}{4}$;

где l_n – линейный размер негабаритного куска, м.

Число буримых шпуров для негабаритного куска большого объема

$$N_{шт} = \frac{Q}{Q_{шт}} \text{ шт.} \quad (9.4)$$

Расход бурения на негабаритный кусок

$$l_{\text{бур}} = l_{\text{шт}} \cdot N_{\text{шт}}, \text{ м.} \quad (9.5)$$

Удельный расход бурения на 1 м³ негабарита

$$l_{\text{уд}} = \frac{l_{\text{бур}}}{V_n}, \text{ м/м}^3. \quad (9.6)$$

Базовый расход ВВ ($q_б$) на дробление 1000 м³ негабаритных кусков (валунов) [13].

Для нахождения удельного расхода ВВ при взрывном дроблении негабарита используют выражение

$$q = q_б \cdot K_{\text{ВВ}} \cdot K_{\text{д}} \cdot (1 \pm K_{\text{вар}}), \text{ кг/м}^3, \quad (9.7)$$

где $K_{\text{ВВ}}$ – коэффициент относительной работоспособности ВВ;

$$K_{\text{д}} = 0,5 \frac{l_n}{l_k} \text{ – коэффициент, учитывающий интенсивность дробления}$$

негабаритного куска;

$$\frac{l_n}{l_k} \text{ – соотношение длины ребра негабаритного куска и требуемого}$$

размера куска (l_k);

$K_{\text{вар}}$ – коэффициент вариации нормального расхода ВВ в зависимости от группы грунтов по СНиП (табл. 9.2).

Таблица 9.2

Категория по СНиПу	IV–V	VI–VII	VIII–IX	X–XI
$K_{\text{вар}}$	$\frac{0,1}{0,2}$	$\frac{0,08}{0,16}$	$\frac{0,06}{0,13}$	$\frac{0,04}{0,1}$

Примечание. В числителе приведены значения $K_{\text{вар}}$ для шпуровых зарядов, в знаменателе – для наружных.

9.3. Дробление негабарита накладными и кумулятивными зарядами

При взрывании наружными (накладными) и кумулятивными зарядами масса ВВ определяется по формуле

$$Q = q_n V_n, \text{ кг,} \quad (9.8)$$

где q – удельный расход ВВ для наружного или кумулятивного заряда (табл. 9.1 и 9.2), кг/м³.

Параметры кумулятивных зарядов и предельные размеры негабаритных кусков приведены в табл. 9.3.

Таблица 9.3

Тип кумулятивного заряда	Общая масса, г	Предельные размеры разрушаемых кусков	
		Максимальная толщина, м	Объем куска, м ³
ЗКП–200	245	0,8	0,8
ЗКП–400	475	1,0	1,6
ЗКП–1000	1229	1,4	2,5
ЗКП–2000	2179	2,2	4,4
ЗКП–4000	4000	2,8	6,9
ЗКН–180	180	0,55	0,75
ЗКН–260	260	0,75	0,9
ЗКН–500	500	1,0	1,6
ЗКН–1000	1000	1,2	2,0
ЗКН–2000	2000	1,6	3,1
ЗКН–4000	4000	2,0	5,0

Размер негабаритного куска (максимальный размер кондиционного куска) определяется из вместимости ковша экскаватора (или погрузчика) E , м³:

$$d_n \leq 0,75 \cdot \sqrt[3]{E}, \quad (9.9)$$

или по вместимости транспортного средства (кузов автосамосвала) V_T , м³:

$$d_n \leq 0,5 \cdot \sqrt[3]{V_T}. \quad (9.10)$$

Допустимый размер кусков при погрузке в перегрузочные бункеры, приемные воронки дробилок, грохотов и т.п. принимают по формуле

$$d_n \leq (0,75 \div 0,85) \cdot B, \text{ м}, \quad (9.11)$$

где B – ширина приемного отверстия, м.

Средний диаметр взорванной горной массы определяется по результатам взрыва с использованием, например, планиметрического или фотопланиметрического методов [8]

$$d_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^n \gamma_i \cdot d_i}{100}, \quad (9.12)$$

где γ_i – процентное содержание i -й фракции, %;

d_i – середина интервала, м.

При отсутствии данных среднее значение может быть рассчитано по формуле⁴

$$d_{cp} \approx \frac{1}{4} \cdot d_n, \text{ м.} \quad (9.13)$$

Используя известную зависимость

$$\frac{d_{cp}}{d_n} = \frac{0,27 \pm 10\%}{\left(\frac{V_e^{+d_n} - V_n^{+d_n}}{V_e^{+d_n}} \right)^3}, \%, \quad (9.14)$$

выход негабарита в % определяется по формуле

$$V_n^{+d_n} = V_e^{+d_n} \left[1 - \left(\frac{0,27 d_n}{d_{cp}} \right)^{1/3} \right], \%, \quad (9.15)$$

где $V_e^{+d_n}$ – содержание негабаритной фракции в массиве до взрыва, %, которое определяется по фактическим замерам или ориентировочно находится по табличным данным.

При $d_{cp} \leq \frac{1}{4} d_n$ выход негабарита принимается равным нулю – $V_n^{+d_n} = 0$.

В табл. 9.4 приведены ориентировочные величины содержания отдельностей различных размеров в породах I–V категории трещиноватости по классификации Межведомственной комиссии по взрывному делу (МКВД).

Таблица 9.4

Категория пород по МКВД	Среднее содержание (%) в массиве отдельностей размером					
	+300 мм	+500 мм	+700 мм	+1000 мм	+1500 мм	+2000 мм
I	до 10	До 5	≈ 0	Нет	Нет	Нет
II	10–70	5–40	До 30	До 5	≈ 0	Нет
III	70–100	40–100	30–80	5–40	До 100	≈ 0
IV	100	100	80–100	40–100	10–50	До 10
V	100	100	100	100	> 50	> 10

Суммарный выход негабарита (в м³) при взрывании блока объемом

$V_{\text{бл}}$ определяется выражением

$$V_{\text{нег}} = 0,01 \cdot V_{\text{бл}} \cdot V_n^{+d_n}, \text{ м}^3, \quad (9.16)$$

где $V_n^{+d_n}$ – выход негабарита, %.

Объем одного негабаритного куска определяется

$$v_n \approx d_n^3 \cdot \varepsilon, \text{ м}^3, \quad (9.17)$$

где ε – коэффициент формы. В расчете может приниматься равным $\varepsilon = 1$.

9.4. Самостоятельная работа

Рассчитать параметры и составить паспорт производства взрывных работ при дроблении негабарита накладными (наружными), шпуровыми и кумулятивными зарядами с использованием электрического способа взрывания или взрывания с помощью детонирующего шнура (ДШ).

1. Объем массового взрыва (взрываемого блока) определяется по условиям задания по главе 7.

2. Определяется максимальный размер кондиционного куска (размер негабарита) d_n и его объем $v_n \approx d_n^3, \text{ м}^3$.

3. Рассчитывается средний размер куска взорванной горной массы – $d_{\text{ср}}, \text{ м}$.

4. По табл. 9.4 определяется содержание негабаритной фракции в массиве до взрыва – $V_e^{+d_n}, \%$.

5. Рассчитывается (или принимается) процент выхода негабарита во взорванной горной массе – $V_n^{+d_n}, \%$.

6. Рассчитывается общий объем негабаритной горной массы $V_m, \text{м}^3$.

7. Определяется количество негабаритных кусков во взорванной массе N_n , шт.

8. Рассчитывается удельный выход негабаритных кусков на 1 м^3 взорванной горной массы.

9. Рассчитываются параметры взрывного дробления негабарита для шнуровых, накладных и кумулятивных зарядов.

По результатам расчета составляется типовой паспорт производства взрывных работ для дробления негабаритных кусков различного объема (табл. 9.5).

Таблица 9.5

Типовой паспорт дробления негабарита

Показатели	Значения				
1. Взрывание шпуровыми зарядами					
Объем негабарита, м ³	$v_H =$	2,0	4,0	6,0	8,0
Средний линейный размер негабарита, м					
Глубина шпуров, м					
Тип ВВ					
Удельный расход ВВ, кг/м ³					
Вес заряда на негабарит, кг					
Вес заряда на 1 шпур, кг					
Количество шпуров, шт.					
Расстояние между шпурами, м					
Длина забойки, м					
2. Накладные заряды					
Тип ВВ					
Удельный расход ВВ, кг/м ³					
Вес заряда на негабарит, кг					
3. Кумулятивные заряды					
Удельный расход ВВ, кг/м ³					
Вес заряда на негабарит, кг					
Тип кумулятивного заряда					

Примечание. Объем негабарита в первом столбце паспорта принимается по условиям расчета главы 7.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кутузов Б.Н. Белин В.А. Проектирование и организация взрывных работ. – М.: Горная книга, 2012. – 416 с.
2. Кутузов Б.Н. Безопасность взрывных работ в горном деле и промышленности. – М.: Горная книга, 2009. – 670 с.
3. Методы ведения взрывных работ. Специальные взрывные работы, Под редакцией проф. Белина В.А. – М.: МГГУ. –563 с.
4. Цейтлин Я.И., Смолин Н.И. Сейсмические и ударные воздушные волны промышленных взрывов. М.: Недра, 1981.
5. Нормативный справочник по буровзрывным работам / Ф.А.Авдеев, В.Л.Барон, Н.В.Гуров, В.Х.Кантор. – 5–е изд., перераб. и доп. – М.: Недра, 1986.
6. Технические правила ведения взрывных работ на дневной поверхности.– М.: Недра, 1972.
7. Физика взрыва. Изд. 2–е, перераб. Под ред. К.П.Станюковича. – М.: Наука, 1975.
8. Дубнов Л.В., Бухаревич Н.Р., Романов А.И. Промышленные взрывчатые вещества. – М.: Недра, 1988.
9. Светлов Б.Я., Яременко Н.Е. Теория и свойства промышленных ВВ. – М.: Недра, 1972.
10. Андреев К.К., Беляев А.Ф. Теория взрывчатых веществ. – М.: Оборонгиз, 1960.
11. Поздняков З.Г., Росси Б.Д. Справочник по промышленным взрывчатым веществам и средствам взрывания. Изд. 2, перераб. и доп. – М.: Недра, 1977.
12. Кук М.А. Наука о промышленных взрывчатых веществах. – М.: Недра, 1980.
13. Кутузов Б.Н. Разрушение горных пород взрывом. – М.: МГИ, 1992.
14. Кутузов Б.Н. Разрушение горных пород взрывом. Взрывные

технологии в промышленности. – М.: МГГУ, 1994.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение 1

Молекулярные массы и теплоты образования веществ (продуктов взрыва)

Вещество	Химическая формула	Молекулярная масса	Кислородный баланс	Теплота образования при постоянном объеме	
				ккал/моль ¹⁾	кДж/моль
Оксид углерода	CO	28	-57,2	27,17	113,7
Двуокись углерода	CO ₂	44	0	94,51	395,6
Вода (пар)	H ₂ O	18	0	57,49	240,6
Вода (жидкость)	H ₂ O	18	0	67,5	282,5
Оксид азота	NO	30	53,3	-21,6	-90,37
Двуокись азота	NO ₂	46	78,26	-8,09	-33,89
Четырехокись азота	N ₂ O ₄	92	66,6	-2,24	-9,37
Метан	CH ₄	16	-399,9	17,7	
Углерод аморфный	C	12	-266,67	—	—
Алюминий	Al	27	-88,9	—	—
Оксид алюминия	Al ₂ O ₃	102	0	398,1	1666,4
Карбид алюминия	Al ₄ C ₃	144	-133,4	50	—
Нитрид алюминия	AlN	41	-57,2	79	—
Оксид железа	Fe ₂ O ₃	159,5	0	197,6	—
Оксид кальция	CaO	56	0	150,8	635,1
Оксид калия	K ₂ O	52	0	98,04	361,5
Оксид натрия	Na ₂ O	62	0	102,9	430,6
Углекислый натрий	Na ₂ CO ₃	106	0	269,02	—
Углекислый кальций	CaCO ₃	100	0	288,6	—
Хлористый натрий	NaCl	58,5	0	98,04	410,9
Хлористый калий	KCl	74,5	0	104,7	—
Хлористый аммоний	NH ₄ Cl	53,5	-44,9	73,2	—

Примечание ¹⁾ — по данным [8, 9]

Теплоты образования индивидуальных ВВ и компонент смесевых ВВ

№ пп	Наименование	Химическая Формула ВВ	Молекулярная масса, М	Кислородный баланс, К _б , %	Теплота образования при постоянном объеме	
					ккал/моль ¹⁾	кДж/моль
1	2	3	4	5	6	7
1.	Азотнокислый аммоний аммиачная селитра (АС)	NH ₄ NO ₃	80	+20	84,75	354,8
2.	Азотнокислый натрий	NaNO ₃	85	+47,1	110,59	462,8
3.	Азотнокислый калий	KNO ₃	101	+39,6	116,93	489,5
4.	Азотнокислый кальций	Ca(NO ₃) ₂	164	+48,8	221,7	
5.	Нитрид натрия	NaNO ₂	69	+46,4		366,2
6.	Перхлорат аммония	NH ₄ ClO ₄	117,5	+34,0	67,3	281,7
7.	Перхлорат калия	KClO ₄	138,5	+46,2	103,0	431,1
8.	Перхлорат натрия	NaClO ₄	122,5	+52,3	91,5	
9.	Хлорат натрия	NaClO ₃	106,5	+45,1	82,4	345,3
10.	Хлорат калия	KClO ₃	122,5	39,18	92	
11.	Стеарат кальция	C ₃₆ H ₇₀ O ₄ Ca	607	-274	641,1	
12.	Коллоидный хлопок (12,2% N)	C _{22,5} H _{28,8} N _{8,7} O _{36,1}	998,2	-36,9	645	
13.	Дизельное топливо (ДТ) ²⁾	C ₁₃ H ₂₀	176	-327,3	37,9	158,8
14.	Минеральные масла	C ₁₂ H ₂₆	170	-348,2	81,6	341,9
15.	Карбамид (мочевина)	CH ₄ N ₂ O	60	-80,0	75,7	333,6
16.	Мука злаков	C ₁₅ H ₂₅ O ₁₁	381	-132,28	—	—
17.	Древесная мука	(C ₁₅ H ₂₂ O ₁₀) _n	362	-137,02	479	2002 19600 ³⁾
18.	Бумага (целлюлоза)	C ₆ H ₁₀ O ₅	162	-118,52	226	950
19.	Октодекан (парафин)	C ₁₈ H ₃₆	254	-346,0	133,5	
20.	Парафин	C ₂₄ H ₅₀	338	-345,6		46500 ³⁾ *

1	2	3	4	5	6	6
21.	Тротил Тринитротолуол	$C_6H_2(NO_2)_3CH_3$	227	-74	10,1 (13,5)	56,6
22.	Нитроглицерин Глицеринтринитрат	$C_3H_5(ONO_2)_3$	227	+3,5	83,7	350,7
23.	Нитроглицоль Этиленглицольдинитрат	$C_2H_4(ONO_2)_2$	152	0	55,75	229,61
24.	Гексоген	$C_3H_6N_6O_6$	222	-21,6	-22,3 (20,86)	-93,3
25.	ТЭН Пентаэритритетранитрат	$C_5H_8(ONO_2)_4$	316	-10,1	120 (122,41)	402,3
26.	Динитронафталин	$C_{10}H_6(NO_2)_2$	218	-139,4	-11,9 (-7,6)	-29,8
27.	Октоген	$C_4H_8N_8O_8$	296	-21,6		-109,4
28.	Нитродиглицоль Диэтиленглицольдинитрат	$C_4H_8O(ONO_2)_2$	196	-40,8	99,3	407,4
29.	Нитрометан	CH_3NO_2	61	-39,34	-27,03	84,0
30.	Тетранитрометан	$C(NO_2)_4$	196	+48,98		49,86
31.	М-Динитробензол	$C_6H_4(NO_2)_2$	168	-95,24		23,88
32.	Гуадинитрат	$HNC(NH_2)_2HNO_3$	122	-19,67		366,63
33.	Тринитроанилин	$C_6H(NO_2)_4NH_2$	218	-69,72		-29,75
34.	Маннитгеканитрат	$C_6H_8(ONO_2)_6$	452	+7,08		444,56
35.	Тетрил Тринитрофенил- метилнитрамин	$C_6H_2(NO_2)_4NCH_3$	287	-47,4	-13,3 (-9,91)	-41,9
36.	Тринитробензол	$C_6H_3(NO_2)_3$	213	-56,34		9,64
37.	Динитрофенол	$C_6H_3(NO_2)_2OH$	184	-78,26		223,33
38.	Тринитрофенол	$C_6H(NO_2)_3OH$	228	-41,92		212,01
39.	Тринитрокрезол	$C_6H(NO_2)_3(OH)CH_3$	243	-62,55		220,81
40.	Стифниновая кислота Тринитрорезорцин	$C_6H(NO_2)_3(OH)_2$	245	-35,92		427,8
41.	Тринитроанизол	$C_6H_2(NO_2)_3OCH_3$	243	-62,55		148,75
42.	Тринитронафталин	$C_{10}H_5(NO_2)_3$	263	-100,4		28,29
43.	Пикрат аммония	$C_6H_2(NO_2)_3ONH_4$	246	-52,03		377,1
44.	Нитроцеллюлоза (Пироксилин)	$C_{24}H_{29}O_9(ONO_2)_{11}$	1143	-28,6		2391

1	2	3	4	5		6
45.	Динитротолуол	$C_6H_3(NO_2)_2CH_3$	182	-114,29	15,35	64,11
46.	Цианутриазит	C_3N_{12}	204	-47,06		-930,18
47.	Тринитротриазидобензол	$C_6(NO_2)_3(N_3)_3$	336	-28,57		1139,68
48.	Пикриновая кислота	$C_6H_2(NO_2)_3OH$	229	-45,4		288
49.	Нитрат тринитрофенил- гликолевого эфира	$C_6H_2(NO_2)_3OC_2H_4ONO$ 2	318	-45,28		257,27
50.	Пикрат калия	$C_6H_2(NO_2)_3OK$	257			473,5

Примечания: ¹⁾ – по данным З.Г. Позднякова, Б.Д. Росси [5], в скобках по данным Б.Я.Светлова [3]; ²⁾ – на практике при расчетах используют идеализированную формулу дизельного топлива – додекан $C_{12}H_{26}$ (строка 14); ³⁾ – теплота сгорания вещества.

УДК 622.235

Белин В.А., Горбонос М.Г., Нутфуллоев Г.С., Заиров Ш.Ш.,
Тухташев А.Б. Буровзрывные работы. Отв. ред.: Норов Ю.Д. – Бухоро,
изд-во «Бухоро», 2017. – 136 с.

*Утверждено к печати советом Навоийского государственного горного
института.*

Редактор: *С.Субхонов*
Корректор: *О.Мухаммедов*
Технический редактор: *С.Носиров*
Верстка: *Л.Хабибова*

Лиц. изд. АІ №115, 30.09.2008 г.
Изд. № 3–58. Сдано в набор __. __. 2017 г.
Подписано в печать __. __. 2017 г.
Формат 60х84 1/16. Бумага офсетная.
Печать офсетная. Гарнитура Georgia.
Уч.–изд. л. 7,07. Усл.–печ. л. 11,94
Тираж 300. Цена договорная

Издательство «Бухоро».
200018, Бухара, ул. И. Муминова, 27.

Отпечатано в типографии ООО «Konchi–texproekt». Заказ №160
210100, г. Навои, ул. Зарафшан 4–16