

**Министерство образования и науки Российской Федерации  
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«ПЕТРОЗАВОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»  
(ПетрГУ)  
Горно-геологический факультет  
Кафедра горного дела**

**Горбонос М.Г.**

## **МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ**

**по практическим занятиям и выполнению самостоятельных работ  
по дисциплине «Технология и безопасность взрывных работ»  
для студентов специальности 130403 «Открытые горные работы».  
Часть 1**

**Петрозаводск 2011**

Методические указания по практическим занятиям и задания для самостоятельной работы по дисциплине "Технология и безопасность взрывных работ" для студентов специальности 130403 "Открытые горные работы". Часть 1. – Петрозаводск, Петрозаводский государственный университет, 2011 – 51 с.

Методические указания (часть 1) содержат сведения, необходимые для практических занятий и при выполнении домашних заданий (самостоятельных работ) по дисциплине "Технология и безопасность взрывных работ".

В каждом практическом занятии приведены необходимые теоретические и справочные материалы, методика выполнения самостоятельных работ, порядок оформления и варианты заданий для домашних работ. В практических занятиях № 1-4 рассмотрены некоторые вопросы теории промышленных ВВ и, в первую очередь, термодинамика (термохимия) ВВ, включающая методы составления реакций взрывчатого превращения, определения состава продуктов взрыва (ПВ), расчета основных взрывчатых и детонационных характеристик ВВ.

Методические указания могут быть полезны для студентов других специальностей изучающих дисциплину "Технология и безопасность взрывных работ", дипломникам при подготовке специальных частей выпускных квалификационных работ (ВКР).

Составитель проф., к.т.н. Горбонос М.Г.

Одобрено Учебно-методической комиссией специальности 130403 "Открытые горные работы"

## ОГЛАВЛЕНИЕ

	Стр.
Общие сведения.....	4
1. Практическое занятие № 1. Расчет кислородного баланса индивидуальных и смесевых (многокомпонентных) взрывчатых веществ (ВВ).....	11
2. Практическое занятие № 2. Принципы составления реакций взрывчатого превращения ВВ.....	17
3. Практическое занятие № 3. Расчет термодинамических характеристик ВВ.....	24
3.1. Расчет теплового эффекта реакции взрывчатого превращения ВВ.....	24
3.1.1. Закон Гесса. Расчет теплоты взрыва ВВ.....	24
3.1.2. Закон Гесса. Расчет теплоты взрыва ВВ.....	25
3.1.3. Аддитивный метод оценки теплоты взрыва смесевых ВВ.....	27
3.2. Расчет температуры взрыва.....	28
3.3. Расчет объема газообразных продуктов взрыва.....	30
3.4. Расчет давления газообразных продуктов взрыва.....	31
3.5. Расчет идеальной работоспособности ВВ и полного термодинамического КПД взрыва.....	32
3.5.1. Расчет идеальной работоспособности ВВ.....	32
3.5.2. Расчет полного термодинамического КПД взрыва.....	34
3.5.3. Баланс энергии при взрыве ВВ.....	35
4. Практическое занятие № 4. Расчет детонационных характеристик ВВ.....	38
4.1. Общие сведения.....	38
4.2. Расчет скорости детонации ВВ.....	39
4.3. Расчет идеальной скорости детонации.....	40
4.4. Расчет детонационного давления (давление в точке Чепмена-Жуге).....	41
4.5. Расчет плотности продуктов взрыва в детонационной волне.....	42
4.6. Расчет скорости разлета ПВ.....	42
5. Самостоятельная работа: «Расчет термодинамических характеристик промышленных ВВ».....	43
Список литературы.....	46
Приложения.....	47
Приложение 1. Молекулярные массы и теплоты образования веществ (продуктов взрыва).....	47
Приложение 2. Теплоты образования индивидуальных ВВ и компонент смесевых ВВ.....	48

## Общие сведения

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

История развития взрывчатых веществ начиналась с использования селитросодержащих 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 скачок 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 происходит 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 во-

дорода 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 быстрому химическому превращению 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.*

**Инициирующие ВВ** применяются для возбуждения детонационных процессов в промышленных ВВ. По чувствительности (восприимчивости) к внешним воздействиям инициирующие ВВ подразделяются:

- *первичные инициирующие ВВ*, отличающиеся высокой чувствительностью, но небольшой мощностью: гремучая ртуть, ТНРС (тринитрорезорцинат свинца), азид свинца и др., применяемые в средствах взрывания – капсюль-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, нитроэферы: 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 – свыше 200°C с разложением. В смеси с тротилом (температура плавления которого около 80°C) получают литевой 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.

Таблица 1

Тип ВВ по химическому составу	Основная компонента	Типы ВВ
Аммиачно-селитренные ВВ	Аммиачная селитра (нитрат аммония) $\text{NH}_4\text{NO}_3$	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. <b>Содержат нитратную группу <math>-\text{ONO}_2</math></b>	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:  <b>-содержащие нитрогруппу <math>-\text{NO}_2</math></b>	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 $\text{CH}_3\text{NO}_2$	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.
<b>- содержащие нитраминную группу <math>-\text{N}=\text{NO}_2</math></b>	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.
<b>- содержащие как нитрогруппу <math>-\text{NO}_2</math>, так и нитраминную группу <math>-\text{N}=\text{NO}_2</math></b>	Тетрил (тринитрофенилметилнитрамин) $\text{C}_6\text{H}_2(\text{NO}_2)_4\text{NCH}_3$	Тетрил применяется в качестве вторичного ВВ при изготовлении капсульдетонаторов (КД и ЭД), тетриловых шашек.
Хлоратные и перхлоратные ВВ, содержат соли хлорноватой ( $\text{HClO}_3$ ) и хлорной ( $\text{HClO}_4$ ) кислот	Хлораты: Калия $\text{KClO}_3$ Натрия $\text{NaClO}_3$  Перхлораты: Калия $\text{KClO}_4$ Аммония $\text{NH}_4\text{ClO}_4$	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. 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 – капсуль-детонаторов и электродетонаторов применяются инициирующие ВВ:

- соли тяжелых металлов гремучей кислоты – гремучая ртуть -  $\text{Hg}(\text{ONC})_2$ ;
- соли азотистоводородной кислоты (азиды) – азид свинца -  $\text{PbN}_6$ ;
- 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-суспензии 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. 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 2

<p><b>Медленное химическое превращение ВВ</b></p>	<p>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).</p>
<p><b>Горение ВВ</b>  <i>Стационарное или нормальное горение</i>   <i>Нестационарное, взрывное горение</i></p>	<p>Возникает при поджигании ВВ. Горение - самораспространяющийся, сравнительно медленно протекающий процесс с переменной скоростью от <math>10^{-1}</math> до <math>10^3</math> 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 (<math>p</math>): <math>u = A + Bp^v</math>.          Здесь: <math>A, B</math> – постоянные для данного ВВ величины, <math>v \leq 1</math>.          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.</p>

<b>Взрыв,</b> низко-скоростной не-стационарный режим протека-ния детонации	Особенностью этого процесса является переменная нестационарная сверх-звуковая 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, вы-зывающий деформацию и разрушение объекта на небольших расстояниях.
<b>Нормальная де-тонация</b>	Распространение взрыва по заряду ВВ с постоянной и максимальной для данного ВВ и данных условий взрывания скоростью, превышающей ско-рость звука в данном веществе. Детонация есть стационарная форма взрыва. В условиях детонации дости-гается максимальное разрушительное действие взрыва.

## Практическое занятие № 1. Кислородный баланс индивидуальных и смесевых (многокомпонентных) взрывчатых веществ (ВВ)

### 1.1. Общие сведения

Как было показано выше, различают индивидуальные ВВ, типа химических соединений и смесевые многокомпонентные ВВ, состоящие, по крайней мере, из двух, химически не связанных друг с другом, компонен-тов.

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, представ-ляющие собой устойчивые термодинамические соединения.

Индивидуальные ВВ, в большинстве своем, представляют собой ки-слородосодержащие органические соединения. Кислород, являющийся со-ставной частью химического соединения, обеспечивает полное или час-тичное внутримолекулярное горение (окисление) горючих элементов.<sup>1</sup>

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

<sup>1</sup> 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 соедине-ний могут служить галоидные и сернистые соединения азота ( $NCl_3$ ,  $NHJ_2$ ,  $N_4S_4$ ), кото-рые легко взрываются от ничтожных механических воздействий. Особенностью таких соединений, согласно Вант-Гоффу, является присутствие в их молекулах особых, т.н. эксплозофорных, соединений [1].

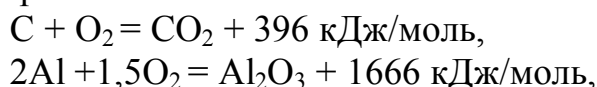
Обеспеченность состава ВВ кислородом характеризуют кислородным балансом ВВ ( $K_o$ ) или кислородным коэффициентом ( $\alpha_k$ ), которые в относительных единицах выражают избыток или недостаток кислорода, необходимого для полного окисления горючих элементов ВВ (углерода, водорода, металлов) до их высших окислов.

## 1.2. Кислородный баланс ВВ

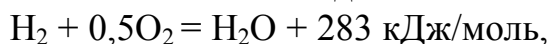
По определению, кислородным балансом называется отношение избытка или недостатка кислорода во взрывчатом веществе, необходимого для полного окисления горючих элементов до их высших окислов, выраженного в грамм-атомах, к грамм-молекулярной массе ВВ. Обычно величина кислородного баланса выражается в процентах.

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

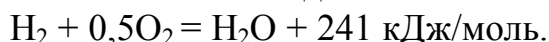
Реакции полного окисления основных горючих элементов ВВ выглядят следующим образом:



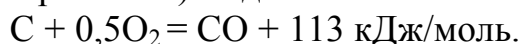
для жидкого агрегатного состояния воды



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

$$K_o = \frac{[d - (2a + b/2)] \cdot 16}{M_{\text{ВВ}}} \cdot 100 \%, \quad (1.1)$$

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

$$\alpha_k = \frac{d}{2a + b/2}. \quad (1.2)$$

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

**Пример 1.1.** Определить  $K_{\delta}$  и  $\alpha_{\kappa}$  для тринитротолуола (тротила)  $C_7H_5(NO_2)_3$ , молекулярная масса которого  $M_{ВВ} = 227$  г-моль.

Приводя химическую формулу к виду условной (брутто-формуле) -  $C_7H_5N_3O_6$ , определяем кислородный баланс и кислородный коэффициент ВВ

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

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

**Пример 1.2.** Рассчитать кислородный баланс наиболее распространенной компоненты промышленных ВВ - аммиачной селитры  $NH_4NO_3$ , молекулярная масса которой  $M_{AC} = 80$  г-моль.

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

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

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

- вычисляется количество каждого из элементов, содержащихся в 1 кг смеси (в грамм-атомах);
- составляется условная (брутто) формула вида  $C_a H_b N_c O_d Al_e$ ;
- рассчитываются  $K_{\delta}$  и  $\alpha_{\kappa}$ :

$$K_{\delta} = \frac{[d - (2a + 0,5b + 1,5e)] \cdot 16}{1000} \cdot 100\% , \quad (1.3)$$

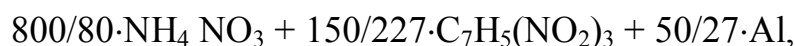
$$\alpha_{\kappa} = \frac{d}{2a + 0,5b + 1,5e} . \quad (1.4)$$

**Пример 1.3.** Составить условную (брутто) формулу, определить  $K_{\delta}$  и  $\alpha_{\kappa}$  для смесевых трехкомпонентного ВВ, состоящего из 80% аммиачной селитры ( $M=80$  г-моль), 15% тротила ( $M=227$  г-моль) и 5% алюминия ( $M=27$  г-моль).

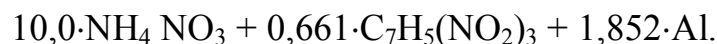
Рассчитаем элементарный состав (брутто-формулу) 1 кг такого ВВ.

<sup>2</sup> 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.

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



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

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

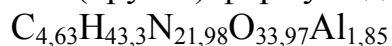
$$\Sigma \text{C} = 0,661 \cdot 7 = 4,634$$

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

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

$$\Sigma \text{Al} = 1,852.$$

Условная (брутто) формула для ВВ имеет вид



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

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

Кислородный баланс ВВ равен

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

Кислородный коэффициент ВВ

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

Для удобства составления условной (брутто) формулы можно воспользоваться табличной формой записи (табл. 1.1)

Таблица 1.1

Компоненты ВВ	К-во г-молей в 1 кг ВВ	$\text{C}_a^{12}$	$\text{H}_b^1$	$\text{O}_c^{16}$	$\text{N}_d^{14}$	$\text{Al}_e^{27}$
Аммиачная селитра $\text{NH}_4\text{NO}_3$	10,0	-	40,0	30,0	20,0	-
Тротил (ТНТ) $\text{C}_7\text{H}_5\text{N}_3\text{O}_6$	0,661	4,627	3,3	3,97	1,983	-
Алюминий Al	1,852	-	-	-	-	1,852
<b>Итого в 1 кг ВВ</b>		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

$$m_i = \frac{10 \cdot \chi_i}{M_i}, \quad (1.5)$$

где  $M_i$  - молекулярная масса  $i$ -й компоненты ВВ, г-моль;  
 $\chi_i$  - процентное содержание  $i$ -й компоненты ВВ.

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

**Пример 1.4.** Определить  $K_{\delta}$  для двухкомпонентного ВВ граммонита 30/70, состоящего из 30% аммиачной селитры  $K_{\delta} = +20\%$  и 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 1.5.** Определить  $K_{\delta}$  для трехкомпонентного ВВ гранулита АС-8, состоящего из 90% аммиачной селитры, 2% индустриального масла, 8% алюминия.

Определим  $K_{\delta}$  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  $K_{\delta}$  для компонент ВВ определяется их процентное содержание.

**Пример 1.6.** 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 ( $K_{\text{б}} \approx 1 \div 2\%$ ), 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.

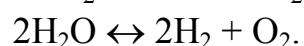
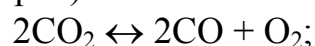
### 1.3. Классификация ВВ по величине кислородного баланса

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

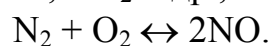
1. **Первая группа** - ВВ с положительным или нулевым  $K_{\text{б}}$ , т.е. с количеством кислорода в составе ВВ, достаточным для полного окисления горючих элементов:

$$d \geq 2a + b/2, \text{ откуда } K_{\text{б}} \geq 0, \alpha_k \geq 1. \quad (1.6)$$

В этом случае в составе ПВ в основном содержатся газообразные  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{N}_2$  и частично продукты диссоциации углекислого газа и воды (водяных паров):



При значительном избытке кислорода возможно образование окислов азота  $\text{NO}$ ,  $\text{NO}_2$  и др., имеющих характерный желто-бурый цвет ( $\text{NO}_2$ ):





Типичным представителем ВВ данной группы является нитроглицерин (глицеринтринитрат) –  $C_3H_5(ONO_2)_2$   $K_6 = + 3,5\%$ .

2. **ВВ с отрицательным  $K_6$** , т.е. с количеством кислорода, недостаточным для полного окисления горючих элементов,  $K_6 < 0$ ,  $\alpha_k < 1$ .

При этом принято различать:

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

$$a + b/2 \leq d < 2a + b/2. \quad (1.7)$$

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 (С) в виде сажи (исследования показывают, что в составе ПВ может содержаться некоторое количество  $H_2$  и  $CO_2$ ):

$$d < a + b/2. \quad (1.8)$$

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 (С):



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 ( $K_6 = - 74\%$ ).

## **Практическое занятие № 2.** Принципы составления реакций взрывчатого превращения ВВ

### 2.1. Метод максимального энерговыделения (принцип Берглю) 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 Берглю – максимального энерговыделения). Избыток кислорода выде-

ляется в виде собственно  $O_2$  или расходуется на образование окислов азота:  $NO$ ,  $NO_2$ ,  $N_2O_5$  и др.

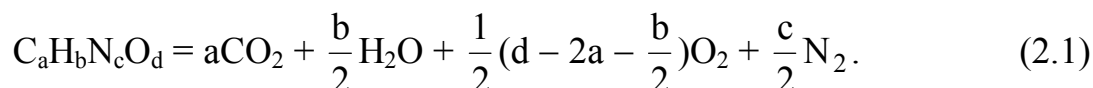
При высоких начальных температуре и давлении в начальный момент взрыва возможна частичная диссоциация  $CO_2$  и  $H_2O$ , а также образование эндотермических соединений  $NO$  и  $C_2N_2$  и др.:



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  $C_3H_5(ONO_2)_3 - K_6 = +3,5\%$ , нитрогликоль  $C_3H_5(ONO_2)_2 - K_6 = 0$ .

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

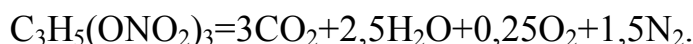


**Пример 2.1.** Рассмотрим реакцию взрывчатого превращения нитроглицерина  $C_3H_5(ONO_2)_3$ , имеющего положительный  $K_6$ :

$$K_6 = \frac{[9 - (2 \cdot 3 + 5/2)] \cdot 16}{227} \cdot 100 = +3,52 \%,$$

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

Реакция взрывчатого превращения нитроглицерина имеет следующий вид:



Для смесового двухкомпонентного ВВ, состоящего из первой компоненты с недостатком кислорода и второй с положительным  $K_6$ , условие получения сбалансированного по кислороду ВВ ( $K_6=0$ ) можно записать в общем виде



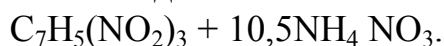
откуда значение  $x$  легко определяется из уравнения

$$2a + \frac{b}{2} - d = x(d_1 - 2a_1 - \frac{b_1}{2}). \quad (2.3)$$

Для смесей органических ВВ с аммиачной селитрой



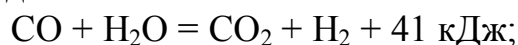
Для смеси аммиачной селитры с тротилом, имеющей  $K_0=0$ , молекулярное уравнение имеет вид



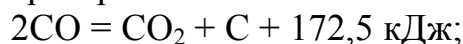
## 2.2. Методы составления реакций взрывчатого превращения для ВВ с отрицательным кислородным балансом

Более сложным является составление реакций взрывчатого превращения для ВВ, имеющих отрицательный кислородный баланс ( $K_0 < 0$ ). 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:

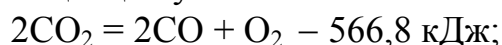
1. Водяного газа



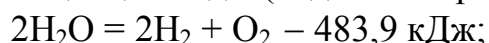
2. Генераторного газа



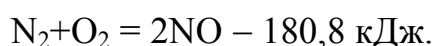
3. Диссоциация углекислого газа



4. Диссоциация воды (водяных паров)



5. Окисление азота



При взрыве ВВ с  $K_0 < 0$  повышение их плотности заряжения 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.

### 2.2.1. 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 (СО);
- оставшаяся часть кислорода равными долями расходуется на окисление водорода (Н) до воды (Н<sub>2</sub>О) и окиси углерода до двуокиси (СО→СО<sub>2</sub>);
- при недостатке кислорода выделяются свободные элементы (Н<sub>2</sub>, С).

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

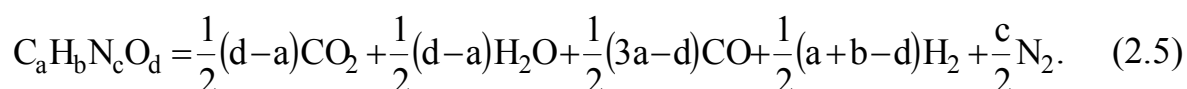


является равновероятным (вода рассматривается в жидкой фазе).

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

В этом случае образуются следующие ПВ: СО<sub>2</sub>, СО, Н<sub>2</sub>О, Н<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>.

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.

### 2.2.2. Методика расчета состава продуктов взрыва по Бринкли-Вильсону

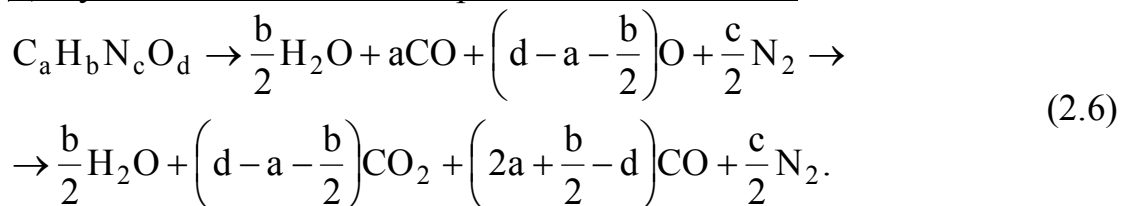
Установлено, что при одинаковых давлениях и температурах диссоциация  $\text{CO}_2$  развита в большей степени, чем диссоциация  $\text{H}_2\text{O}$ , вследствие этого реакция образования  $\text{H}_2\text{O}$  будет превалировать над реакцией образования  $\text{CO}_2$ .

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  $\text{H}_2\text{O}$  и углерод в  $\text{CO}$ , а оставшаяся часть кислорода используется на доокисление  $\text{CO}$  в  $\text{CO}_2$ .

Данный метод используется для ВВ 3-й группы, однако он является приемлемым и для ВВ 2-й группы [1].

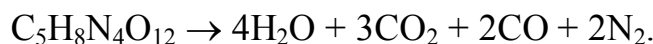
Для условия полного газообразования  $d \geq a + b/2$



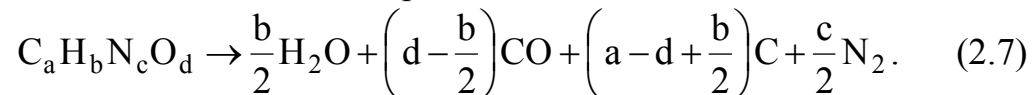
По этой методике реакция взрывчатого превращения для гексогена  $\text{C}_3\text{H}_6\text{N}_6\text{O}_6$  ( $d = 6 \geq 3 + 0,5 \cdot 6 = 6$ ) имеет вид



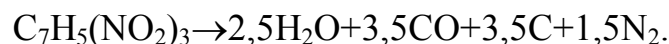
Для ТЭНа -  $\text{C}_5\text{H}_8\text{N}_4\text{O}_{12}$  ( $d = 12 \geq 5 + 0,5 \cdot 8 = 9$ ),



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

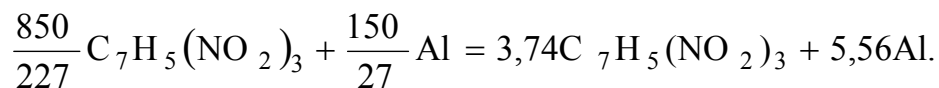


Для алюмосодержащих смесевых ВВ сначала алюминий окисляется в  $Al_2O_3$ , а водород - в воду ( $H_2O$ ), углерод С - в СО. Оставшийся кислород идет на доокисление СО в  $CO_2$ . Если кислорода до полного окисления не хватает, тогда Al вступает в реакцию с азотом с образованием нитрида алюминия ( $AlN$ ).

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 2.2.** 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:

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

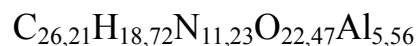
$$\sum C = 3,744 \cdot 7 = 26,21;$$

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

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

$$\sum Al = 5,56.$$

Условная (брутто) формула алюмотола имеет вид



Проверка суммарной массы для условной (брутто) формулы

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

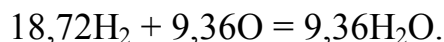
Кислородный баланс алюмотола

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

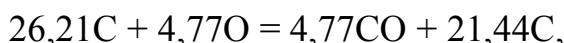
Согласно принципу Бринкли-Вильсона, сначала окисляется алюминий до окисла  $Al_2O_3$ :



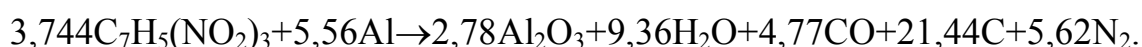
Далее водород окисляется до воды



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:

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

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

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].

## Практическое занятие № 3. Расчет термодинамических характеристик ВВ

### 3.1. Расчет теплового эффекта реакции взрывчатого превращения ВВ

#### 3.1.1. 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"  $Q_{det}$  и "фугасная"  $Q_f$  (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.

### 3.1.2. 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. 3.1 приведено схематическое изображение состояния системы – треугольник Гесса.

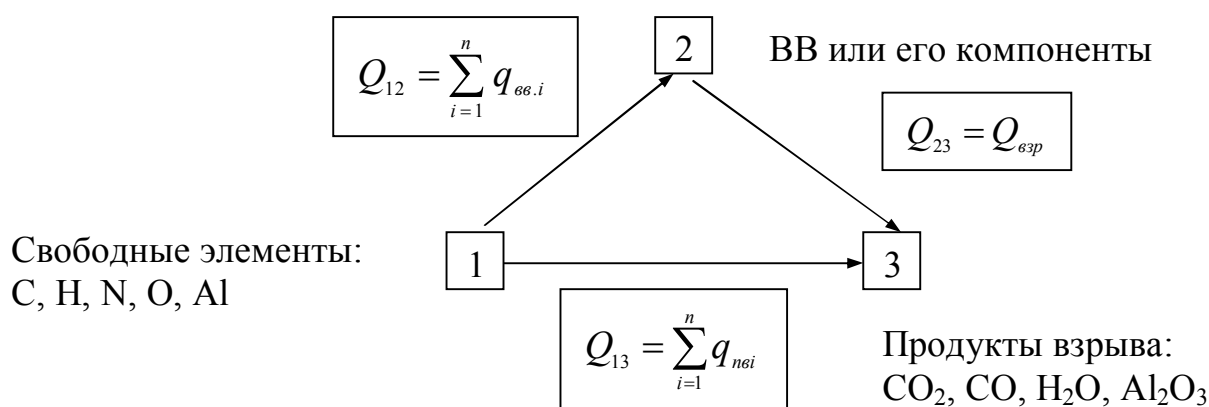


Рис.3.1. Треугольник Гесса

По известным значениям теплоты образования ВВ (индивидуально-го) или компонентов смесевго ВВ и теплоты образования продуктов взрыва тепловой эффект реакции взрыва определяется по формуле

$$Q_{23} = Q_{13} - Q_{12}, \quad (3.1)$$

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

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

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, например, в [5].

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 (Приложение 1, 2).

Разность тепловых эффектов при постоянном объеме и давлении определяется выражением

$$Q_v - Q_p = p \cdot \Delta V, \quad (3.2)$$

или для условия постоянства температуры до и после реакции можно переписать

$$Q_v - Q_p = p (V_2 - V_1), \text{ или } Q_v = Q_p + p \cdot V(n_2 - n_1), \quad (3.3)$$

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

$$Q_v = Q_p + \Delta n \cdot R \cdot T, \quad (3.4)$$

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

$$Q_v = Q_p + 2,479 \cdot \Delta n, \text{ кДж} \quad (3.5)$$

или

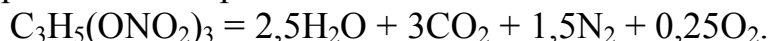
$$Q_v = Q_p + 0,592 \cdot \Delta n, \text{ ккал.} \quad (3.6)$$

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.

$$Q_v = Q_p + R \cdot T \cdot n_{\text{ПВ}} = Q_p + 2,479 n_{\text{ПВ}}, \quad (3.7)$$

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

**Пример 3.1.** 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  $\text{H}_2\text{O}$  в парообразном состоянии, кДж/моль (Приложение 1).;

$q_2$  - теплота образования  $\text{CO}_2$ , 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

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

Здесь  $M_{\text{ВВ}} = 227 \text{ г-моль}$  - молекулярный вес нитроглицерина.

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

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

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

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

### 3.1.3. Аддитивный метод оценки теплоты взрыва смесевых ВВ

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

$$Q_{\text{взр}} = \sum v_i \times Q_{i \text{ взр}}, \quad (3.8)$$

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

### 3.2. 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;  $pdV$  - 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  $\Delta E$  - 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

$$T_{\text{взр}} = \frac{Q_{\text{взр}}}{\sum C_{vi} \cdot n_i}. \quad (3.9)$$

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:

$$C_v = a + bT + cT^{-2} + \dots, \quad (3.10)$$

где  $a, b, c$  - некоторые эмпирические коэффициенты.

Обычно для несложных расчетов ограничиваются первыми двумя членами полинома

$$C = a + bT, \quad (3.11)$$

или с учетом числа молей образующихся ПВ

$$\sum C_i n_i = \sum a_i n_i + (\sum b_i n_i) T_{\text{взр}}, \quad (3.12)$$

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

$$T_{взр} = \frac{-a + \sqrt{a^2 + 4bQ_{взр} \cdot 10^3}}{2b} \quad (3.13)$$

или

$$T_{взр} = \frac{-\sum n_i a_i + \sqrt{(\sum n_i a_i)^2 + 4\sum n_i b_i Q_{взр} \cdot 10^3}}{2\sum n_i b_i}, \quad (3.14)$$

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 (3.13) и (3.14) значение  $Q_{взр}$  умножено на  $10^3$ .

В табл. 3.1 приведены значения эмпирических коэффициентов  $a$  и  $b$ , предложенные Г. Кастом [2].

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

$$C_v = 3 \cdot n_i \cdot R = n_i \cdot 24,97, \quad (3.15)$$

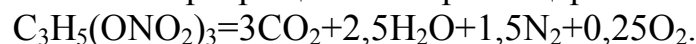
где  $n_i$  – число молей твердых компонентов (например  $Al_2O_3$ , С).

Таблица 3.1

Тип газа	$a$ , Дж/моль·°С (кал/моль·°С)	$b$ , Дж/моль·°С (кал/моль·°С)
Двухатомные (CO, H <sub>2</sub> , O <sub>2</sub> , N <sub>2</sub> , NO)	20,1 (4,8)	$18,86 \cdot 10^{-4}$ ( $4,5 \cdot 10^{-4}$ )
Трехатомные (CO <sub>2</sub> , NO <sub>2</sub> )	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 <sub>2</sub> O)	16,76 (4,0)	$90,10 \cdot 10^{-4}$ ( $21,5 \cdot 10^{-4}$ )
Твердые компоненты ПВ (С, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	24,97 (5,96)	0

**Пример 3.2.** Определить температуру продуктов взрыва ( $T_{взр}$ ) при взрыве нитроглицерина.

Реакция взрывчатого превращения нитроглицерина



Находим

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

$$\sum n_i b_i = 10^{-4} \cdot (3 \cdot 24,3 + 2,5 \cdot 90,1 + 1,5 \cdot 18,86 + 0,25 \cdot 18,86) = 33,112 \cdot 10^{-4}.$$

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

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

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

### 3.3. Определение объема газообразных продуктов взрыва (ПВ)

Объем газообразных ПВ определяется по реализации взрывчатого превращения ВВ на основе закона Авогадро, согласно которому объем, занимаемый одним молем газа при температуре  $0^\circ\text{C}$  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

$$V_{пв} = \frac{22,4 \cdot (n_1 + n_2 + \dots + n_n)}{M_{вв}}, \text{ м}^3/\text{кг}, \quad (3.16)$$

где  $M_{вв}$  - молекулярная масса ВВ, г·моль.

Для многокомпонентного смесового ВВ

$$V_{пв} = \frac{22,4 \cdot (n_1 + n_2 + \dots + n_n)}{M_1 m_1 + M_2 m_2 + \dots + M_n m_n}, \text{ м}^3/\text{кг}. \quad (3.17)$$

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

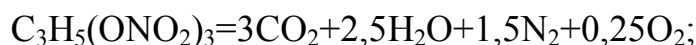
$m_1, m_2, \dots$  - количество грамм-молекул составных частей ВВ;

$M_1, M_2, \dots$  - 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

$$V_{пв} = \frac{22,4 \cdot (n_1 + n_2 + \dots + n_n)}{1000}, \text{ м}^3/\text{кг}. \quad (3.18)$$

**Пример 3.3.** Определить объем ПВ при взрыве нитроглицерина ( $K_0 > 0$ ,  $M_{вв} = 227$  г·моль):



а) объем ПВ для парообразного состояния воды

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

б) объем ПВ для жидкого состояния воды

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

**Примечание:** в расчете объема ПВ учитываются только газообразные продукты взрыва ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ , С, NaCl,  $\text{Na}_2\text{O}$  и др. являются твердыми продуктами взрыва).

### 3.4. 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 ( $P_{взр}$ );
- давление в детонационной волне, отвечающее точке Чепмена-Жуге ( $P_{ж}$ );
- 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:

$$P = \frac{P_0 V_{пв} T_{взр}}{273 \cdot (V - \alpha)}, \quad (3.19)$$

где  $P_0$  - атмосферное давление газов при  $0^\circ\text{C}$ ,  $P_0 = 1,01 \cdot 10^5$  Па;

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

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

$V$  - объем зарядной камеры (заряда ВВ),  $\text{м}^3$ ;

$V_{пв}$  - объем ПВ,  $\text{м}^3$ ;

$\alpha$  - поправка, учитывающая собственный объем молекул продуктов взрыва – несжимаемая часть газа или коволюм,  $\text{м}^3$ .

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

$$P = \frac{P_0 V_{пв} T_{взр}}{273 \cdot (1/\Delta - \alpha)} = \frac{P_0 V_{пв} T_{взр} \Delta}{273 \cdot (1 - \alpha \Delta)}. \quad (3.20)$$

Сложность расчета по формуле (3.20) связана с неопределенностью величины коволюма  $\alpha$ <sup>3)</sup>. Наибольшие трудности при расчете давления ПВ

---

<sup>3)</sup> 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.

при высоких плотностях заряжания ( $\Delta > 1000 \text{ кг/м}^3$ ) представляет находение величины коволюма газообразных ПВ (несжимаемая часть объема газов)<sup>2)</sup>. Если плотность заряжания 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  $\Delta$ - плотность заряжания ВВ,  $\text{кг/м}^3$ .

**Пример 3.4.** 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

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

### 3.5. Расчет идеальной работоспособности ВВ и полного термодинамического КПД взрыва

#### 3.5.1. 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.  $dQ = 0$ .

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 расшире-

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



нии 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:

$$A_u = \int dE = \int_{T_1}^{T_2} \bar{C}_V dT = \bar{C}_V \cdot (T_1 - T_2) = \bar{C}_V T_1 \left(1 - \frac{T_2}{T_1}\right) = Q_{\text{взр}} \left(1 - \frac{T_2}{T_1}\right), \quad (3.21)$$

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

$$A_u = Q_{\text{взр}} \left(1 - \frac{T_2}{T_1}\right); \quad (3.22)$$

$$A_u = Q_{\text{взр}} \left[1 - \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^{\gamma-1}\right]; \quad (3.23)$$

$$A_u = Q_{\text{взр}} \left[1 - \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}\right], \quad (3.24)$$

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

$V_1$  и  $V_2$  - начальный и конечный удельные объемы ПВ, м<sup>3</sup>/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

$$A_u = Q_{\text{взр}} \left[ 1 - \left( \frac{1,01 \cdot 10^5}{P_{\text{пв}}} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right], \text{ кДж/кг.} \quad (3.25)$$

### 3.5.2. Расчет полного термодинамического КПД взрыва

Вышеприведенную формулу (3.25) можно представить в виде

$$A_u = Q_{\text{взр}} - q_{\text{т}}. \quad (3.26)$$

Здесь величина  $q_{\text{т}} = Q_{\text{взр}} - A_u = C_{\nu 2} \cdot T_2$  – 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

$$\eta = \frac{A_u}{Q_{\text{взр}}} \quad (3.27)$$

или с учетом формулы (3.24)

$$\eta = 1 - \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{(\gamma-1)}{\gamma}}. \quad (3.28)$$

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 ( $\eta$ ) 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  $\gamma$  снижается (соответственно снижается  $A_u$  и  $\eta$ ), если в ПВ содержатся четырех и пятиатомные газы, а также твердые продукты (NaCl, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и др.). В этих случаях  $\gamma = 1,15, 1,1$  и  $1,05$ .

**Пример 3.5.** Определить полную идеальную работоспособность и термодинамический КПД аммонита 6ЖВ при плотности заряжания 900 кг/м<sup>3</sup> и следующих параметрах взрывного превращения:

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

$$Q_{\text{взр}} = 4300 \text{ кДж/кг};$$

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

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  $\eta = 87,5\%$

### 3.5.3. Баланс энергии при взрыве ВВ

На рис. 3.2 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%**):

$$Q_{взр} = E_n - q_{хим} = (0,95 \div 0,97) E_n . \quad (3.29)$$

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)

$$A_u = Q_{взр} - q_T = \eta \cdot Q_{взр} . \quad (3.30)$$

Здесь  $\eta$  - термодинамический КПД, составляющий для промышленных ВВ  $\approx 70 \div 85\%$ , т.е.  $q_T$  составляют **15÷30%**.

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%**.

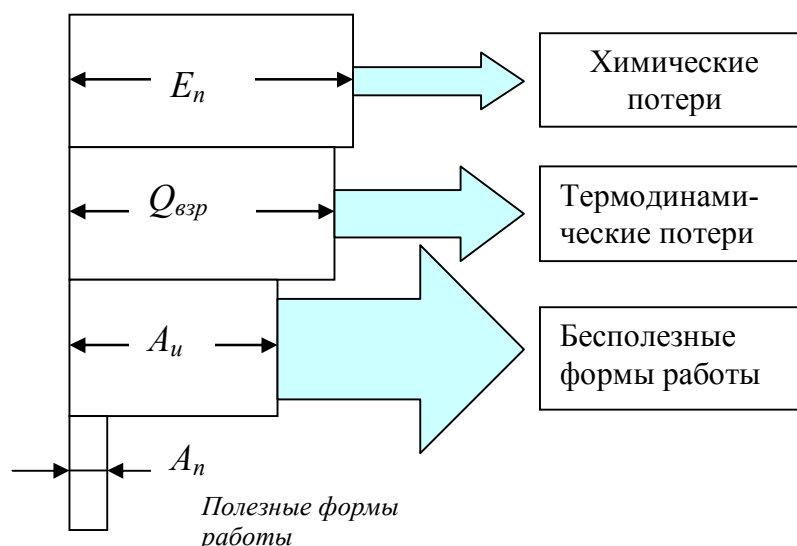
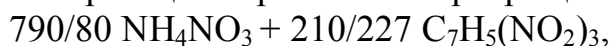


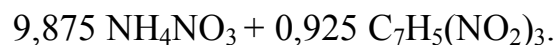
Рис. 3.2. Схема баланса энергии взрыва ВВ (по А.Ф.Беляеву)

**Пример 3.6.** Рассчитать основные термодинамические характеристики граммонита 79/21 (для 1 кг ВВ). Состав ВВ: аммиачная селитра - 79 %, тротил - 21 %, плотность заряжения  $\Delta = 850 \text{ кг/м}^3$ .

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



откуда



2. Определение условной (брутто) формулы ВВ:

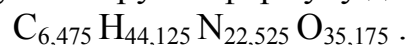
$$\Sigma C = 0,925 \cdot 7 = 6,475;$$

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

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

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

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

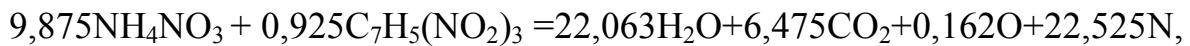
$$K_{\sigma} = \frac{\left[ 35,175 - \left( 2 \cdot 6,475 + \frac{44,125}{2} \right) \right] \cdot 16}{1000} \cdot 100 = +0,26\%.$$

и кислородного коэффициента

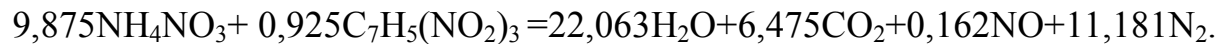
$$\alpha_{\kappa} = \frac{35,175}{2 \cdot 6,475 + 0,5 \cdot 44,125} = 1,005 \approx 1,0.$$

5. Составление правой части реакции взрывного разложения.

Так как кислородный баланс граммонита 79/21 положительный то весь углерод окисляется в углекислый газ  $\text{CO}_2$ , а водород в воду  $\text{H}_2\text{O}$  и выделяется кислород, который взаимодействует с азотом с образованием окислов азота, например,  $\text{NO}$ :



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:

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

## **Практическое занятие № 4. Расчет детонационных характеристик ВВ**

### 4.1. 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:

$$D = u + c, \quad (4.1)$$

где  $u$  - массовая скорость продуктов детонации за ударным фронтом;  
 $c$  - местная скорость звука в продуктах детонации (ПД).

#### 4.2. 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

$$PV^n = \text{const}, \quad (4.2)$$

где  $P$  - давление продуктов взрыва ВВ, Па;

$V$  - объем продуктов взрыва, м<sup>3</sup>;

$n$  - показатель политропы продуктов взрыва, зависящий от начальной плотности ВВ (табл.4).

Таблица 4

$n$	1,3	1,6	2,2	2,8	3,0	3,2	3,4
Плотность ВВ, т/м <sup>3</sup>	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

$$D = 31,56 \sqrt{(n^2 - 1) \cdot Q_{взр}}. \quad (4.3)$$

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

$$D = D'_{эт} \cdot \sqrt{\frac{Q_{ВВ}}{Q_{эт}}}, \quad (4.4)$$

где  $D$  - скорость детонации ВВ, м/с;

$D'_{\text{эт}}$  - скорость детонации эталонного ВВ при соответствующей плотности заряжения, м/с;

$Q_{\text{вв}}$  - теплота взрыва ВВ, кДж/кг;

$Q_{\text{эт}}$  - теплота взрыва эталонного ВВ, кДж/кг.

Скорость детонации эталонного ВВ (аммонита 6ЖВ), равная 3600 м/с при плотности заряжения  $1 \text{ г/см}^3$ , пересчитывается с учетом реальной плотности заряда ВВ по формуле

$$D'_{\text{эт}} = D_{\text{эт}} + 3500(\Delta - 1). \quad (4.5)$$

Здесь  $\Delta$  - плотность заряжения ВВ,  $\text{г/см}^3$ .

**Пример 4.1.** Определить скорость детонации гранулита игданита при плотности заряжения  $\Delta = 0,85 \text{ г/см}^3$ . Теплота взрыва -  $\approx 3800 \text{ кДж/кг}$  (900-920 ккал/кг).

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

По формуле (4.4) 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 заряжении гранулит игданит имеет плотность заряжения  $\Delta = 1,1 \text{ г/см}^3$ . 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  $\Delta$  с 0,85 до 1,1  $\text{г/см}^3$  скорость детонации возрастает на 28-29 %. Согласно [2] при увеличении плотности ВВ на 0,1  $\text{г/см}^3$  скорость детонации возрастает на 300 - 400 м/с.

#### 4.3. Расчет идеальной скорости детонации

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

$$D_u = 2641 + 3,231 \cdot \Delta \cdot \sqrt{\omega}, \text{ м/с,} \quad (4.6)$$

где  $\Delta$  - плотность ВВ,  $\text{г/см}^3$ ,

$\omega$  - так называемое *характеристическое произведение теплоты взрыва на объем ПВ*, предложенное Бертло (1883 г.) для оценки эффективности ВВ

$$\omega = Q_{\text{взр}} \cdot V_{\text{пв}}, \quad (4.7)$$

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

$V_{\text{пв}}$  - объем продуктов взрыва, л.



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

**Пример 4.2.** Для условий примера 4.1 определить идеальную скорость детонации гранулита игданита. Объем продуктов взрыва равен для игданита  $V_{пв} = 0,98 \text{ м}^3/\text{кг}$  или 980 л.

Рассчитывается характеристическое выражение Бергло (4.7):

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

Откуда идеальная скорость детонации гранулита игданита

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

#### 4.4. Расчет детонационного давления (давление в точке Чепмена-Жуге)

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

$$P_{жс} = \frac{\Delta \cdot D^2}{n+1} \cdot 10^{-3}, \text{ МПа.} \quad (4.8)$$

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

$$P_{жс} = 2,5 \cdot 10^{-4} \cdot \Delta \cdot D^2, \quad (4.9)$$

где  $P_{жс}$  - детонационное давление, МПа;

$D$  - скорость детонации ВВ, м/с;

$\Delta$  - плотность ВВ, г/см<sup>3</sup>.

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

$$P_{жс} = D \cdot \Delta \cdot u. \quad (4.10)$$

Откуда массовая скорость определяется:

$$u = \frac{P_{жс}}{\Delta \cdot D} \cdot 10^{-3}, \text{ м/с.} \quad (4.11)$$

По известному значению массовой скорости ( $u$ ) рассчитывают показатель политропы

$$n = \frac{D}{u} - 1. \quad (4.12)$$

**Пример 4.3.** Для условий примера 4.1 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. 4.2 приведены значения детонационного давления для различных видов ВВ.

<sup>3</sup> 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 [8].

Таблица 4.2

Тип ВВ	Плотность, г/см <sup>3</sup>	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 (АС-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 Бертра (ω) может быть использовано для расчета детонационного давления [7]:

$$P_0 = 1596 + 9,378 \cdot 10^{-3} \cdot \Delta^2 \cdot \omega, \text{ МПа.} \quad (4.13)$$

**Пример 4.4.** Для условий примера 18 и 19 по формуле (4.13) определить детонационное давление:

$$P_0 = 1596 + 9,378 \cdot 10^{-3} \cdot 0,85^2 \cdot 900 \cdot 980 = 7572 \text{ МПа.}$$

#### 4.5. Расчет плотности продуктов взрыва в детонационной волне

Плотность продуктов взрыва в детонационной волне определяется по формуле

$$\rho_{\text{пв}} = \frac{n+1}{n} \cong \frac{4}{3} \rho_{\text{вв}} \quad (4.14)$$

#### 4.6. Расчет скорости разлета ПВ

Массовая скорость движения продуктов взрыва за фронтом детонации определяется выражением

$$u = \frac{D}{n+1}, \text{ м/с.} \quad (4.15)$$

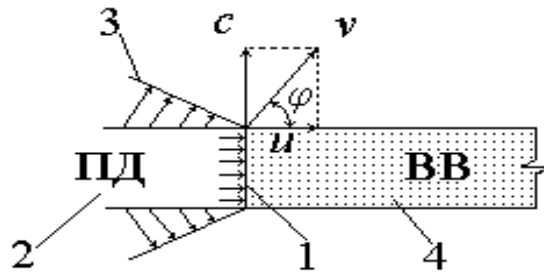
Здесь  $n$  - показатель политропы.

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

$$u \cong \frac{D}{4}, \text{ м/с.} \quad (4.16)$$

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  $\varphi$  результирующей скорости движения ПВ (рис. 4.1).



**Рис. 4.1.** Схема движения продуктов детонации при взрыве прямолинейного открытого заряда ВВ: 1 – фронт детонации; 2 – продукты детонации; 3 – фронт расширяющихся продуктов детонации; 4 – взрывчатое вещество

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

$$C = \frac{2 \cdot n \cdot D_u}{n^2 + 1}, \text{ м/с.} \quad (4.17)$$

Тогда можно принять

$$\text{tg } \varphi = \frac{u}{c}, \text{ или } \text{tg } \varphi = \frac{n-1}{2n} \quad (4.18)$$

Для конденсированных ВВ  $n = 3$ , откуда  $\text{tg } \varphi = \frac{1}{n} = \frac{1}{3}$ , что соответст-

вует углу  $\varphi = \text{arctg } \frac{1}{3} = 18^\circ 43'$ .

**Пример 4.5.** Для условий примера 4.5 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

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

## 5. Самостоятельная работа: «Расчет термодинамических характеристик промышленных ВВ»

В соответствии с вариантом задания (табл. 5.1) определить кислородный баланс, кислородный коэффициент, составить брутто-формулу и реакцию взрывчатого превращения, рассчитать основные термодинамические характеристики ВВ: теплоту взрыва, объем, температуру и давление газообразных продуктов взрыва, идеальную работоспособность и идеальны термодинамический КПД.

**Примечание.** Для самостоятельных расчетов преподавателем могут быть предложены варианты трехкомпонентных ВВ, содержащих окислитель – аммиачную селитру, сенсibiliзатор – индивидуальное ВВ и энергетическую (горючую) добавку – порошок алюминия.

Таблица 5.1

## Компонентный состав ВВ

№ пп.	Наименование ВВ	Аммиачная селитра (АС)	Тротил $C_7H_5(NO_2)_3$	Гексоген $C_3H_6N_6O_6$	Алюминиевая пудра (АI)	Дизельное топливо (ДТ) $C_{13}H_{20}$	Нитроглицерин $C_3H_5(ONO_2)_3$	Минеральное масло $C_{12}H_{26}$	Углерод (угольный порошок) С	Древесная мука $C_{15}H_{22}O_{10}$	Хлористый натрий NaCl	Динитронафталин $C_{10}H_6(NO_2)_2$	Плотность заряжания, г/см <sup>3</sup>
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1.	Динафталит	88										12	1,15
2.	Аммонит АП-5ЖВ	70	18								12		1,1
3.	Аммонит ПЖВ-20	64	16								20		1,15
4.	Аммонит Т-19	61	19								20		1,15
5.	Детонит 10А	76	8		6		10						1,2
6.	Детонит М	79			11		10						1,2
7.	Победит ВП-4	65,5	12							1,5	12		1,2
8.	Гранулит игданит	94,5				5,5							0,85
9.	Гранулит АС-4	91,8			4			4,2					0,85
10.	Гранулит АС-6	90			6			4					0,85
11.	Гранулит АС-8	89			8			3					0,85
12.	Гранулит Д-5	94				2			4				0,85
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		13
13.	Гранулит С-2	92,8						4,2		3			0,85
14.	Гранулит М	94,5						5,5					0,85
15.	Гранулит УП-1	93				3,5			3,5				0,85
16.	Грамотол 5	90,3	5					4,2					0,9
17.	Грамотол 18	81	18					1					0,9

18.	Грамотол 10	87	10					3					0,9
19.	Грамотол 15	83	15					2					0,9
20.	Грамотол 20	79	20					1					0,9
21.	Граммонал А-45	40	45		15								0,95
22.	Граммонал А-50	47	50		3								1,0
23.	Комбизар 1	89	8				3						0,85
24.	Комбизар 2	92	3				5						0,85
25.	Аммонал водоустойчивый	80,5	15		4,5								1,15
26.	Аммонит скальный № 1	66	5	24	5								1,5
27.	Аммонал скальный № 3	72	5	15	8								1,1
28.	Аммонит 6ЖВ	79	21										0,85
29.	Граммонит 82/18	82	18										0,9
30.	Граммонит 50/50	50	50										0,9
31.	Граммонит 30/70	30	70										0,9
32.	Гранулотол		100										0,95
33.	Граммонит 79/21	79	21										0,9
34.	Алюмотол		85		15								1,0

Примечание. Компонентный состав некоторых промышленных ВВ упрощен для облегчения расчета ТДХ.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:**

1. Физика взрыва. Изд. 2-е, перераб. Под ред. К.П.Станюковича. М.: "Наука", 1975.
2. Дубнов Л.В., Бухаревич Н.Р., Романов А.И. Промышленные взрывчатые вещества. - М.: Недра, 1988.
3. Светлов Б.Я., Яременко Н.Е. Теория и свойства промышленных ВВ. - М.: Недра, 1972.
4. Андреев К.К., Беляев А.Ф. Теория взрывчатых веществ. - М.: Оборонгиз, 1960.
5. Поздняков З.Г., Росси Б.Д. Справочник по промышленным взрывчатым веществам и средствам взрывания. Изд. 2, перераб. и доп. М., "Недра", 1977.
6. Кук М.А. Наука о промышленных взрывчатых веществах. - М.: Недра, 1980.
7. Кутузов Б.Н. Разрушение горных пород взрывом. – М.: МГИ, 1992.
8. Кутузов Б.Н. Разрушение горных пород взрывом. Взрывные технологии в промышленности. – М.: МГГУ, 1994.

Приложение 1

Молекулярные массы и теплоты образования веществ (продуктов взрыва)

Вещество	Химическая формула	Молекулярная масса	Кислородный баланс	Теплота образования при постоянном объеме	
				ккал/моль <sup>1)</sup>	кДж/моль
Окись углерода	CO	28	-57,2	27,17	113,7
Двуокись углерода	CO <sub>2</sub>	44	0	94,51	395,6
Вода (пар)	H <sub>2</sub> O	18	0	57,49	240,6
Вода (жидкость)	H <sub>2</sub> O	18	0	67,5	282,5
Окись азота	NO	30	53,3	-21,6	-90,37
Двуокись азота	NO <sub>2</sub>	46	78,26	-8,09	-33,89
Четырехокись азота	N <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	92	66,6	-2,24	-9,37
Метан	CH <sub>4</sub>	16	-399,9	17,7	
Углерод аморфный	C	12	-266,67	-	-
Алюминий	Al	27	-88,9	-	-
Окись алюминия	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	102	0	398,1	1666,4
Карбит алюминия	Al <sub>4</sub> C <sub>3</sub>	144	-133,4	50	-
Нитрид алюминия	AlN	41	-57,2	79	-
Окись железа	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	159,5	0	197,6	-
Окись кальция	CaO	56	0	150,8	635,1
Окись калия	K <sub>2</sub> O	52	0	98,04	361,5
Окись натрия	Na <sub>2</sub> O	62	0	102,9	430,6
Углекислый натрий	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	106	0	269,02	-
Углекислый кальций	CaCO <sub>3</sub>	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 <sub>4</sub> Cl	53,5	-44,9	73,2	-

Примечание <sup>1)</sup> –по данным [ 8,9]

## Теплоты образования индивидуальных ВВ и компонент смесевых ВВ

№ пп	Наименование	Химическая Формула ВВ	Молекулярная масса, М	Кислородный ба- ланс, К <sub>б</sub> , %	Теплота образования при постоянном объеме	
					ккал/моль <sup>1)</sup>	кДж/моль
1	2	3	4	5	6	7
1.	Азотнокислый аммоний аммиачная селитра (АС)	NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub>	80	+20	84,75	354,8
2.	Азотнокислый натрий	NaNO <sub>3</sub>	85	+47,1	110,59	462,8
3.	Азотнокислый калий	KNO <sub>3</sub>	101	+39,6	116,93	489,5
4.	Азотнокислый кальций	Ca(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	164	+48,8	221,7	
5.	Нитрид натрия	NaNO <sub>2</sub>	69	+46,4		366,2
6.	Перхлорат аммония	NH <sub>4</sub> ClO <sub>4</sub>	117,5	+34,0	67,3	281,7
7.	Перхлорат калия	KClO <sub>4</sub>	138,5	+46,2	103,0	431,1
8.	Перхлорат натрия	NaClO <sub>4</sub>	122,5	+52,3	91,5	
9.	Хлорат натрия	NaClO <sub>3</sub>	106,5	+45,1	82,4	345,3
10.	Хлорат калия	KClO <sub>3</sub>	122,5	39,18	92	
11.	Стеарат кальция	C <sub>36</sub> H <sub>70</sub> O <sub>4</sub> Ca	607	-274	641,1	
12.	Коллоидный хлопок (12,2% N)	C <sub>22,5</sub> H <sub>28,8</sub> N <sub>8,7</sub> O <sub>36,1</sub>	998,2	-36,9	645	
13.	Дизельное топливо (ДТ) <sup>2)</sup>	C <sub>13</sub> H <sub>20</sub>	176	-327,3	37,9	158,8
14.	Минеральные масла	C <sub>12</sub> H <sub>26</sub>	170	-348,2	81,6	341,9
15.	Карбамид (мочевина)	CH <sub>4</sub> N <sub>2</sub> O	60	-80,0	75,7	333,6
16.	Мука злаков	C <sub>15</sub> H <sub>25</sub> O <sub>11</sub>	381	-132,28	-	-
17.	Древесная мука	(C <sub>15</sub> H <sub>22</sub> O <sub>10</sub> ) <sub>n</sub>	362	-137,02	479	2002 19600 <sup>3)</sup>
18.	Бумага (целлюлоза)	C <sub>6</sub> H <sub>10</sub> O <sub>5</sub>	162	-118,52	226	950
19.	Октодекан (парафин)	C <sub>18</sub> H <sub>36</sub>	254	-346,0	133,5	
20.	Парафин	C <sub>24</sub> H <sub>50</sub>	338	-345,6		46500 <sup>3)</sup> *



1	2	3	4	5		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 Этиленглицоль- динитрат	$C_2H_4(ONO_2)_2$	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
45.	Динитротолуол	$C_6H_3(NO_2)_2CH_3$	182	-114,29	15,35	64,11
46.	Циануриазит	$C_3N_{12}$	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- глико- левого эфира	$C_6H_2(NO_2)_3OC_2H_4ON$ $O_2$	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.

ГОРБОНОС МИХАИЛ ГРИГОРЬЕВИЧ

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ  
ПО ПРАКТИЧЕСКИМ ЗАНЯТИЯМ И ВЫПОЛНЕНИЮ САМОСТОЯТЕЛЬНЫХ РАБОТ  
ПО ДИСЦИПЛИНЕ «ТЕХНОЛОГИЯ И БЕЗОПАСНОСТЬ ВЗРЫВНЫХ РАБОТ»  
ДЛЯ СТУДЕНТОВ СПЕЦИАЛЬНОСТИ 130403 «ОТКРЫТЫЕ ГОРНЫЕ РАБОТЫ»  
ЧАСТЬ 1

Темплан 2011 г. поз. \_\_\_\_\_

Компьютерная верстка проф. Горбонос М.Г.

Редактор

Технический редактор .....

Подписано в печать ..... Формат 60×90/16

Объем .... п.л. Тираж 100 экз. Заказ №

---

Типография