

РЕДАКЦИОННЫЙ  
С О В Е Т

*Председатель*  
**Л.А. ПУЧКОВ**

*Зам. председателя*  
**Л.Х. ГИТИС**

*Члены редсовета*  
**И.В. ДЕМЕНТЬЕВ**

**А.П. ДМИТРИЕВ**

**Б.А. КАРТОЗИЯ**

**М.В. КУРЛЕНЯ**

**В.И. ОСИПОВ**

**Э.М. СОКОЛОВ**

**К.Н. ТРУБЕЦКОЙ**

**В.В. ХРОНИН**

**В.А. ЧАНТУРИЯ**

**Е.И. ШЕМЯКИН**

*ИЗДАТЕЛЬСТВО  
МОСКОВСКОГО  
ГОСУДАРСТВЕННОГО  
ГОРНОГО УНИВЕРСИТЕТА*

*ректор МГГУ,  
чл.-корр. РАН*

*директор  
Издательства МГГУ*

*академик РАЕН*

*академик РАЕН*

*академик РАЕН*

*академик РАН*

*академик РАН*

*академик МАН ВШ*

*академик РАН*

*профессор*

*академик РАН*

*академик РАН*

ВЫСШЕЕ ГОРНОЕ ОБРАЗОВАНИЕ

**Б.Н. Кутузов  
Г.А. Нишпал**

# ТЕХНОЛОГИЯ И БЕЗОПАСНОСТЬ ИЗГОТОВЛЕНИЯ И ПРИМЕНЕНИЯ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ НА ГОРНЫХ ПРЕДПРИЯТИЯХ

*Издание второе,  
стереотипное*

*Рекомендовано Учебно-методическим объединением по  
высшему горному образованию в качестве учебного по-  
собия для студентов высших учебных заведений, обу-  
чающихся по специальностям «Открытые горные ра-  
боты», «Физические процессы горного производства»,  
«Взрывное дело» направления подготовки дипломиро-  
ванных специалистов «Горное дело»*

МОСКВА

ИЗДАТЕЛЬСТВО  
МОСКОВСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО  
ГОРНОГО УНИВЕРСИТЕТА

2 0 0 4



УДК 622.235.2+622.235.4

ББК 33.133

К 95

*Книга соответствует*

*«Гигиеническим требованиям к изданиям книжным для взрослых. СанПиН 1.2.1253-03», утвержденным Главным государственным санитарным врачом России 30 марта 2003 г.*

**Кутузов Б.Н., Нишпал Г.А.**

К 95 Технология и безопасность изготовления и применения взрывчатых веществ на горных предприятиях: Учеб. пособие. — 2-е изд., стер. — М.: Издательство Московского государственного горного университета, 2004. — 246 с.

ISBN 5-7418-0057-2 (в пер.)

Приведены классификация и характеристики промышленных ВВ, изготавливаемых на горных предприятиях. Дана характеристика компонентов, изложены технологии приготовления и применения сухих гранулированных и водосодержащих взрывчатых веществ. Описано оборудование для приготовления и применения этих ВВ. Приведены сведения о ВВ, полученных из утилизированных боеприпасов, для использования их в качестве компонентов промышленных ВВ. Показана техническая, экономическая и экологическая эффективность приготовления промышленных ВВ на горных предприятиях. Рассмотрены основные вопросы безопасности приготовления и применения ВВ, условия возникновения и развития аварийных ситуаций, а также методы их предупреждения и локализации.

Для студентов горных вузов и факультетов, обучающихся по специальностям «Открытые горные работы», «Физические процессы горного производства», «Взрывное дело» направления подготовки дипломированных специалистов «Горное дело».

УДК 622.235.2+622.235.4

ББК 33.133

ISBN 5-7418-0057-2

© Б.Н. Кутузов, Г.А. Нишпал, 2004

© Издательство МГГУ, 2004

© Дизайн книги. Издательство МГГУ, 2004

## **ВВЕДЕНИЕ**

В обозримом будущем подготовка скальных горных пород к выемке на карьерах с помощью буровзрывных работ останется основным способом, а потому его совершенствование должно быть приоритетным в общей проблеме разрушения скальных пород при их подготовке к выемке. Одним из главных вопросов в условиях перевода промышленности страны на рыночную экономику является наблюдающаяся в России тенденция перевода горных предприятий на применение более дешевых ВВ, изготавливаемых непосредственно вблизи мест их применения на стационарных пунктах или в специальных транспортно-смесительно-зарядных машинах (ТСЗМ).

Указанная тенденция имеет место и в практике деятельности фирм зарубежных стран, причем работы в этом направлении были начаты в бывшем СССР, США и Канаде практически в одно время. Инертность хозяйственной структуры и государственный монополизм в СССР и России не позволили осуществить широкомасштабный быстрый перевод горных предприятий на ВВ местного изготовления, из-за чего в этом вопросе наблюдается отставание как в части оборудования пунктов, так и применяемых рецептур ВВ.

Фактические результаты внедрения на ряде горных предприятий производства ВВ показывают, что:

- стоимость применяемых местных ВВ в 1,5-2,0 и более раз ниже, чем заводских;
- уменьшается в пять и более раз объем перевозок на склады ВВ горных предприятий взрывоопасных грузов;

- упрощается и удешевляется обустройство приемных железнодорожных перегрузочных площадок для взрывоопасных грузов;
- улучшаются условия снабжения горных предприятий взрывчатыми веществами местного изготовления.

В I-IV главах учебного пособия рассмотрена классификация промышленных ВВ, изготавливаемых на местах применения, дана характеристика компонентов, оборудование стационарных пунктов их хранения и приготовления исходных веществ-агентов для приготовления ВВ, транспортно-смесительно-зарядных машин – передвижных заводов приготовления ВВ и заряжания сухих и обводненных скважин.

В заключительных, V-VIII главах рассмотрены вопросы возникновения опасных ситуаций при приготовлении ВВ, которые могут привести к взрыву, дана кинетика развития возникшей опасной ситуации и перехода ее во взрыв, проанализированы факторы, приводящие к возникновению аварий, даны методы их предупреждения, предотвращения и локализации.

Книга может служить также инженерным руководством для производства промышленных ВВ вблизи мест их потребления, а также специалистам и научным работникам в области взрывного дела.

## 1. Классификация промышленных ВВ, изготавливаемых на горных предприятиях

Гранулированные и водосодержащие смесевые ВВ принято делить на следующие группы.

1. Не содержащие взрывчатых компонентов (химических соединений) тротила, нитроэфиров, гексогена, бездымного пороха:

- *гранулиты* — двух- и трехкомпонентные ВВ, содержащие в своем составе гранулированную аммиачную селитру, соляровое масло, твердое измельченное горючее (древесную муку, дисперсный алюминий, угольный порошок, полиэфирную муку и т.д.);
- *издамит* — двухкомпонентный гранулит с жидким горючим (аммиачная селитра гранулированная + 6% солярового масла);
- *динамон* — двухкомпонентный гранулит с твердой горючей добавкой. Динамон может быть и порошкообразным, который выпускался разных марок в 1941-1950 гг. в условиях дефицита тротила. Прекращен выпуск из-за отказов, получаемых в результате сегрегации разноплотных компонентов состава при заряжании.

### 2. Тротилсодержащие гранулированные ВВ

*Граммониты* — двухкомпонентные ВВ, содержащие гранулотол или чешуйчатый ТНТ в количестве 18–70%.

### 3. Водосодержащие ВВ типа «сларри» и эмульсионные ВВ

В практике взрывного дела иногда путают понятия «водонаполненное ВВ», «водосодержащее ВВ», «эмульсионное ВВ», а потому, чтобы исключить неточности, ниже приведены технические понятия (термины), которыми в дальнейшем будем пользоваться.

**Водонаполненное ВВ** — это состояние заряда, при котором водоустойчивое гранулированное или кусковое ВВ (гранулотол, алюмотол, тротил У, гранипор, дибазит и др.) заряжено в обводненную скважину и высота столба воды в ней равна или выше высоты заряда. В данном случае в промежутках между кусочками ВВ находится вода.

**Водосодержащее ВВ** — это группа ВВ, содержащая в своем составе раствор селитр в их различных физических состояниях.

Водосодержащим принято также считать скважинный заряд граммонита 79/21, который нижней частью или полностью заряжен в воду. Селитра частично растворяется в воде и такой растворонасыщенный граммонит устойчиво детонирует от стандартного промежуточного детонатора. Для сохранения концентрации раствора селитры заряд помешают в полиэтиленовый рукав. Остальные водосодержащие ВВ этой группы в России называют акватоломи, а в зарубежной литературе — сларри.

**Ифзаниты** — водосодержащие ВВ, представляющие собой смесь гранулированных аммиачной селитры и тротила с заполненным межгранульным пространством, насыщенным загущенным водным раствором селитры с температурой 20°, 60° и 80°С, с добавками структурирующих компонентов.

**Карбатолы** — водосодержащие горячельющиеся ВВ, изготавливаемые из низкотемпературного эвтектического расплава аммиачной селитры и карбамида с добавками гранулотола, алюминия и 3-5% воды. Плотности расплава и гранулотола примерно равны, что исключает расслаиваемость заряда и необходимость применения загустителя, так как смесь при охлаждении быстро твердеет.

**Акватолы** — горячельющиеся ВВ типа ГЛТ-20, изготавливаемые из горячего загущенного полиакриламидом, КМЦ или другим загустителем раствора аммиачной селитры путем добавления в него 20% тротила. После остывания ГЛТ-20 затвердевает. Температура раствора в процессе приготовления ВВ меняется от 80 до 110°С в летнее и зимнее время соответственно.

ИГД УРО АН разработана рецептура, акватолов с изменяемом содержанием тротила от 10 до 20% более низкой температурой раствора аммиачной селитры 32–40°С. В раствор селитры добавляется тротил, а в процессе подачи насосом в скважину добавляются загуститель и структурообразователь (сшивка), которые придают суспензии гелеобразную консистенцию и определенную водоустойчивость.

Зарубежные сларри имеют более стабильные физико-химические характеристики и весьма широко применяются на карьерах и в подземных условиях в не патронированном и патронированном виде.

**Эмульсионные ВВ** изготавливают путем обработки горячего раствора селитры (смеси аммиачной, кальциевой или натриевой селитр) при температуре 80°С с добавкой эмульгатора в аппарате эмульгирования, за счет чего образуется обратная эмульсия. При этом раствор селитры диспергируется до капель микронного размера,

которые обволакиваются пленкой масла, за счет чего обратная эмульсия становится абсолютно водоустойчивой сметанообразной консистенции. Это зарубежные эмультивы и отечественные порэмивты.

При использовании мазута вместо масла эмульсия по консистенции подобна солидолу и затвердевает при остывании. Для активации эмульсии в нее добавляют газогенерирующую добавку (ГГД) или пористые материалы (стеклянные или полимерные полые микросферы, перлит и т.п.).

Все эмульсии по энергетике одинаковы, так как это 85%-ый горячий раствор селитры, т.е. жидкое AN-FO или игданит плотностью 1,25-1,33 г/см<sup>3</sup>.

Для повышения энергетики ЭВВ отечественные разработчики по образцу зарубежных вводят в их состав дисперсный алюминий от 4 до 8% (рекомендуется 6%), а зарубежные фирмы от 4 до 12%. Обычные ЭВВ имеют теплоту взрыва 700 ккал/кг (3000 кДж/кг), скорость детонации 4,5-5,0 км/с плотностью 1,2-1,3 г/см<sup>3</sup>. Перспективным является введение в состав ЭВВ утилизируемых порохов и ракетных топлив.

Металлизированные — 1040 ккал/кг (4350 кДж/кг) и скорость детонации 4,6-5,2 км/с.

*Эмульваны, (гранэмивты)* — смесевые суспензионные ВВ, изготавливаемые путем добавки в эмультивы (порэмивты) 30-70% AN-FO (игданита). Это последние зарубежные и отечественные разработки рецептур ВВ на основе эмульсий.

Необходимо подчеркнуть, что эмульваны сохраняют энергетическую селитры, а увеличение объемной энергии взрыва достигается только за счет увеличения плотности с 1,25 до 1,3÷1,35 г/см<sup>3</sup>. Для сохранения водоустойчивости и заряжания насосом под столб воды количество

гранул не должно превышать 25-40%, а потому увеличение энергетической эмульваны будет еще меньше.

## 2. Краткая характеристика компонентов промышленных ВВ.

Физико-химическая характеристика компонентов промышленных ВВ, изготавливаемых на горных предприятиях и специальных пунктах вблизи мест их применения, имеет определяющее значение как основной фактор, обеспечивающий получение ВВ с требуемыми характеристиками по их стабильности, энергетике, водоустойчивости и др.

Недостаточная требовательность к свойствам компонентов, особенно при изготовлении многокомпонентных эмульсионных ВВ может приводить к их расслоению, снижению взрывчатых характеристик, чувствительности к инициирующему импульсу, что в конечном счете ухудшает результаты взрыва и может приводить к отказам зарядов, что недопустимо.

Ниже дается описание технологических свойств компонентов и их влияние на свойства получаемого ВВ.

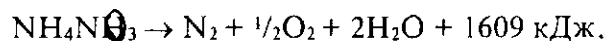
### 2.1. Аммиачная селитра NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub>

Аммиачная селитра представляет собой белое кристаллическое вещество, получаемое взаимодействием аммиака с азотной кислотой



Выпускается в виде гранул, чешуек или кристаллов. Аммиачная селитра ранее применялась в чистом виде как малочувствительное ВВ при массовых взрывах; теплота взрывчатого превращения селитры 1600 кДж/кг, работо-

При взрыве в идеальных условиях селитра разлагается по уравнению



При недостаточном инициировании, а также при тепловом взрыве она может разлагаться и по другим уравнениям с меньшими тепловыми эффектами и с выделением токсичных окислов азота, например по реакции:



Этим объясняется выделение окислов азота при взрывах ВВ на основе аммиачной селитры.

В зависимости от температуры аммиачная селитра может существовать в нескольких модификациях (табл. 2.1).

Таблица 2.1

Модификация	Диапазон изменения температуры для различных модификаций	Вид симметрии	Параметры кристаллической решетки $10^{-10}$ м			Объем крист. решетки $10^{-10}$ м <sup>3</sup>	Теплота перехода, кДж/кг	Изменение объема, %	Плотность, г/см <sup>3</sup>
			a	b	c				
I	169,6-125,2	Кубическая	4,40	4,40	4,40	85,2	70,13	-2,13	1,55
II	125,2-84,2	Тетрагональная	5,75	5,75	4,95	163,7	51,25	-1,33	1,6
III	84,2-32,3	Ромбическая моноклиновая	7,06	7,66	5,80	313,7	17,46	+0,8	1,68
IV	32,3+(-17)	Ромбическая бипирамидальная	5,75	5,45	4,96	155,4	20,9	-3,3	1,70
V	(-17)+(-50)	Тетрагональная	8,03	8,03	9,83	633,8	6,7	+1,6 5	1,72

Переходы из одной модификации в другую обратимые и протекают с небольшим рыхлением структуры в

поликристаллических образцах. Исключение составляет III модификация. Увлажнение облегчает переход из-за рекристаллизации.

При температурных изменениях в массе селитры (смесевых ВВ) возникают напряжения, которые могут привести либо к сцеплению порошкообразных частиц (слеживание, спекание), либо к разрыхлению и росту сформированных зарядов. Так как низкая влажность (ниже 0,1%) тормозит наиболее опасный переход из модификации IV в III, то одним из способов физической стабилизации является либо подсушка (в производственных условиях), либо введение водопоглощающих добавок.

Гранулы аммиачной селитры, образующиеся при кристаллизации ее расплава, представляют собой капиллярно-пористое тело.

В зависимости от формы и размеров частиц насыпная плотность аммиачной селитры составляет 0,8–0,9 г/см<sup>3</sup>. В процессе хранения в условиях частого и резкого перепада температур происходит значительное увеличение ее объема, особенно при высокой влажности. Совершенно сухая аммиачная селитра даже при резких колебаниях температуры сохраняет свой первоначальный объем.

Аммиачная селитра хорошо растворяется в воде, причем ее растворимость зависит от температуры:

Температура, °C	-15	-5	5	15	25	35
Концентрация, %	43,1	50,8	57,4	63,0	68,0	72,2
Температура, °C	45	55	65	75	85	95
Концентрация	75,9	79,2	82,2	85,0	87,6	90,0
Температура, °C	105	115	125	15	145	
Концентрация	92,2	94,2	95,7	97,1	97,9	
Температура, °C	155	165	169,6			
Концентрация	98,8	99,6	100,0			

Плотность насыщенных растворов аммиачной селитры также зависит от температуры (табл. 2.2).

Растворение селитры в воде сопровождается поглощением тепла и понижением температуры замерзания раствора. При растворении 6 частей селитры в 10 частях воды температура понижается примерно на 27°C. Раствор, содержащий 50 г селитры на 100 г воды, замерзает при температуре около -13°C.

Безводная аммиачная селитра плавится при температуре 169,4°C.

Термическое разложение селитры в присутствии продуктов разложения при низких температурах (около 180°C) и больших отношениях массы вещества  $m$  к объему реакционного сосуда  $V$  имеет самоускоряющийся характер. Изменение характера термического разложения связано с активизирующим действием некоторых продуктов разложения, например азотной кислоты.

Таблица 2.2

Показатели	Температура, °C							
	20	40	60	80	100	120	140	160
Плотность, г/см <sup>3</sup>	1,31	1,34	1,36	1,39	1,41	1,49	1,43	1,44
Содержание аммиачной селитры, %	66,1	73,3	80,2	85,9	91	94,7	97,4	99,4

Действие различных примесей на разложение селитры разнообразно: хлориды, хроматы и соединения кобальта действуют каталитически, карбамиды и сульфаты проявляют ингибирующее действие, нитраты металлов, окись алюминия, двуокись кремния влияния не оказывают.

Вводимые в промышленные сорта гранулированной селитры добавки сульфата аммония примерно в 1,5 раза

снижают скорость термического разложения селитры, а добавки доломита и фосфатов увеличивают скорость в 2–3 раза. Водостойчивая селитра марки ЖВК, содержащая металлическую соль жирных кислот, по термической стабильности несколько уступает кристаллической.

Добавка к селитре веществ, которые могут разлагаться с выделением аммиака (например, карбамид или ацетамид), тормозит разложение.

Снижают термическую стойкость селитры органические вещества, такие, как углеводы, крахмал, сахараиды, глюкоза, а также материалы из целлюлозы — бумага, картон, древесина, обычно применяемые для укупорки аммиачной селитры.

С селитрой легко взаимодействуют сера и сернистые соединения, сульфиды, азотная кислота и окислы азота, серная и фосфорная кислоты, многие металлы, особенно в виде тонкодисперсных порошков (цинк, медь и сплавы, кадмий, никель, магний, висмут) и некоторые соединения, в частности, соли меди марганца, хрома. Особенно опасно присутствие в селитре нитритных солей.

Не взаимодействуют с селитрой и не снижают ее термической стойкости алюминий, железо, их окислы и соли.

При хранении больших масс селитры в определенных условиях может произойти самовозгорание с переходом во взрыв.

Тепловой взрыв может возникнуть не только в сухой селитре, но и в ее высококонцентрированных растворах и расплавах. Взрыв селитры может возникнуть и при ее горении, для которого не требуется кислород воздуха. Некоторые катастрофические взрывы, которым предшествовали пожары, свидетельствуют о такой возможности.

В США около Трасквуда в 1960 г. произошло крушение товарного поезда. Один из вагонов был с аммиачной селитрой в мешках и один с селитрой, нагруженной навалом. Возник сильный пожар и затем взорвалась селитра, упакованная в мешки.

В 1973 г. в США (штат Оклахома) произошел пожар, сопровождающийся взрывом в отделении упаковки и хранения аммиачной селитры навалом.

Имел место случай пожара с переходом во взрыв в отделении грануляции, происшедший в 1974 г. на установке фирмы «Атлас Пуодер» (США). Первопричиной взрывов было загорание или термическое разложение селитры.

Переходу горения во взрыв способствует замкнутость емкости, когда удаление продуктов горения затруднительно и давление газов повышается. Особенно опасно загорание селитры в трюмах судов, цельнометаллических вагонах, в железных контейнерах.

Пожаро- и взрывоопасные свойства селитры возрастают при наличии в ней примесей > 2% по массе органического происхождения (нефтепродуктов и т.д.), а также при укупорке в горючие материалы.

Загорание селитры возможно от открытого огня, искр, сильных разрядов электричества, в результате взаимодействия с некоторыми легко окисляемыми и агрессивными материалами. При загорании селитра плавится и растекается по полу помещения, причем опасность возникновения взрыва расплавленной селитры выше, чем кристаллической.

Присутствие в водостойчивой аммиачной селитре марки ЖВК небольших количеств гидрофобных добавок (до 0,4%) не увеличивает ее пожароопасности по сравнению с обычной.

Чувствительность селитры к детонационному импульсу (ударно-волновая чувствительность), определяемая минимальным инициирующим импульсом и критическим диаметром, зависит от влажности, размера гранул и плотности. Детонация сухой тонкоизмельченной селитры при плотности 0,8 г/см<sup>3</sup>, по данным А.Ф. Беляева, устойчиво распространяется в открытых зарядах диаметром около 100 мм.

Детонация селитры с размером частиц до 1 мм и влажностью 1% затухает в открытом заряде диаметром 300 мм. Аммиачная селитра с влажностью 3% не взрывается в таких зарядах.

Установлено, что чувствительность к взрыву можно снизить добавкой нескольких процентов нитрата калия. Эта добавка стабилизирует модификацию IV в интервале температур 32±100°С и тем самым снижает пористость селитры.

По данным М. Кука, скорость детонации измельченной селитры  $v_d$  в зависимости от диаметра заряда  $d$  имеет следующие значения:

$d$ , мм	100	150	200	250	300	460
$v_d$ км/с	отказ	1,4	1,6	1,8	1,15	2,75

На детонационную способность селитры влияет прочная оболочка. В неразрушающейся оболочке зарегистрирована устойчивая детонация аммиачной селитры в зарядах диаметром 5 мм.

Критический диаметр водостойчивой селитры в зависимости от степени измельчения и содержания гидрофобных добавок (0,4÷0,8%) составляет 50–80 мм, а ее тонкодисперсной пыли 20÷30 мм. Толщина критического слоя распространения детонации измельченной во-

доустойчивой селитры без оболочки составляет 30-50 мм, а для ее тонкодисперсной пыли 15-20 мм, что в 1,5 раза меньше критического диаметра цилиндрических зарядов.

Скорость детонации селитры без добавок в металлической трубе диаметром 40 мм составляет 1,95 км/с, водоустойчивая селитра в этих условиях детонирует со скоростью 2,57 км/с, а ее пыль — со скоростью 3,4 км/с. Скорость детонации водных растворов селитры в металлических трубах диаметром 50 мм с толщиной стенок 6,5 мм в зависимости от температуры приведена в табл. 2.3. При введении в селитру органических добавок чувствительность к детонации возрастает.

К механическим воздействиям водоустойчивая селитра, особенно ее пыль, более чувствительна, чем обычная селитра, но менее чувствительна, чем тротил и аммонит 6ЖВ.

Таблица 2.3

Показатели	Температура, °С							
	126	141	154	163	204	215	216	230
Содержание воды, %	20	10,3	5,7	4,1	1,0	0,7	1,0	0,6
Скорость детонации, км/с	1,15	1,19	1,13	1,17	1,1	1,13	1,8	2,1

Безопасное по передаче детонации расстояние между штабелями аммиачной селитры можно рассчитать по формуле

$$r = K\sqrt{Q},$$

где  $Q$  — масса селитры, кг;

$K$  — эмпирический коэффициент.

Коэффициент  $K$ , по экспериментальным данным, для кристаллической селитры без примесей равен 0,1 и может меняться в зависимости от размеров частиц и свойств примесей в продукте.

При оценке действия взрыва аммиачной селитры на окружающие строения можно пользоваться расчетной формулой безопасных по действию ударной воздушной волны  $r_y$  расстояний:

$$r_y = a\sqrt{K_{\text{св}}Q},$$

где  $a$  — коэффициент, зависящий от характера разрушений;

$K_{\text{св}}$  — тротильный эквивалент селитры, который можно принять равным 0,35.

Промышленность выпускает несколько сортов аммиачной селитры. Наиболее массовым сортом является гранулированная селитра марок А и Б, изготавливаемая как для сельского хозяйства, так и для производства промышленных ВВ. Гранулированная селитра марки А предназначена для производства в основном заводских гранулированных ВВ, а селитра марки Б используется главным образом при изготовлении ВВ на месте применения. Гранулы селитры марок А и В малопористы, плохо поглощают и удерживают жидкие компоненты, вводимые в состав ВВ. Для гранулированных ВВ заводского изготовления с жидкими нефтепродуктами АО Акрон и ПВХ Альбо при Красноармейском КНИИМ вырабатывают пористую селитру марки П. Пористость гранул селитры марок А и Б составляет 6-9%, марки П — 15-18%. В пористой селитре впитывающая способность гранул относительно солярового масла должна быть не ниже 10%. Прочность гранул этой селитры марок А и Б соответственно 2,5-4,0 и 4-8 Н.

Б.Н. КУТУЗОВ, Г.А. НИШПАЛ

Водоустойчивая селитра марки ЖВК в кристаллическом виде предназначается для изготовления порошкообразных промышленных ВВ. В табл. 2.4 приведены характеристики различных сортов аммиачной селитры, используемых при изготовлении промышленных ВВ.

Таблица 2.4

Показатели	Гранулированная рядовая (ГОСТ 2-85)		Гранулированная пористая П <sup>1</sup>	Кристаллическая водоустойчивая марки ЖВК <sup>xx</sup> (ГОСТ 14702-79)	
	марки А	марки Б		1	5
Содержание, %	2		3	4	5
нитрата аммония (не менее)	98		азота 34+0,5	99,5	99
влаги (не более)	0,3		0,3	0,5	0,8
нерастворимых примесей (не более)	0,2		не нормированы	0,08	0,01
минеральных кислот в пересчете на азотную (не более)					
добавок против слеживания, %	4		4	0,02	0,07
нитратов кальция и магния в пересчете на СаО или фосфатов в пересчете на Р <sub>2</sub> О <sub>5</sub> или сульфата аммония	0,3-0,7		0,3-0,7	0,3-0,7	-
<b>гидрофобных добавок:</b>					
железа	-		-	-	0,6-0,9
органики	-		-	-	0,3-0,4

Окончание таблицы 2.4

1	2	3	4	5
Прочность гранул на раздавливание; Н	40	30	25	-
<b>Гранулометрический состав, %:</b>				
гранул размером 1-3 мм. (не менее)	92	93	90	-
гранул размером меньше 1 мм. (не более)	5,0	5,0	10,0	-
* Впитывающая способность по отношению к соляровому маслу не менее 10%				
** Водоустойчивость составляет 2,16 кПа				

Повышенную взрывоопасность имеет сухая тонкоизмельченная пыль селитры, особенно пыль водоустойчивой селитры. Поэтому не следует допускать скопления пыли при работе. Пыль селитры с примесью органических веществ чувствительна к КД № 8 и детонирует со скоростью 3,0-3,4 км/с. При механизированных погрузочно-разгрузочных работах необходимо оберегать селитру от загрязнения горюче-смазочными материалами.

## 2.2. Натриевая, калиевая и кальциевая селитры

Натриевая, калиевая и кальциевая селитры как кислородоносители имеют преимущества перед аммиачной селитрой: они содержат в два с лишним раза больше избыточного кислорода, имеют повышенную плотность. Но они невзрывчаты и при разложении образуют мало газов и много твердых окислов, кроме того, натриевая и калиевая селитры существенно дороже аммиачной, тонкодисперсные сухие смеси их с горючими характеризуются

ются более высокой способностью к воспламенению и горению, повышенной чувствительностью к механическим воздействиям по сравнению с аммиачно-селитренными смесями. Поэтому они находят ограниченное применение в составе ВВ. В виде раствора в некоторых водосодержащих ВВ используют натриевую, реже калиевую селитры для уравнивания кислородного баланса смеси, повышения плотности и пластичности, понижения температуры замерзания. Для водосодержащих ВВ больше пригодна кальциевая селитра, она сильно гигроскопична и легко растворима в воде, в составе с аммиачной селитрой понижает температуру плавления последней, хорошо удерживает влагу и препятствует подсыханию и твердению водосодержащей массы.

*Основные характеристики нитратов*

	NaNO <sub>3</sub>	KNO <sub>3</sub>	Ca(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> ·4H <sub>2</sub> O
Молекулярная масса,	85,02	101,1	266,13 (164) <sup>x</sup>
Кислородный баланс, %	+47	+40	+48,8
Плотность кристаллов, г/см <sup>3</sup>	2,25	2,11	1,82 (2,36)
Плотность насыщенного при 20° С раствора, г/см <sup>3</sup>	1,14	1,165	1,55
Температура плавления, °С	308	326	42,7(561)
Температура разложения, °С	380	420	- (500)
Теплота образования, ккал/моль	-111,54	-117,76	-213,8 (202,6)
Теплота термического распада, ккал/кг	-700	-750	
Гигроскопическая точка при 20°С, %	77,1	92,5	45,0
Криогидратная точка, °С	-18,1	-2,82	-28
Содержание соли в криогидратной точке (г) в 100г.		12,2	78,6

<sup>x</sup> В скобках здесь и ниже указаны данные для безводной соли. Вязкость 40% -ного раствора кальциевой селитры 3,22 сП при 50°С.

Растворение натриевой селитры происходит с большим теплопоглощением (5,03 ккал/моль), насыщенный водный раствор замерзает при минус 18°С. Добавками натриевой селитры вместе с другими криореагентами (например, гликолями) удается понизить температуру замерзания водосодержащих аммиачно-селитренных ВВ до минус 30°С. Эта селитра с аммиачной селитрой образует легкоплавкую смесь.

Калиевая селитра в воде растворяется с незначительным поглощением тепла. Она относится к малогигроскопичным солям.

Таблица 2.5

Показатели	Натриевая селитра (ГОСТ 828-68)		Калиевая селитра (ГОСТ 19790-74)		Кальциевая селитра (ТУ 6-03-367-71)	
	I	II	I	II	—	
Сорт селитры	I	II	I	II	—	
Внешний вид	Кристаллы		Кристаллы		Чешуйки	
<b>Содержание; %</b>						
основного вещества, не менее	99,5		99,7		99,85	99,7
хлоридов, не более	0,5				0,03	0,06
влаги, не более	1,0		1,2		0,1	0,2
карбонатов, не более	—				0,01	0,02
окисляемых примесей, не более	0,02		—		0,01	0,01
нерастворимых примесей, не более	0,05		—		0,03	0,03
<sup>x</sup> Содержание общего азота. <sup>xx</sup> Содержание аммиачной селитры.						

Натриевая и калиевая селитры имеют желтоватый оттенок. Кальциевая селитра вырабатывается в виде чешуек и водной суспензии. Эти селитры не взрывоопасны и не пожароопасны. Не оказывают токсического действия на персонал. Технические показатели селитр приведены в таблице 2.5.

### 2.3. Металлические горючие в составе промышленных ВВ

Одним из широко распространенных путей повышения энергии промышленных ВВ является введение в их состав алюминия.

Добавка алюминия в состав ВВ увеличивает суммарную энергию взрыва, объемную энергию, температуру и давление, но незначительно влияет на скорость детонации.

В процессе детонации алюминий реагирует с образованием твердых оксидов алюминия и других алюминийсодержащих продуктов, что уменьшает объем образующихся газов. Теплота образования оксидов алюминия очень высока — 16260 кДж/кг, что дает значительное увеличение теплоты взрыва и температуры газов. Подъем температуры газа компенсирует уменьшение количества газов и образовавшийся объем газа может произвести большую работу за счет увеличения его температуры. При использовании ВВ с добавкой алюминия совершается большая работа при одинаковом количестве ВВ и, как следствие, увеличивается расстояние между скважинами и отмечается улучшение дробления породы при взрывных работах.

В табл. 2.6 приведен перечень промышленных ВВ (AN-FO, эмульсия, тяжелое AN-FO) содержащих пористую аммиачную селитру с различными добавками алюминия.

Основными характеристиками алюминия являются: размер частиц, чистота, плотность, а также сыпучесть, имеющая большое значение для бестарных систем. Размер частиц очень важен, так, частицы более 20 меш. склонны к замедленной реакции, а частицы размером менее 150 меш. — пылеобразные и представляют высокую пожароопасность.

Таблица 2.6

Взрывчатый состав	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Относительная массовая концентрация (AN-FO = 100)	Относительная объемная энергия (AN-FO с плотностью 0,85 г/см <sup>3</sup> =1,00)
AN-FO	0,85	100	1,00
Al/AN-FO+(5% Al)	0,88	112	1,16
Al/AN-FO+(10% Al)	0,91	123	1,32
Al/AN-FO+(10% Al)	0,94	134	1,48
NCN эмульсия	1,15	78	1,06
NCN эмульсия + (5%Al)	1,21	91	1,30
NCN эмульсия + (10%Al)	1,27	103	1,54
NCN эмульсия + 15%Al)	1,30	117	1,79
AN-FO + 10% эмульсии	0,93	98	1,07
AN-FO+20% эмульсии	1,01	96	1,14
AN-FO+30% эмульсии	1,11	93	1,21
AN-FO+40% эмульсии	1,20	91	1,28
AN-FO+50% эмульсии	1,29	89	1,35
AN-FO+30% эмульсии+(5%Al)	1,14	105	1,41
AN-FO+30% эмульсии+(10%Al)	1,16	116	1,58
AN-FO+30% эмульсии+(15%Al)	1,19	127	1,78

В табл. 2.7 приведены марки алюминиевого порошка применяемые для производства ВВ, включая AN-FO, сларри, эмульсионные взрывчатые составы.

Таблица 2.7

Марка	Удельная поверхность, см <sup>2</sup> /г	Размер частиц, мкм	Активность, %	Форма частиц	Метод получения
Порошки					
ПА-1	350	60 - 65	-	-	-
ПА-2	400	50 - 55	-	-	-
ПА-3	700	30 - 31	-	-	-
ПА-4	1000-1100	20 - 22	91	Неправильная	Пulверизация расплавленного алюминия
ПА-5	1100	-	99	То же	То же
АСД-1	1500-1800	15	99,2-99,5	Сферическая	Распыление инертным газом
АСД-1м	2200-2500	10	99,0	То же	Промжучный продукт порошка
АСД-2	3600-3800	5	99	"	Распыление инертным газом
Пудра					
ПП-1	3540	6 - 7	90	Лепестковая	Размол алюминиевого пульверизата в шаровых мельницах
ПП-2	4000	5 - 6	90	То же	То же
ПП-3	4550	4 - 5	90	"	"
ПП-4	4400 - 6000	3 - 4	90	"	"
ПАК-3	26000	0,8 - 0,9			
АК-4	30000	0,7 - 0,8			

Одним из основных факторов, определяющих выбор ВВ, является обводненность скважины. Другими факторами, влияющими на затраты, связанные с ВВ, являются

объемная насыпная плотность ВВ и цены на алюминиевый порошок.

Предложен расчет (в ценах США) выбора ВВ (с заданной плотностью 1,4) из числа взрывчатых составов: AN-FO, эмульсии, тяжелые AN-FO с добавками алюминия или без них для снаряжения сухих скважин диаметром 311 мм, исходя из стоимостей компонентов (за кг):

жидкое топливо — 26,5 центов, нитрат аммония — 19,8 центов, эмульсия — 39,7 центов, алюминиевый порошок — 180 долларов. Расчет показал, что оптимальным ВВ без добавки алюминия является тяжелое AN-FO, содержащее 20% эмульсии. Из составов с добавкой алюминиевого порошка оптимальным ВВ является тяжелое AN-FO содержанием 20% эмульсии и 7 % алюминиевого порошка.

Возможно использование и других более экономичных и менее дефицитных высокотеплотворных металлов и их соединений. Расчетные значения прироста энергетических характеристик при замене тротила металлическими и другими горючими веществами для стехиометрической смеси селитры с горючим приведены в табл. 2.8.

Таблица 2.8

Горючая добавка	Относительная молекулярная масса	Формула оксида	Теплота образования оксида, кДж/моль	Повышение теплоты взрыва состава на 1г горючего, кДж
Алюминий	27	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1670	31
Кремний	28	SiO <sub>2</sub>	860	31
Магний	24	MgO	600	25
Фосфор	31	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	1540	24,7
Кальций	40	CaO	630	16
Марганец	55	MnO <sub>2</sub>	520	9,4
Железо	56	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	820	7,4

Практически интерес представляют металлические порошки, содержащие кремний, ферросилиций и силикокальций. Все перечисленные в табл. 2.8 металлы по теплотворной способности уступают алюминию, однако с кремнием образуют соединения, способные повысить теплоту взрыва ВВ.

Из-за высокой твердости частиц порошков ферросилиция и силикокальция чувствительность составов высокая, причем она возрастает по мере увеличения содержания кремния. Водонаполнение существенно снижает чувствительность к механическим воздействиям. По химической стойкости водосодержащие композиции с порошками ферросилиция и силикокальция не уступают составам с алюминием. Таким образом, замена алюминия в водосодержащих ВВ экономически доступными и дешевыми горючими компонентами, обеспечивающими высокую объемную энергию составов (9210 — 9710 кДж/л), позволяет снизить стоимость ВВ на 10-20%. По этим причинам в один из составов карботолов (ФТ-10) введен ферросилиций как экономичное высокоэффективное горючее. Составы, содержащие ферросилиций, применяются в Болгарии (аммонал ФС, водосодержащее ВВ марки ЖВ — ФС), Швеции (приллит Д), Японии (карлиты).

#### 2.4. Жидкие нефтепродукты и другие горючие

**Дизельные топлива и некоторые нефтяные масла.** Для изготовления игданита используют в качестве горючего доступные и дешевые дизельные топлива, имеющиеся на каждом предприятии, ведущем взрывные работы. Нефтеперерабатывающая промышленность вырабатывает топливо четырех марок для автотракторных двигателей и столько же марок для быстроходных двигателей. Все

они допущены для производства игданита. Приведенное в табл. 2.9 цетановое число характеризует способность топлива к воспламенению. Чем выше это число, тем выше воспламеняемость топлива. Температура воспламенения вместе с цетановым числом характеризует пожароопасность топлива.

Таблица 2.9

Некоторые характеристики дизельных топлив

Показатели	Автотракторное (ГОСТ 305-73)	Для быстроходных двиг. (ГОСТ 4749-73)						
		З	Л	С	ДА	ДЗ	ДЛ	ДС
Цетановое число, не менее	45	45	45	50	40	40	45	50
Вязкость при 20°C, сСт	1,5-2,5	2,2-3,2	3-6	4,5-8	2,5-4	3,5-6	3,5-8	2,5-4 при 50°C
Температура, °C:								
вспышки в закрытом тигле, не ниже	30	35	40	90	35	50	60	90
застывания, не выше	-55	-35	-10	-15	-60	-45	-10	-15

Буквенные индексы вместе с температурой застывания означают климатические условия применения топлива: А и ДА — арктическое; З и ДЗ — зимнее; Л и ДЛ — летнее. Топливо марок С и ДС имеет также и специальное назначение.

От вязкости зависит способность его растекаться по поверхности гранул селитры в игданите и впитываться в их поры и трещины. В приведенных марках топлива нормировано полное отсутствие воды и механических примесей, содержание золы допускается не более 0,02%, содержание серы не более 0,2 — 0,4%.

Для изготовления гранулита М на местах применения можно использовать маловязкие нефтяные масла (табл. 2.10), которые не выделяют летучих компонентов и не создают сильного запаха, менее чувствительны к огню и облегчают пневмотранспортирование ВВ. Масло «мягчитель», как и приборное, имеет низкую температуру застывания и пригодно для изготовления ВВ при низких температурах воздуха. Доступны также промышленные масла общего назначения. Все рассмотренные масла хорошо очищены от сопутствующих примесей. В них почти полностью отсутствуют минеральные кислоты, щелочи, вода и механические включения.

Таблица 2.10  
Характеристики маловязких нефтяных масел общего и технологического назначения

Показатели	Соляровое (ОСТ-38-157-74)	Поглотительное (ГОСТ 4540-48)	Мягчитель (ГОСТ 6601-53)	Приборное (ГОСТ 1805-51)	Индустриальные общего назначения (ГОСТ 20799-75)		
					И-8А	И-12А*	И-20А
Вязкость при 50°C, сСт	5-9	3,6-6,2	6,2-8,3	6,3-8,5	6-8	10-14	17-23
Температура, °C:							
вспышки, не ниже	125	-	120	120	130	165	180
застывание, не выше	-20	-20	-60	-60	-20	-30	-15
Плотность при 20°C, г/см <sup>3</sup>	0,88-0,9	0,89	0,87	0,865	0,88	0,89	0,87

\* Такие же характеристики имеет индустриальное масло ИС-12 по ГОСТ 8675-62

Карбамид (мочевина),  $H_2NCONH_2$ , молекулярная масса 60,06, используется в составе карботолов в качестве горючего и для получения низкоплавких смесей. Смесь аммиачной селитры с карбамидом в эвтектическом соотношении плавится при температуре около 75°C. С азотной кислотой образует нитрат мочевины  $CO(NH_2)_2HNO_3$ , имеющий взрывчатые свойства. Сам карбамид не взрывоопасен. Пыль его, взвешенная в воздухе, взрывоопасна при концентрациях выше 500г/м<sup>3</sup>. С формальдегидом образует широко применяемые в промышленности карбамидные смолы.

Теплофизические и другие характеристики карбамида

Теплота образования, ккал/моль.....	79
Теплота сгорания, ккал/моль .....	151
Теплоте растворения, ккал/кг .....	57,8
Теплота плавления, ккал/кг .....	58,8
Температура плавления, °C:	
сухого вещества .....	132,7
с 2% воды .....	125
с 10% воды .....	105
Удельная теплоемкость при 25°C, ккал/(кг°C) .....	0,37
Вязкость расплава при 133°C, сПз .....	2,58
Поверхностное натяжение расплава, дин/см .....	36
Теплопроводность при 0°C, ккал/(м.ч°C) .....	0,191
Растворимость в 100 г воды*, г:	
при 0°C .....	67
при 20°C .....	104,7
при 50°C .....	205
при 100°C .....	733
Плотность насыщенного раствора при 20°C, г/см <sup>3</sup> .....	1,15
Температура замерзания раствора**, °C .....	-12
Упругость пара над насыщенным раствором при 20°C, мм рт.ст. ....	14,05

\*Карбамид также хорошо растворяется в спирте, жидком аммиаке и глицерине.

\*\*В момент замерзания в растворе содержится 32% карбамида.

Карбамид вырабатывается в кристаллическом и гранулированном виде. Кристаллы и гранулы бесцветны, без запаха, нетоксичны, умеренно гигроскопичны и мало склонны к слеживанию. Гигроскопическая точка карбамида 80% при 20°C. В гранулированном виде карбамид сохраняет рассыпчатость на протяжении всего срока хранения.

Плотность кристаллов карбамида 1,335 г/см<sup>3</sup>, плотность гранул 1,25-1,32 г/см<sup>3</sup>, насыпная их плотность 0,76-0,8 г/см<sup>3</sup>. Размер гранул 1,0-1,5 мм, прочность на раздавливание гранулы 400-500 гс.

*Нормированные технические характеристики  
гранулированного карбамида по ГОСТ 2081 – 75*

**Содержание, %:**

основного вещества, не менее .....	99,3
влаги, не более .....	0,3
биурета, не более .....	0,8
свободного аммиака, не более .....	0,015
нерастворимых веществ, не более .....	0,02
окислов железа, не более .....	0,005
сульфатов в пересчете на SO <sub>4</sub> , не более .....	0,02

Поставляется потребителям в бумажных мешках с гарантийным сроком хранения 6 мес. Предельно допустимая санитарная норма пыли карбамида в воздухе 10 мг/м<sup>3</sup>.

## 2.5. Загустители

Для загущения растворов аммиачной селитры в составе водосодержащих ВВ широко применяют натриевую соль карбоксиметилцеллюлозы (КМЦ), реже полиакриламид, и иногда гуаргам. КМЦ является простым эфиrom целлюлозы и гликолевой кислоты

$C_6H_7O_2(OH)_{3-x}(OCH_2COOH)_x$  в воде нерастворима. При обработке щелочью или аммиаком дает водорастворимую соль.

КМЦ содержит от 0,5 до 1,2 карбоксиметильных групп на одно элементарное звено макромолекулы целлюлозы. От числа таких групп (степени замещения) зависит способность ее солей растворяться в воде и насыщенном растворе аммиачной селитры. При растворении образуются вязкие гели, которые структурируются (смешиваются) с небольшими добавками некоторых солей трехвалентных металлов (например, сульфатом хрома), приобретая способность не разбавляться водой (в отсутствие механического перемешивания), благодаря чему их используют для придания водоустойчивости водосодержащим ВВ.

Промышленность вырабатывает десять марок технической натриевой соли КМЦ в виде мелкозернистого или порошкообразного материала. Три марки этой соли выпускаются в хорошо очищенном от сопутствующих примесей состоянии, имеют нормированный водородный показатель рН раствора. Наиболее густые и вязкие водные растворы способны дать КМЦ марок 70/500 и 85/500, которые отличаются высокими степенями полимеризации и замещения по карбоксильным группам (табл. 2.11).

Аммониевая соль КМЦ по своим техническим показателям не уступает натриевой соли. Соли КМЦ являются дорогостоящими продуктами. Находят применение в составе водосодержащих ВВ все ее сорта ввиду легкой растворимости в воде и хорошей загущающей способности в присутствии структурообразующих добавок.

*Полиакриламид*  $(C_3H_5ON)_n$ , молекулярная масса 71, кислородный баланс — 169%. Выпускается в виде высоковязкого водного раствора 8-9% ной концентрации по

ТУ 6-16-1759-72 и в виде порошка по ТУ 6-16-153-73. Водный раствор содержит около 60 г/л полиакриламида и 145-165 г/л сульфата аммония. Кинематическая вязкость 0,1%- ного раствора полиакриламида не менее 1,7 сСт при 20°C. Сухой технический полиакриламид содержит около 35% основного вещества и 60-70% сульфата аммония.

Таблица 2.11

Нормируемые технические показатели натривой соли

Показатели	КМЦ техническая		КМЦ очищенная	
	ГОСТ 5.588-70 марка 85/500	ОСТ 6-05-386-73 марка 70/500	марка 70/500	марка 85/500
<b>Содержание, %:</b>				
основного вещества, не менее	52	50	-	-
влаги, не более	10	10	15	15
свободных щелочей, не более	1	2	Отсутствуют	
хлоридов, не более	-	-	0,05	0,05
Степень замещения, не менее	82	65-75	65-75	80-90
Степень полимеризации, не менее	500	500	500	500
Растворимость в воде, % (не менее)	99,3	98	98	98
Вязкость 0,5%- ного водного раствора, сПз (не менее)				
Водородный показатель рН 0,5%-ного раствора	-	-	7±0,3	7±0,3

Полиакриламид является хорошим загустителем для получения гелеобразных высоководоустойчивых водосодержащих ВВ. По загущающей способности значи-

тельно превосходят КМЦ. Но он пока мало используется для данной цели из-за технологических трудностей разбавления водой его высоковязких растворов, особенно при изготовлении ВВ в полевых условиях. Порошок полиакриламида хуже растворяется, чем соли КМЦ, требует применения горячей воды и механического перемешивания. Более пригоден для изготовления гелеобразных ВВ в заводских условиях.

**Гуаргам** представляет собой белый порошок с сероватым оттенком. Получается путем размола бобов некоторых тропических сортов акации (рождового дерева). Вырабатывается с содержанием основного вещества не менее 80%, протеинов 3-5%, нерастворимых в воде примесей не более 3%, золы не более 1%. В холодной воде растворяется не менее 95% продукта, водородный показатель рН водного раствора  $6,5 \pm 0,5$ . Вязкость 1%-ного раствора 3000 сПз. Эффективной сшивкой водных растворов гуаргама является бура и окислы сурьмы и висмута.

**Структурообразующие добавки** (сшивки) применяют для поперечной связи (сшивания) макромолекул полимерных веществ в водном растворе. Для КМЦ наиболее эффективной сшивкой является сульфат хрома (сернокислый хром)  $Cr_2(SO_4)_2 \cdot 18H_2O$ . Представляет собой кристаллическую соль зеленого или фиолетового цвета, хорошо растворимую в воде. Этой соли растворяется 24% при температуре 20°C и 46% при 100°C. Плотность таких растворов 1,26 и 1,5 г/см<sup>3</sup> соответственно.

Менее эффективны водорастворимые нитраты хрома  $Cr(NO_3)_2 \cdot 9H_2O$ , аммониевые  $NH_4Cr(SO_4)_2 \cdot 12H_2O$  и калиевые квасцы хрома  $KCr(SO_4)_2 \cdot 12H_2O$  и биохромат натрия  $Na_2Cr_2O_7$  (ГОСТ 2651-70).

При отсутствии хромовых солей для сшивания растворов КМЦ могут применяться (но с меньшим успехом) сернокислый алюминий очищенный  $Al_2(SO_4)_2 \cdot n \cdot H_2O$  по ГОСТ 12966-75, железо, сернокислое очищенное  $Fe_2(SO_4)_3 \cdot 9H_2O$  или хлорное железо  $FeCl_3$  по ГОСТ 11159-65. Количество перечисленных солей, вводимых в водные растворы КМЦ, составляет 0,01-0,05% по отношению к последней.

Бура (ГОСТ 8429-69) — натриевая соль тетраборной кислоты  $Na_2B_4 \cdot 10H_2O$  в 100 г воды растворяется 3,9 г при температуре 30°C, 10,5 г при температуре 50°C. Применяется для сшивания растворов гуаргама.

### 3. Характеристика ВВ, изготавливаемых вблизи мест потребления

#### 3.1. Бестротиловые гранулированные ВВ

К бестротиловым ВВ на основе гранулированной аммиачной селитры относят смеси с жидкими или легкоплавкими нефтепродуктами, которые могут изготавливаться непосредственно на горных предприятиях и на специализированных заводах.

ВВ указанного типа в английской транскрипции обозначают индексом AN-FO (нитрат аммония — горючее масло), в русской — АС-ДТ (аммиачная селитра — дизельное топливо), однако имеются и собственные наименования: игданиты, гранулиты (Россия), нилит, аустенит (США), амекс (Канада), андекс, амонекс (ФРГ), декамон, динамон (ГДР), гранулехс, анабел (Великобритания), селтит, ферролит, нитрат фуэл (Франция), нитрол, нитрекс (Югославия), пермон, пермонекс (Чехословакия), нафтенит (Болгария), никегран (Венгрия), лабрит

(Австрия), анол, амелен, нитрамон (Румыния), солетрол (Польша), аннит (Финляндия), приллит (Швеция), наголит, алнафт, наурут (Испания), энергел (Индия) и др. Они могут отличаться между собой сортом селитры и видом жидкого горючего. Некоторые современные сорта (гранулиты марки АС, простейшие ВВ типа игданита и др.) содержат помимо жидкого горючего металлические угольные порошки, другие твердые горючие.

Смеси гранулированной аммиачной селитры с жидкими нефтепродуктами (дизельным топливом) начали применять на открытых горных разработках в США и Канаде в 1955 г. Их компоненты недефицитны и недороги. Смеси АС-ДТ безопаснее в обращении сравнительно с другими ВВ, так как они характеризуются весьма низкой чувствительностью к механическим воздействиям. В отличие от тонкодисперсных динамонов обладают хорошей сыпучестью и мало слеживаются.

Технология приготовления и таких смесей чрезвычайно проста. Она сводится к механическому перемешиванию твердой и жидкой фаз, для чего пригодны простые по устройству лопастные смесители как в стационарных остановках, так и на передвижных зарядно-смесительных машинах. Благодаря этим преимуществам смеси АС—ДТ оказалось возможным готовить на месте применения, а также осуществлять их механизированное зарядание.

Смеси данного типа имеют низкую стоимость и для горных пород малой и средней крепости являются одними из наиболее экономичных промышленных ВВ.

Смеси АС—ДТ применяют как на открытых, так и на подземных горных разработках. В последнем случае зарядание шпуров и скважин производят увлажняющими до 2% воды с помощью пневмозаряжающих уст-

ройств с высокой плотностью благодаря хорошей уплотняемости этих ВВ, содержащих жидкую фазу.

Гранулированные ВВ почти везде за рубежом представлены простейшими двухкомпонентными составами типа АС—ДТ, а в ряде стран также и трехкомпонентными смесями с содержанием в составе алюминия. Простейшие гранулированные взрывчатые смеси в настоящее время — самое распространенное промышленное ВВ, доля потребления их достигает 50-60% общего потребления промышленных ВВ, а в США в 1990 г. 85%.

Недостатки смесей АС—ДТ:

- 1) смеси неводоустойчивы, при содержании влаги более 5% они теряют детонационную способность и поэтому их нельзя применять в обводненных забоях;
- 2) смеси недостаточно физически стабильны. При больших высотах скважинных зарядов жидкая фаза в течение нескольких часов стекает в нижнюю часть заряда;
- 3) для взрывания (рыхления) крепких и особо крепких пород детонационные параметры этих ВВ (детонационные давления) недостаточны;

Многочисленные попытки придать бинарным смесям АС—ДТ необходимую степень водоустойчивости не увенчались успехом.

В бывшем СССР изготавливались водоустойчивые сорта трехкомпонентных гранулитов марки АС—В, отличающихся от простейших ВВ типа АС—ДТ тем, что вместо жидкого горючего в них вводятся низкоплавкие твердые нефтепродукты, обладающие гидрофобными свойствами. Эти ВВ предназначены для заряжания обводненных шпуров и скважин в подземных выработках с помощью пневмозарядчиков.

Формируемый таким способом заряд вытесняет воду из шпура (скважины). В уплотненном состоянии заряд обладает малой водопроницаемостью.

Для заряжания обводненных скважин методом свободной засыпки гранулиты этих марок мало пригодны. Поэтому при производстве взрывных работ в обводненных забоях с помощью этих ВВ, засыпаемых в скважины без уплотнения, практикуют предварительную откачку воды из скважин, если скважины имеют небольшой водоприток. Применяют также методы гидроизоляции зарядов с помощью полиэтиленовых рукавов.

Для заряжания скважин небольшой обводненности широко используют комбинированные заряды: нижнюю обводненную часть скважины заполняют водоустойчивыми гранулированными ВВ, например гранулотолом, а верхнюю, сухую часть — игданитами или гранулитами.

Комбинированные заряды позволяют решить и проблему повышения бризантового (дробящего) действия взрыва в нижней, наиболее трудно-взрываемой части уступа, с хорошей проработкой подошвы.

Для повышения физической стабильности смесей АС—ДТ во многих странах применяют пористую гранулированную селитру, изготавливаемую по специальной технологии. Она обладает повышенной впитывающей способностью по отношению к дизельному топливу. Если обычные сельскохозяйственные сорта аммиачной селитры (с гладкой поверхностью) впитывают 2-3% дизельного топлива по массе, то пористые сорта — до 12-16%.

Физическая стабильность может быть повышена и за счет применения более вязких, чем дизельное топливо, минеральных масел — солярового, индустриального и других, а также припудривания поверхности, смоченной

жидкими топливами, и поверхности гранул тонкодисперсными твердыми горючими материалами — алюминиевой пудрой, древесной мукой и т.п. На этом принципе, в частности, основаны рецептуры многих гранулированных ВВ (гранулитов), выпускаемых промышленностью.

В связи с тем что гранулированная аммиачная селитра при изготовлении ВВ не измельчается (при пневмозряжении происходит лишь частичное дробление гранул), взрывчатые характеристики ВВ этого типа существенно зависят от размера гранул, их влажности, прочности, а также вязкости горючего. Энергетические характеристики смеси определяются ее химическим составом. Теплота взрыва будет наивысшей для смесей стехиометрического состава, отвечающего нулевому кислородному балансу. В случае трехкомпонентных алюмосодержащих ВВ она возрастает с увеличением соотношения между алюминием и жидким горючим.

Впитывающая (удерживающая) способность гранул селитры зависит от их пористости и влажности.

Впитывающая способность селитры марки Б с влажностью около 0,9% относительно дизельного топлива составляет в зависимости от размера гранул 6,3-8,8%. Влияние влажности на впитывающую способность различных горючих жидкостей еще более сильное.

При влажности 0,19% непористая гранулированная аммиачная селитра впитывает 13,3% дизельного топлива, 11,9% глицерина, 18% скипидара, 10,2% поликсилосановой жидкости и 8% автола. При влажности селитры 0,26% гранулы впитывают лишь 1,5% дизельного топлива, 2% глицерина или скипидара или поликсилосановой жидкости, а также 2,5% автола.

Чем меньше влажность аммиачной селитры, тем более горючей жидкости она впитывает. Увлажненная ам-

миачная селитра поглощает малое и примерно одинаковое количество горючих жидкостей независимо от их физических и химических свойств, причем это количество колеблется в пределах от 1,5% до 2%, в среднем составляя 2%.

Поэтому для обеспечения нулевого или близкого к нулю кислородного баланса в состав ВВ вводят дополнительно твердые горючие добавки, такие, как древесная мука, уголь, сажа, стеарат кальция, полиакриламид и др.

Твердая горючая добавка должна быть пористой, способной поглотить ту часть жидкого горючего, которая не удерживается гранулами аммиачной селитры. С этой точки зрения лучшими твердыми горючими добавками являются тонко измельченный каменный и древесный уголь, хорошо адсорбирующие жидкие компоненты.

Замена части дизельного топлива на угольный порошок уменьшает растворимость гранулитов. Помимо повышения водоустойчивости введение угольного порошка увеличивает эффективность взрыва на 17-20 % и повышает бризантность (в кольцах) с 16 до 23 мм.

На физико-химические и взрывчатые свойства смесей данного типа сильное влияние оказывают физические свойства компонентов.

При одинаковом химическом составе физические различия смесей обуславливают прежде всего различные значения величин критического  $d_{кр}$  и предельного  $d_n$  диаметров заряда. Так, смесь дизельного топлива с непористой селитрой имеет  $d_{кр} = 120-160$  мм в патронах в бумажной оболочке, а с пористой селитрой — 70-100 мм.

Зависимость критического диаметра детонации заряда игданита от впитывающей (удерживающей) способности селитры относительно дизельного топлива и ее удельной поверхности при взрывании ВВ в стальных трубах показана на рис. 3.1.

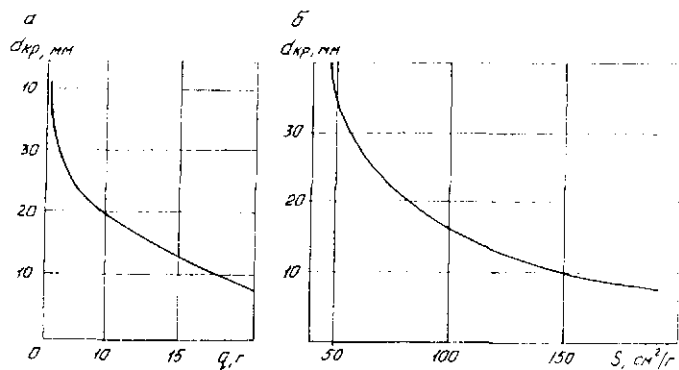


Рис. 3.1. Зависимость критического диаметра детонации  $d_{кр}$  заряда игданита от удерживающей способности в 100 г аммиачной селитры  $q$  (а) и от удельной поверхности  $S$  аммиачной селитры (б)

При диаметре заряда больше критического, но меньше предельного, т.е. в области неидеального режима детонации, физические характеристики смеси влияют и на параметры детонации.

Введение в гранулированную селитру на стадии кристаллизации некоторых поверхностно-активных веществ (ПАВ) способствует увеличению ее впитывающей способности и соответственно скорости детонации игданита при взрывании в стеклянных трубках диаметром 25 мм от 1,74 до 2,45 км/с.

Повышенной впитывающей способностью по отношению к дизельному топливу характеризуется водостойчивая селитра марки ЖВК, содержащая соли жир-

ных кислот. Игданит на ее основе отличается более стабильными физическими и взрывчатыми свойствами.

США и Канаде выпускается гранулированная селитра с добавками ПАВ или припудренная пористым диатомитом (3%).

При достижении предельного диаметра заряда физические особенности смеси (размер гранул, их впитывающая способность и др.) перестают влиять на параметры детонации, которые зависят только от химического состава смеси и плотности заряда.

Величины  $d_{кр}$  и  $d_n$  в сильной степени зависят от физико-химических характеристик оболочки заряда. В прочной и массивной оболочке они резко уменьшаются. Так,  $d_{кр}$  для игданита и гранулитов в бумажной оболочке составляет 70-160 мм, а в стальной оболочке 18-30 мм. Такие же значения критических диаметров получают при пневмозарядании шпуров. В практических условиях максимальная скорость детонации 3,8-4 км/с достигается при зарядании в скважины, выбуренные в скальных породах, диаметром 150 мм. Минимальная скорость детонации, отвечающая  $d_{кр}$ , составляет 1,5-1,7 км/с в зависимости от свойств селитры и химического состава смеси.

При пневматическом зарядании шпуров и скважин ВВ содержащими жидкое или низкоплавкое горючее с явно выраженными пластическими свойствами (типа парафина, воска и т.п.), гранулы селитры дробятся, что приводит к более равномерному смешиванию компонентов и уплотнению ВВ в зарядной камере. Благодаря этому параметры детонации становятся более высокими, чем при ручном зарядании. Так, например, в шпурах, выбуренных в известняке диаметром 50 мм, при плотности зарядания 0,8-0,9 г/см<sup>3</sup> (засыпка вручную) скорость детонации простейших ВВ составляет 2,5-3,3 км/с.

а при плотности 1,1-1,2 г/см<sup>3</sup> (пневмозаряжание) — 3,3-4 км/с.

Давление детонации в точке Жуге для этих ВВ в неидеальном режиме примерно в 3 раза, а в идеальном режиме в 1,6 раза ниже, чем у аммонита 6ЖВ в соответствующих режимах детонации, а импульс взрыва более растянут. Ширина зоны химической реакции игданита, рассчитанная по формуле Эйринга, в 17 раз больше ширины зоны аммонита 6ЖВ. Это приводит к более «мягкому» нагружению горных пород при взрывании.

Оптимальное значение плотности бестротилового гранулированного ВВ составляет около 1,2 г/см<sup>3</sup>. Такая плотность при применении существующих моделей пневматических зарядчиков обеспечивается только при расстоянии от зарядной трубки до заряда ВВ не более 0,5-0,6 м. Практически же оно изменяется от 0,3 до 1,5 м из-за чего плотность ВВ меняется по длине заряда от 1,15-1,25 г/см<sup>3</sup> до значений меньше 1 г/см<sup>3</sup>.

В целях повышения энергетических характеристик ВВ в их состав вводят алюминиевый порошок или пудру (гранулиты марки АС). Введение в состав этих ВВ 4-8% алюминия с уменьшением содержания жидкого горючего, отвечающего близкому к нулевому кислородному балансу, приводит к повышению теплоты взрыва на 20-40%.

Как ВВ, имеющие близкий к нулевому кислородный баланс, игданиты и гранулиты относятся к классу II и могут применяться как на открытых, так и на подземных работах.

В табл. 3.1 приведены свойства отечественных бестротилового гранулированного ВВ. Относительно водостойчивыми являются только гранулиты АС-4В и АС-8В.

Таблица 3.1

Показатели	Игданит	Простейшее ВВ с алюминием	Гранулиты			
			М	АС-4	АС-4В	АС-8В
1	2	3	4	5	6	7
Кислородный баланс, %	0,12	-1,2	+0,14	+0,41	+0,35	-3,3
Теплота взрыва, кДж/кг	3760	4500	3760	4520	4520	5230
Объем газов, л/кг	980	—	980	907	—	—
Полная идеальная работа взрыва, кДж/кг	3150	—	3150	3550	3550	4000
Работоспособность, см <sup>3</sup>	320-330	400-410	320-330	390-410	390-410	400-420
Тротильовый эквивалент по баллистическому маятнику	—	—	0,89	0,96	0,96	—
Бризантность в стальном кольце, мм <sup>2</sup>	15-20	—	18-22	22-26	22-24	22-26
Скорость детонации, км/с	2,2-2,8	2,5-3,6	2,5-3,6	2,6-3,5	2,8-3,5	3,0-3,6
<b>Критический диаметр, мм:</b>						
в бумажной оболочке	120-150	100-120	80-100	60-100	70-100	80-100
в стальной оболочке	25-30	25-30	15-20	20-25	15-20	20-25
Минимальный инициирующий импульс (тротил), г	20-30	—	10-15	5-10	5-10	5-10

Окончание таблицы 3.1

1	2	3	4	5	6	7
<b>Чувствительность:</b>						
к удару, %	0	0-20	0	4-12	0-12	0-8
к трению с примесью 5% песка, Мпа, (не менее)	300	-	300	300	300	300
Насыпная плотность, г/см <sup>3</sup>	0,8- 0,9	0,8-0,9	0,8- 0,9	0,8- 0,9	0,8-0,9	0,8-0,9
* От шашки тротила массой 5 г.						

Игданиты изготавливаются на местах производства взрывных работ, гранулиты — на специализированных пунктах и заводах. Внешне они представляют собой сферические гранулы размером 1-3 мм, однородные по цвету, без видимых посторонних включений и комков.

**Игданит** — сбалансированная по кислороду бинарная смесь гранулированной аммиачной селитры с дизельным топливом, изготавливаемая месте применения. В гранулированном состоянии игданит хорошо сыпуч, транспортабелен по пневмомагистралям, не пылит и мало электризуется, уплотняется при пневмозарядании, вследствие чего удерживается в восстающих скважинах. Игданит отличается от ВВ заводского производства простотой изготовления и низкой стоимостью. Это ВВ устойчиво детонирует от промежуточного детонатора. С увлажнением зарядов мощность промежуточного детонатора должна быть увеличена.

Благодаря низкой чувствительности к механическим, тепловым и электрическим воздействиям и простоте технологии игданит изготавливается на централизованных стационарных установках, размещенных на специальных

площадках при базисных или расходных складах ВВ, в смесительно-зарядно-транспортных машинах.

Бризантность игданита возрастает с увеличением количества мелких фракций селитры, ее удерживающей способности (рис. 3.2.) При изготовлении игданита на пористой селитре критический диаметр снижается до 16 мм, скорость детонации составляет 2,8 км/с при диаметре 28 мм, 4,5 км/с — при диаметре 50 мм. Для игданита, изготовленного на непористых гранулах селитры, при применении в мягких грунтах и слабых породах рекомендуется применять скважинные заряды диаметром не менее 100 мм, в твердых породах — шпуровые и скважинные заряды диаметром не менее 30 мм. Физическую стабильность игданита на непористой селитре повышает введение в его состав поверхностно-активных и пористых веществ.

При увеличении содержания влаги в игданите детонационная способность его снижается, увеличиваются критический диаметр и минимальный инициирующий заряд. При содержании воды более 6% необходимо применять усиленные промежуточные детонаторы. В сухом состоянии надежно инициируется от взрыва патронов аммонитов, тротильовых шашек-детонаторов.

Для определения количества вредных газов, выделяющихся при взрыве игданита, взрывали заряды диаметром 36 мм в блоках из гранита и габбро-диабазы. Результаты опытов, приведенные в табл. 3.2, показали, что непатронированный игданит при взрыве в крепких горных породах выделяет ядовитых газов меньше, чем патронированный аммиачно-селитренный состав.

ВВ типа смесей игданита с алюминием содержит алюминий более крупных частиц в виде порошка с меньшей удельной поверхностью сравнительно с алю-

миниевой пудрой, уменьшает возможность пыления и реакцию с водой. При этом также улучшаются санитарно-гигиенические условия и повышается степень безопасности применения игданита с алюминием. Изготавливается на месте применения с помощью передвижной зарядной машины СУЗН-5А или другой марки.

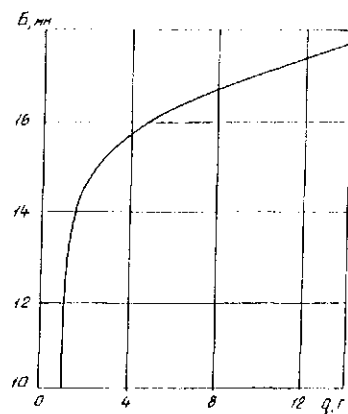


Рис. 3.2. Зависимость бризантности игданита  $B$  от удерживающей способности  $q$  в 100 г аммиачной селитры

Заряды игданита с алюминием надежно детонируют в скважинах диаметром 243–269 мм при инициировании боевиками из четырех тротильных шашек. Состав дешевый и достаточно стабильный.

**Гранулит М** изготавливается на пористых сортах селитры, содержит в качестве горючего соляровое масло, которое полностью впитывается в гранулы пористой селитры. Поэтому гранулы после смешивания почти сухие на ощупь. Физически стабилен, масло из гранул не эксудировать. Гранулит М хранится без изменения химического состава и взрывчатых свойств в течение длительного времени. Практически не слеживается, сыпуч,

хорошо транспортируется по трубам с малой степенью электризации, не пылит, пригоден для пневматического заряжания. Как и игданит, характеризуется низкой чувствительностью к механическим воздействиям.

Таблица 3.2

ВВ	Удельная поверхность, см <sup>2</sup> /г	Масса заряда, г	Количество ядовитых газов (л/кг), образующихся при взрывании в блоках					
			гранита			габбро-диабазы		
			СО	NO <sub>2</sub>	суммарная	СО	NO <sub>2</sub>	суммарная
<b>Игданит на аммиачной селитре:</b>								
мелкодисперсной	340	20	—	—	—	28,3	1,31	37,1
то же	340	50	11,8	0,60	15,7	—	—	—
пористой	160	20	—	—	—	28,6	1,55	38,4
гранулированной	85	20	—	—	—	32,3	1,66	42,7
<b>Аммиачно-селитренная смесь:</b>								
без оболочки	236	50	20,9	0,95	27,0	—	—	—
то же	235	20	—	—	—	43,2	1,30	51,6
в бумажной парафинированной оболочке	235	20	—	—	—	71,3	1,34	79,9

Благодаря однородности смешивания имеет более высокую детонационную способность, чем игданит, что выражается в меньшем значении критического диаметра. В зависимости от плотности заряжания и диаметра шпура (скважины) детонирует со скоростью 2,8–3,8 км/с. При пневмозарядании обеспечивается плотность до 1,15 г/см<sup>3</sup> в шпурах и до 1,05 г/см<sup>3</sup> в скважинах.

По экономической эффективности гранулит М на подземных разработках при пневматическом заряжании на 10–15% превосходит патронированный аммонит

6ЖВ. Гранулит М предназначен для открытых и подземных работ. С учетом критических условий распространения детонации гранулит М рекомендуется применять в слабых породах в скважинах диаметром не менее 60 мм, в скальных породах — не менее 30 мм.

Для надежности взрывания гранулита М рекомендуется применять промежуточные детонаторы. Допустимая влажность гранулита не более 5% для шпуровых зарядов и не более 8% для скважинных зарядов. Применяется в сухих и слабо обводненных забоях.

**Гранулит АС-4** содержит алюминиевую пудру. При пневматическом зарядании обеспечивается плотность зарядов 1,1-1,2 г/см<sup>3</sup> в шпурах и 1,0-1,1 г/см<sup>3</sup> — в скважинах. При указанных параметрах зарядания гранулит АС-4 по объемной концентрации энергии превосходит патронированные аммониты.

Гранулит АС-4 физически стабилен, сыпуч, но при пневмозарядании пылит. Для снижения пыления и электризуемости при пневмозарядании гранулит АС-4 рекомендуется орошать небольшим количеством воды (2-3%). К механическим воздействиям несколько более чувствителен, чем неметализированные простейшие ВВ, но менее чувствителен, чем аммониты и граммониты. Надежно детонирует от промежуточного детонатора в виде патронов аммонитов в подземных разработках, шашек-детонаторов из тротила на открытых разработках. Применяется в сухих и слабообводненных забоях.

**Гранулиты АС-4В и АС-8В** в отличие от гранулита АС-4 вместо солярового масла в качестве органического горючего содержат легкоплавкие нефтепродукты (парафины, воски). Средний размер гранул 1,8-2 мм, прочность на раздавливание 3-8 Н на гранулу. Благодаря покрытию гранул пленкой из гидрофобного нефтепродук-

та могут находиться в виде сформированных зарядов в течение 2-4 ч. в шпурах и скважинах с непроточной водой без потери взрывчатых свойств. При пневмозарядании уплотняются в шпурах и скважинах несколько хуже, чем составы с жидкими нефтепродуктами. Для снижения электризуемости и уменьшения пыления при пневмозарядании эти гранулиты рекомендуется увлажнять 2-3% воды.

Как высокоэкономичные промышленные ВВ бестропиловые гранулированные ВВ получили широкое применение во всех развитых горнодобывающих странах (табл. 3.3).

Таблица 3.3

Страна	Наименование ВВ (состав в процентах)	Плотность ВВ, г/см <sup>3</sup>	Теплота взрыва, кДж/кг	Скорость детонации, км/с
1	2	3	4	5
Венгрия	Нафтенит Г-1 (аммиачная селитра 94,1; ДТ 4; уголь 1,9)	0,9	3860	2,6
	Нафтенит В-2 (аммиачная селитра 94; ДТ-4; графит 1,9)	0,9	3860	2,6
	Нафтенит А-4 (аммиачная селитра 92; ДТ 4; порошок алюминия 4)	0,9	4280	2,5
ГДР	Декамон (аммиачная селитра пористая 94,5; ДТ 5,5)	0,8	3880	3,2
	Алюмон (аммиачная селитра 92; ДТ 4; порошок алюминия 4)	0,9	4540	3,5
ГДР	Динамон (аммиачная селитра 89; ДТ 4; порошок алюминия 3; мука древесная 7)		4200	3,6
Чехословакия	Пермон-1 (аммиачная селитра 94; ДТ 6)	1,0	3860	3,5

Окончание таблицы 3.3

1	2	3	4	5
Польша	Солетрол (аммиачная селитра 94,5; ДТ 5,5)	0,9	4200-4620	2,8
	Солетрол М (аммиачная селитра 90-95; масло 3-5; алюминия 2-5)	0,9	4200-4620	3,2
Югославия	Нитрол (аммиачная селитра 88-90; порошок угля и лигнита 5-7; ДТ или малло 2-3; натрий-карбометишцеллоза 1)	0,98-1,0	3790	3,0
ФРГ	Аммонекс (аммиачная селитра 93,2; ДТ 4; мука древесная 3)	0,85	3780	2,5
	Аммонекс (аммиачная селитра 93,2; ДТ или легкое нефтяное масло 5,5)	0,85	4070	2,5

### 3.2. Гранулированные тротилосодержащие ВВ

Разработка таких промышленных ВВ (граммонитов, граммоналов и гранитолов) было продиктовано необходимостью создать заводские непылящие, недорогие ВВ, пригодные для механизированного заряжания скважин.

Преимущества граммонита перед порошкообразным аммонитом — пониженное пыление, лучшая сыпучесть и меньшая слеживаемость.

Благодаря наличию тротила в составе ВВ, который выполняет функции горючего и сенсibilизатора, гранулированные аммониты и аммоналы обладают определенной степенью водоустойчивости и способны детонировать в обводненных скважинах. Степень их водоустойчивости зависит от содержания тротила и структу-

ры ВВ, их можно разделить на абсолютно и условно водоустойчивые.

К первым относятся ВВ, из которых селитра вымывается крайне медленно благодаря структуре гранул, обладающих малой пористостью и высокими гидрофобными свойствами.

Ко вторым относятся ВВ, представляющие собой механические смеси гранулированной селитры с тротилом, иногда с добавками других горючих компонентов. К таким ВВ относятся граммониты. В них поверхность гранул селитры не защищена или слабо защищена от действия воды и селитра быстро растворяется в окружающей заряд воде. Тем не менее, благодаря наличию в ВВ тротила они взрываются с полным или частичным выделением тепла. Если столб воды над зарядом невелик и раствор селитры в основном сохраняется в объеме заряда между гранулами (чешуйками) тротила, то при взрыве реализуется почти вся потенциальная энергия ВВ, так как селитра и в растворенном состоянии принимает участие в процессе взрыва. При значительном столбе воды в скважине или ее циркуляции селитра вымывается, эффект взрыва снижается, и может произойти отказ.

Таким образом, граммониты 79/21 (82/18), 50/50, 30/70 по своим эксплуатационным качествам не дублируют бестротилловые гранулированные ВВ, а имеют свою область применения. Бестротилловые ВВ выгодно применять для заряжания сухих скважин, граммониты — для обводненных скважин. При использовании технологии заряжания в полиэтиленовые рукава можно использовать только граммонит 79/21.

При водонаполнении граммонитов в результате заполнения пустот между гранулами раствором аммиачной селитры снижается критический диаметр зарядов,

повышается скорость детонации. Каждому составу свойственно оптимальное содержание воды, отвечающее максимальным параметрам детонации. Положительное влияние растворонаполнения усиливается для ВВ с отрицательным кислородным балансом.

Учитывая повышение энергетических и детонационных характеристик при заполнении межгранульного пространства водоустойчивых ВВ насыщенным раствором аммиачной селитры, на некоторых рудниках практикуют дополнительную засыпку аммиачной селитры в скважины, заряженные гранулотолом или алюмотолом из расчета до 30% массы ВВ.

Граммониты представляют собой механическую смесь гранулированной селитры с чешуйчатым или гранулированным тротилом.

В зависимости от диаметра скважин заряд граммонита 79/21 (82/18) сохраняет детонационную способность при содержании в нем воды до 20–25%. При содержании воды до 10% сохраняется восприимчивость к детонационному импульсу, а эффективность взрывов возрастает по сравнению с взрывом сухого граммонита. По данным В.Б.Иоффе, оптимальное содержание воды составляет 10–12%.

При смешивании граммонита 79/21 с водой часть селитры растворяется и раствор заполняет межгранульное пространство. При этом происходит осадка и уплотнение заряда и повышается вместимость скважины. Согласно измерениям, максимальная плотность около 1,3 г/см<sup>3</sup> отвечает содержанию воды 11–12% по массе. В этом случае теплота взрыва водосодержащей смеси уменьшается примерно на 770 кДж/кг по сравнению с сухим ВВ, но объемная энергия увеличивается на 1670 кДж/л. Таким образом, при соответствующем увеличе-

нии удельного расхода ВВ эффективность взрывания при постоянном объеме бурения может быть увеличена. Критический диаметр заряда растет с увеличением содержания воды в составе вначале медленно, примерно до 10% содержания воды, затем быстрее. Скорость детонации достигает наибольших значений при максимальной плотности ВВ, т.е. при содержании воды 11–12%. Восприимчивость к начальному импульсу снижается с увеличением содержания воды в составе ВВ.

По измерениям на электромагнитной установке показатель политропы продуктов детонации составляет от 1,8 до 2,0 для сухой смеси: 2,47 и 1,84 — при содержании воды соответственно 10 и 20%. Выпускают предприятия относительно небольшими партиями смеси воды и водоустойчивых ВВ на основе гранулированных утилизированных порохов (граниподы, дибазиты) и других утилизированных боеприпасов.

Для сильно обводненных скважин на угольных разрезах Междуреченска эффективное использование граммонита 79/21 обеспечивается заряданием в полиэтиленовые рукава. В условиях Криворожских карьеров с малым водообменом оправдана засыпка граммонита в скважины, осушенные с помощью легких погружных насосов. В других случаях осушение скважин и использование граммонита 79/21 позволило снизить более чем на 45% расход гранулотола. При использовании шелевого понижения уровня грунтовых вод в забоях карьера пробуриванием водоотливных скважин по его бортам и на площадках рабочих горизонтов также получен высокий экономический эффект.

### 3.3. Водосодержащие ВВ

Заполнение пустот между частицами сыпучих ВВ жидкостью способствует повышению плотности ВВ, придает им текучесть, снижает чувствительность. В качестве жидкого наполнителя и пластифицирующего материала обычно используют водные гели, а содержащие их ВВ называют водосодержащими.

Водный пластификатор флегматизирует ВВ. Поэтому подбирают оптимальное соотношение между твердой фазой и жидким наполнителем, определяемое требуемыми реологическими свойствами, гранулометрическим и химическим составом твердой фазы.

Вода как наполнитель промышленных ВВ имеет ряд достоинств. Вследствие растворения в ней аммиачной селитры пространство между частицами ВВ заполняется насыщенным раствором с плотностью около  $1,3 \text{ г/см}^3$ , благодаря чему при содержании воды 5-15% средняя плотность водосодержащих ВВ (ВВВ) достигает  $1,5 \text{ г/см}^3$ , а при содержании в составе водорастворимых нитратов щелочных и щелочноземельных металлов —  $1,6 \text{ г/см}^3$  при начальной (насыпной) плотности ВВ  $0,8-0,9 \text{ г/см}^3$ . Кроме того, вода снижает чувствительность состава, придает ему текучесть или пластичность, появляется возможность механизированной перекачки низковязких ВВВ по трубопроводам и шлангам с помощью насосов.

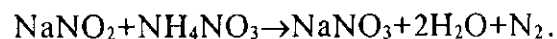
Недостатком воды как наполнителя является ее химическая инертность. Значительная часть тепла, выделяющегося при взрыве, расходуется на прогрев воды и ее испарение. К моменту завершения механической работы продукты взрыва сохраняют температуру выше  $100^\circ \text{C}$  и поэтому возврата тепла вследствие конденсации паров не происходит. Некоторое повышение термодинамического КПД взрыва достигается в результате обо-

гашения продуктов взрыва водяными парами, так как средняя теплоемкость продуктов взрыва уменьшается и увеличивается общий объем газов, отнесенный к единице массы ВВ. Но за счет этого потери тепла компенсируются неполностью. Так, работа взрыва водосодержащих аммонитов с нулевым кислородным балансом на единицу их массы и в пересчете на единицу массы сухого вещества меньше, чем тех же ВВ в сухом состоянии.

Известны водосодержащие ВВ различного химического состава и реологических свойств — от жидкотекучих до густых резиноподобных. Простейшие композиции таких ВВ представлены смесью аммиачной селитры и тротила или алюминия и водного геля. Более сложные составы содержат одновременно тротил и алюминий, гранулированный сплав тротила с гексогеном или тэнном, нитраты щелочных и щелочноземельных металлов, антифризы и др.

Благоприятным с энергетической точки зрения является введение в водосодержащие ВВ (акваналы) алюминия. В этом случае вода по отношению к алюминию является окислителем. Теплота реакции взаимодействия алюминия с водой  $8710 \text{ кДж/кг}$ , а реакции окисления алюминия аммиачной селитрой  $9750 \text{ кДж/кг}$ . Несмотря на эти достоинства водосодержащих аммоналов, не содержащих взрывчатый сенсibilизатор, их применение ограничено в основном из-за низкой детонационной способности. Составы подобного типа сенсibilизируют газовыми пузырьками и применением высокодисперсной алюминиевой пудры. Из отечественных сортов пудры высокую детонационную способность акваналов обеспечивает алюминиевая пудра марок ПАК-3 и ПАК-4. Близкие к ним характеристики имеет пудра марок ПАП-1 и ПАП-2.

Насыщение акваналов газовыми пузырьками производят несколькими способами. Простейший из них состоит в механическом занесении пузырьков воздуха в массу ВВ при интенсивном перемешивании (аэрации) водного раствора аммиачной селитры с алюминиевой пудрой или порошком. Другой способ состоит в том, что в состав ВВВ вносят газогенерирующие добавки так называемые порофоры – вещества, способные взаимодействовать с каким-либо из компонентов ВВ с образованием газообразных продуктов реакции, например нитрит аммония, который взаимодействует с нитратом аммония с выделением газообразного азота по реакции:



Практикуют и введение в состав ВВ полых тонкостенных сфер (шариков) из какого-либо полимера или стекла, заполненных воздухом (так называемые полые микросферы). Первые два способа более экономичны, но получаемые ВВВ физически менее стабильны, при хранении и температурных изменениях газовые включения могут диффундировать в атмосферу, в результате чего детонационная способность таких ВВ снижается.

Механизм сенсibilизации ВВВ газовыми пузырьками сводится к тому, что при адиабатическом сжатии их в детонационной волне они сильно разогреваются и служат «горячими точками», способствующими распространению детонации по заряду.

Скорость детонации водосодержащих аммоналов повышается с уменьшением размеров частиц селитры и алюминия. Оптимальное по детонационным характеристикам содержание раствора селитры возрастает с увеличением содержания алюминия в составе ВВВ. Избыток раствора приводит к снижению детонационной способности ВВ.

Первые водосодержащие ВВ, сенсibilизированные тротилом, были разработаны в 1957 г. М.Куком и сразу же получили промышленное применение благодаря простоте изготовления и достаточно хорошей воспроизводимости составов. В отличие от аэрированных ВВ эти ВВ можно эффективно применять в глубоких скважинах и при подводном взрывании, т.е. при повышенном гидростатическом давлении.

Наиболее распространенным сенсibilизатором в составе ВВВ является тротил, реже — смесь тротила с гексогеном.

Структура и реологические свойства ВВВ зависят от содержания в них водного геля, его вязкости, определяемой природой и количеством загустителя, водорастворимых нитратов и других веществ, от технологии приготовления и ряда других факторов.

Гелеобразующими агентами являются набухающие в воде синтетические или природные полимеры, некоторые полисахариды растительного происхождения (гуаргам) в различных модификациях, соли карбоксиметилцеллюлозы, полиакриламид и др. Водные гели являются не только наполнителем и пластификатором, но также предотвращают или замедляют вымывание селитры и других водорастворимых солей из ВВ при зарядании обводненных скважин, придают ВВ пластичность, в отдельных случаях — липкость и другие полезные эксплуатационные качества.

Большое значение при выборе загустителя как компонента ВВ имеет кинетика образования коллоидного раствора. При изготовлении низковязких текучих ВВВ (сларри) на месте применения необходима быстрая желатинизация. В гелеобразных ВВВ, которые изготавливаются в заводских условиях, процесс загущения может

Б.Н. КУТУЗОВ, Г.А. НИШПАЛ

быть более длительным. Он начинается с образования суспензии загустителя и образования вязкого коллоидного раствора. Процесс набухания связан с проникновением молекул растворителя в полимер. Молекулы растворителя, проникая в пространство между звеньями высокомолекулярного загустителя, раздвигают цепи макромолекул, что приводит к набуханию образца. Набухание переходит в собственно растворение или неограниченное набухание в том случае, если между макромолекулярными цепями отсутствуют поперечные химические связи. Разделение цепей ослабляет силы межмолекулярного взаимодействия и позволяет макромолекулам диффундировать в растворитель. Для образования прочных структур с поперечными связями вводятся специальные сшивающие агенты, обычно в виде солей металлов с переменной валентностью (хрома и др.).

Содержание загустителя в ВВВ обычно составляет 0,7-1,5%, воды — 5-15%. Влияние воды на вязкость составов выражается следующими цифрами:

Содержание воды, %	10	12	15	18	20	23
Вязкость на приборе Баха, Па.с	80	79	45	2,1	2	2

Результаты определения вязкости водных насыщенных и 40%-ных растворов аммиачной селитры в вискозиметре Геплера в зависимости от содержания загустителей, выполненные Н.В. Селивановой, приведены на рис. 3.3. ВВВ с загустителем и сшивкой характеризуются более высокими водостойчивыми свойствами по сравнению с составами без сшивки (рис. 3.4).

Для ВВВ с алюминием помимо физической необходимо обеспечить также химическую стабильность составов с учетом способности алюминия взаимодействовать с водой, особенно в присутствии щелочей. Исследования в

этой области выполнены Е.Я. Светловым, Р.Н. Солнцевой, А.Г. Павловым.

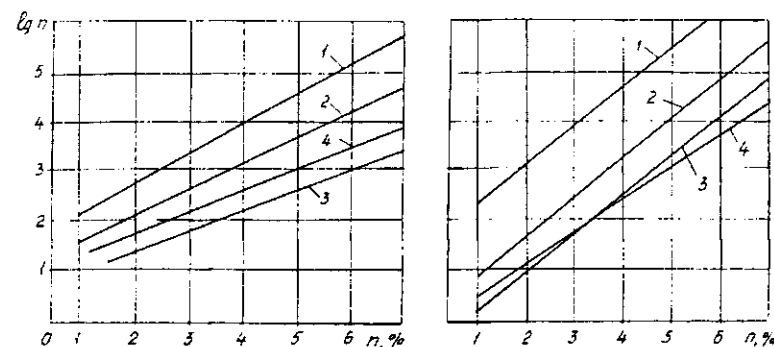


Рис. 3.3. Зависимость вязкости растворов аммиачной селитры от содержания загустителя ( $\eta$ , Па·с $\times 10^{-1}$ ):  
 а — насыщенных водных растворов; б — 40%-ных растворов; 1 — аммоний КМЦ; 2 — натрий КМЦ очищенная; 3 — полиакриламид; 4 — натрий КМЦ техническая

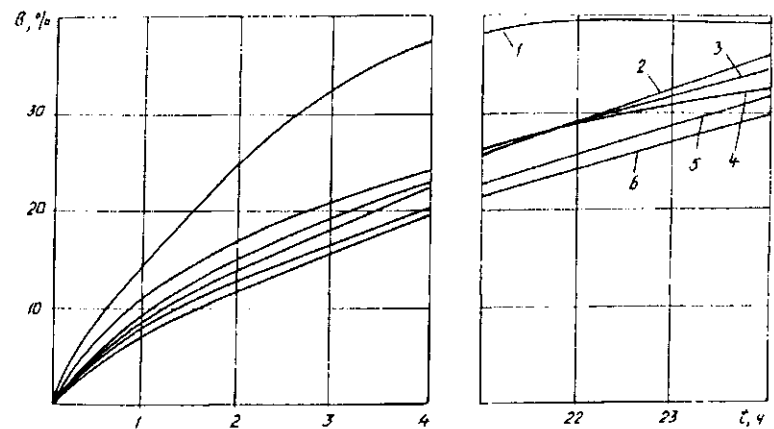


Рис. 3.4. Зависимость водостойкости образцов ВВ с 2% загустителя от времени  $t$ :  
 1 — полиакриламид; 2 — то же, со сшивкой; 3 — аммоний КМЦ; 4 — натрий КМЦ со сшивкой; 5 — натрий КМЦ; 6 — аммоний КМЦ со сшивкой

Имеются два эффективных способа стабилизации: гидроизоляция и пассивирование частиц алюминия. Надежная гидроизоляция ВВ, содержащих тротил и алюминий одновременно, достигается совместной грануляцией этих компонентов из суспензии алюминиевого порошка в расплавленном тротиле по технологии получения алюмотола. Пассивирование достигается образованием на поверхности частиц алюминия плотной и прочной оксидной пленки при введении в состав ВВ небольших количеств (до 2,5%) солей хромовой кислоты, нитритов и других водорастворимых активных окислителей. Стабилизации пленки способствует добавка фосфатов. Для повышения химической стабильности ВВВ применяют также ингибированную алюминиевую пудру.

Активность алюминия возрастает с увеличением удельной поверхности частиц. Скорость взаимодействия пудры алюминия ПП-4 с горячей водой примерно вдвое выше, чем порошка ПА-1. Поэтому в ВВВ типа аквапалов вводят преимущественно порошки алюминия с наиболее крупными частицами. Раствор загустителя не должен давать щелочную реакцию, так как щелочность способствует взаимодействию алюминия с водой. Растворы аммиачной селитры с гидролизной кислотностью ( $\text{pH} < 7$ ) более стойки по отношению к алюминию, чем вода.

В состав ВВВ в качестве окислителей помимо аммиачной селитры могут входить также нитраты щелочных и щелочноземельных металлов и другие соединения, например перхлораты.

Нитраты металлов повышают плотность ВВВ. Так, например, плотность металлизированного акватола в зависимости от соотношения в составе ВВ аммиачной и натриевой селитры меняется следующим образом:

Аммиачная селитра, %	46,5	26,5	16,5	0
Натриевая селитра, %	0	20	30	46,5
Плотность, г/см <sup>3</sup>	1,36	1,48	1,55	1,63

Недостатком нитратов металлов как окислителей является образование благодаря им твердых продуктов взрыва (оксидов, гидроокисей или карбонатов металлов), что ухудшает термодинамические характеристики продуктов взрыва. К недостаткам перхлоратных солей можно отнести их меньшую, чем у нитратов, растворимость в воде, к достоинствам меньшую зависимость растворимости от температуры, большую энергоемкость, благодаря чему повышаются энергетические характеристики ВВВ.

Увеличение вязкости и потеря пластичности при низких температурах ограничивают область применения ВВВ. В связи с этим снижение температуры их затвердевания является одной из важных задач совершенствования ВВВ.

Одним из известных путей снижения температуры замерзания водных растворов является введение в их состав антифризов и подбор окислителей и их сочетаний с низкой температурой затвердевания водных растворов. К антифризам, используемым в составе ВВВ, предъявляют следующие требования: высокая растворимость в воде и в насыщенных растворах окислителей, низкая температура затвердевания антифриза и его смесей с растворами солей, небольшой отрицательный кислородный баланс, отсутствие растворяющего действия по отношению к основному взрывчатому компоненту, высокая температура кипения, низкая летучесть, невысокая вязкость антифриза и его смеси с водными растворами солей, особенно при пониженной температуре. Перечисленным требованиям могут удовлетворять низко-

молекулярные соединения типа амидов низших кислот и др.

Для обеспечения достаточно низкой температуры затвердевания жидкой фазы содержание антифриза в насыщенном растворе окислителя должно составлять 20-30%.

При введении в состав ВВВ 10-30% кальциевой селитры температура замерзания состава снижается до  $-58^{\circ}\text{C}$ .

Во всех случаях с понижением температуры растворосодержащего ВВ его восприимчивость к детонации уменьшается, что связано с увеличением вязкости вещества.

Сенсибилизирующее действие нитрата натрия при пониженной температуре проявляется за счет увеличения доли окислителя, находящегося в растворе, так как совместная растворимость смеси нитратов натрия и аммония выше, чем одного нитрата аммония. Такое влияние связано с тем, что при детонации в реакции принимает участие окислитель, растворенный в воде. Определяющую роль в этом случае играет весь кислород, содержащийся в окислителе.

ВВВ без пузырьков газа мало восприимчивы к детонационному импульсу и требуют промежуточного детонатора. По механизму возбуждения и распространения детонации ВВВ близки к жидким ВВ. Их применяют как на открытых работах (акватола, акванала, карбатолы), так и на подземных (акваниты). ВВВ для открытых работ имеют произвольный кислородный баланс, для подземных — близкий к нулевому.

Важными эксплуатационными качествами акватолов и карбатолов являются их текучесть и физическая стабильность, которые в известной мере противоречивы. Высокая текучесть необходима для механизированного заряжания скважин закачкой по шлангам от передвиж-

ного бункера-накопителя (зарядной машины). Стабильность важна для сохранения химического состава и свойств в процессе заряжания в обводненную скважину. С уменьшением вязкости, как правило, физическая стабильность уменьшается; при погружении массы ВВВ через столб воды происходит частичное расслоение и вымывание селитры. Поэтому ВВВ заряжают под столб воды. Оптимальными являются такие составы, которые позволяют производить заряжание по шлангу сверху, т.е. на столб воды.

Основные преимущества ВВВ перед гранулированными и порошкообразными ВВ состоят в их высокой плотности ( $1,3-1,5 \text{ г/см}^3$ ), водостойкости способности целиком заполнять зарядные емкости без принудительного уплотнения и безопасности в обращении, определяемой низкой чувствительностью к механическим и тепловым воздействиям. ВВВ позволяют достигать концентрации энергии в зарядах в 1,8-2 раза выше, чем патронированные ВВ, и получать соответственно высокие результаты взрывания весьма крепких пород. Однако более сложный рецептурный состав и технология изготовления, меньшая физическая стабильность удорожают их сравнительно с гранулированными ВВ. По этим причинам ВВВ применяются в значительно меньших объемах, чем гранулированные аммиачно-селитренные смеси.

Сдерживающими применение ВВВ факторами являются следующие:

- многокомпонентность составов и наличие в некоторых из них импортруемых веществ (гуаргам),
- сложность технологического процесса изготовления,
- высокая стоимость составов (в 5-6 раз выше, чем АС-ДТ),

- низкая чувствительность к инициирующему импульсу.

Дальнейшее совершенствование ВВВ привело к созданию составов, не содержащих тротила и алюминия, а сенсibilизированных только горючими добавками (нефтепродуктами и др.), которыми либо пропитывают пористые гранулы селитры, входящие в состав твердой фазы водной суспензии, либо эмульгируют их в водном растворе селитры, получая прямые эмульсии типа «масло в воде» или обратные типа «вода в масле». Их можно использовать для наполнения твердыми компонентами. Таким образом, появился новый тип ВВВ — эмульсионные ВВ.

**Водосодержащие ВВ для открытых работ.** Аквато-лы — растворонаполненные ВВ, представляющие собой плотные нерасплаивающиеся суспензии, твердой фазой которых служит смесь гранулированной аммиачной селитры с гранулотолом или алюмотолом. Жидкая фаза суспензий представлена насыщенным раствором аммиачной селитры, целиком заполняющим межгранульное пространство в заряде ВВ. Ранее эти составы были известны под названием ифзанитов или горячелюющих ВВ марки ГЛТ. Наиболее распространен аквато-л Т-20, содержащий 20% гранулотола или алюмотола. Имеется несколько его модификаций.

Для придания водостойчивости раствор аммиачной селитры загущается солью карбоксиметилцеллюлозы и дополнительно его структурируют сшивающим и агентами. В акватоле Т-20 содержание воды в жидкой фазе составляет 20%. ВВ предназначено для сухих и обводненных скважин диаметром более 100 мм, устойчиво детонирует от стандартной шашки-детонатора массой 200г. При изготовлении и зарядании аквато-лов марки

Т-20 применяют смесительно-зарядные машины. Их можно получать также на основе готовых сухих смесей совмещением с насыщенным раствором селитры. При введении сшивки образуется гель в течение 3-5 мин.

**Карбато-лы** — льющиеся в горячем состоянии ( $t = 80^{\circ}\text{C}$ ) ВВ, отвердевающие после зарядки в скважину. Их изготавливают из низкоплавкой эвтектики аммиачной селитры и карбамида, сенсibilизированной тротилом, которая по своей плотности мало отличается от плотности гранул тротила, что делает суспензию нерасплаивающейся до затвердевания без введения загустителя. Эвтектическая смесь плавится и содержится в расплавленном состоянии до момента смешивания при температуре ниже плавления тротила. Использование низкоплавкой эвтектики упрощает изготовление карбато-лов и повышает их безопасность в полевых условиях.

Карбато-лы характеризуются высокой плотностью, в их состав вводится 3-5% воды для образования раствора. Иногда они содержат в качестве структурообразователя соли карбоксиметилцеллюлозы с бихроматом, используемым для сшивки.

Взрывчатое разложение стехиометрической смеси карбамид-селитра происходит по уравнению



с выделением 3810 кДж/кг тепла и образованием 968 л/кг газов.

Для обеспечения устойчивой детонации скважинных зарядов больших диаметров (200-300 мм) требуется применение промежуточных детонаторов массой не менее 400 г.

В карбатоле ГЛ-15Т сенсibilизатором служит гранулотол; карботол ГЛ-10В наряду с гранулотолом содержит алюминиевый порошок, который в процессе из-

готовления эвтектической смеси пассивируется, что обеспечивает ему необходимую химическую стабильность. Карбатол ФТ-10 в качестве высококалорийного и недорогого металла содержит ферросилиций.

Заряды карботолов могут находиться в скважине с непроточной водой 20-30 сут. Обводненные скважины заряжают закачиванием смеси под столб воды. В мерзлых породах карбатоллами можно заряжать сразу после бурения.

Карбатылы практически нечувствительны к механическому воздействию на всех стадиях приготовления и заряжения, в том числе при повышенной температуре (до 200°C). По удельному электрическому сопротивлению карбатылы относятся к полупроводникам и имеют низкую чувствительность к электрической искре при действии на образцы искрового потока различной энергии, поэтому принимать какие-либо меры по защите от статического электричества на механизированных комплексах в этом случае нет необходимости. Они также нечувствительны к лучу огня огнепроводного шнура при непосредственном соприкосновении с пламенем.

Карбатылы изготавливаются на месте применения из отдельных компонентов.

**Акванал А-10-ВВВ** содержит алюминиевый порошок или менее дорогостоящий металлический компонент — силикоалюминий, и представляет собой смесь металлизированной сухой фазы с насыщенным водным раствором аммиачной селитры. Акванал А-10 изготавливается на месте применения и предназначается для взрывных работ на земной поверхности.

**Водосодержащие ВВ для подземных работ.** Акванит АРЗ-8Н (акванит отдельного заряжения), предназначенный к применению в подземных условиях, состоит из смеси аммиачной селитры, алюминиевого порошка и

водорастворимого загустителя. Изготавливается по эмульсионной технологии и выпускается в виде гранул, водосовмещается и пластифицируется в процессе пневмозаряжения с использованием зарядчиков и оросительных насадок. Таким образом, в акваните АРЗ-8Н сочетаются достоинства и гранулированных, и водосодержащих ВВ.

Как гранулированное ВВ он легко транспортируется и заряжается с помощью пневмозарядчика, а в смоченном и пластифицированном состоянии хорошо уплотняется в шпурах и скважинах умеренного сечения.

При введении воды в процессе пневмозаряжения гранулы акванита АРЗ-8Н пластифицируются и уплотняются в заряде. Смачивание акванита АРЗ-8Н при заряжении устраняет его пыление и электризацию.

В табл. 3.4 приведены основные показатели водосодержащих ВВ.

ВВВ широко распространены и за рубежом (табл. 3.5), их свойства близки к свойствам отечественных водосодержащих ВВ.

ВВВ в Венгрии представлены габбровитами, содержащими аммиачную селитру и тротил. По физическому состоянию они подразделяются на пластичные (плотность 1,4-1,6 г/см<sup>3</sup>) и суспензионные (плотность 1,3-1,4 г/см<sup>3</sup>) составы, характеризующиеся устойчивой детонацией в диаметре 50-120 мм и теплотой взрыва 3280-4120 кДж/кг.

В Польше ВВВ представлены ватергелом. Его свойства: плотность 1,4 г/см<sup>3</sup>, теплота взрыва 3650 кДж/кг, скорость детонации 4,5 км/с.

Таблица 3.4

Показатели	Аква-тон Т-20	Карбоголы			Аква-нит АРЗ-8Н	Аквапал А-10
		ГЛ-10В	ГЛ-15Т	ФГ-10		
Кислородный баланс, %	-1,2-1,6	-21,4	-9,6	—	-1,3	-1,5
Теплота взрыва, кДж/кг	3310-3690	5680	3430	5380	5040	4980
Плотность, г/см <sup>3</sup>	1,35-1,4	1,55-1,6	1,50-1,55	1,6-1,65	0,8-0,85*	1,5-1,55
Объемная энергия, кДж/л	4450-5200	8810-9200	5130-5300	8600-8870	6040-6550	7460-7710
Работоспособность, см <sup>3</sup>	—	450-470	320-350	—	400-410	—
Полная идеальная работа взрыва, кДж/кг	2790	4430	2980	4490	4140	4200
Объем газов, л/кг	987	844	946	720	822	812
Бризантность в стальном кольце, мм	24-26	28-30	24-26	24-26	22-25	—
Критический диаметр, мм	100-120	140-160	120-150	250-280 (80-100)*	90-100 (40-45)*	280-300 (80-100)*
Скорость детонации, км/с	4,5-5,0	4,5-5,0	4,5-4,8	4,0-4,2	2,8-3,5	4,0-4,2
Чувствительность к удару, %	0-4	12-24	4-12	12-24	0-4	12-24
Максимальный инициирующий импульс, г тротила	40-60	40-50	—	—	—	—

\* Для патронов ВВ в металлической оболочке

\*\* Плотность после водонаполнения составляет 1,25-1,3 г/см<sup>3</sup>.

Таблица 3.5

Страна	Наименование ВВ (состав в процентах)	Физическое состояние	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Теплота взрыва, кДж/кг	Скорость детонации, км/с	Примечание
Венгрия	ВВВ Т-18 (аммиачная селитра 67, тротил 18, вода 15)		1,35	3280	5,0	Критический диаметр 120 мм
ФРГ	Хабластит 10: жидкая фаза (аммиачная селитра 40, кальциевая селитра 32,7, вода 15,5, этиленгликоль 5, прочие добавки 1,4); твердая фаза (крахмал гильсонит 7,3, пигментная алюминиевая пудра 1,7, нитрит натрия и др.)	Пластичный в патронах или пастообразный в контейнерах	1,1-1,2	3530	3,0-3,5	Водоустойчивый
	Хабластит 85: жидкая фаза (аммиачная селитра 48,8, кальциевая селитра 32,7, вода 10,6, этиленгликоль 2, дизтопливо 2,3); твердая фаза (алюминиевый порошок 10, пигментная пудра 3, нитрит натрия и др.)	Пластичный в патронах или пастообразный в контейнерах	1,1-1,25	5330	3,2-3,8	Водоустойчивый
Швеция	Реолит А-2 (аммиачная селитра 28, натриевая селитра 25, тротил 23, алюминий 7,5, вода 15, загуститель и структурообразователь 1,5)	Текучее водногелевое	1,5	5040	4,9	Выпускается в автоцистернах или контейнерах, заполненных наливом

Окончание таблицы 3.5

1	2	3	4	5	6	7
	Реолит Р-25 (аммиачная селитра 62,6, тропил 25, вода 12, гуар 1,3, снлька 0,1)	Текущее водно-гелевое	1,4	3570	5,5	Выпускается в автоцистернах или контейнерах, заполненных наливом
Швеция	Реомекс А: твердая фаза (аммиачная селитра 89,6, ДТ 5, алюминий 5,4); жидкая фаза (аммиачная 37, натриевая селитра 13, нитрат метилamina 35, вода 14,5, гуар 0,5, сшивка 0,05) Кимит (аммиачная селитра 89,6, натриевая селитра 10, алюминий 8, вода 16, твердое горючее 3,5, этиленгликоль 4, гуар 1,5, сшивка 0,05)	Водногелевое ВВ раздельного заряжения	1,4	4960	4,2	
		Пастообразный	1,1-1,2	4300	3,8-4,0	Выпускается в патронах, шланговых монозарядах и

В Канаде выпускаются нитрексы, гидромексы, повергел, аквамекс. Эти ВВ отличаются хорошей подвижностью и текучестью. Их свойства: плотность 1,25-1,58 г/см<sup>3</sup>, скорость детонации 3,5-5,2 км/с. По заказам потребителя они могут выпускаться в патронах диаметром 30-50 мм. В США применяются пастообразные товексы 20, А-4, 100, 210, 220, 500, 600, 650, 700, 800, экстра, сларриты 10, 85, 135, сларран, трогелы WS-7, сларри и гелеобразные карбогены 5, 10, 15, которые выпускаются с алюминием и без него, а также с содержанием в качестве окислителя перхлоратных солей. Их свойства: плотность от 1,1 до 1,5 г/см<sup>3</sup>, теплота взрыва 2770-5710 кДж/кг, скорость детонации 3,4-6,8 км/с. Выпускаются в патронах и шлангах.

**Эмульсионные ВВ (эмулиты).** Последним направлением в развитии ВВ является создание эмульсионных ВВ как разновидности простейших аммиачно-селитренных взрывчатых смесей. Их особенность состоит в том, что в отличие от смесей типа АС-ДТ, в которых дизельное топливо или другое низковязкое жидкое горючее покрывает гранулы селитры и частично впитывается в гранулы, в эмулитах жидкое горючее покрывает тонкой пленкой капли насыщенного раствора аммиачной селитры (иногда смешанных растворов аммиачной селитры и натриевой селитры или щелочно-земельного металла), образуя так называемую обратную эмульсию. Процесс эмульгирования осуществляют в смесителях с быстро вращающейся мешалкой в присутствии специальных веществ — эмульгаторов. Размер капель, порядка, 10<sup>-6</sup>м. Такие смеси в отличие от смесей АС-ДТ обладают высокой водостойчивостью и физически стабильны.

Для повышения детонационной способности в эмульсиях, как и в акваналах, вводят газовые пузырьки в виде, например, микросфер из полимерных материалов или стекла, добавляя газообразующие вещества (порофоры) или газогенерирующий нитрит натрия (ГГД). В таком состоянии, как и акваналы, эмульсии становятся чувствительными к импульсу капсюля-детонатора и имеют сравнительно малые величины критического диаметра. В эмульсиях достигается высокая поверхность контакта между окислителем (раствор аммиачной селитры) и горючим (нефтемасла). По показателям плотности они уступают взрывчатым суспензиям типа акватолов. В зависимости от содержания жидкой фазы могут обладать как текучими, так и пластическими свойствами. Для повышения энергетических показателей во многие сорта эмульсионных ВВ вводят тонкодисперсный алюминий.

Изучение и разработка эмульсионных ВВ были начаты в нашей стране в 1975 г. Вначале разрабатывали технологию изготовления и изучали свойства обратных эмульсий типа «вода в масле».

Готовят водный раствор селитры, отдельно — смесь дизельного топлива с поверхностно-активными веществами при циркуляции насосом. Далее происходит процесс эмульгирования фаз, обеспечивающий синтез обратной эмульсии.

Плотность заряда 1,2-1,3 г/см<sup>3</sup> достигается введением газообразующего компонента в небольших количествах при температуре эмульсии  $\geq 70^\circ\text{C}$ . При этих условиях и плотности 1,22 г/см<sup>3</sup> критический диаметр открытого заряда составляет 20 мм; скорость детонации 4,9-5,2 км/с, теплота взрыва около 3500 кДж/кг. Детонирует от капсюля-детонатора.

За рубежом впервые стали заниматься эмульсионными ВВ в США в 1964 г. В качестве эмульгаторов для

Таблица 3.6

Характеристики	Россия		Порэмилты	Швеция	Чехия	Финляндия	Испания	США	
	И	М						Эмульсия	Ирзель
<b>1. Компонентный состав, %</b>									
аммиачная селитра	62	59	62	67	65	28-59	62	77	
натриевая селитра	16	15	16	12	—	9,6-11,5	12	5	
(кальциевая селитра)	(16)	(15)	—	—	14	4,9-3,9	—	—	
вода	15	14	15	12	13	8,6-11,9	16	9	
масло	5	5	5,8	2	7	6,2	6	7	
эмульгатор	2	2	1,1	3	—	1,3-2,3	1	1	
алюминий	—	4	до 4,5	—	8	до 4,9	—	—	
сенсбиллизатор	0,5-1,5	2,5	3	3	2-3	3	—	1	
<b>2. Консистенция, упаковка</b>									
	Пластичная льющаяся			Пластичная патроны			Пластичная льющаяся		
3. Плотность заряда, г/см <sup>3</sup>	1,2-1,3	1,25-1,35	1,2-1,3	1,1-1,2	1,0-1,3	1,15-1,35	1,18-1,2	1,2	
4. Теплота взрыва, ккал/кг	680	1040	692-1009	680	750-1000	735-1050	720	705	
5. Скорость детонации, км/с	4,4-4,2	4,6-5,3	4,7-5,0	4,5-5,0	4,0-5,0	4,5-5,0	4,35-4,5	—	
6. Критический диаметр, мм	30-40	20-30	15-50	65	32-50	—	—	—	
7. Производительность, т/год	10000	25000	25000	2000	25000	25000	20000	—	
8. Масса эмульсии в СЗМ, т		8-10	7-8	Паг-роны	9,0	7,8	—	—	

состава, содержащего аммиачную селитру, воду, нефтяное масло и нитропроизводные парафиновых углеводов, применялись соли щелочно-земельных металлов жирных кислот, производные полиоксизтилена, эфиры сорбита и жирных кислот, оксазолины.

Эмульсионные ВВ (табл.3.6) в различных странах содержат различные поверхностно-активные вещества в качестве эмульгаторов. За рубежом применяются с 1970 г. Составы, содержащие эмульсии в смесях типа АС-ДТ, называют эмульсанами. В Финляндии эмульсионные ВВ называют кемитами, в Испании — риогелями, в Швеции — эмулитами.

## **4. Оборудование для приготовления ВВ вблизи мест их применения**

### **4.1. Общие сведения**

Для приготовления гранулированных и водосодержащих ВВ применяется оборудование, которое целесообразно классифицировать по функциональному назначению:

#### **1. Для приготовления гранулированных ВВ:**

- подготовка компонентов;
- смешение компонентов и получение готового ВВ;
- доставка компонентов или готового ВВ на блок, приготовление ВВ, зарядание скважин;
- вспомогательное оборудование для транспортировки, накопления компонентов или ВВ, дозирования при загрузке в транспортно-смесительно-зарядные машины.

#### **2. Для приготовления водосодержащих акваторов и эмульсионных ВВ:**

- подготовка компонентов;
- доставка компонентов в машинах — самоходных миниавтомобильных на блок, получение готового ВВ, зарядание скважин.

В практике зарубежных и отечественных горных предприятий разработано и применяется разнообразное оборудование для выполнения перечисленных задач. Для регламентации основных вопросов создания стационарных пунктов изготовления гранулированных и водосодержащих ВВ разработаны и утверждены Горгостехнадзором России две инструкции:

1. Правила устройства и безопасной эксплуатации стационарных пунктов изготовления гранулированных и водосодержащих ВВ и пунктов подготовки ВВ заводского производства на предприятиях, ведущих взрывные работы. ЦНИИНИКПК. М.:1989.

2. Правила устройства зарядного, доставочного и смесительного оборудования, предназначенного для механизации взрывных работ. М.: 1996.

Кроме того, для каждого вида оборудования и пункта разрабатываются индивидуальные технологические инструкции по их эксплуатации с учетом действующих «Единых правил безопасности при взрывных работах». М, 1992.

Ниже рассмотрены некоторые образцы из применяемого оборудования, которое успешно применяется на ряде горных предприятий России, стран СНГ и дальнего зарубежья.

#### 4.2. Оборудование подготовки компонентов гранулированных ВВ

В качестве исходных компонентов для гранулированных бестротилового ВВ применяют: аммиачную селитру, жидкую или твердые неметаллические горючие добавки, дисперсный алюминий.

**Аммиачная селитра** поступает на горные предприятия в многослойных бумажных мешках емкостью 50 кг, мягких контейнерах одноразового или многоразового использования емкостью до 1000 кг, россыпью в вагонах-хoppers. В зависимости от годовой потребности предприятия селитра хранится в мешках в хранилищах или на открытых площадках в контейнерах. На складах селитры она хранится в виде буртов. Прием ее на склад и подача на пункт подготовки ВВ производится с помощью ленточных конвейеров с разгрузочными устройствами и доставочных канатных скреперов на площадке хранения внутри склада.

Схема такого крупного склада, действующего на предприятии, показана на рис.4.1. Схема работы оборудования понятна из рисунка.

**Жидкие горючие добавки** (дизельное топливо, промышленное масло и т.д.) хранятся в металлических емкостях, откуда насосами через дозаторы подается в узлы смешивания компонентов или в емкости транспортно-смесительно-зарядных машин.

**Твердые горючие добавки** (уголь, древесные опилки, другие органические вещества) хранятся в отдельных хранилищах и подаются конвейерами в узел смешения компонентов. На пунктах некоторых угольных разрезов уголь подается непосредственно из забоев или склада. Тогда между конвейером и узлом смешения устанавливается молотковая дробилка с ситами, за счет чего обес-

печивается требуемый дисперсный состав угольной добавки.

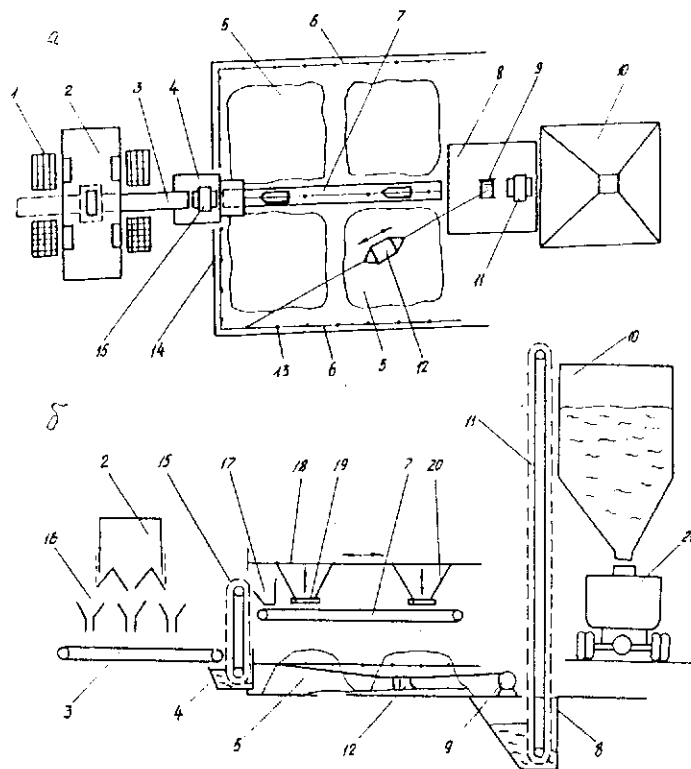


Рис. 4.1. Схема механизации склада аммиачной селитры: а — вид в плане, б — вид сбоку:

1 — защитная решетка, 2 — вагон МПС, 3 — конвейер, 4 — бункер, 5 — аммиачная селитра, 6 — трос, 7 — конвейер, 8 — бункер, 9 — лебедка, 10 — разгрузочный бункер, 11 — вертикальный конвейер, 12 — скрепер, 13 — узлы крепления скрепера, 14 — здание склада, 15 — вертикальный конвейер, 16 — тетки, 17 — бункер, 18 — трос, 19 — косые ножи, 20 — тросы подвески косых ножей, 21 — зарядная машина

**Дисперсный алюминий** подается в металлических герметичных боченках-контейнерах, откуда он вакуумным

насосом подается для предварительного смешения с жидкой горючей добавкой (для смешения пылевыведения). При малой производительности засыпка дисперсного алюминия производится вручную.

Аналогично подаются в узел смешения и другие твердые горючие добавки.

#### 4.3. Классификация оборудования для смешения компонентов и получения готовых гранулированных ВВ

Данное оборудование подразделяют на:

- стационарные пункты смешения компонентов и получение готовых ВВ;
- мобильные автономные пункты на автомашинах, в которых обеспечивается хранение и доставка компонентов на заряжаемый блок, изготовление ВВ и его зарядание в скважины.

Это транспортно-смесительно-зарядные машины. Когда на стационарном пункте производят готовые ВВ (игданит, гранулит, граммонит) — машиной осуществляют доставку ВВ и его зарядание в скважины. Это осуществляют с помощью более простых транспортно-зарядных машин бункерного типа с шиберными затворами. На горных предприятиях работает большое число конструкций оборудования стационарных пунктов и машин, которые внедряют предприятия, институты, проектные организации и заводы уже в течение 40 лет. Ниже рассмотрены некоторые из наиболее распространенных видов оборудования.

#### 4.4 Схемы и оборудование стационарных пунктов для приготовления гранулированных ВВ

Стационарные пункты приготовления гранулированных ВВ отличаются производительностью и способами смешения, которые делят на:

- барабанные,
- шнековые,
- гравитационные.

Исходными явились заводские технологические схемы приготовления порошкообразных аммонитов в барабанных смесителях (рис.4.2), а также граммонитов и гранулитов в наклонных шнековых смесителях (рис. 4.3). В созданных на горных предприятиях технологических схемах процессы подготовки компонентов и их смешения существенно упрощены, что, как показали проверки, не ухудшило качестваготавливаемых ВВ, особенно учитывая, что их используют для зарядания скважин большого диаметра 150–250 мм. и более при критическом диаметре для этих ВВ 40-80 мм.

Схема и оборудование стационарного пункта большой производительности (20 тыс.т. ВВ и более в год) для приготовления бестротилового гранулитов и тротилсодержащих комбизаров, разработанная ОАО «Молибден» и Сорским филиалом КИЦМ представлены на рис. 4.4.

Такие пункты для приготовления тротилсодержащих ВВ построены и успешно эксплуатируют более 20 лет на карьере ОАО «Молибден», начата эксплуатация на Изыхском угольном разрезе, а в Междуреченске АО «ЮжКуТУК» такой пункт используют для приготовления бестротилового гранулитов УП из смеси аммиачной селитры и угольного порошка. Особенности этих пунк-

тов заключаются в конструкции гравитационного смесителя, на который подается дозированное количество аммиачной селитры, тротила или угольного порошка и жидкого горючего.

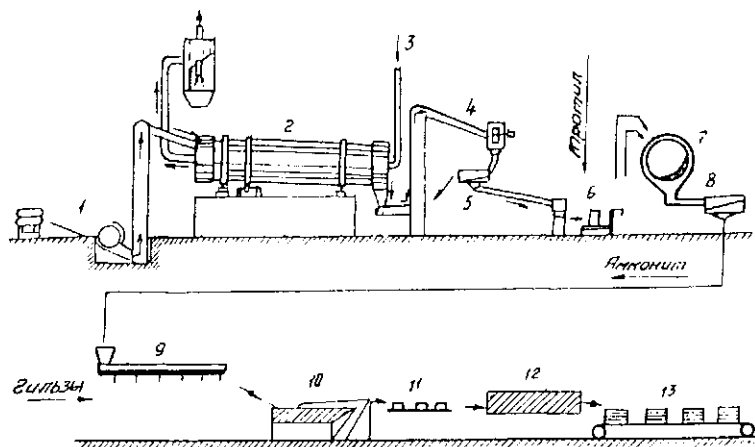


Рис. 4.2. Схема производства аммонитов:

- 1 — грубое дробление селитры, 2 — сушка, 3 — подача воздуха или топочных газов, 4 — тонкое дробление, 5 — просев, 6 — взвешивание селитры или тротила, 7 — обработка компонентов в смесительных барабанах, 8 — просев аммонита, 9 — патронирование, 10 — парафинирование патронов, 11 — упаковка в пакеты, 12 — парафинирование пачек, 13 — укупорка в ящики

Гранулированное смешевое ВВ получают с высокой производительностью, а потому пункт не имеет накопительного бункера для готового ВВ, а поступает после смесителя в бункер зарядной машины.

Стационарный пункт меньшей производительности до 26 т/ч. эксплуатируется во Взрывпроме при Краснобродском разрезе Кузбасса (рис.4.5).

В данной схеме подачу и смешение твердых компонентов: селитры и угольного порошка производят с помощью шнековых конвейеров-смесителей, а жидкое горючее по-

дается в первый шнек-смеситель 8 для аммиачной селитры. Пункт также не имеет накопительного бункера для ВВ и оно подается непосредственно в зарядную машину.

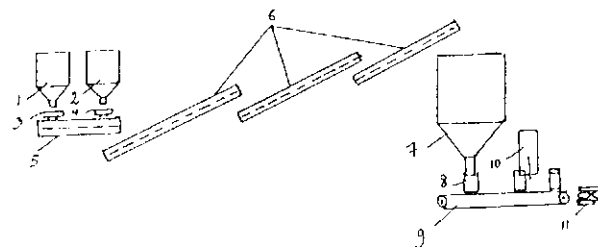


Рис. 4.3. Схема производства гранулированного ВВ:

- 1 — бункер для аммиачной селитры, 2 — бункер для тротила, 3, 4 — дозаторы селитры и тротила, 5 — шнек подачи и первичного смешения компонентов, 6 — наклонные шнек-смесители гранулянтов, 7 — бункер-накопитель с дозатором, мешок для ВВ, подающий конвейер, 10 — прошивочная машина, 11 — поддон для мешков с ВВ

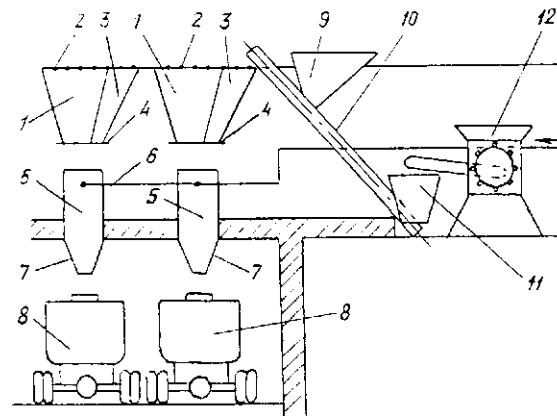


Рис. 4.4. Схема пункта приготовления гранулированного ВВ:

- 1 — бункер для аммиачной селитры, 2 — защитная решетка на бункере, 3 — бункер для гранулированного тротила или угольного порошка или другой горючей добавки, 4 — регулировочный шторный затвор, 5 — гравитационный смеситель, 6 — подача жидкого горючего, 7 — течка для готового ВВ, 8 — бункер зарядной машины, 9 — резервный бункер для компонентов, 10 — шнековый конвейер подачи угольного порошка, 11 — узел сортировки угольного порошка, 12 — молотковая дробилка

Аналогичный пункт большой производительности со шнековой схемой подачи и смешения аммиачной селитры и угольного порошка эксплуатируется в ГУП «Якутуголь» на Нерюнгринском угольном разрезе. Как и в остальных пунктах изготовленный гранулит УП подается непосредственно в бункер зарядной машины.

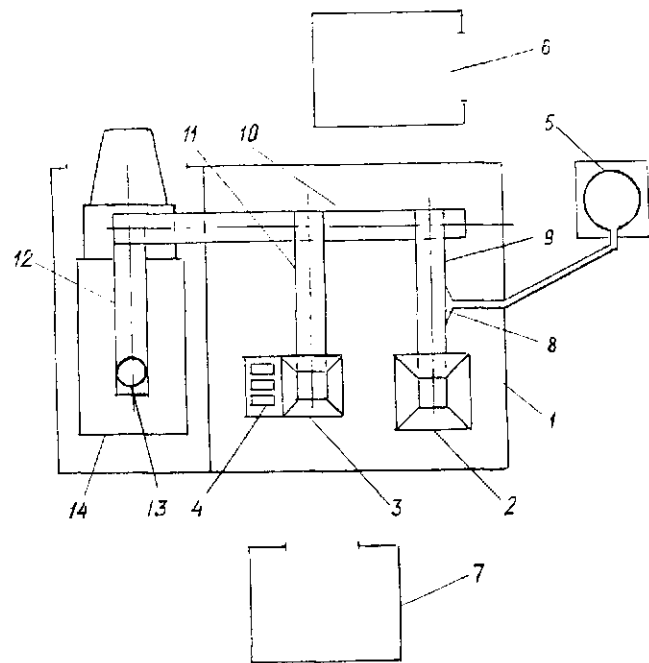


Рис. 4.5. Схема пункта приготовления угленита УП-1А Красноярского взрывпрома:

1 — здание, 2 — приемный бункер алюминия, 3 — приемный бункер угольного порошка, 4 — мешки с угольным порошком, 5 — емкость для жидкого горючего, 6 — склад АІ, 7 — склад угольного порошка, 8 — распылитель жидкого горючего, 9, 10, 11, 12 — шнековые конвейеры подачи и смешения компонентов, 13 — выпускная точка готового ВВ, 14 — транспортно-зарядная машина

Научно-исследовательским центром «Кастл» разработан барабанный объемный смеситель циклического действия для бестротилового ВВ, в котором имеется бункер селитры объемом 0,05 м<sup>3</sup> и более. Объем ВВ, изготовляемого за цикл в течение 2-3 минут смешения, составляет 0,02 м<sup>3</sup>. Техническая производительность пункта при объеме бункера-смесителя 0,25 м<sup>3</sup> составляет 1200 кг/ч.

**Передвижные пункты** приготовления бестротилового ВВ представляют собой зарядные машины МЗ-3, МЗ-4 и другие, которые на складах загружают аммиачной селитрой и жидким горючим, а на заряжаемом блоке производят приготовление гранулитов в шнековом смесителе-податчике, которым готовое ВВ подается в зарядный рукав и в скважину.

#### 4.5 Технология работы и оборудование стационарных пунктов для водосодержащих ВВ

Водосодержащие ВВ, как указано выше, принято различать по следующим признакам:

- суспензионные гелеобразные:
  - а) гранулированная аммиачная селитра + тротил + загуститель + раствор селитры (сларри, акватолы, акваниты);
  - б) раствор селитры + загуститель + тротил (горячельющиеся ГЛТ, карбатолы);
  - в) гранулированная аммиачная селитра + сенсibiliзатор + загуститель + сшивка для придания гелеобразного нетекучего водоустойчивого состояния;

г) эмульсионный горячий раствор аммиачной (с добавками натриевой или кальциевой) селитры + эмульгатор + жидкое горючее (индустриальное масло, дизельное топливо, мазут) + энергетическая добавка (дисперсный алюминий) + газогенерирующая добавка (эмульсионные ВВ эмульты, порэмиты);

• суспензионные смесевые эмульсионные:

д) смеси эмульсионного ВВ с 30-70% AN-FO (суспензионные эмульаны, гранэмиты).

Для получения на стационарных пунктах или в зарядных машинах этих ВВ применяется соответствующий набор технологического оборудования.

#### А. Суспензионные гелеобразные ВВ

В бывшем СССР в 70-х годах начаты работы по созданию суспензионных горячельющихся ВВ из смеси загущенного раствора селитры с гранулотолом типа ГЛТ (Ленинградский горный институт, Лебединский ГОК), а затем ифзанитов (по названию разработчика — бывшего сектора физико-технических горных проблем ИФЗ АН СССР, сейчас ИПКОН РАН), в которых вместо одного гранулотола используют смесь его с гранулированной селитрой, а объем загущенного раствора в заряде ВВ равен объему межгранульных пустот.

Процентное химическое соотношение компонентов (АС-80%, гранулотол — 20%) в ГЛТ и ифзанитах одинаково. Ифзаниты могут выпускать с температурой смеси 40, 60 и 80°C. Технологическая схема приготовления водосодержащих акватолов типа ГЛТ приведена на рис. 4.6. На стационарном пункте готовится горячий насыщенный раствор ( $t = 85-110^\circ\text{C}$ ) селитры в аппарате-растворителе емкостью 6-10 т. с добавкой 15-17% воды по массе и загуститель (полнакриламид или карбоксилме-

тилцеллюлоза). Приготовленный невзрывчатый раствор подается в накопительную изотермическую емкость 20-

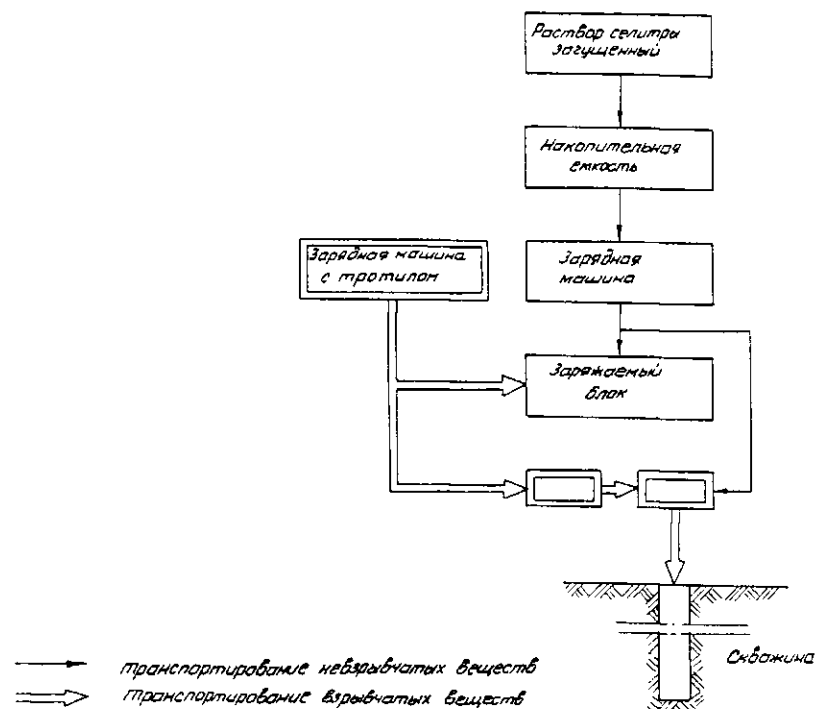


Рис. 4.6. Технологическая схема приготовления горячих акватолов типа ГЛТ-20

60 м<sup>3</sup>, откуда насосом или самотеком в транспортно-смесительно-зарядные машины Акватол-IV или Акватол-III. Аппарат растворения имеет мешалку и паронагревательную кольцевую спираль для нагрева раствора. Машины доставляют горячий раствор селитры на прикарьерный пункт, где из специальной емкости-бункера в емкость машины подается 20% гранулотола, а затем шнековой мешалкой, расположенной в нижней части емкости, производят перемешивание жидкого раствора

и гранул тротила в течение 20-30 мин, а затем полученная суспензия насосом через дозатор машины подается в скважину по шлангу под столб воды. Схема зарядной машины МЗВ-10 приведена на рис. 4.7. В ряде случаев машина с раствором селитры подается на взрываеваемый блок, где из другой зарядной машины МЗ-ЗБ в емкость первой подается гранулолот и перемешивается для получения суспензии ГЛТ.

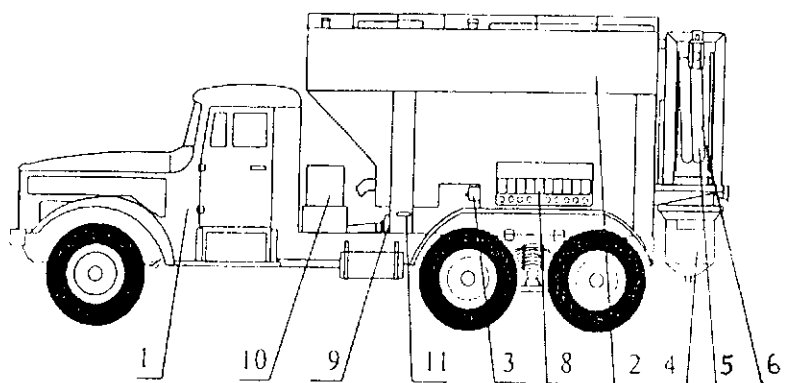


Рис. 4.7. Схема транспортно-смесительно-зарядной машины на базе КрАЗ-256Б1 МЗВ-10 (акватол 1У):

1 — шасси машины, 2 — емкость для раствора, 3 — шнековые питатели-смесители, 4 — дозатор, 5 — шланговый насос, 6 — барабан с зарядным шлангом, 8 — пульт управления, 9 — раздаточная коробка, 10 — узел гидроаппаратуры, 11 — ящик с электрооборудованием

За прошедший период вследствие недостаточного внимания к этим разработкам институтов-разработчиков промышленных ВВ, а также машиностроительной базы министерства-поставщика ВВ, определенной хими-

ко-технологической недоработки композиций ГЛТ и ифзанитов весь комплекс вопросов, связанных с их изготовлением и получением зарядов со стабильными свойствами не завершен, несмотря на то, что их изготовлено на предприятиях более 500 тыс.т. Пионеры внедрения этих разработок проф. Ханукаев А.Н., проф. Демидюк Г.П., ряд крупных горных предприятий — Норильский ГМК, Лебединский ГОК, Оленегорский ГОК, Костомукшский ГОК, Полтавский ГОК и др.

Главный недостаток суспензионных ГЛТ — в их раскисляемости вследствие разной плотности раствора селитры и гранулолота. Не были найдены отечественные загустители, которые обеспечивали бы физическую стабильность скважинного заряда в скважине. Работами МГИ, НИИКМА и КМавзрывпрома состав ГЛТ был усовершенствован за счет повышения температуры раствора селитры до 100-110°C и создания ВВ типа прямой эмульсии (раствор АС + расплав тротила).

ВВ типа ГЛТ-20 обладает еще одним недостатком, кроме оседания гранулолота на дно скважины, а процессе твердения суспензии из нее выделяется вода, которая в верхней части заряда образует конус, заполненный раствором селитры, с размерами в диаметре в верхней части от 100 до 200 мм и глубиной до 3,0 м и более. Это можно было бы считать достоинством данного ВВ, если бы заряд и в верхней части содержал расчетный процент тротила, т.е. происходило образование конического заряда. Но поскольку в верхней части заряда процент содержания тротила, по данным НИИКМА, снижается до 7-10%, то такое ВВ обладает недостаточной энергией, выделяет повышенное количество ядовитых оксидов азота, приводит к низкому качеству дробления верхней части уступа.

Ифзаниты, кроме отсутствия водоустойчивости, обладают низкой подвижностью для высокопроизводительной подачи их в скважину с помощью насосов, а поэтому малопригодны для заряжания обводненных скважин, особенно под столб воды. Для их применения необходимо использовать перистальтические насосы, не выпускаемые в России. В зарубежных странах аналогичные гелеобразные водоустойчивые водосодержащие ВВ под общим названием «сларри» широко выпускаются с 50-х годов различными фирмами США, Канады, Китая, Югославии в непатронированном и патронированном видах.

В качестве энергетических добавок применялся тротил, бездымный порох, дисперсный алюминий, жидкое горючее, монометилнитрамин и др.

Фирмы, производящие эти ВВ, дают им различные названия: нитро-карбо-нитраты, сларинокс, NCN-600, остиниты, ДОУ, товекс и др. Технологические схемы приготовления ВВ обеспечивают на стационарном пункте приготовления исходных компонентов с последующей загрузкой их в зарядные машины, где производят их смешение и приготовление ВВ, т.е. зарядная машина, как правило, превращена в самоходный завод приготовления смеси-суспензии ВВ и их заряжание в скважины.

Заслуживает внимания предложение фирмы «Мега-мекс» (Индия) по технологии приготовления ВВ NCN-600, содержащего 75% аммиачной селитры, воду, уротропин, гуаргам и дихромат натрия.

Этот акватол-сларри имеет плотность до 1,3 см<sup>3</sup>, скорость детонации до 5,0 км/с, энергию 960 ккал/кг и критический диаметр 100 мм.

В качестве зарядной машины используется автобетоносмеситель с вращающейся емкостью-бочкой с установленным на нем насосе для подачи ВВ под столб во-

ды. Существенно то, что в составе NCN-600 содержится в основном гранулированная селитра и значительно меньше раствора чем в ГЛТ.

### Б. Эмульсионные ВВ

В бывшем СССР, вместо доработки составов ГЛТ, министерство-поставщик ВВ, учитывая опыт США, Швеции, Канады и других стран, начало разрабатывать составы отечественных эмульсионных ВВ типа эмультов. В отличие от последних в составе ВВ использовали отечественный эмульгатор («ноу-хау»), вместо минерального масла применяли топочный мазут, вместо полых микросфер использовали газогенерирующую добавку ГГД (нитрит натрия). Созданы зарядные машины Порэмит-IV, а затем институтом НИПИГОРМАШ зарядные машины МЗВ-8 на базе КраЗа грузоподъемностью 8 т и МЗВ-20 на базе БелАЗа-540 грузоподъемностью 20 т. Построены опытные установки приготовления эмульсии на ОАО Лебединский ГОК, ОАО Ураласбест, ОАО Апатит. Эмульсия считается невзрывчатой и приобретает свойства ВВ через 40-50 мин после введения ГГД и перемешивания ее на машине в статическом смесителе перед подачей в зарядный шланг, опущенный в скважину. Технологическая схема приготовления эмульсионных порэмитов приведена на рис. 4.8.

Зарубежные фирмы США, Канады создают компактные модульные установки и зарядные машины заводы для приготовления и применения эмульсионных и смесевых (эмульсия + AN-FO) ВВ. В качестве примера на рис. 4.9 показан общий вид пункта комплекса фирмы ETI (США) для приготовления эмульсии с двумя накопителями емкостями для эмульсии вместимостью по 60 т каждая. Приготовление эмульсии производят в модульной установке контейнерного типа (рис. 4.10). Загрузку

готовой эмульсии производят в цистерну емкостью 15 м<sup>3</sup> и более (рис. 4.11) для доставки на большие расстояния (более 100 км) или машину (рис. 4.12), которая транспортирует компоненты ВВ на карьер и позволяет получать AN-FO, и смесь эмульсии с AN-FO в различных соотношениях. Фирма ETI рекомендует применять для

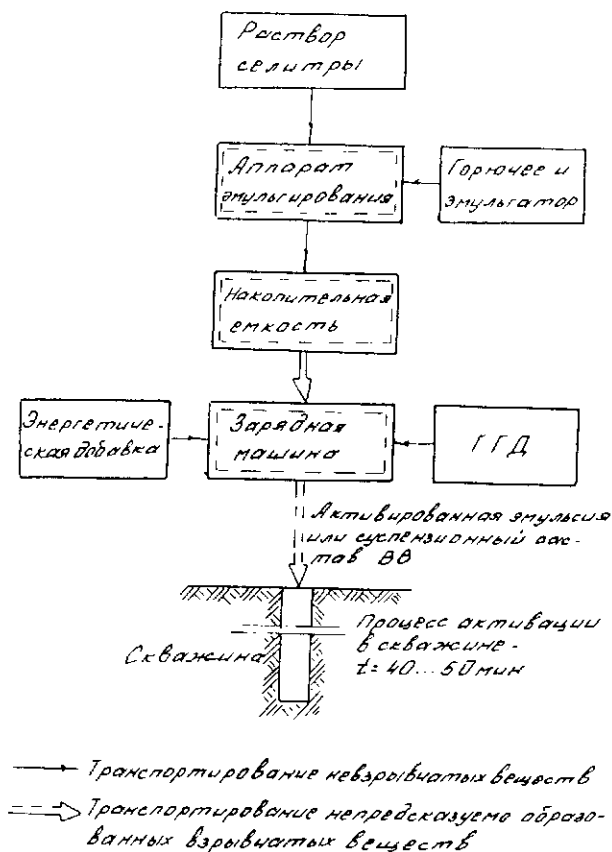


Рис. 4.8. Технологическая схема приготовления эмульсионных ВВ типа порэмитов (эмулитов)

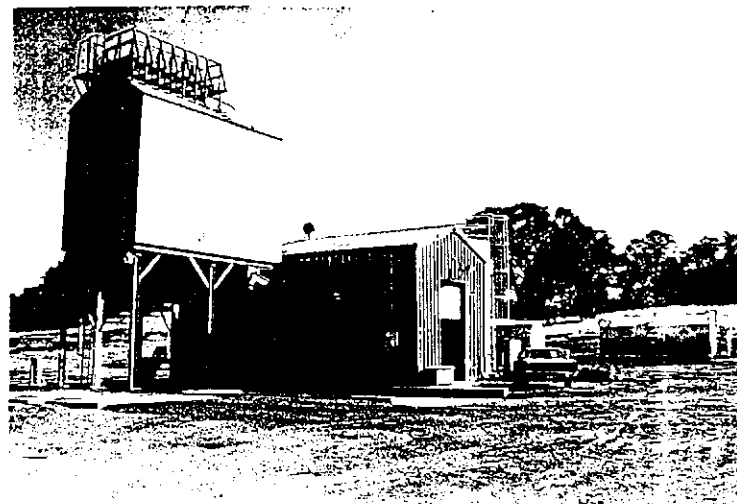


Рис. 4.9. Пункт-комплекс для приготовления эмульсии с накопительными емкостями фирмы ETI (Канада-США)

активации эмульсии и превращения ее в ВВ стеклянные полые микросферы которые на стационарном пункте добавляют в количестве до 2% по объему в эмульсию с помощью специального миксера (рис. 4.13).

Другой тип универсальной транспортно-смесительно-зарядной машины-минизавода показан на рис. 4.14.

Промышленные взрывы, проведенные КМА взрывом при испытаниях порэмита на карьерах Лебединского и Стойленского ГОКов, показали, что обычный порэмит годен для взрывания трещиноватых пород с коэффициентом крепости по М.М. Протодяконову до 12, а с добавками 4 и 8% алюминиевого порошка — для

пород любой крепости. Однако не было установлено, почему при опытных взрывах с большими удельными расходами порэмита средний размер куса взорванной горной массы был в 1,5-2,0 раза больше, чем при использовании штатных гранулированных ВВ. Единственным объяснением этого является плохое перемешивание газогенерирующей добавки (ГГД) в смесительном узле зарядной машины «Порэмит», в результате чего фактически детонировала только часть активированного ГГД заряда. Проверить это предположение на практике невозможно, так как на зарядной машине нет приборов экспресс-контроля полноты перемешивания компонентов по сечению заряда.

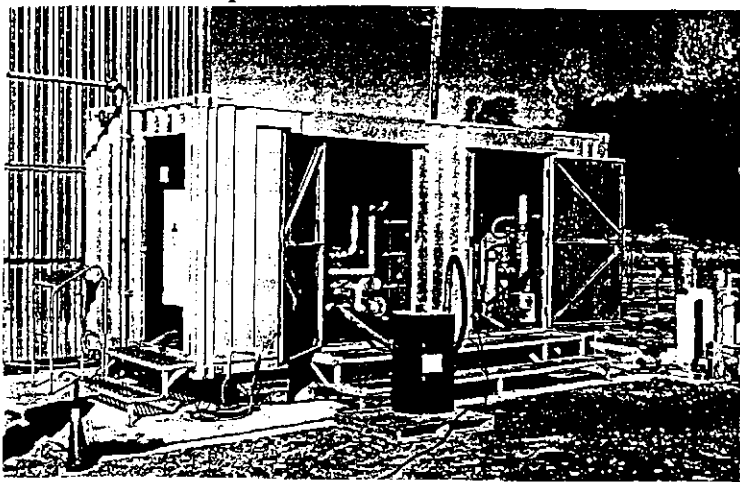


Рис. 4.10. Модульная установка для приготовления эмульсии в контейнере 6 м «земля-море» фирмы ЕТІ (Канада-США)

Представители зарубежных фирм Айрико (США), Нитро-Нобель (Швеция) и другие считают более дешевым и достаточно надежным использовать в качестве

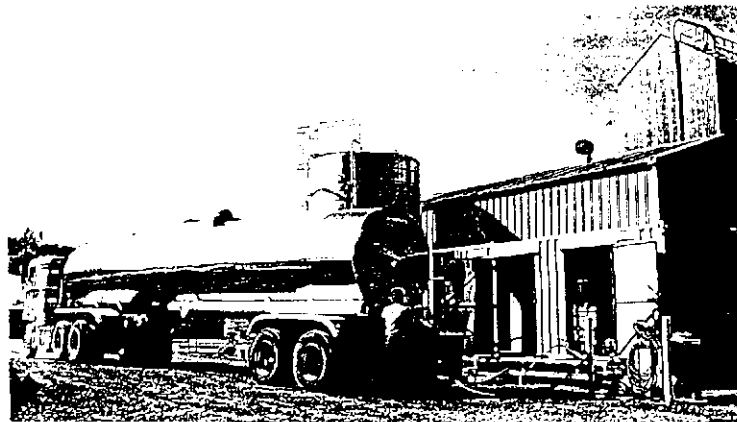


Рис. 4.11. Загрузка готовой эмульсии в цистерну-доставщик большой емкости фирмы ЕТІ (Канада-США)

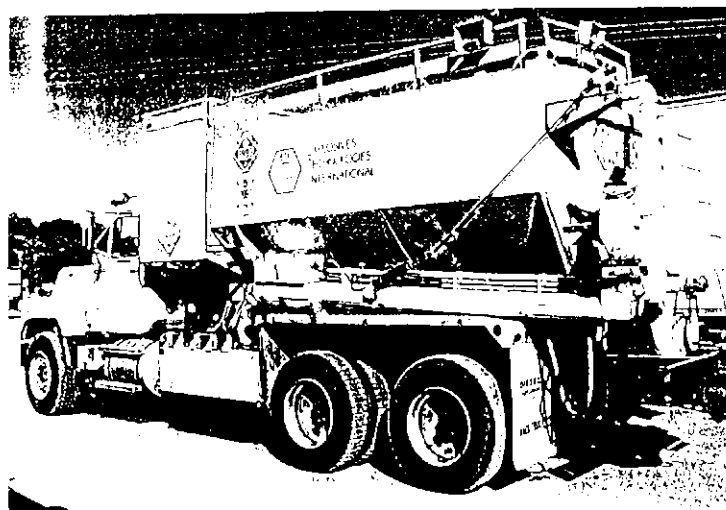


Рис. 4.12. Транспортно-смесительно-зарядная машина для получения AN-FO, и смесевой суспензии эмульсия + AN-FO фирмы ЕТІ (Канада-США)

активирующего компонента также ГГД, а полые микросферы применять только в патронах.

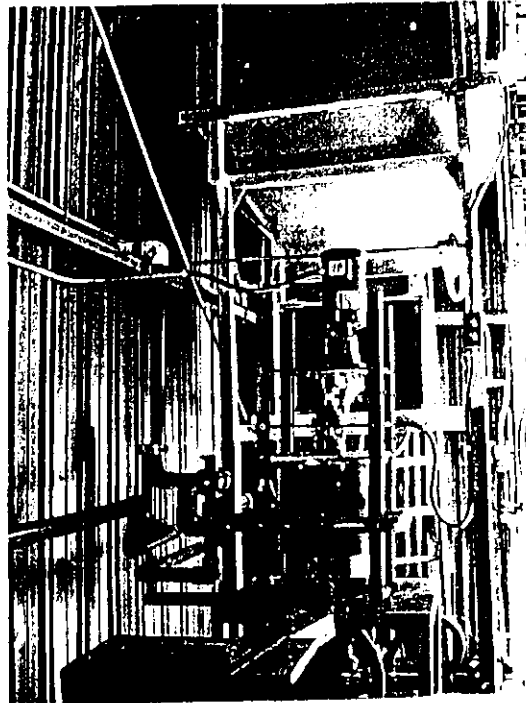


Рис. 4.13. Установка для ввода полых микросфер в эмульсию фирмы ETI (Канада-США)

Кроме того, по данным зарубежных исследований для получения высокого качества эмульсии и ВВ необходимо обеспечивать высокую химическую чистоту исходных компонентов: селитр (с учетом добавок против ее слеживания), алюминиевой пудры, горючей добавки.

Испытаниями технологической цели аппаратов приготовления эмульсии на пунктах предприятий КМА. и комбината Ураласбест и стыковки ее с работой зарядных машин с точки зрения достижения максимально

возможной эксплуатационной производительности установлено следующее.

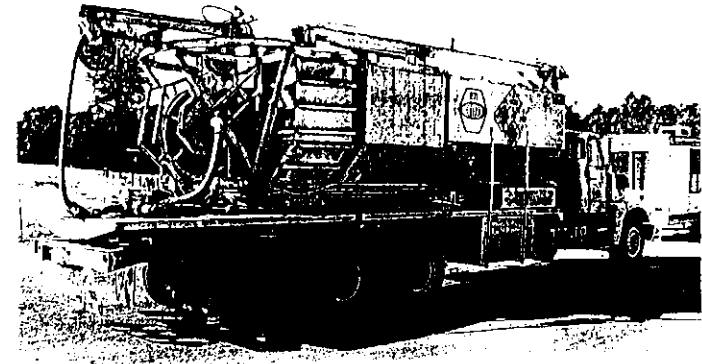


Рис. 4.14. Общий вид универсальной транспортно-смесительно-зарядной машины фирмы ETI (Канада-США)

Представители бывшего Госгортехнадзора СССР и отраслей при формировании программы производства эмульсионных ВВ возражали против того, чтобы пункты приготовления компонентов были собственностью горняков.

Пункты на первом этапе оставили за министерством-поставщиком ВВ, обеспечивающим приготовление невзрывчатых компонентов, из которых на горных предприятиях изготавливают ВВВ: акватол ГЛТ или порэммит. Таким образом, все получилось наоборот: производители-технологи делают невзрывчатые компоненты, а горняки — из этих компонентов ВВ, что им, по мнению ведомств, «не позволено».

В конце 1990 г. в г. Асбесте на опытной установке Калиновского завода по производству эмульсии для

приготовления порэмита во время ее работы произошел взрыв с травмированием 84 человек, в том числе 15 с летальным исходом. В результате взрыва полностью разрушены здание пункта, все технологическое оборудование и зарядная машина МЗВ-8, стоявшая под загрузкой эмульсии. Окружающие здания других производств получили от воздействия воздушной ударной волны различную степень повреждения и не пригодны без капитального ремонта к дальнейшей эксплуатации.

Изучение акта расследования аварии показывает, что причина взрыва фактически не установлена, а высказанные версии относятся к категории маловероятных.

Обратная эмульсия представляет собой гомогенную смесь микроскопических капель горячего раствора аммиачной и натриевой селитры, окруженных тонким слоем эмульгированного топочного мазута, который содержит в своем составе (по ГОСТу) легколетучие с температурой испарения 60°C жидкие фракции и серу. Таким образом, обратная эмульсия содержит в своем составе окислитель, горючее и компоненты, способные ее активизировать без нитрита натрия, применяемого в качестве газогенерирующей добавки. Кроме того, в процессе эмульгирования в получаемую эмульсию могут захватываться пузырьки воздуха. Отсюда следует, что эмульсия даже без активизации может считаться низкочувствительным взрывчатым веществом с большим критическим диаметром в отличие от горячих растворов селитры, применяемых при изготовлении ВВ типа ГЛТ.

В августе 1993 г. на карьере Лебединского ГОКа через 4 часа после окончания зарядания ГЛТ-20 в процессе первого этапа монтажа взрывной сети без установки КЗДШ-69 (РП-8) произошел преждевременный взрыв, в результате которого погибло 12 чел. и несколько чело-

век было травмировано. Выдвинутые наиболее реальные версии преждевременного взрыва следующие:

- автокаталитические реакции между пиритом и горячим раствором селитры;
- трение тротил-гексогеновой шашки ТГ-500 о стенку скважины в процессе технологии монтажа сети (опускание ее на шнуре);
- нештатное воздействие на ДШ (удар падающего камня, перебивание шнура камнем и т.д.).

Ни одну из перечисленных версий не удалось подтвердить экспериментально, а поэтому нельзя исключать террористический акт со стороны недовольных работников, тем более в этом случае могли быть подвергнуты самым строгим наказаниям проектировщики взрыва, работники КМА взрывпрома, рудоуправления и комбината ОАО Лебединский ГОК. Работы по выявлению причин преждевременного взрыва не завершены.

Несомненно, что технология приготовления ВВ типа порэмита оказалась более опасной, чем ГЛТ, а, приравняв приготовление эмульсии порэмита к взрывоопасной, надо признать, что строящиеся пункты для приготовления эмульсий на горных предприятиях — это мастерские приготовления ВВ с необходимостью изменения требований к их размещению, режиму эксплуатации и конструкции. Это в конечном счете приведет к дальнейшему удорожанию строительства, их содержания и снижению уровня безопасности выполнения взрывных работ по сравнению как с заводскими ВВ, так и ВВ типа акваторов, тем более, что остался невыясненным в обеих рассмотренных катастрофах инициатор взрыва. Поэтому на данном этапе целесообразно начать широкое внедрение ВВ типа акваторов.

приготовления порэмита во время ее работы произошел взрыв с травмированием 84 человек, в том числе 15 с летальным исходом. В результате взрыва полностью разрушены здание пункта, все технологическое оборудование и зарядная машина МЗВ-8, стоявшая под загрузкой эмульсии. Окружающие здания других производств получили от воздействия воздушной ударной волны различную степень повреждение и не пригодны без капитального ремонта к дальнейшей эксплуатации.

Изучение акта расследования аварии показывает, что причина взрыва фактически не установлена, а высказанные версии относятся к категории маловероятных.

Обратная эмульсия представляет собой гомогенную смесь микроскопических капель горячего раствора аммиачной и натриевой селитр, окруженных тонким слоем эмульгированного топочного мазута, который содержит в своем составе (по ГОСТу) легколетучие с температурой испарения 60°C жидкие фракции и серу. Таким образом, обратная эмульсия содержит в своем составе окислитель, горючее и компоненты, способные ее активизировать без нитрита натрия, применяемого в качестве газогенерирующей добавки. Кроме того, в процессе эмульгирования в получаемую эмульсию могут захватываться пузырьки воздуха. Отсюда следует, что эмульсия даже без активизации может считаться низкочувствительным взрывчатым веществом с большим критическим диаметром в отличие от горячих растворов селитр, применяемых при изготовлении ВВ типа ГЛТ.

В августе 1993 г. на карьере Лебединского ГОКа через 4 часа после окончания зарядания ГЛТ-20 в процессе первого этапа монтажа взрывной сети без установки КЗДШ-69 (РП-8) произошел преждевременный взрыв, в результате которого погибло 12 чел. и несколько чело-

век было травмировано. Выдвинутые наиболее реальные версии преждевременного взрыва следующие:

- автокаталитические реакции между пиритом и горячим раствором селитры;
- трение тротил-гексогеновой шашки ТГ-500 о стенку скважины в процессе технологии монтажа сети (опускание ее на шнуре);
- нештатное воздействие на ДШ (удар падающего камня, перебивание шнура камнем и т.д.).

Ни одну из перечисленных версий не удалось подтвердить экспериментально, а поэтому нельзя исключать террористический акт со стороны недовольных работников, тем более в этом случае могли быть подвергнуты самым строгим наказаниям проектировщики взрыва, работники КМ Авзрывпрома, рудоуправления и комбината ОАО Лебединский ГОК. Работы по выявлению причин преждевременного взрыва не завершены.

Несомненно, что технология приготовления ВВ типа порэмит оказалась более опасной, чем ГЛТ, а, приравняв приготовление эмульсии порэмита к взрывоопасной, надо признать, что строящиеся пункты для приготовления эмульсий на горных предприятиях — это мастерские приготовления ВВ с необходимостью изменения требований к их размещению, режиму эксплуатации и конструкции. Это в конечном счете приведет к дальнейшему удорожанию строительства, их содержания и снижению уровня безопасности выполнения взрывных работ по сравнению как с заводскими ВВ, так и ВВ типа акватолов, тем более, что остался невыясненным в обеих рассмотренных катастрофах инициатор взрыва. Поэтому на данном этапе целесообразно начать широкое внедрение ВВ типа акватолов.

С учетом мирового опыта создания водоустойчивых ВВ в КНР были разработаны оригинальные составы эмульсионных ВВ, аналогичных эмулитам. Оригинальность этих составов в том, что при их приготовлении используют эмульгаторы («ноу-хау»), получаемые из продуктов перегонки нефти, а установка эмульгирования горячего раствора селитр имеет большую емкость (до 1,5 т готовой эмульсии) и выполнена в виде цилиндрического бака с мешалкой пропеллерного типа из нержавеющей стали.

Газогенерирующая добавка (нитрит натрия) добавляется в установку эмульгирования. Таким образом, вместо невзрывчатой эмульсии на пункте (в установке эмульгирования) получают готовое к употреблению эмульсионное достаточно подвижное ВВ с видимыми газовыми пузырьками. ВВ фасуется порциями по 20 кг в мешки многоразового использования с полиэтиленовым вкладышем и транспортируется на склад ВВ, где может храниться до трех месяцев, или непосредственно на взрываемый блок. Зарядание выполняют вручную. При этом у скважины из мешка вытряхивают полиэтиленовый вкладыш с ВВ, надрезают его и сбрасывают ВВ вместе с вкладышем в скважину на столб воды. Эмульсионное ВВ имеет плотность 1,25-1,3 г/см<sup>3</sup>, а потому тонет в воде и создает нормальный (по полученным от производителей данным) заряд. Отказов при взрывании таких скважинных зарядов не наблюдалось. На железорудном карьере Нанфинь (КНР) построен завод по производству эмульсии и аппаратов смешения горячего с газогенерирующей добавкой по патенту фирмы Айрико (США).

Установка приготовления эмульсии находится в отдельном здании и состоит из аппарата растворителя селитры емкостью 12 т с добавкой загустителя («ноу-хау»)

и двух накопительных емкостей 40 и 60 т загущенного раствора селитры. По гибким трубопроводам раствор селитры насосом подается в цистерну емкостью 16 т транспортно-смесительно-зарядной машины Айрико (США). Снаряженная раствором селитры машина подъезжает к другим зданиям, где в отдельные емкости подаются горючее в смеси с эмульгатором, газогенерирующая добавка («ноу-хау») и горячая вода для промывки. Смешение компонентов происходит в аппарате эмульгирования, приобретенном фирмой у шведской фирмы Нитро-Нобель, непосредственно у скважины.

Таким образом, КНР применяет две разные технологии приготовления эмульсионных ВВ: получая готовое ВВ на пункте или получая готовое ВВ у скважины, не смешивая горючее и окислитель, как делается в России. Первая технология применяется при больших объемах применения ВВ.

На карьере Нанфинь успешно применяют водосодержащие водоустойчивые ВВ типа «Сларри» с использованием механизированной технологии американской фирмы «Айрико». На карьере работают как американские зарядные машины этой фирмы, так и изготовленные в Китае.

Чисто эмульсионные ВВ обладают невысокими взрывчатыми характеристиками, т.к. они представляют собой жидкое AN-FO с плотностью ВВ в заряде 1,2-1,25 см<sup>3</sup>. Потому в состав зарубежных эмулитов и отечественных порэмитов вводится дисперсный алюминий в количестве 4-12 %. В этом случае взрывчатые характеристики ВВ повышаются и они становятся пригодными для взрывания крепких высокоплитных пород типа железистых кварцитов. При этом стоимость ВВ существенно возрастает и затраты на отбойку становятся близки к

условиям использования гранулолола, т.е. существенно дороже, чем при использовании акватолов.

Поэтому в зарубежных странах вместо дорогого дисперсного алюминия в эмульсии стали добавлять AN-FO в количестве от 30 до 70 %. По массе при этом при содержании AN-FO до 40% полученное суспензионное ВВ пригодно для подачи его в скважину насосами под столб воды. При большем содержании AN-FO ВВ подается в скважину шнеком с поверхности. Эти ВВ изготовлены и в России и получили название гранэмиты. Зарубежные ВВ называют эмуланами или тяжелыми эмульсиями. Созданы специальные зарядные машины для таких смесевых ВВ. Машины имеют емкость для селитры, жидкого горючего и эмульсии. Вначале готовят AN-FO в наклонном шнеке и ВВ подается в бункер, откуда шнековым податчиком-смесителем подается к винтовым насосам. В трубу шнека подается необходимое количество эмульсии, которая из второго бункера захватывается винтовыми (героторными) насосами и подается в зарядный шланг длиной до 30 м для заряжения ВВ в скважину под столб вода. При этом газогенерирующая добавка не применяется, а активация ВВ достигается за счет применения в AN-FO пористой селитры, в настоящее время на зарубежных карьерах более 80 % эмульсионных ВВ используют, смешивая их с AN-FO за счет чего повышаются на 10-15 % энергетические характеристики ВВ, плотность заряда и снижается стоимость применяемой смеси. Таким образом, чисто эмульсионные ВВ менее эффективны, чем суспензионные смеси и не имеют перспектив широкого применения. Кроме того, стоимость заводов по приготовлений эмульсий с годовой производительностью 20 тыс. т в России достигает 100 млрд. руб. в ценах 1996 г., а потому стоимость 1 т эмульсии по сырью составляет 1,6-1,9 млн. руб., а с уче-

том эксплуатационных затрат на завод и персонал, общая стоимость эмульсии будет составлять 4 млн. руб. и более, особенно, если завод будет работать с загрузкой по выпуску эмульсии меньше проектной. Велики и энергетические затраты на перевод, всей селитры в горячий раствор. Сказанное позволяет утверждать, что водо-содержащие гелеобразные ВВ по всем параметрам более экономичны и эффективны, чем эмульсионные.

Характеристики водосодержащих гелеобразных и эмульсионных ВВ приведены в табл. 4.1-4.5.

Таблица 4.1

## Горячельющиеся водосодержащие ВВ

Наименование показателя	Значение показателей для марки ГЛВСВ		
	ГЛТ-20 ТУ 84-03-50-77	ГЛТ-20М	ГЛТ-20ГК ТУ Гой КФАН-2-88
Селитра аммиачная	69,3 ± 3,0	65,3 ± 3,0	71,0 ± 3,0
Вода	7,7 ± 1,0	7,7 ± 1,0	
Тротил или гранулолол	20,0 ± 3,0	20,0 ± 3,0	20,0 ± 3,0
Карбамид (мочевина)	—	4,0 ± 1,0	
Кремниевый гель	—	—	9,0 ± 1,0
NaKMЦ или полиакриламид	3,0 ± 1,0	3,0 ± 1,0	—
Хромпик (бура)	0,015 ± 0,005 (0,09 ± 0,003)		—
Теплота взрыва, кДж/кг (ккал/кг)	3678 (877)	3670 (876)	4058 (968)
Скорость детонации, км/с	4,9-5,0	4,9-5,0	4,9-5,1
Плотность, г/см <sup>3</sup>	1,4-1,45	1,4-1,45	1,45-1,55

Таблица 4.2

## Карботолы

Наименование показателей	Значение показателей для марки карботола	
	ГЛ-10В	15Т
Селитра аммиачная	57,0 ± 3,0	67,0 ± 3,0
Карбамид	13,0 ± 2,0	13,0 ± 2,0

Окончание таблицы 4.2

1	2	3
Тротил	10,0 ± 2,0	15,0 ± 2,0
Порошок алюминиевый	15,0 ± 2,0	—
NaKMЦ	0,8 ± 1,5	0,8 ± 1,5
Вода	4,0 ± 1,0	4,0 ± 1,0
Теплота взрыва, кДж/кг	5684	3427
Скорость детонации, км/с	4,5-5,0	4,5-4,8
Плотность, г/см <sup>3</sup>	1,5-1,6	1,4-1,6

Ифзаниты

Таблица 4.3

Компоненты и показатели	Ифзаниты		
	Т-20	Т-60	Т-80
1	2	3	4
<b>Технический состав, % по весу</b>			
Селитра аммиачная гранулированная	40	40	40
Тротил гранулированный или чешуйчатый (чешуированный)	20	20	20
Раствор аммиачной селитры*	40	40	40
Концентрация раствора, %	64	80	86
Температура раствора, °С	20	60	80
Плотность раствора, г/см <sup>3</sup>	1,3	1,368	1,372
<b>Химический состав, % по весу</b>			
Селитра аммиачная	66	72	74
Тротил	20	20	20
Вода	14	8	6
<b>Характеристики</b>			
Кислородный баланс, %	-1,6	-0,4	0
Плотность, г/см <sup>3</sup>	1,34-	1,48-	1,52-
	1,38	1,52	1,56
Теплота взрыва, ккал/кг	794	905	930
Объемная энергия взрыва, ккал/л**	1080	1360	1440
Полная идеальная работа взрыва, ккал/кг	675	760	780
Объем газов, л/кг	937	920	913

Окончание таблицы 4.3

Скорость детонации, км/с	4,2-4,5	4,5-5,0	4,5-5,0
Критический диаметр, мм	100-120	100-110	90-100
Минимальный инициирующий импульс, ТНТ	40-60	30-50	30-50
* При необходимости в раствор вводят загуститель и структурообразователь			
** Определена как произведение полной идеальной работы на плотность ВВ			

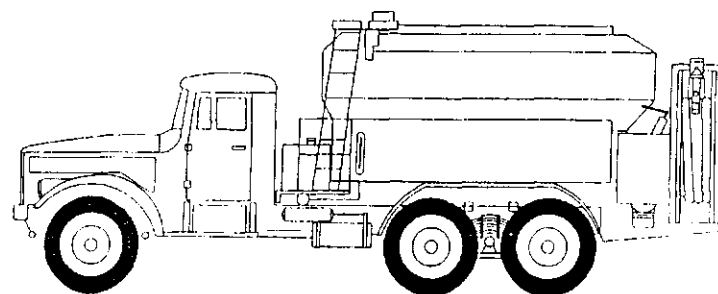


Рис. 4.15. Схема машины МЗВ-8 для приготовления и зарядки порэмита института НИПИГОРМАШ

Схема и технические данные отечественных транспортно-смесительно-зарядных машин для порэмитов и гранэмитов проектированных и выпущенных в опытных образцах институтами КНИИМ и НИПИГОРМАШ, приведены на рис. 4.15-4.18.

Таблица 4.4

## Эмульсионные ВВ

Характеристики	Россия		Швеция	Чехия	Финляндия	Испания		США Ирр-гель	
	Порэмиты	3	Эмулиты	Эмсиг	Кемит	Эмульсии	7	8	9
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1. Компонентный состав, %									
аммиачная селитра	62	59	62	67	65	28-59		62	77
натриевая селитра	16	15	16	12	—	9,6-11,5		12	5
(кальцевая селитра)	(16)	(15)	—	—	14	4,9-3,9		—	—
вода	15	14	15	12	13	8,6-11,9		16	9
масло	5	5	5,8	2	7	6,2		6	7
эмульгатор	2	2	1,1	3	—	1,3-2,3		1	1
алюминий	—	4	до 4,5	—	8	до 4,9		—	—
сенсбилизатор	0,5-1,5		2,5	3	3	2-3		3	1
2. Консистенция, упаковка	Пластичная льющаяся			Пластичная патроны		Пластичная льющаяся			

Е.Н. КУТЗОВ, Г.А. НИШЛАД

Окончание таблицы 4.4

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
3. Плотность заряда, г/см <sup>3</sup>	1,2-1,3	1,25-1,35	1,2-1,3		1,1-1,2	1,0-1,3	1,15-1,35	1,8-1,2	1,2
4. Теплота взрыва, ккал/кг	680	1040	692-1009		680	750-1000	735-1050	720	705
5. Скорость детонации, км/с	4,4-4,2	4,6-5,3	4,7-5,0		4,5-5,0	4,0-5,0	4,5-5,0	4,35-4,4	
6. Критический диаметр, мм	30-40	20-30	15-50		65	32-50	—	—	
7. Производительность, т/год	10000	25000	25000		2000	25000	25000	20000	
8. Масса эмульсии в СЗМ, т		8-10	7-8		Патроны	9,0	7-8	—	

ТЕХНОЛОГИЯ И БЕЗОПАСНОСТЬ  
ИЗГОТОВЛЕНИЯ И ПРИМЕНЕНИЯ ВВ НА ГОРНЫХ ПРЕДПРИЯТИЯХ

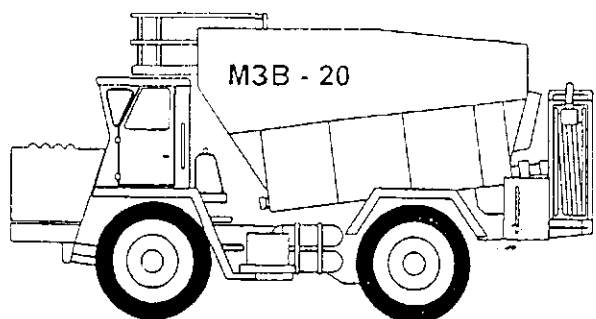


Рис. 4.16. Схема машины МЗВ-20 для приготовления и зарядки порэмита института НИПИГОРМАШ

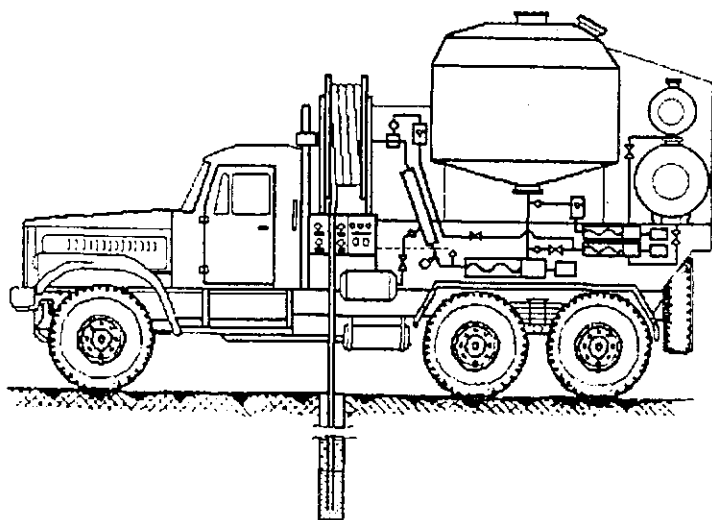


Рис. 4.17. Схема машины СЗМ-10 для приготовления и зарядки порэмита КНИИМ

Таблица 4.5

Гранэмиты

Наименование показателя	Гранэмит марки		
	И-30	И-50	И-70
1. Состав, % по массе			
игданит (ТУ-ГП-02)	30	50	70
эмульсия	70	50	30
2. Теплота взрыва, кДж/кг (ккал/кг)	3350 (800)	3490 (835)	3630 (865)
3. Удельный объем газов, л/кг	938	950	962
4. Скорость детонации в стальных трубах диаметром 50 мм: км/с	3,8-4,5	4,5-5,0	4÷4,5
5. Плотность заряжания, г/см <sup>3</sup>	1,3-1,35	1,35	1,25
6. Объемная концентрация энергии, кДж/дм <sup>3</sup>	4145	4630	4350
7. Кислородный баланс, %	-0,6	-0,4	-0,2
8. Водостойчивость (за 24 часа), кг/м <sup>2</sup>	0,8	1,25	3,5
9. Тротильный эквивалент по теплоте взрыва	0,8	0,83	0,86
10. Средства инициирования	2 шт Т-400Г	2 шт Т-400Г	2 шт Т-400Г

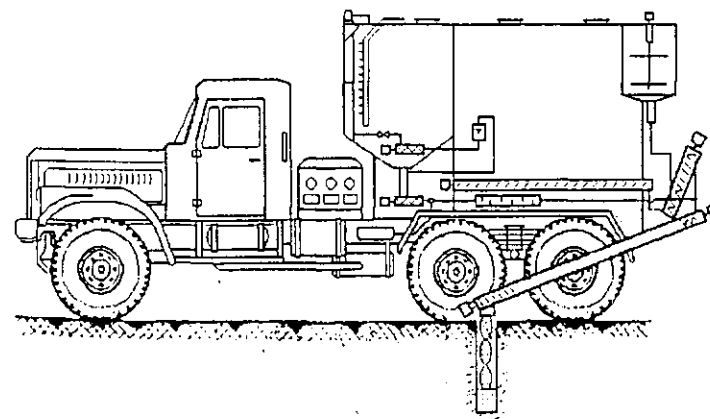


Рис. 4.18. Схема машины СЗМ-10Г для приготовления и зарядки порэмитов КНИИМ

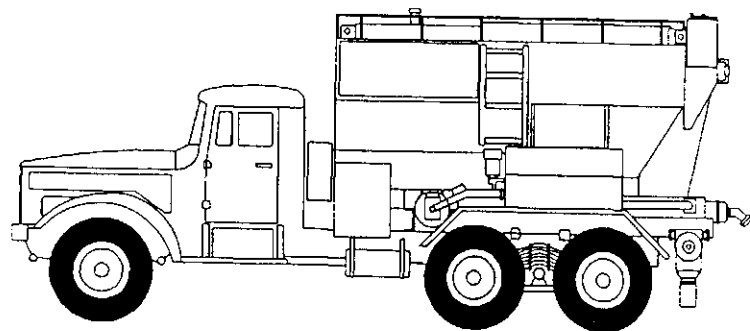


Рис. 4.19. Схема машины МЗГ-10 для приготовления и зарядки гранулитов НИПИГОРМАШ

### В. Разработка и внедрение акватаола Т-20ГК

В России наибольшее распространение для загущения водосодержащих взрывчатых веществ получили дорогостоящие и дефицитные синтетические полимеры: карбоксиметилцеллюлоза (КМЦ), полиакриламид (ПАА).

Применение КМЦ и ПАА в качестве загустителей в составе водосодержащих ВВ, для приготовления которых используется горячий раствор аммиачной селитры, неэффективно. При температуре 95-105°C эти загустители подвергаются деструкции и теряют свои загущающие свойства. Поэтому при зарядании водосодержащего ВВ в скважины вследствие различия в плотностях раствора аммиачной селитры и гранулозола и потери загустителем своих свойств, до кристаллизации заряда в скважине, происходит его расслоение, заряд ВВ теряет водостойчивость.

Это приводит к снижению в 1,5-2,0 раза энергетических характеристик ВВ и увеличению в 30-50 раз количества выделяющихся ядовитых газов.

В результате изучения поведения растворенного кремнезема, переходящего в раствор при кислотной обработке нефелинсодержащего сырья, впервые в мировой практике предложено для загущения водосодержащих ВВ использовать золь кремниевой кислоты, который при определенных условиях полимеризуется в гель с образованием прочных объемных структур за счет образования силоксановых связей Si-O-Si, придают гелю высокие водозащитные свойства.

Кремнегель, содержащий 4% SiO<sub>2</sub>, превосходит по предельному напряжению сдвига гель полиакриламида с содержанием 4% ПАА в 3,3 раза.

Образцы, загущенные кремнегелем, практически в два раза более устойчивы к выщелачиванию по сравнению с образцами, загущенными гелем ПАА.

Температура начала разложения аммиачной селитры, загущенной ПАА, равняется 267°C, а температура начала разложения аммиачной селитры с кремнегелем равняется 308°C.

Таким образом, кремнегель по загущающей способности, водозащитному действию и термостабильности значительно превосходит неорганические, загустители ПАА и КМЦ.

На основе неорганического загустителя-геля кремниевой кислоты — разработано новое водосодержащее взрывчатое вещество Акватаол Т-20ГК (табл. 4.6).

Кремнегель формирует заряд нормальной структуры с равномерно распределенным тротилом по всему объему загущенного раствора АС. В результате этого по всей колонке заряда ВВ наблюдается устойчивая детонация.

По результатам промышленных испытаний постановлением Госпроматомнадзора СССР № 05-1-40/281 от 10.07.91 Акватол Т-20ГК допущен к постоянному применению.

Таблица 4.6

Рецептура, основные взрывчатые характеристики Акватола Т-20ГК

Наименование показателей	Норма
<b>Состав</b>	
Аммиачная селитра	71,0 ± 3,0
Тротил	20,0 ± 3,0
Гель кремниевой кислоты	9,0 ± 1,0
<b>Расчетные</b>	
Теплота взрыва, МДж/кг (ккал/кг)	4,058 (970)
Объем газообразных продуктов взрыва, л/кг	950
Кислородный баланс, %	+ 0,5
Концентрация энергии, МДж/дм <sup>3</sup> (ккал/дм <sup>3</sup> ) при плотности 1,5 г/см <sup>3</sup>	6,087 (1455)
Количество ядовитых газов на условную окись углерода, л/кг	50
<b>Экспериментальные</b>	
Плотность, г/см <sup>3</sup>	1,45-1,55
Скорость детонации заряда в стальных оболочках $d = 100$ мм при плотности 1,5 г/см <sup>3</sup> , мм	100

На АО «Апатит» (Центральный рудник) спроектирован и построен стационарный пункт приготовления Акватола Т-20ГК (рис. 4.20; 4.21).

Стационарный пункт приготовления Акватола Т-20ГК АО «Апатит» включает: электропогрузчик ЭПВ-1,25, кантователи аммиачной селитры и гранулозола, растаривающая установка УРВ-2, аппараты для растворения аммиачной селитры (объем 12 м<sup>3</sup>).

Технологический процесс приготовления Акватола Т-20ГК состоит из следующих операций: подготовки компонентов, приготовления кремниевого геля, приготовления горячего раствора аммиачной селитры с загустителем, загрузки доставочно-зарядных машин и приготовления Акватола Т-20ГК.

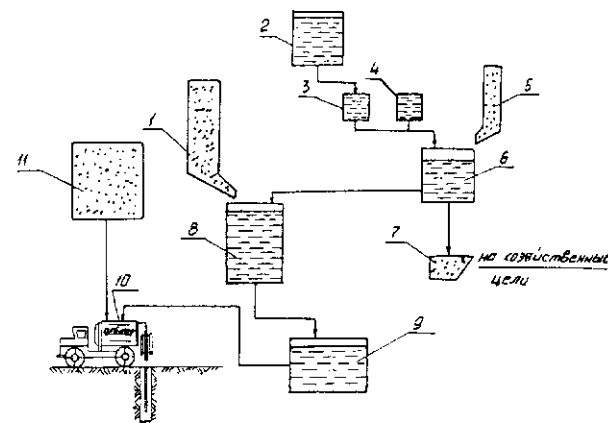


Рис. 4.20. Технологическая схема приготовления Акватола Т-20ГК в условиях АО «Апатит»:

1 — бункер-накопитель аммиачной селитры, 2 — емкость для хранения кислоты, 3 — дозатор кислоты; 4 — дозатор воды; 5 — бункер-накопитель НК (ХАФ); 6 — аппарат для приготовления кремниевого золя; 7 — бункер для складирования твердой фазы; 8 — аппарат для приготовления раствора окислителя; 9 — бак-накопитель; 10 — смесительно-зарядная машина Акватол-IV (Акватол-3); 11 — бункер с гранулозолом

На производство компоненты поступают в следующем виде:

- аммиачная селитра — в мешках (по 50 кг), мягких контейнерах (до 1000 кг), в ж/д вагонах;
- серная кислота в цистернах на автотранспорте;
- гранулозол — в мешках (по 40 кг) в ж/д вагонах;

- нефелиновый концентрат или хвосты апатито-нефелиновой флотации в контейнерах на автотранспорте.

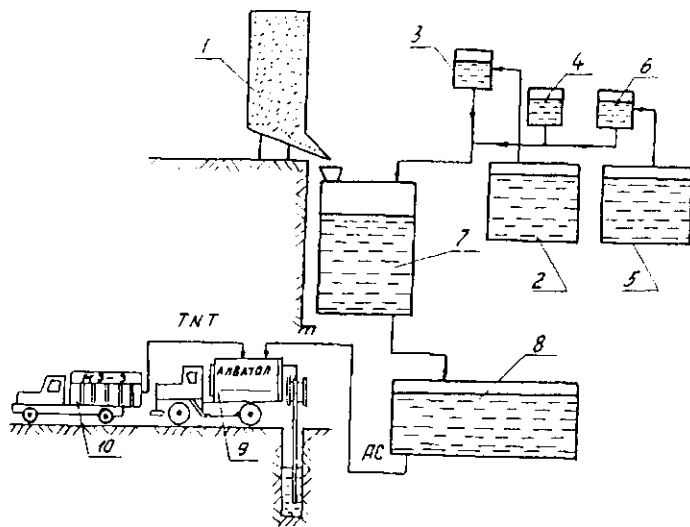


Рис. 4.21. Технологическая схема приготовления Акватола Т-20ГК в условиях АО "Олкон":

1 — бункер-накопитель аммиачной селитры; 2 — емкость для хранения жидкого стекла; 3 — дозатор жидкого стекла; 4 — дозатор кислоты; 5 — емкость для хранения нефелино содержащего сырья; 6 — дозатор кислоты; 7 — реактор для приготовления раствора окислителя; 8 — бак-накопитель; 9 — транспортно-смесительно-зарядная машина Акватол-IV (Акватол-3); 10 — зарядная машина МЗ-3

**Подготовка компонентов** (см.рис. 4.20) состоит в следующем: аммиачная селитра складирована в бункерах. Нефелиновый концентрат или хвосты апатито-нефелиновой флотации из контейнеров пересыпается в стационарный бункер. Серная кислота из передвижных емкостей перекачивается в стационарную емкость хра-

нения кислоты. Гранулированный тротил из ж/д вагонов перегружается в накопительную емкость II.

Кремниевый гель (загуститель) изготавливается на обогатительной фабрике (АНОФ-2) и доставляется на пункт автомобильным транспортом в стандартных цистернах.

Приготовление раствора загустителя осуществляется в стационарном аппарате 6.

В аппарат через мерники 3, 4 заливаются расчетные количества воды и кислоты, включается перемешивающее устройство и засыпается расчетное количество нефелино содержащего сырья 5.

Смешение реагентов осуществляются в течение 10-20 мин., и отстаивают в течение 15 мин. Кремниевый золь насосом подают в аппарат растворения аммиачной селитры 8.

Нерастворимый осадок из бункера перекачивается в хвостохранилища.

Расход реагентов для получения одной тонны кремниевое золя приведен в табл. 4.7

Таблица 4.7

Расход реагентов для получения 1 т кремниевое золя

Наименование	Норма, кг
Вода	753,8
Нефелиновый концентрат	128,4
Серная кислота	117,8

Приготовление горячего раствора аммиачной селитры с загустителем производят в обычных аппаратах растворения. В змеевики аппарата подается пар и включается мешалка, затем в аппарат порциями из бункера 8 подается аммиачная селитра. После загрузки каждой 1,5-2 т селитры температура раствора доводится до 80-95°C. Полнота растворения аммиачной селитры контро-

лируется визуально. Заданный объем готового окислителя определяется по уровню раствора в аппарате при помощи мерной линейки. Плотность раствора замеряется денсиметром при температуре 95°C. Общее время приготовления раствора окислителя до 1 ч. Готовый раствор окислителя перекачивается в бак-накопитель 9. Допустимое время хранения готового раствора окислителя 48 ч при температуре 80-90°C.

Загрузка емкости 10 транспортно-смесительно-зарядных машин на пункте производится раствором окислителя из бака-накопителя. затем в машину из бункера загружается тротил и машина следует на взрываеваемый блок, где производится зарядка скважин. Производительность пункта — 80 т/смену. Пункт обслуживают пять человек.

В период с 1989 по 1996 г. для отбойки обводненных руд и пород на ОАО «Олкон» приготовлено более 25 т. Акватола Т-2ОГК с применением кремниевого золя на основе нефелинсодержащего сырья.

Опыт отбойки сульфидных руд (серно-колчеданная, медная сульфидная, медно-цинковая сульфидная) показал, что при определенных условиях в скважинах возникает самопроизвольная химическая реакция между аммиачной селитрой, входящей в состав простейших и водосодержащих ВВ, и рудами с выделением тепла. Это может послужить причиной преждевременной детонации зарядов и привести к тяжелым несчастным случаям.

Безопасность применения водосодержащих ВВ в железных рудах может быть повышена путем введения в состав взрывчатых смесей соды, мела, карбоната кальция, карбамида и других ингибиторов. Наиболее эффективным ингибитором реакции взаимодействия раствора аммиачной селитры с пиритом является карбамид. Однако введение в раствор аммиачной селитры карбамида

приводит к ухудшению взрывчатых характеристик акватолов:

- карбамид образует с аммиачной селитрой низкоплавкие комплексы, в результате чего резко снижается вязкость раствора окислителя и температура его кристаллизации. Поэтому при зарядании акватола с добавкой карбамида вследствие различия в плотностях гранулоатола и раствора окислителя, а также понижения его вязкости и температуры кристаллизации, до кристаллизации заряда в скважине происходит его расслоение;
- повышается опасность обращения с раствором окислителя, так как аммиачная селитра с карбамидом представляет собой взрывчатую смесь.

Для отбойки железных руд, содержащих примеси сульфидов, разработана модификация Акватола Т-2ОГК, в котором в качестве загустителя применяется кремниевый золь, получаемый из жидкого стекла. Применение жидкого стекла позволяет регулировать значение водородного показателя раствора окислителя и исключить реакцию взаимодействия пирита и аммиачной селитры.

Анализ результатов массовых взрывов на ОАО «Олкон» с применением модифицированного акватола Т-2ОГК в сульфидосодержащих рудах показал, что в скважинах не наблюдается реакций взаимодействия между пиритовым шламом и раствором аммиачной селитры.

На ОАО «Олкон» спроектирован и построен стационарный пункт изготовления Акватола Т-2ОГК для отбойки железных руд и пород, содержащих примеси сульфидов. Пункт включает следующее оборудование: бункер-дозатор аммиачной селитры (8,6 т), емкость для жидкого стекла (объем 5 м<sup>3</sup>), емкость для серной кислоты (объем 4 м<sup>3</sup>), аппарат для растворения аммиачной селитры (объем 12 м<sup>3</sup>).

Аммиачная селитра транспортируется из ж/д вагонов автотранспортом на пункт приготовления акватаола и складировается в бункерах (см. рис. 4.21).

Жидкое стекло из ж/д цистерн перекачивается в контейнеры и транспортируется на пункт приготовления акватаола, где перекачивается в накопительную емкость 2.

Серная кислота из цистерн перекачивается в накопительную емкость 5.

Гранулированный тротил на складе ВВ перегружается в зарядную машину МЗ-3 или подобную.

Приготовление раствора загустителя осуществляется в аппарате растворения селитры 7. Сначала в аппарат через мерник 4 заливается необходимое количество воды, а затем в аппарат растворения селитры через мерник 6 заливается серная кислота.

После этого через мерник 3 при непрерывном перемешивании воды и кислоты в течение 5-10 мин заливается жидкое стекло. Расходные нормы реагентов для получения одной тонны кремниевого золя приведены в табл. 4.8.

Таблица 4.8

Расход реагентов для получения 1 т кремниевого золя

Наименование	Норма, кг
Вода	781,05
Жидкое стекло	193,05
Серная кислота	25,9

После завершения приготовления золя в теплообменник аппарата растворения подается пар для нагревания раствора золя до температуры 75-80°C, а затем из бункера 1 порциями 1,5-2,0 т подается аммиачная селитра. Следующая порция селитры подается при достижении температуры раствора 80-95°C. После растворения всей аммиачной селитры с помощью жидкого стекла

производится корректировка рН раствора до величины  $5,2 \pm 0,4$ . Общее время приготовления раствора окислителя 1 ч 20 мин. Горячий раствор аммиачной селитры перекачивается в бак-накопитель 8. Время хранения готового раствора окислителя 48 ч при температуре 80-90°C.

Загрузка емкости 9 зарядной машины производится из любого аппарата растворения 7 или из бака-накопителя 8 центробежными насосами. После загрузки окислителя машина «Акватаол» следует к месту загрузки гранулозола. Из зарядной машины 10 гранулозол подается в машину «Акватаол». Одновременно с подачей гранулозола включается перемешивающее устройство. Общее время перемешивания составляет 30 мин. После приготовления Акватаола Т-20ГК он с помощью насоса заряжается в скважины.

Производительность стационарного пункта — 80 т/см. Пункт обслуживает 4 человека.

В период с 1989 по 1996 г. для отбойки железных руд с примесями сульфидов приготовлено более 70 тыс. т Акватаола Т-20ГК с применением кремниевого золя на основе жидкого стекла.

Технико-экономические показатели применения Акватаола Т-20ГК приведены в табл. 4.9.

Таблица 4.9

Технико-экономические показатели применения  
Акватаола Т-20ГК

Показатели	Тип взрывчатого вещества	
	тротил	акватаол Т-20ГК
Удельный расход ВВ, кг/м <sup>3</sup>	0,86	1,21
Затраты на бурение, тыс. руб/м <sup>3</sup>	1,85	1,55
Затраты на взрывание, тыс. руб/м <sup>3</sup>	5,66	2,50
Суммарные затраты, тыс. руб/м <sup>3</sup>	7,51	4,05
Экономия, тыс. руб/м <sup>3</sup>	—	3,46

## 5. Технологическая безопасность взрывчатых материалов

### 5.1. Общие и исторические сведения

Вся история человечества немыслима без применения «огня».

Огонь является источником тепла, обогревающего людей, и источником энергии, при помощи которой человек готовит себе пищу, варит металл, создает уникальные творения природы в виде гончарных изделий, красок и много других интересных и полезных для жизни человечества людей.

Неразрывно с понятием огонь связано слово взрыв и в нашем представлении взрывчатые вещества только орудия войны. Патроны, гранаты, бомбы, одним словом, это только смерть и разрушение, т.е. в царстве всеобщего мира им не должно быть места. Однако это не верно. Ни одно вещество не может быть только вредным или полезным — все зависит от того какое применение ему найдет человек. Из свинца льют пули и делают типографский шрифт, из металла изготавливают средства передвижения, железные дороги, но производят и вооружение. Ядерные боеприпасы — злейшее изобретение современного человечества и источник неиссякаемой электрической энергии для электростанций и современных океанских лайнеров. Взрывчатые вещества, как и человек, могут носить и штатскую и военную одежду, и исходя из самой сущности человечества, главное их назначение — созидание а не разрушение. Взрывчатые вещества выделяют в восемь-десять раз меньше энергии, чем сгорание одинаковой с ними массы угля, мазута и других известных энергетических источников, приме-

няемых в жизни, но их энергия освобождается в миллионы раз быстрее, чем при обычном горении, т.е. небольшой заряд ВВ в несколько сот граммов равен по мощности гигантской электро-станции. В месте взрыва давление достигает нескольких сот тысяч атмосфер, а температура нескольких тысяч градусов. Какой материал может противостоять такому натиску? Идея использования могучей силы взрыва разрабатывалась многими выдающимися умами человечества и продолжает жить до настоящего времени. Однако победы по укрощению и управлению взрывом одержаны не в один день и дались дорогой ценой. Ф. Энгельс писал, что «изобретение пороха и применение его для метания тяжелых тел в определенном направлении, это теперь признается всеми, принадлежит восточным странам. Мы не имеем сведений, когда стала известна особая смесь селитры, серы и древесного угля, взрывчатые свойства которой придали ей также огромное значение». Это изобретение по праву ставится в один ряд с такими основополагающими для развития человечества изобретениями, как книгопечатание и компас. История не сохранила нам имя одного человека, давшего это изобретение, да, очевидно, это был не один человек, сведения о создании «огнедышащей силы» дошли до нас и из Китая, и из Византии».

Так, из летописи известно, что при походе князя Игоря на Византию его флот беспрепятственно вошел в Босфор, но затем был уничтожен при помощи т.н. греческого огня, который выбрасывался на значительное расстояние из специальных устройств, т.е. прообразов наших современных огнеметов.

В Европе (1260 г.) порох появился значительно позже, чем в Китае и в арабских странах, и пришел он через Византию, когда была опубликована книга Марка Грека «Книга огней», — для сжигания врагов. Вот тогда и по-

явился всем известный дымный порох, прослуживший многие века добрым и злым делам. Чаще всего честь изобретения огнестрельного оружия и пороха в Европе приписывают немецкому монаху Бертольду Шварцу, жившему в середине XIV столетия во Фрайбурге. Судя по многочисленным историческим свидетельствам, Шварц – личность историческая и он безусловно имел отношение к созданию огнестрельного оружия и улучшению качества черного пороха, но все-таки такое изобретение не могло быть сделано одним человеком — оно безусловно является плодом коллективного разума. Применение пороха и огнестрельного оружия на Руси связано с Д. Донским в 1382 г через два года после Куликова поля татары напали на Москву и тогда впервые было применено огнестрельное оружие (ТЮФЯКИ) — Туфенг — ружье (турецкое) образец такого оружия, которому 600 лет, хранится в Арт. музее в С.-Петербурге. Вначале в Россию порох привозили из-за, границы, но очень скоро его начали делать сами, причем, надо сказать, что порох вначале на Руси называли «зелье», по образу и подобию всяких чудодейственных материалов и прежде всего лекарств. Развитие пороходелия привело к тому, что в 1422 г от порохового пожара сгорела вся столица. Особо мощный толчок выделка пороха получила при Иване Грозном и главным образом для применения его в борьбе с Казанским ханством. К 1547 г было накоплено очень большое количество пороха, и спустя более ста лет произошел сильный пороховой пожар, уничтоживший все деревянные постройки столицы. Страна смогла оправиться от этого пожара только через пять лет и в 1552 г знаменитые минные подкопы решили участь Казани. Всего было взорвано по тем временам гигантское количество пороха, около пяти тонн. Разви-

тие пороходелия и вооружения на Руси потребовало определенных организационных мер, в 1577 г было создано первое официальное учреждение «Пушкарский приказ». Изготовление пороха и ВВ как в далекие времена, так и в настоящее время, дело сложное и опасное, поэтому требует не только четкости и аккуратности, но и больших знаний свойств материала, особенностей его переработки. Первый государственный пороховой завод был построен Петром I в 1712 г на окраине Петербурга на Зеленой (теперь Б. Зеленина) улице, который существовал 90 лет и был закрыт в 1802 г. За период существования на нем произошло 92 взрыва и все они практически были связаны с недостаточным вниманием к вопросам техники безопасности, да и отчасти с незнанием тех или иных особенностей пороховых составов и технологических приемов работы.

Относительный застой в мировой промышленности в XVII–XVIII столетии сменился ее бурным развитием в конце XVIII – начале XIX столетия, что потребовало более мощных ВВ и порохов, чем старый много веков служивший черный порох. В буквальном смысле революцию в промышленности ВВ и порохов сделали ряд открытий в середине XIX в В 1832 г. французским ботаником Бракоино была открыта нитроцеллюлоза. В 1846 году итальянским ученым Соберерро был синтезирован нитроглицерин. В лаборатории динамитной фабрики Авильяно (Турин) в склянке хранится до сих пор нитроглицерин, синтезированный лично Соберерро. В том же 1846 г. проф. Шенбейном был получен пироксилин или, как он его назвал, «порохострельная бумага». Безусловно потребовалось еще несколько десятков лет, чтобы эти изобретения приобрели практическую значимость и другие ученые завершили начатое. В этом отношении

неоценимый вклад в практическое применение современных ВВ и порохов внес шведский ученый Альфред Нобель. Вторая половина XIX столетия дала целую плеяду замечательных ученых, внесших неоценимый вклад в развитие ВВ — наши соотечественники Зинин, Петрушевский, Менделеев, англичанин Абель, французы Бертло, Вьель.

В 1899 г. был открыт тринитротолуол (ТНТ) или, как его в обиходе называют «Тол». Это основное ВВ как в военном деле, так и в горнодобывающей промышленности, не потерявшее значение до настоящего времени. Более того, необходимо отметить, что оно является необходимой составной частью практически всех современных взрывчатых составов, благодаря его высокой безопасности, наряду с достаточно высокими энергетическими показателями, и физико-химическими свойствами. Тротиловое производство во вторую мировую войну в Германии составило 190 тыс. т, в Англии 180 тыс. т. Если оценить масштабы производства ВВ и порохов в целом, то только в Германии в 1944 г было изготовлено 495 тыс. т ВВ и около 260 тыс. т пороха. В США за время второй мировой войны изготовлено более 300 млн. снарядов, более 350 млн. мин, около 6 млн. т авиабомб. Сколько в настоящее время ВВ и порохов в мире и, в частности в СНГ, не поддается подсчету.

Потребление ВВ в мирных целях растет из года в год и в настоящее время их используется для этой цели несколько миллионов тонн в год. Вот таковы последствия замечательных открытий XIX столетия, положивших начало развитию современных видов ВВ и порохов.

Безусловно, современное развитие ВВ и порохов немыслимо без современного оборудования по их производству. Разве можно сравнить современные гибкие ав-

томатизированные производства с оборудованием первых заводов Нобеля по производству динамитов, когда даже такая взрывоопасная операция, как нитрация, проводилась вручную, с производством нитроглицерина, когда управление процесса нитрации осуществляется с помощью ЭВМ, когда нитрация и другие фазы производства тротила производятся дистанционным способом. Однако для того, чтобы организовать безопасный технологический процесс производства или транспортирования ВМ, необходимо знать их свойства, знать условия причин случайных загораний и взрывов, чтобы при организации производства избежать таких явлений.

Надо сказать, что нет такой области промышленности, где не применялись бы ВВ — геология, горнодобывающая промышленность, резка металлов, упрочнение металлов, получение искусственных алмазов и т.п.

До последнего времени на территории СССР в народном хозяйстве использовалось около 2 млн. т ВМ в год. Исторически сложившиеся районы изготовления ВВ и места их потребления, удаленные друг от друга на сотни и тысячи км, приводят к необходимости их транспортирования, в том числе и за рубеж. При этом нужно учитывать, что основные перевалочные пункты обязательно примыкают к густонаселенным районам и поэтому вопросы безопасности являются приоритетными. Если по данным ООН 50% от всех мировых перевозок составляют опасные грузы, то 20% от них — это опасные грузы I-го класса, т.е. ВМ. За последние 15 лет на территории бывшего СССР известны 25 случаев аварий с железнодорожными вагонами, перевозившими ВМ, а два из них закончились трагически. Это 1988 г. в Арзамасе и Свердловске (Екатеринбурге). В первом случае одновременно взорвалось около 140 т ВВ, во втором около

95 тонн. При этом погибло 96 человек, более 800 получили ранения. Суммарные материальные потери в современных ценах составили триллионы рублей. Справедливости ради можно сказать, что подобные трагедии могут происходить не только с ВМ, но и другими потенциально опасными материалами, например газозвоздушные смеси. Достаточно вспомнить трагедию Уфы, постоянно чередующиеся взрывы метано-воздушных смесей в угольных шахтах, например шахты им. Шевякова, где сразу погибло 23 шахтера, тела которых не погребены до настоящего времени. Более того, по оценкам академика Легасова, в Москве есть 10-12 объектов, на которых при неблагоприятных обстоятельствах могут возникнуть аварии, сопоставимые с Чернобылем.

Таким образом, уделяя внимание оценкам причин возникновения и развития аварий с ВМ, мы в полной мере можем перенести их на другие материалы. В настоящее время, используя накопленный опыт, ученые ведут работы в интересах угольной и нефтехимической промышленности.

### **5.2. Понятия и критерии технологической безопасности производства и применения ВМ**

В передовых странах мира вопросам безопасности придается большое значение (в том числе для защиты техносферы) и на эти цели затрачиваются громадные средства. Так, по данным Юнеско, в Нидерландах на безопасность техносферы ежегодно затрачивается около 50 млрд. долларов. В США после выхода закона о безопасности труда только в химической промышленности в течение нескольких лет затрачивалось до 2 млрд. долларов на улучшение безопасных условий труда. Во многих странах Европы (Франция, Голландия, Германия и др.)

приоритет в развитии промышленности прежде всего отдается безопасности с очень широкими правами экспертизы. В этих странах созданы специализированные национальные институты безопасности. На проведение НИР и научно-технической экспертизы выделяются значительные средства. Так, например, только оценка уровня риска одного проекта составляет 1-2 млн. долларов. Проект по оценке пожаровзрывобезопасности метровагонов для их движения по туннелю под Ла-Маншем был оценен в 20 млн. долларов. Такой подход привел к тому, что, начиная с 80-х годов, в Европе количество аварий уменьшилось в шесть раз, а убытки в 20 раз.

Как научное направление, технологическая безопасность начала развиваться с начала 60-х годов, когда правительством перед группой ученых во главе с И.Я. Петровским (Л.В. Волков, Г.А. Нишпал, М.Р. Овсищев и др.) была поставлена задача разобраться в причинах серии взрывов, имевших место при производстве новых ВМ. Опубликованные ранее классические работы К.К. Андреева, А.Ф. Беляева, Ф.А. Баума, Б.И. Шехтера, В.К. Боболева, Н.А. Холево, И.В. Тишунина, Б.П. Жукова, Е.Ю. Орловой освещали только какую-либо одну сторону свойств ВМ, т.е. либо физику горения и взрыва, либо химию и технологию ВМ. Технологическая безопасность, базируясь на этих работах возникла и развивалась одновременно в обоих направлениях. Начиная с шестидесятых годов в области технологической безопасности было проведено значительное количество исследований и результаты этих исследований, выполненных И.Я. Петровским, Л.В. Волковым, Б.С. Милалевым, Б.Н. Лапшиным, Б.В. Соколовым, Ю.Г. Бывалиным, В.Г. Базаровой, Ю.Е. Зайчиковым, Л.И. Левиным, В.С. Ибатуллиним, В.Я. Копытовым, И.В. Мильчаковым, И.Д. Мауринной, Ю.В. Звонаревым, Г.Т. Афанасьевым,

вым, С.М. Муратовым, А.Н. Осавчуком, легли в основу понятия технологическая безопасность, которую можно определить как комплекс нормативов и правил, а также исходных данных для проектирования технологического оборудования, построения безопасных технологических процессов и защитных сооружений для обслуживающего персонала и населения вне санитарных зон предприятия.

Что же включает в себя понятие пожаровзрывозащита зданий, сооружений, оборудования, транспортных средств, а также защита обслуживающего персонала и населения, находящегося вне санитарных зон.

Прежде всего, необходимо четко разделить понятия частоты и последствия аварии. Например, в производство порохов частота вспышек на вальцах на порядок превышает аварийные случаи на фазе прессования. Однако в первом случае потери минимальны и достаточно просто осуществить защиту обслуживающего персонала. Что касается фазы прессования, то авария всегда связана с громадными потерями и иногда с травмами людей. Можно привести примеры и из обыденной жизни, например, перегорание электрической лампочки вызовет только неудобство. А загорание за счет короткого замыкания электропроводки может вызвать сильный пожар. Последствия аварии могут быть различными и безусловно здесь особое место занимают ВМ и другие потенциально опасные материалы, например, исходные вещества для лекарственных препаратов. Какие же могут быть критерии оценки при организации пожаровзрывозащиты при переработке, хранении и транспортировании ВМ. Выбор критерия зависит от многочисленных факторов, но прежде всего от технического уровня и материальных ресурсов.

Можно назвать по крайней мере три основных критерия:

- недопущение загорания,
- недопущение массового пожара,
- недопущение сильных взрывов, приводящих к значительным разрушениям.

Рассмотрим сказанное на примере организации перевозок ВМ в ж/д вагоне.

Если исходить из первого критерия, то его выбор прежде всего связан с тем, можно ли исключить аварию на ж/д транспорте вообще? Очевидно, этого сделать нельзя, статистика показывает, что вероятность аварии на ж/д транспорте менее 1/10, т.е. имеет конечную величину. Можно ли исходить из критерия №2 — предупреждение сильного пожара. Теоретически можно, если обеспечить систему быстродействующих датчиков обнаружения пламени и систему пожароподавления. Однако мы находимся на такой стадии технического развития и особенно затрат материальных средств, что реально такой проект на данном этапе развития не осуществим.

Критерий №3. Недопущение сильных взрывов при определенных организационно-технических мероприятиях и сравнительно небольших затратах можно осуществить. Для этого нужно только найти оптимальные условия размещения груза, его упаковки, элементов организации движения транспортного средства.

Таким образом, выбор каждого из названных критериев обуславливается рядом показателей, связанных прежде всего с техническим уровнем, т.е. уровнем наших знаний и экономической целесообразностью.

В стратегии обеспечения безопасности надо исходить из уровня риска, т.е. частоты события и его последствий, так как средства на обеспечение безопасности можно и должно затрачивать до того момента, пока эти средства обеспечивают снижение потерь при авариях.

В целом, комплекс мероприятий по обеспечению безопасности можно назвать технологической или эксплуатационной безопасностью.

Ее можно определить как комплекс методов исследования, направленных на разработку правил, мероприятий, рекомендаций, исходных данных по созданию материалов, проектированию оборудования, зданий и защитных сооружений. В основе этого направления лежит изучение взрывчатых характеристик материалов, их компонентов (сырья) и полуфабрикатов, условий возбуждения начального очага загорания и механизма развития взрывных процессов, определение параметров поражающих факторов при возникновении аварийных ситуаций.

Главной задачей нашего курса познакомиться с явлениями взрыва и горения. Ознакомиться с основными явлениями, могущими возникнуть при загорании, выявить причины возможных взрывов, для того чтобы учесть их в своей практической деятельности при конструировании и эксплуатации оборудования, применяемого в производстве ВВ и порохов, т.е. взрывом надо управлять, а для этого нужно знать его закономерности.

В общем виде взрыв можно представить как сумму механической работы сжатых газов, образовавшихся при чрезвычайно быстром химическом превращении вещества, т.е. взрыв есть не что иное, как работа сжатых газов при беспредельном адиабатическом расширении от начального своего состояния. В целом ВВ должно обладать тремя основными факторами, характерными для химических соединений, способных к взрывчатому превращению:

- эзотермичностью процесса;
- газообразованием;

- высокой скоростью процесса.

**Эзотермичность процесса.** Очевидно, что взрывчатое превращение — процесс самораспространяющийся, а этот процесс возможен только в том случае, когда в его ходе выделяется определенное количество тепла. В противном случае необходим посторонний источник энергии. Для известных взрывчатых систем теплота взрывчатого превращения составляет 300-3000 ккал/кг.

**Газообразование.** Явление не может иметь взрывного характера, если при разложении вещества не происходит газообразование, которое является рабочим телом. Для известных взрывчатых систем количество выделяемых газов составляет 400-1000 л/кг вещества.

**Высокая скорость процесса.** Эта величина является характерной и относительной особенностью взрывчатых систем, которая определяет плотность энергии. В свою очередь плотность энергии определяет области применения того или иного источника. При горении и взрыве ВМ плотность энергии может составлять величину 4-4000 ккал/л. При этом нижняя граница относится к процессам горения и верхняя к детонации. В соответствии с плотностью энергии линейные скорости процессов взрывчатого превращения могут колебаться в пределах от мм/с до км/с. Таким образом, из сказанного следует, что для взрывчатых систем, в том числе и ВМ, существуют два основных вида взрывчатого превращения: горение, детонация.

**Горение** — самораспространяющийся процессе химического превращения вещества. Распространение химической реакции по веществу при горении обеспечивается теплопроводностью. Выделяющееся при химической реакции тепло нагревает следующий слой. Каждое вещество, в частности топливо, имеет свою строго

определенную скорость горения. Под скоростью горения понимают линейную скорость распространения фронта реакции в глубь вещества. Скорость горения ВМ с увеличением давления возрастает по определенному закону, зависящему от его индивидуальных свойств. Различают нормальное послойное горение и «взрывное горение». При нормальном послойном горении топливо сгорает равномерными параллельными слоями, со скоростями от долей мм/с до нескольких мм/с.

Например, плотные шашки топлив обычно имеют скорости горения при давлении 40 атм, равные 6-10 мм/с.

Если вещество пористое или порошкообразное, то при повышении давления выше определенной критической величины газообразные горячие продукты горения могут проникать в глубь вещества и поджигать его уже за фронтом горения, т.е. горение будет протекать не послойно, параллельными слоями, а охватывать какой-то объем. Скорость горения вещества при этом резко возрастает до десятков и даже сотен м/с, такой вид горения обычно называют «взрывным горением» (конвективное горение, дефлаграция).

В природе существуют различные виды взрывного горения, но наиболее распространенные из них является т.н. фильтрационное (конвективное) горение. Этот вид горения происходит тогда, когда проникновение газов внутрь вещества, например, шашки топлива, происходит только при наличии внешнего по отношению к горящему веществу давления (горение в замкнутом объеме, в камере ракетного двигателя и т.п.). Более развитой формой взрывного горения является такой процесс, когда становится возможно его самораспространение по веществу, т.е. для его протекания необязательно наличие внешнего давления. Необходим только местный очаг высокого давления для начала процесса, в дальнейшем

роль оболочки выполняет само вещество. В этом случае сгорание вещества происходит за доли секунды и оно превращается в газы, практически сжатые в объеме вещества, и такой вид горения называют «объемным горением».

Детонация — самораспространяющийся процесс чрезвычайно быстрого химического превращения вещества. Детонация обеспечивается распространением по веществу механической волны с очень крутым фронтом — ударной волны, которая сжимает вещество до очень высоких давлений (порядков десятков и сотен тысяч атмосфер) и за счет этого выделяется очень большое количество тепла, в результате чего происходит химическая реакция. Выделяющаяся энергия при этом поддерживает параметры ударной волны и она становится стационарной. Такая волна называется детонационной. Детонация вещества в зависимости от его индивидуальных свойств, плотности и других факторов может распространяться со скоростями от десятых долей км/с до нескольких км/с. Например, шашки ВМ имеют скорость детонации 5-7 км/с. Весь процесс детонации ВВ протекает за миллионные доли секунды. Превращение в газы исходного вещества при детонации происходит в собственном объеме, при этом плотность конечных газообразных продуктов в момент протекания детонационной реакции в 1,5-2 раза выше, чем исходного вещества.

Из сказанного ясно видно, что в одной и той же взрывчатой системе можно возбудить процессы горения или детонации в зависимости от подбора инициатора, физического состояния вещества и ряда других внешних факторов.

Знание условий возбуждения и протекания взрывных процессов в ВМ чрезвычайно важно с точки зрения не-

допустимости несанкционированного возникновения любых взрывных процессов, особенно детонации. Очевидно, что даже загорание на отдельной фазе технологического потока чревато тяжелыми последствиями, так как современное производство ВВ отличается многотоннажностью и крупногабаритностью единичных изделий. По своему служебному назначению все взрывчатые системы делятся на четыре группы.

1. Иницирующие взрывчатые вещества (ИВВ).

2. Бризантные взрывчатые вещества (БВВ), типичные представители: тротил, гексоген.

3. Метательные ВВ. Ракетные топлива и пороха (ТРТ) СТРТ, РБП, пороха ДРП пироксилиновые.

4. Пиротехнические смеси.

Производство каждого из классов названных ВВ имеет свои специфические особенности, однако авария в любом химико-технологическом процессе, в том числе и при производстве ВВ происходит в определенной последовательности и имеет развитие, зависящее от ряда условий. Для наглядности представим развитие аварии в виде схемы (табл 5.1).

Таблица 5.1

Последовательность	Необходимые условия
Начальный очаг загорания	Удар, трение, тепловой нагрев, разряд статического электричества и другие источники энергии
Горение	Обеспечение критических параметров горения ( $P$ , $Q$ , $U$ ) в зоне начального очага
Переход во взрыв или детонацию	Образование ударной волны или сжатых газов ( $d_p/d_t > 0$ , $d_p/d_t > 0$ )
Детонация	Ударная волна с параметрами выше критических. Заряд диаметром выше критического ( $d_{кр}$ ) и ( $P_{кр}$ )

Авария развивается в соответствии с определенными стадиями, которые зависят не только от свойств самого материала, но и от внешних факторов (конструкций аппаратов, построения технологического процесса). В связи с этим при обосновании безопасности производства конкретного продукта необходимо знание комплекса его взрывчатых свойств в различном физическом состоянии и влияния на эти свойства конструкций аппаратов и технологических параметров. Как свидетельствует многолетняя статистика оценки аварий, имевших место при производстве и эксплуатации ТРТ, основными причинами, приведшими к ним, являются.

1. Ошибки обслуживающего персонала — 30% — возросло вдвое (60-70%)
2. Неудовлетворительное состояние оборудования — 30%.
3. Конструктивное несовершенство оборудования — 20%.
4. Неучтение и незнание свойств перерабатываемых материалов — 20%

Непосредственные причины, вызывающие начальный очаг загорания, распределяется следующим образом.

1. Механические воздействия — 65-90%.
2. Разряд статического электричества — 5-30%.
3. Термическое разложение в результате теплового нагрева — 5-10%.

С целью исключения или значительного сокращения аварийных ситуаций в производстве от указанных причин все используемые в производстве ВМ оцениваются по комплексу свойств, называемых показателями взрывоопасности. Эти показатели являются общими для всех видов ВВ, но в некоторых случаях являются характер-

допустимости несанкционированного возникновения любых взрывных процессов, особенно детонации. Очевидно, что даже загорание на отдельной фазе технологического потока чревато тяжелыми последствиями, так как современное производство ВВ отличается многотоннажностью и крупногабаритностью единичных изделий. По своему служебному назначению все взрывчатые системы делятся на четыре группы.

1. Иницирующие взрывчатые вещества (ИВВ).

2. Бризантные взрывчатые вещества (БВВ), типичные представители: тротил, гексоген.

3. Метательные ВВ. Ракетные топлива и пороха (ТРТ) СТРТ, РБП, пороха ДРП пироксилиновые.

4. Пиротехнические смеси.

Производство каждого из классов названных ВВ имеет свои специфические особенности, однако авария в любом химико-технологическом процессе, в том числе и при производстве ВВ происходит в определенной последовательности и имеет развитие, зависящее от ряда условий. Для наглядности представим развитие аварии в виде схемы (табл 5.1).

Таблица 5.1

Последовательность	Необходимые условия
Начальный очаг загорания	Удар, трение, тепловой нагрев, разряд статического электричества и другие источники энергии
Горение	Обеспечение критических параметров горения ( $P$ , $Q$ , $U$ ) в зоне начального очага
Переход во взрыв или детонацию	Образование ударной волны или сжатых газов ( $d_p/d_t > 0$ , $d_p/d_l > 0$ )
Детонация	Ударная волна с параметрами выше критических. Заряд диаметром выше критического ( $d_{кр}$ ) и ( $P_{кр}$ )

Авария развивается в соответствии с определенными стадиями, которые зависят не только от свойств самого материала, но и от внешних факторов (конструкций аппаратов, построения технологического процесса). В связи с этим при обосновании безопасности производства конкретного продукта необходимо знание комплекса его взрывчатых свойств в различном физическом состоянии и влияния на эти свойства конструкций аппаратов и технологических параметров. Как свидетельствует многолетняя статистика оценки аварий, имевших место при производстве и эксплуатации ТРТ, основными причинами, приведшими к ним, являются.

1. Ошибки обслуживающего персонала — 30% — возросло вдвое (60-70%)

2. Неудовлетворительное состояние оборудования — 30%.

3. Конструктивное несовершенство оборудования — 20%.

4. Неучтение и незнание свойств перерабатываемых материалов — 20%

Непосредственные причины, вызывающие начальный очаг загорания, распределяется следующим образом.

1. Механические воздействия — 65-90%.

2. Разряд статического электричества — 5-30%.

3. Термическое разложение в результате теплового нагрева — 5-10%.

С целью исключения или значительного сокращения аварийных ситуаций в производстве от указанных причин все используемые в производстве ВМ оцениваются по комплексу свойств, называемых показателями взрывоопасности. Эти показатели являются общими для всех видов ВВ, но в некоторых случаях являются характер-

ными только для одного класса ВМ. Для того чтобы произошел взрыв или воспламенение, необходимо сообщить ВМ некоторое количество энергии, способное вызвать начало взрывчатого превращения. Это внешнее воздействие носит название начального импульса.

Минимальное количество энергии начального импульса, достаточное для возбуждения взрывчатого превращения, служит мерой чувствительности ВМ к начальному импульсу данного вида.

Различают виды простого начального импульса, к которым относятся чувствительность к механическим воздействиям, тепловым воздействиям, искровому разряду и начальный импульс энергии другого ВВ.

Под чувствительностью вещества к механическим воздействиям понимают его способность разогреваться в локальных точках до температуры вспышки при переходе механической энергии удара или трения в теплоту.

Температурой вспышки называют ту минимальную температуру при которой теплоприход становится больше теплоотвода и химическая реакция вследствие ее ускорения и самоукорения принимает характер взрывчатого превращения. Иначе, температура вспышки — это та наименьшая температура, до которой должно быть нагрето ВВ, для того чтобы вызвать в нем химическое превращение со скоростью, достаточной для получения звукового эффекта или пламени.

Все химические вещества после изготовления имеют определенный срок хранения, который зависит от неизменности свойств вещества. Сроки хранения ВМ зависят как от индивидуальных особенностей, так и от условий, при которых производится хранение.

При обычных температурах реакция разложения ВМ настолько мала, что значительное время в них не обнаруживается изменения свойств.

Если хранение очень длительное или оно производится при более высоких температурах, то скорости реакции разложения увеличиваются и при определенных условиях могут привести к бурному разложению ВМ и к их samozагоранию. Быстрота накопления изменений в ВМ и определяет его стойкость. Различают два вида стойкости.

*Физической стойкостью* называется способность ВМ сохранять свои физические свойства в практических условиях их хранения и применения.

*Химической стойкостью* называется способность ВМ не претерпевать при нормальных условиях хранения химических превращений, могущих привести к самовоспламенению или хотя бы к существенному изменению эксплуатационных свойств.

Под чувствительностью вещества к искровому разряду понимают его способность воспламеняться при переходе электрической энергии в теплоту.

При возбуждении взрывчатого превращения в ВВ энергией другого ВВ имеется целый ряд особенностей и закономерностей, которые зависят как от индивидуальных свойств ВМ, так и от условий, при которых происходит возбуждение. В зависимости от целого ряда факторов и видов приложения энергии в ВМ могут протекать различные процессы, которые характеризуются целым рядом показателей.

#### *Минимальный инициирующий импульс.*

Минимальным инициирующим импульсом называют то минимальное количество ВВ, при подрыве которого может быть возбуждена детонация исследуемого ВМ. Ниже приводится определение параметров, характеризующих ВМ, на основе которых дается оценка уровня ПВБ.

**Критический диаметр детонации.**

Критическим диаметром детонации (толщиной) называется такой диаметр, выше которого в ВМ возможно протекание устойчивой детонации заряда. Критический диаметр характеризует время протекания химической реакции в зоне детонационной волны.

**Расстояние передачи детонации.**

Расстоянием передачи детонации называется то максимальное расстояние, при котором в испытуемом заряде еще возбуждается устойчивая детонация.

Расстояние передачи детонации характеризует чувствительность топлива к ударной волне.

**Критическое давление возбуждения детонации.**

Критическое давление возбуждения детонации характеризует возникновение реакции при прохождении ударной волны по заряду выше критической.

**Переход горения в детонацию.**

Переходом горения в детонацию называют переход от горения к другому, качественно отличному процессу (детонации), за счет образования ударной волны в горящем веществе с параметрами, достаточными для возбуждения детонации.

Переход горения в детонацию зависит как от индивидуальных особенностей топлива и его физического состояния, так и от внешних условий, при которых он происходит.

Проводимая оценка по указанным показателям характеризует степень пожаровзрывоопасности перерабатываемого материала и служит исходными данными для организации безопасного производства ВМ или его транспорта.

Пожаровзрывобезопасность современного производства складывается из следующего комплекса технических мероприятий:

- построение технологического процесса, исключающего возникновение режимов, приводящих к загоранию или взрыву материала, с автоматическим регулированием основных параметров технологического процесса;
- конструкция технологических аппаратов и отдельных их узлов, исключающих загорание или взрыв перерабатываемых в них материалов;
- локализация или подавление возникшего пожара или взрыва при помощи быстродействующих автоматических средств пожаротушения;
- применение новых конструкционных материалов, повышающих взрывозащиту технологических аппаратов.

Защита обслуживающего персонала обеспечивается:

- дистанционность ведения опасных технологических операций;
- инженерными мерами в виде устройства специальных железобетонных кабин, обваловок производственных зданий и расположением их на соответствующих регламентированных расстояниях.

При этом степень защиты обслуживающего персонала оценивают по т.н. коэффициенту технической безопасности

$$K_6 = \frac{A_6 + 2A_{6o}}{A_6 + A_6 + 2A_{6o}}$$

где  $K_6$  — коэффициент безопасности технологического процесса;  $A_6$  — общее количество безопасных операций;  $A_6$  — общее количество опасных и особоопасных операций.

Коэффициент безопасности в среднем колеблется в широких пределах от 0,5 до 0,95.

Безопасная операция — это технологическая операция, которая исключает воздействие человека на ВМ или выполняется дистанционно. Опасная или особо опасная операция — это технологическая операция с ВМ, могущая привести к аварийной ситуации в случае нарушения технологического режима.

Различие между опасной и особоопасной операциями заключается только в степени воздействия на окружающих. В первом случае поражается только исполнитель, во втором и окружающие.

Статистика показывает, что за счет указанных мероприятий аварийность при производстве и особенно при эксплуатации изделий значительно ниже, чем на автомобильном и ж/д транспорте. Естественно, все сказанное справедливо только при соблюдении установленных правил устройства производственных зданий, ведения технологического процесса и эксплуатации оборудования.

## **6. Причины и условия возникновения начального очага загорания**

### **6.1 Общие сведения о чувствительности к механическим воздействиям**

Как показывает статистика, основной причиной несанкционированных (случайных) загораний при производстве ВМ и изготовлении из них изделий является чувствительность к механическим воздействиям, т.е. переход механической энергии, воздействующей на ВМ, в тепловую. Действительно, практически любые технологические операции переработки ВМ связаны с механическими воздействиями. Например, при операциях прессования зарядов, механической обработке на токарных и

фрезерных станках, шнековании, чистке оборудования, смешении и т.д. основными операциями являются механические воздействия. Знание закономерностей воздействия и допустимых величин этих воздействий на ВМ, исключающих его загорание, т.е. допустимых тепловых воздействий, являющихся результатом перехода механической энергии в тепловую, закономерности этого перехода являются одним из важнейших вопросов при организации безопасных методов переработки ВМ. Процесс перехода механической энергии в тепловую сложен, и в настоящее время отсутствует единая точка зрения на механизм этого явления. В то же время этот вопрос имеет принципиальное значение при организации безопасных химико-технологических процессов и конструирование оборудования, так как исключение начального очага загорания автоматически исключает аварию. Многие видные ученые XX столетия (Н.А. Холево, Ю.Б. Харитон, В.К. Боболев, К.К. Андреев, В.С. Козлов, Ф.А. Баум, Боуден и др.) пришли к выводу, что чувствительность к механическим воздействиям не является постоянной величиной (const), присущей данному ВМ, а зависит от конкретных условий приложения нагрузки, физического состояния вещества и других факторов. Не останавливаясь подробно на существующих взглядах на механизм чувствительности, отметим, что в настоящее время наибольшее распространение получила так называемая теория «горячих точек». Как показывают многочисленные эксперименты, энергия удара, производимого по веществу, недостаточна, чтобы нагреть его до температуры вспышки в объеме, находящемся даже в зоне удара. Ряд специалистов считают, что разогрев навески испытуемого ВМ составляет величину не более 1°С. Отсюда возникла гипотеза локальных разогревов, впервые высказанная Ю.Б. Харитоном и затем

экспериментально подтвержденная Л.Ф. Беляевым и В.К. Боболевым. Сущность этого явления заключается о том, что при механическом воздействии в веществе возникают напряжения. Наличие неоднородностей в системе (гетерогенность, различие в форме и размерах частиц и т.д.) в локальных объемах ВМ могут возникать «пики напряжений». В этих объемах будут возникать высокие температуры, т.е. будут образовываться «горячие точки», являющиеся центрами возникновения реакций взрывчатого превращения ВМ. Так, по данным С.М. Муратова с сотрудниками, характеристическая температура в зоне удара, способная вызвать реакцию взрывчатого превращения имеет величину (550-650°C). Причинами возникновения «горячих точек», как показано Боденом и Иоффе, являются:

- адиабатическое сжатие небольших газовых включений в жидких, пластичных и твердых ВВ;
- трение твердых частиц, особенно высокоплавких примесей;
- вязкостный нагрев при быстром течении ВМ;

По мнению Н.Д. Холево, последняя причина является основной при возникновении реакции взрывчатого превращения в результате механического воздействия. Отметим, что эта причина в силу особенностей механических, свойств и условий переработки является наиболее характерной.

Действительно, практически все основные технологические приемы переработки ВМ связаны с механическими воздействиями и течением материала:

- разогрев и течение термопластичной пороховой массы на вальцах и в шнек-прессе и раструбном пресс-инструменте;

- перемешивание топливной массы и ее слив, под давлением и т.п. операции при формовании изделий;
- прессование шашек из порошкообразных ВМ.

Е.К. Боболев и Г.Т. Афанасьев считают, что локальный разогрев, приводящий к взрыву твердых ВВ при ударе, создается в процессе прочностного разрушения. При этом упругая энергия, заключенная в веществе, переходит в работу деформации на разрыве. Поэтому процесс разрушения и дальнейшие процессы идут по самораспространяющемуся механизму. На поверхностях разрыва в результате трения возникает сильный локальный разогрев. Аналогичную точку зрения, однако в результате термических напряжений, высказывал К.К. Андреев. По данным В.К. Боболева, Г.Т. Афанасьева, критические напряжения ( $P_{кр}$ ), достаточные для возникновения реакций взрывчатого превращения должны составлять  $1 \cdot 10^4$ - $2,5 \cdot 10^4$  атм. В определенной степени подтверждением вышесказанного является работа Б.Н. Кондрикова, который экспериментально показал, что ВМ воспламеняется при сжатии его давлением выше  $4 \cdot 10^3$  кгс/см<sup>2</sup>. Такие высокие давления сжатия ВМ до разрушения практически могут реализоваться в условиях деформации тонкого слоя ВМ. Таким образом, В.К. Боболев и Г.Т. Афанасьев предложили новый механизм образования локального разогрева и применения его для количественной оценки реализующихся на практике случаев, например, удар по открытому ВМ (удар по полупространству и тонкому слою). При этом указанные авторы считают, что в твердых ВВ в результате механического воздействия способна распространяться только детонация. Таким образом, при ударе по открытому объему принята следующая схема: механическое воздей-

ствие-разогрев ВВ в очаге-загорание-горение с переходом в детонацию в зоне сжатия-детонации в несжатом ВВ. Сформулированная модель возбуждения процесса взрывчатого превращения в целом является справедливой и может объяснить ряд явлений, причем позволяет в ряде случаев произвести количественную оценку. Однако эта модель хорошо объясняет закономерность протекания процесса в гомогенных кристаллических ВВ и не является правомерной для многих промышленных ВВ и твердых топлив. Применяя формально закономерности, разработанные В.К. Боболевым и Г.Т. Афанасьевым для количественной оценки опасности, возникавшей в производственном процессе по т.н. минимальному диаметру ударяющего тела ( $D_{\min}$ ), находящегося в прямой зависимости от критического диаметра детонации, можно прийти к парадоксальному выводу об отсутствии чувствительности к механическим воздействиям у ряда промышленных ВВ и твердых топлив, в случаях очень большого критического диаметра детонации.

Исходя из сказанного схема механизма загорания таких ВМ может быть представлена следующим образом: механическое воздействие — вязкостное течение с разогревом в локальных точках в зоне воздействия — горение вне зоны воздействия.

В практике оценки чувствительности к механическим воздействиям существует многообразие экспериментальных методов и способов оценки чувствительности к механическим воздействиям. Все существующие методы оценки чувствительности можно разбить на две группы:

- методы относительной оценки чувствительности, позволяющие построить ряд чувствительности ВМ, т.е. аттестовать в ряду других данный ВМ по уровню его чувствительности к механическим воздей-

ствиям (рис. 6.1). Необходимо отметить, что указанная группа методов широко распространена за рубежом, в таких развитых странах, как США, Великобритания, ФРГ, Япония и др.

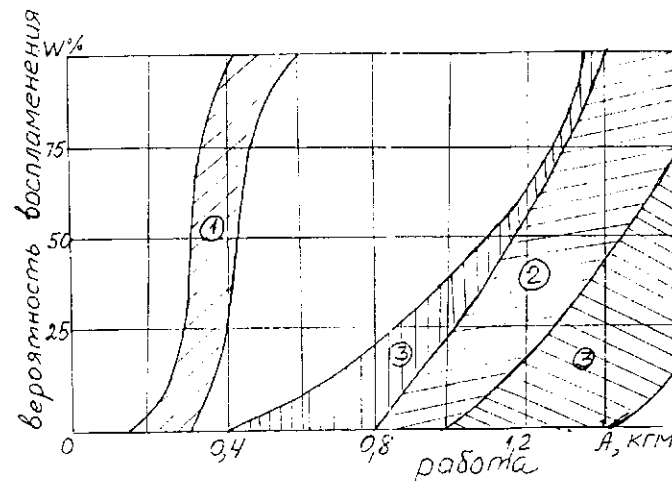


Рис. 6.1. Сравнительный ряд чувствительности различных ВМ при механических воздействиях в условиях копровых испытаний: 1 — область ИВВ; 2 — область БВВ; 3 — область порохов и твердых топлив

В последние годы в нашей стране разработаны оригинальные модельные методы, составляющие самостоятельную группу. Модельные методы испытаний позволяют воспроизвести механические воздействия, имеющие место в отдельных узлах аппаратуры, фазе производства и других практических условиях. В ряде случаев эти методы позволяют определить основные критические параметры загорания исследуемого материала: дав-

ление, скорость, время ( $P, \bar{v}, \tau$ ), необходимые для конструирования аппаратуры по переработке ВМ.

Каждая из этих групп методов испытаний имеет свои положительные стороны и недостатки. Несомненным достоинством первой группы методов испытаний является их простота, малая навеска испытуемого вещества (0,02-0,1) г., а также оперативность испытаний. Существенным недостатком данной группы методов является относительность оценки чувствительности испытуемых ВМ, т.е. построение только ряда чувствительности испытуемых ВМ.

Результаты исследований, полученные при помощи методов относительной оценки чувствительности к механическим воздействиям, не могут быть непосредственно использованы при проектировании технологической аппаратуры и организации технологического процесса. Эти задачи могут решить только модельные методы испытаний, которые либо воспроизводят работу отдельного узла аппарата, либо моделируют в количественном измерении процессы, происходящие в ВМ. Однако эти методы при всей их необходимости могут быть разработаны только при наличии действующей или, по крайней мере, уже спроектированной аппаратуры, а также достаточного количества испытуемого материала (десятки и сотни граммов).

Таким образом, целесообразность использования обеих групп методов оценки чувствительности не вызывает сомнений. Преимущество каждой из групп на определенном этапе разработки нового ВМ очевидно, т.е. на первоначальном этапе решающую роль при аттестации ВМ в ряду уже известных. играют результаты относительной оценки чувствительности, при организации же безопасного технологического процесса, необходимо

знание критических параметров загораний, которые можно получить при помощи модельных испытаний.

В соответствии с действующей нормативно-технической документацией при оценке чувствительности ВМ и исходных компонентов, используют следующие основные испытания:

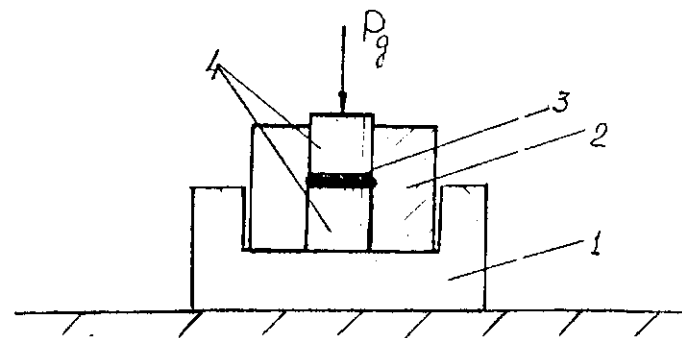


Рис. 6.2 а. Схема приборчика № 2 для испытаний на удар на вертикальном копре:

1 — поддон; 2 — муфта; 3 — навеска испытуемого материала; 4 — ролики

1. Чувствительность к удару на вертикальном копре в приборчиках № 1 и № 2 (рис 6.2 а). Навеска испытуемого материала, 0,1 г. Используют грузы: 10 кг, 5 кг, 2 кг. Оценка результатов из 25 параллельных испытаний производят по нижнему пределу при отсутствии следов взрывчатого разложения (предел безопасности  $H_0$ , мм) и по частоте взрывчатого разложения при постоянной высоте ( $H = 250$  мм), в % (русская проба). Кроме этого, оценку можно проводить по полной удельной работе удара по соотношению:

$$A = P \cdot H \cdot S,$$

Б.Н. КУТУЗОВ, Г.А. НИШПАЛ

где  $A$  — работа удара, кгм/см;  $P$  — вес груза, кг;  $H$  — высота падения, м;  $S$  — площадь навески испытуемого ВМ в приборчике, см<sup>2</sup>.

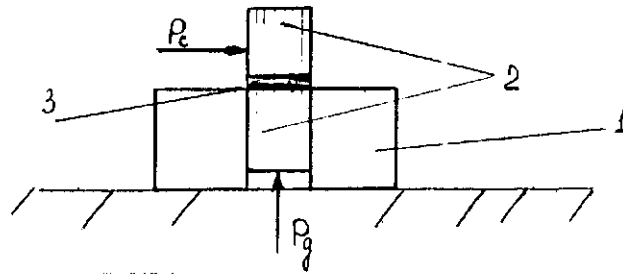


Рис. 6.2 б. Схема приборчика для испытаний на ударный сдвиг на приборе К-44-III:  
1 — муфта; 2 — ролик; 3 — навеска испытуемого материала

2. Чувствительность к ударному сдвигу на приборе К-44-III (рис. 6.2 б). Навеска испытуемого материала — 0,02 г. Оценку результата (при отсутствии следов взрывчатого разложения) из 25 параллельных испытаний производят по нижнему значению (предел безопасности) давления прижатия образца ( $P_0$ , кг/см<sup>2</sup>) при его относительном сдвиге, от удара маятникового груза весом 2 кг. по ролику с различного угла отклонения или по работе трения в этих условиях, вычисляемой по соотношению:

$$A_{тр} = kP \cdot L \cdot S,$$

где  $A_{тр}$  — работа трения, кгм;  $P$  — давление прижатия образца, кгс/см<sup>2</sup>;  $S$  — площадь образца, (0,785см<sup>2</sup>);  $L$  — путь относительного перемещения ролика по образцу, мм ( $1,2 \cdot 10^{-1}$  см);  $k$  — коэффициент трения (0,1-0,3).

Коэффициент трения можно определить любым способом, но наиболее корректно производить определение

по Мамаеву, в условиях прибора К-44-III по соотношению:

$$K = \frac{160(\cos \alpha - \cos \beta)}{2N \cdot S \cdot L},$$

где  $N$  — давление по манометру, кгс/см<sup>2</sup>;  $S$  — площадь образца, см<sup>2</sup>;  $L$  — величина сдвига, см;  $\alpha$  — угол падения;  $\beta$  — угол отскока.

3. Чувствительность к трению неударного характера на приборе И-6-II (рис. 6.2 в). Навеска испытуемого материала 0,03 г. Оценку результатов из 10 параллельных испытаний (при отсутствии следов взрывчатого разложения) производят по нижнему пределу усилия прижатия образца ( $P_0$ , кгс/см<sup>2</sup>) при частоте вращения пуансона 520 об/мин в течение 3 с.

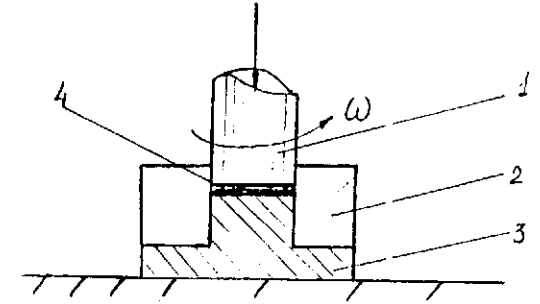


Рис. 6.2 в. Схема приборчика для испытаний на неударное трение на приборе И-6 II:  
1 — подвижный вал, 2 — муфта; 3 — пуансон; 4 — навеска испытуемого вещества

Критические значения работы удара и трения некоторых видов ВМ, выше которых возникает очаг загорания, полученных при испытаниях по описанным методикам, представлены в табл. 6.1.

Рассмотренные методы и результаты испытаний широко используются в практике оценки чувствительности к механическим воздействиям ВМ. Однако с их помощью можно произвести оценку допустимой работы удара или трения только в зоне механического воздействия (зона сжатия) без учета возможности и условий распространения начального очага в зону несжатого (разгруженного) испытываемого вещества.

Таблица 6.1

Чувствительность к механическим воздействиям некоторых ВМ при копровых испытаниях

Наименование	Критическая работа удара, кг.м
Гексоген	0,5 – 0,2
ТНТ	0,7 – 1,0
Баллиститный порох	0,5 – 0,1
Твердое топливо	0,5 – 0,6
Пироксилиновый порох	0,25 – 0,5
Омасленный П.П	0,7 – 1,0
Азид свинца	0,05 – 0,07
НГЦ	0,01 – 0,08
ТЭН	0,2
Аммотол	0,5 – 0,6
Скальный аммонит	0,3 – 0,5
Гелеобразные ВВ	1,0 – 1,2

Большая работа по модернизации методов испытаний, с учетом распространения начального очага из зоны сжатия в несжатое вещество проводится С.М. Муратовым с сотрудниками. Такие методы испытаний дают более полное представление о реальной чувствительности ВМ, в том числе и ТРТ, которые при определенных условиях можно использовать как исходные данные при конструировании аппаратуры или отдельных узлов.

В практике оценки условий возникновения начального очага загорания при механических воздействиях для выбора оптимального порядка ввода компонентов применяют диаграммный способ, разработанный Г.Т. Афанасьевым и В.К. Боболевым и развитый работами С.М. Муратова с сотрудниками. Указанный способ дает наглядное представление о динамике изменения чувствительности к механическим воздействиям в идентичных условиях нагружения в зависимости от соотношения компонентов во взрывчатой смеси.

Имеющиеся в наличии диаграммы чувствительности конкретных смесей дают возможность обосновать пути выбора наиболее безопасных соотношений с точки зрения возникновения очага загорания при их переработке.

## 6.2. Количественная оценка начального очага загорания при механических воздействиях

Рассмотренные выше методы и способы определения чувствительности к механическим воздействиям позволяют построить только ряд чувствительности ВМ как такового без привязки его к конкретным условиям. Все ВВ в зависимости от критической энергии, при которой происходит взрывчатое разложение, располагают в определенный ряд чувствительности. Причем возникновение взрывчатого разложения в испытываемом материале носит вероятностный характер с определенным законом изменения от 0 до 1 (рис. 6.3) для каждого ВМ. С другой стороны, в процессе переработки ВМ в аппарате оно закономерно подвергается различным механическим воздействиям, интенсивность которых зависит прежде всего от типа аппарата, технологических характеристик (вязкость, растекаемость, температуры, давления и т.п.) и является случайной величиной. Только знание функ-

ции распределения нагрузок, которым подвергается ВМ в процессе переработки, с одной стороны, и вероятность возникновения взрывчатого разложения при механическом нагружении, с другой, дают возможность определения вероятности возникновения начального очага загорания в процессе его переработки в конкретных условиях.

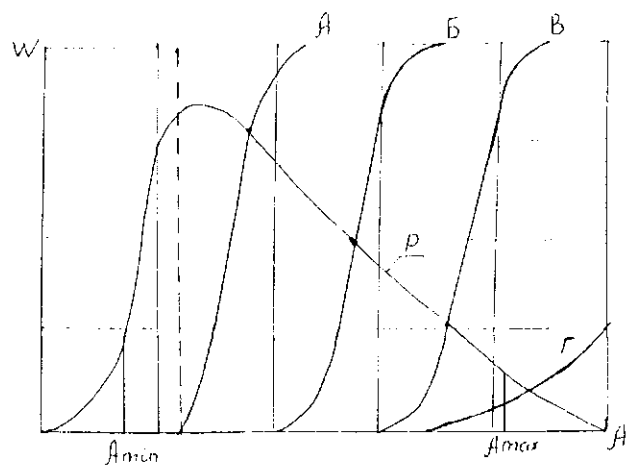


Рис. 6.3. Сравнительная оценка вероятности возникновения начального очага загорания при механических воздействиях для различных составов:

А, Б, В, Г — кривые частоты воспламенения различных составов при идентичных условиях, Р — механические воздействия, производимые на перерабатываемый материал при работе аппаратов

$P(A)$  — плотность вероятности для величины нагрузки в данном аппарате при переработке состава, вероятность воспламенения которым нас интересует.

$A_{max}$ ,  $A_{min}$  — максимальное и минимальное значение усилий, которым может подвергаться ВМ в процессе переработки;

$W(A)$  — вероятность воспламенения топлива при воздействии нагрузки  $A$ .

Предположим, что кривые  $P(A)$  и  $W(A)$  имеют вид, изображенный на (рис. 6.3), форма кривых выбрана исходя из следующих соображений:

$A_{max}$  может отклоняться от номинального значения на любую величину, так как это не скажется на работоспособности аппарата. Вероятность большого отклонения мала и по мере увеличения стремится к нулю. Однако указанные отклонения превышают допустимые нагрузки.

$A_{min}$  не может иметь больших отклонений от своего номинального значения, так как в противном случае произойдет остановка аппарата и, следовательно, прекращение процесса переработки ВМ.

$W$  имеет определенное значение для каждого конкретного состава ВМ и зависит от его природы, физико-химического состояния, а также условий воздействий. Тогда вероятность возникновения начального очага загорания ВМ в аппарате ( $W$ ) от нагрузок ( $A$ ) есть

$$W = P(A) \cdot W(A) \cdot d(A),$$

при этом полная вероятность возникновения начального очага загорания топлива при механических воздействиях в условиях переработки

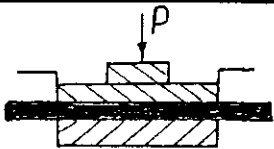
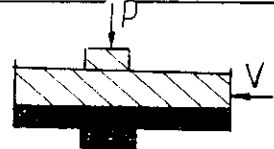
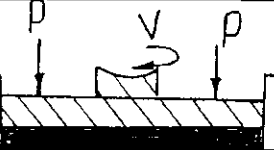
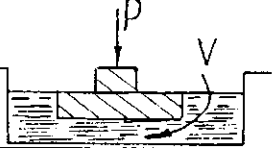
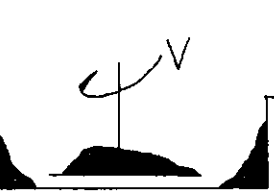
$$W_n = P(A) \cdot W(A) \cdot d(A).$$

Таким образом, для того чтобы оценить вероятность воспламенения топлива в процессе переработки и дать количественную оценку условиям возникновения начального очага загорания конкретного состава, необходимо знать функцию распределения нагрузок, которые воздействуют на топливо. Отсутствие таких данных приводит только к сравнительной качественной оценке.

Анализ работы технологического оборудования, применяемого в производстве ВМ, позволяет при всей его сложности и многообразии выделить ряд типичных механических воздействий на перерабатываемый материал, отвечающих реальным условиям производства (табл. 6.2).

Таблица 6.2

Классификация механических воздействия при технологических операциях в производстве ВВ

Тип воздействия	Где может быть	Эскиз имитатора	Определяемые параметры
Объемное сжатие	Поддавливание, полимеризация, слив, прессование		$P, \text{кг/см}^2$
Трение при сдвиге	Поршни, штоки, скребки		$P, \text{кг/см}^2$ $V, \text{м/с}$
Трение при бесконечном сдвиге	Уплотнения, механическая обработка		$P, \text{кг/см}^2$ $V, \text{м/с}$
Течение через канал	Шнеки, решетки, вальцы		$P, \text{кг/см}^2$ $V, \text{м/с}$
Скоростной удар	Падение со сдвигом, срабатывание затворов, клапанов, гидравлический удар при массопередаче		$V, \text{м/с}$

Представленная классификация механических воздействий позволяет путем создания несложных устройств произвести экспериментальное моделирование и определение критических параметров загорания практически для всех ВМ, применительно к технологической аппаратуре, используемой в производстве ВМ. Описанный способ подхода моделирования позволяет прогнозировать уровень безопасности вновь разрабатываемых технологических аппаратов. Данный вопрос, естественно, не нашел еще окончательного решения, однако в настоящее время уже существуют определенные положения для создания представительной модели. Они заключаются в следующем:

- выбор геометрического подобия модели и натуры. Оптимальным считается соотношение 1:5;
- энергетическое подобие модели и натуры. Достаточное соотношение 1:125;
- адекватность материалов модели и натуры;
- использование размеров навески вещества, исключая влияние краевых эффектов на результаты испытаний;
- установление основных изучаемых параметров, дающих возможность объективной оценки натуры.

Разработанные методы моделирования механических воздействий при производстве и эксплуатации ТРТ нашли достаточно широкое применение и хорошо оправдали себя. Некоторые из них описаны ниже.

*Модель работы сальниковых уплотнений смесительных аппаратов (трение при бесконечном сдвиге).*

Сущность метода заключается в определении критических параметров загорания ( $P, V$ ) технологической взрывчатой смеси, находящейся между торцом и боко-

вой поверхностью вращающегося пуансона и неподвижным поддоном. Используются различные материалы пар трения (сталь, латунь, фторопласт и т.д.) (рис. 6.4).

**Метод оценки чувствительности ЖВВ к вибрационным воздействиям.**

Сущность метода заключается в определении частоты, амплитуды колебаний и времени воздействия, приводящих к загоранию ЖВВ (рис. 6.5). Полученные количественные данные позволяют произвести расчеты реальных нагрузок и спрогнозировать поведение ЖВВ в реальных условиях.

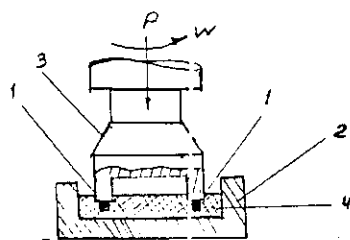


Рис. 6.4. Схема испытаний модели сальниковых уплотнений:

1 — испытуемый образец ЖВВ;  
2 —; 3 — вращающийся пуансон;  
4 — материал пары трения

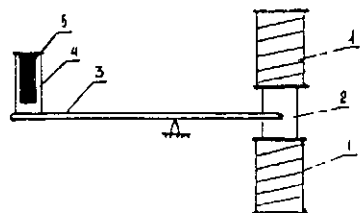


Рис. 6.5. Схема метода оценки чувствительности ЖВВ к вибрации:

1 — электромагниты; 2 — подвижный сердечник; 3 — коромысло; 4 — кювета; 5 — навеска ЖВВ

**Моделирование падения изделий из ЖВВ с различных высот и на различное основание.**

1. Чувствительность к трению при проскальзывании шашки ЖВВ по различным материалам.

Сущность метода заключается в определении критических параметров загорания ЖВВ ( $P$ ,  $V$ ) при проскальзывании инертного блока с индикатором загорания в виде шашки топлива размером 30/0-30 по наклонной

плоскости по различным материалам (сталь, резина, войлок, брезент и т.д.). Вес изделия моделируется дополнительными сменными грузами (рис. 6.6 а).

2. Чувствительность к соударению изделий из ЖВВ при падении с различных высот и на различные основания.

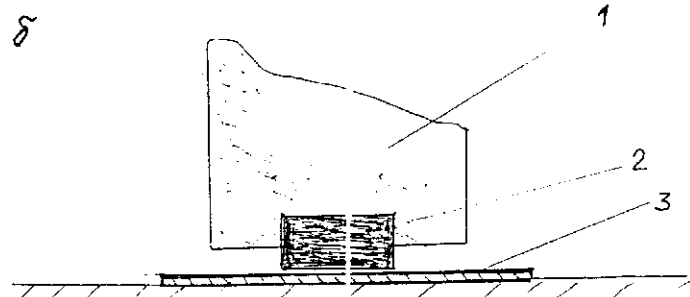
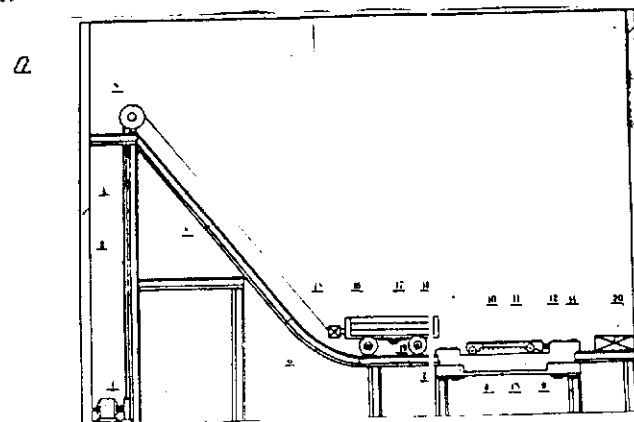


Рис. 6.6. Схема установки (а) и ее рабочий орган (б) при оценке чувствительности отвержденного топлива при проскальзывании по различным материалам:

1 — инертный груз; 2 — образец ЖВВ; 3 — материал пары трения

Сущность метода заключается в определении критических параметров загорания ВМ ( $P$ ,  $I$ ) при соударении изделий в модельном устройстве.

Модельное устройство по оценке чувствительности изделия из ВМ при волочении по различным видам грунта приведено на рис. 6.7.

Имитация механических воздействий на изделия из ВМ при соосном их соударении приведена на рис. 6.8.

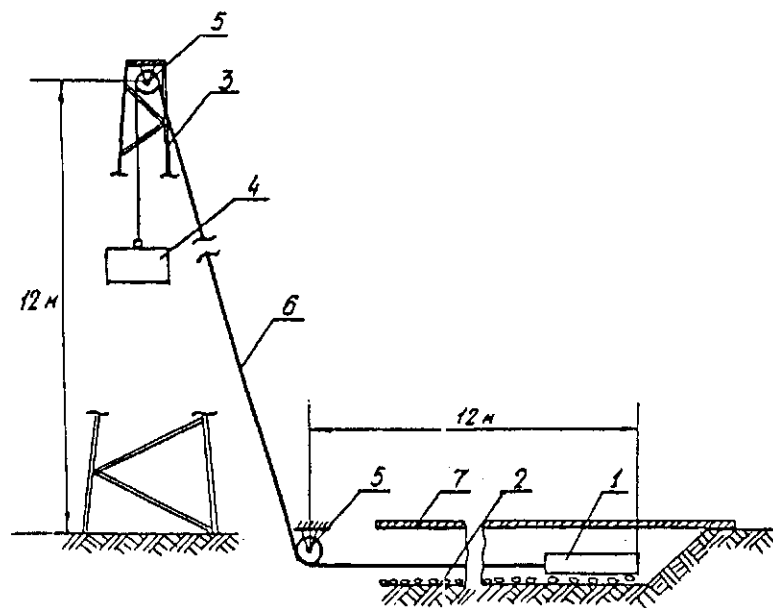


Рис. 6.7. Схема испытаний по волочению изделий:

1 — изделие; 2 — желоб; 3 — вышка; 4 — приводной груз; 5 — направляющие блоки; 6 — приводной канат; 7 — листы покрытия желоба

Из краткого описания сущности каждого из приведенных методов видно, что каждый из них решает только одну частную задачу при достаточной своей громоздкости. Однако знание критических параметров за-

горания ВМ в конкретных реальных условиях позволяет технически обоснованно разрабатывать технологические режимы при производстве и мероприятия по безопасной эксплуатации ВМ, и располагать обоснованными данными для конструирования технологической аппаратуры.

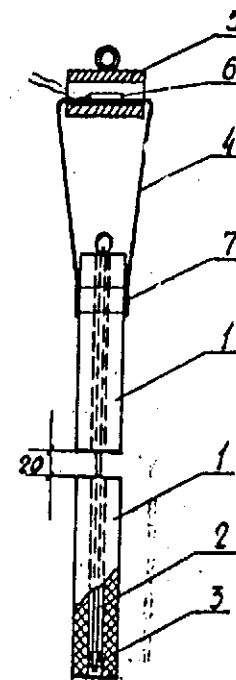


Рис. 6.8. Схема испытаний по соударению изделий:

1 — изделие; 2 — направляющая; 3 — клиновое крепление направляющей; 4 — шпигат подвески; 5 — защитная труба; 6 — электродетонатор; 7 — крепление шпигата на изделии

Анализ многочисленных данных критических параметров загорания ВВ, полученных различными исследо-

Б.Н. КУТУЗОВ, Г.А. НИШПАЛ

вателями (Левин Л.И., Широков В.Н., Базарова В.Г., Копытов В.Я., Павлова Г.И. и др.) при помощи методов моделирования, дают основания считать, что они находятся в сильной функциональной зависимости от времени воздействия ( $\tau$ ). При этом в зависимости от условий механического нагружения конкретного ВМ можно с достаточной для инженерных расчетов точностью указать удельные давления прижатия и скорости перемещения пар трения для разных конструкционных материалов (металл, тефлон, резина, войлок) для наиболее чувствительных ВМ, применяемых в практике разработки ВВ (см. табл. 6.3).

Таблица 6.3

Тип воздействия на ВМ	Время, с	Критические параметры	
		Руд, кг/см	V м/с
Длительное трение при установленном теплоотводе	> 3000	10-25	0,3-0,2
Трение с истиранием испытуемого материала	5-30	15-30	1,2
Проскальзывание при падении или сдвиге	1·10 <sup>-1</sup>	20-40	5-4
Кратковременные (импульсные) воздействия	5·10 <sup>-3</sup>	500-1000	5

Таким образом, с учетом коэффициента безопасности (1,5-2) в зависимости от условий переработки материала, приведенные выше данные могут быть использованы при конструировании технологического оборудования и оснастки для переработки ВМ.

### 6.3. Статическое электричество как причина начального очага загорания

Под статическим электричеством (СЭ) принято понимать электрические заряды, находящиеся в состоянии относительного покоя, распределенные на поверхности или в объеме диэлектрика или на поверхности изолиро-

ванного проводника. Перемещение зарядов в СЭ в пространстве обычно происходит вместе с наэлектризованными телами.

По физико-химическому строению все вещества электрически нейтральны, т.е. обладают равным количеством положительных и отрицательных зарядов. Тело является наэлектризованным, если содержит избыток зарядов какого-либо одного знака. Процесс электризации заключается в том, что одно тело приобретает или отдает другому электрические заряды преимущественно одного знака. Обмен зарядами между взаимодействующими телами происходит на границе их соприкосновения или вблизи ее за счет физико-химических процессов. Два электрически нейтральных тела, приведенных в соприкосновение, после нарушения контакта между ними могут оказаться наэлектризованными зарядами противоположного знака. Мерой электризации является количество электрического заряда перешедшего с одного тела на другое в ходе их взаимодействия. При трении двух химически одинаковых тел положительные заряды получает более плотное тело. Металлы при трении о диэлектрик электризуются отрицательно. Однако если поверхность окислена, то могут возникать на его поверхности и положительные заряды.

Пыль, скользящая по поверхности тела, из которого она образована, электризуется отрицательно.

Наиболее ярко способность к электризации проявляется на диэлектрических материалах. Идеальных диэлектриков, совершенно не проводящих электрический ток, в природе не существует, поэтому проводимость любого диэлектрика не равна нулю. Следовательно, даже самый лучший диэлектрик способен рассеивать заряды, сообщенные ему в результате электризации, однако

процесс этот происходит значительно медленнее, чем у проводников.

Электрические свойства диэлектрика характеризуются объемным сопротивлением  $\rho_v$  (Ом·м) или удельной объемной электропроводностью

$$\gamma_v = \frac{1}{\rho_v},$$

т.е. способностью единицы объема материала проводить электрический ток. Кроме объемной электропроводности, большое значение для электризации имеет поверхностная электропроводность материала

$$\gamma_s = \frac{1}{\rho_s}.$$

Поверхностная электропроводность может быть существенно выше объемной за счет наличия на поверхности диэлектрика всякого рода загрязнений, пленки влаги с растворенными в ней различными веществами и т.п., что способствует увеличению токов утечки. На величину поверхностной электропроводности большое влияние оказывают температура и влажность окружающего воздуха. Поверхностная электропроводность часто играет определяющую роль как в самом процессе электризации, так, и в ходе рассеяния зарядов СЭ.

Так как ВМ по своей природе необходимо отнести либо к полупроводникам, либо к диэлектрикам (см. табл. 6.4), т.е. системам, способным к статической электризации, то вопросы условий воспламенения их в результате разряда статического электричества являются принципиально важными с точки зрения безопасности.

Электризация твердых тел становится заметной, если удельное электрическое сопротивление материала пре-

вышает  $1 \cdot 10^6$  Ом·м. До этой величины время релаксации составляет 0,1 с.

Таблица 6.4

NN п/п	Наименование класса ВМ	Физическое со- стояние	Значение уд. сопротивления, Ом·м	
1	РПБ	Монолит $\rho = 1,6 \text{ г/см}^3$	$2,1 \cdot 10^7 - 5 \cdot 10^9$	$1,6 \cdot 10^{10} - 5,1 \cdot 10^{12}$
2	СТРТ	Монолит $\rho = 1,7 \text{ г/см}^3$	$3 \cdot 10^6 - 8 \cdot 10^{12}$	$1 \cdot 10^8 - 5 \cdot 10^{13}$
3	Окислители типа ПХА	Насыпной порошок $\rho = 1,0 \text{ г/см}^3$	$1 \cdot 10^{12} - 1 \cdot 10^{14}$	$> 1 \cdot 10^{15}$
4	Кристалличес- кие мощные ВВ типа гек- согена	Насыпной порошок $\rho = 1,0 \text{ г/см}^3$	$> 1 \cdot 10^{15}$	$> 1 \cdot 10^{15}$
5	Литые ВМ типа тротила	Монолит $\rho = 1,6 \text{ г/см}^3$	$> 1 \cdot 10^{12}$	$> 1 \cdot 10^{14}$

В современном производстве ВМ существует ряд технологических операций, на которых наблюдается электризация перерабатываемых веществ. В первую очередь это операции, связанные с обработкой и транспортированием дисперсных материалов просеивание, сушка в кипящем слое, пневмо- и вакуумтранспортирование и т.п. За счет недостаточного внимания к вопросам защиты от вредных проявлений статического электричества в практике эксплуатации сушильных агрегатов «кипящего» слоя при сушке гексогена известно 5 случаев взрывов по этой причине с сильными разрушительными последствиями. Поскольку большинство сыпучих материалов, применяемых в производстве ВМ, обладают низкой электропроводностью, то они способны сильно электризоваться, что в ряде случаев может нарушить ход технологических операций, например, в результате налипания

материала на стенки оборудования, а при определенных условиях создает угрозу возникновения пожара и взрыва за счет разрядов СЭ. Этими условиями являются:

- 1) заряды СЭ создают напряженность электрического поля, при которой возможно возникновение электрического разряда;
- 2) энергия электрических разрядов достаточна для воспламенения горючей смеси;
- 3) возникновение электрических разрядов в горючей среде.

Итак, для того чтобы оценить степень опасности электрических разрядов, которые могут возникнуть в той или иной горючей среде, необходимо знать, а какова же необходимая энергия электрического разряда, который может воспламенить эту среду. Тот факт, что такой высокотемпературный источник воспламенения, как электрическая искра, температура канала которой превышает 10000 К, не всегда вызывает устойчивое распространение фронта пламени после окончания разряда, объясняется тем, что для воспламенения необходимо создать условия, аналогичные горению во фронте пламени. Другими словами, необходимо прогреть до температуры горения сферический объем, радиус которого в несколько раз больше характерной ширины зоны ламинарного пламени. В этом случае близлежащие слои горючей среды успевают воспламениться прежде, чем нагретый искрой объем остынет.

К сожалению, теории, позволяющей количественно рассчитать величину МЭВ для конкретной среды, в настоящее время не существует, поэтому определение МЭВ производится экспериментально.

Все экспериментальные установки, как правило, состоят из двух частей:

- схемы формирования электрического разряда, позволяющей создавать искру с заданной энергией. При этом необходимая энергия разряда задается исходя из расчета по известной зависимости:

$$W = \frac{CU^2}{2},$$

где  $W$  – энергия разряда, Дж;  $C$  – электрическая емкость, Ф;  $U$  – электрический потенциал, В;

- устройства, для создания в зоне разряда испытуемой горючей смеси.

Для газов и паровоздушных сред это обычно вакуумируемая взрывная камера, в которую напускается из отдельных баллонов испытуемая смесь с соответствующими системами управления и контроля. Для пылевоздушных сред в большинстве случаев используется установка, в которой горючее вещество распыляется с помощью вибросита. Известны также методы, предусматривающие распыление навески исследуемого продукта в замкнутом объеме, например, установка ЧЭР-М, однако они получили меньшее распространение. Действующий в отрасли метод определения МЭВ электрического разряда, воспламеняющего ПВС, предусматривает применение установок, в которых ПВС, создается распылительным устройством путем просеивания вещества (рис. 6.9). Для определения МЭВ твердых, пастообразных и жидких веществ используются установки, в которых электрический разряд происходит непосредственно над поверхностью испытуемого образца (рис. 6.10). Фактические значения МЭВ различных ВМ, а также других материалов, используемых в их производстве, представлены в табл. 6.5.

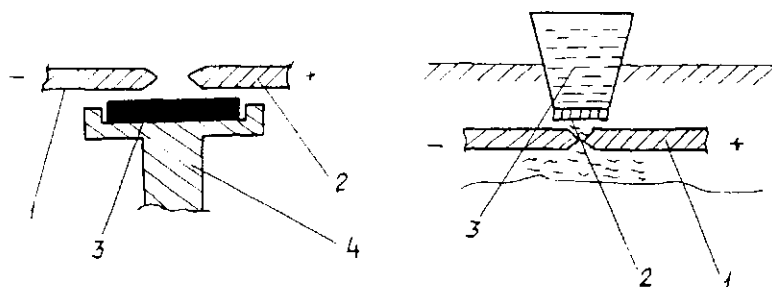


Рис. 6.9. Схема испытаний на чувствительность к искровому разряду твердых, пастообразных и жидких веществ: 1 — подвижный электрод; 2 — неподвижный электрод; 3 — испытуемое гнездо; 4 — гнездо для установки вещества (диэлектрик)

Рис. 6.10. Схема испытания на чувствительность к искровому разряду ПВС: 1 — разрядные электроды; 2 — пылевоздушная смесь испытываемого вещества; 3 — бункер с распылительной сеткой

Таблица 6.5

№ г/п	Наименование материалов	Физическое состояние	Значение МЭВ, Дж
1	ЛВЖ (ацетон, бензин, спирт)	Газообразное	$(0,1 \div 0,4) \cdot 10^{-3}$
2	Алюминий	Пылевоздушная смесь	$(1,4 \div 8) \cdot 10^{-3}$
3	Гексоген	—	$1 \cdot 10^{-2}$
4	Пороховая пыль	—	$1 \cdot 10^{-2} - 30 \cdot 10^{-2}$
5	БСТТ	Моноблок	$> 70$
6	СТРТ	—	$> 150$
7	РБП	—	$> 150$

Следует заметить, что некоторые топлива, имеющие высокую скорость горения, обладают очень низкими значениями МЭВ (10 мДж), которые зависят от структуры топлива. Известны два случая, когда при операциях извлечения шашек топлива НК-2 из упаковки происхо-

дили его загорания по причине разряда статического электричества.

Классификация чувствительности к искровому разряду веществ в различном физическом состоянии в соответствии с отраслевыми правилами представлена в табл. 6.6.

Таблица 6.6

Группа чувствительности по отраслевым правилам защиты от статического электричества	Типичный представитель класса веществ	Минимальная энергия воспламенения, Дж
Очень высокая $1 \cdot 10^{-4}$	Водород	$1,3 \cdot 10^{-5}$
Высокая $10^{-4} \div 5 \cdot 10^{-4}$	Бензин	$1,5 \cdot 10^{-4}$
	Ацетон	$2,5 \cdot 10^{-4}$
Средняя $5 \cdot 10^{-3} \div 2 \cdot 10^{-2}$	Октоген	$1,5 \cdot 10^{-2}$
Низкая $> 2 \cdot 10^{-2}$	Твердое топливо	$> 1,0$

Необходимо отметить, что разряды статического электричества неспособны воспламенить вещества, имеющие критическую энергию воспламенения больше, чем  $1 \cdot 10^{-1}$  Дж. Таким образом, воспламенить отвержденное топливо без промежуточной среды невозможно. Характерным примером является загорание изделия весом более 20 т топлива ПЭКА-18МК на фазе дефектоскопии, где исключены любые механические воздействия. Как показали специально проведенные эксперименты, разряд с человека при касании торца изделия воспламенил закапсулированные в манжете изделия пары бензина с последующим воспламенением топлива.

В общем виде принято считать, что если энергия воспламенения составляет величину, меньшую 50 мДж (за рубежом 15-20 мДж), то для таких веществ не требуется специальных мер по защите от статического электричества, т.е. при работе с такими материалами необходимо осуществлять общепринятые мероприятия в ви-

де заземлений, поддержания влажности в помещениях на необходимом уровне и т.п.

Как уже отмечалось, возможность загораний, причиной которых является СЭ, возникает в следующих условиях:

- 1) существует источник электризации;
- 2) заряды СЭ создают напряженность электрического поля, при которой возможно искрообразование;
- 3) электрические разряды возникают в горючей среде;
- 4) энергия разрядов СЭ достаточна для воспламенения горючей среды.

Отсутствие хотя бы одного из указанных условий делает невозможным возникновение загорания от СЭ. На вышеизложенном и основаны методы защиты. Наиболее часто применяемая мера защиты – заземление. Его целью является устранение формирования электрических разрядов с проводящих элементов оборудования, поскольку разряды с таких элементов наиболее опасны в производстве. Другим опасным источником разрядов СЭ является обслуживающий персонал, поскольку энергия разряда с тела человека может достигать 50 мДж. Опасность человека как источника разряда статического электричества можно проиллюстрировать следующим примером. В лабораторных условиях преднамеренно производили зарядание человека от электрофорной машины. Безусловно, электризация человека была далеко не максимальной. Однако инструментально замеренный разряд с человека составлял величину до 5 мДж, что было достаточно для воспламенения через специальный токоъемник паров ЛВЖ, и ряда чувствительных пылевоздушных смесей.

В то же время произведенный разряд с поверхности, предварительно заряженного до максимальной величины зарядки стеклопластикового цилиндрического изде-

лия диаметром 2,5 м, осуществленный Б.В. Соколовым, А.Н. Осавчуком и др., дал величину заряда не более 0,1 мДж, т.е. недостаточную даже для воспламенения паров ЛВЖ. Чтобы предупредить возникновение разрядов с человека, нужно обеспечить быструю утечку зарядов. Для этого в тех производствах, где существует опасность воспламенения горючих смесей разрядом с человека, необходимо обеспечивать работающих электропроводной обувью и предусматривать устройство электропроводных полов.

В некоторых случаях удается подобрать контактные пары электризующихся материалов, т.е. чтобы уменьшить суммарный заряд. Так, применение в линии загрузки тонкодисперсного порошка алюминия в смесителе участков, изготовленных из резины и нержавеющей стали, позволило полностью устранить заряды на порошке, поступающем в смеситель, т.к. на разных участках трубопровода порошок алюминия электризовался различным знаком.

Эффективной мерой является также уменьшение количества окислителя, т.е. замена воздуха в оборудовании, содержащем горячую среду на азот или  $\text{CO}_2$ , так, замена воздуха на  $\text{CO}_2$  повышает МЭВ для октогена в 6 раз, что позволяет безопасно эксплуатировать линии пневмозагрузки этого компонента в смеситель.

В некоторых случаях при переработке гидрофильных веществ удается уменьшить интенсивность электризации повышением относительной влажности воздуха более 65%. Однако данный путь в производстве ВМ является неприемлемым т.е. повышение влажности резко ухудшает физико-механические характеристики топлива. Широкое распространение в последние годы в производстве ВМ получили такие меры защиты от проявлений СЭ, как применение электропроводных полимерных

материалов, трубопроводы из саженаполненного полипропилена  $< 1 \cdot 10^5$  Ом, катки дефектоскопов из электропроводной резины  $< 1 \cdot 10^6$  Ом, упаковочная электропроводная пленка на основе полиэтилена и полипропилена  $< 1 \cdot 10^7$  Ом.

В заключение следует отметить, что возникновение начального очага в СЭ производстве и при эксплуатации ВМ можно полностью исключить при соблюдении отраслевых правил защиты от статического электричества.

#### 6.4. Чувствительность к тепловым воздействиям

Одним из важнейших показателей, характеризующих любой ВМ, является его чувствительность к тепловому импульсу. Рассмотрение в предыдущих параграфах причины возникновения начального очага загорания при механических воздействиях или разряде статического электричества в конечном итоге носили тепловой характер, т.е. механическая или электрическая энергия трансформировалась в тепловую. Тепловая чувствительность также характеризует химическую стойкость конкретного взрывчатого материала. Если в ВМ при нормальной температуре процессы термического разложения практически отсутствуют, во всяком, случае настолько малы, что ВМ многие годы практически не изменяет своих свойств. При нагреве вначале возникает самоускоряющийся процесс его разложения, который заканчивается вспышкой, т.е. происходит самовоспламенение ВМ. Температура самовоспламенения представляет собой ту температуру, начиная с которой равновесие между теплоприходом и теплоотводом становится неустойчивым, т.е. теплоприход превосходит теплоотвод  $Q_n > Q_r$ . Условия теплоотвода относительно мало зависят от природы

ВМ, и в сильной степени зависят от скорости его термического распада, которая находится в функциональной зависимости от температуры вспышки ВМ.

В связи с тем что теплоприход пропорционален объему ВВ, а теплоотвод — его поверхности, то с увеличением массы ВМ температура вспышки ( $T_{всп}$  С) снижается, аналогичным образом снижение температуры вспышки находится в функциональной зависимости от времени нагревания.

В практике наиболее распространены два приема определения температуры вспышки ( $T_{всп}$ ).

Определенную навеску ВВ (1 г) в пробирке помещают в металлический блок или баню, заполненную сплавом Вуда, которые нагреты до температуры  $100^\circ$  С с дальнейшим нагревом в темпе  $5-20^\circ$ С в минуту. Отмечают температуру в момент вспышки и ее характер. Второй метод заключается в установлении зависимости изменения периода индукции или задержки вспышки от температуры. По этому методу температуру поддерживают постоянной с момента помещения навески ВМ, замеряя при этом время до вспышки, т.е.  $T = f(\tau)$ . Этот метод позволяет полнее характеризовать чувствительность ВМ к тепловому импульсу, в частности, оценить энергию активации  $E$ , применяя известное выражение Тодеса

$$\tau = B \cdot E^{E/RT},$$

где  $R$  — газовая постоянная,  $R = 1,98726$  кал./град/моль;  $T$  — температура вспышки;  $B$  — константа, зависящая от условий опыта (количество ВМ, условия теплообмена).

По существу минимальное значение температуры (табл. 6.7) при максимальном времени нагревания, при которых происходит вспышка ВМ, является температурой начала интенсивного разложения ( $T_{инт}$ ), т.е. даль-

нейший процесс становится самоускоряющимся и приводит к полному сгоранию ВМ.

Таблица 6.7

ВВ	t°С
Пироксилин	195
НГЦ	210
НГЦ - порох	180 - 220
Смесевые топлива	240 - 280
Гексоген	230
Тротил	290
Азид свинца	315

Одной из важнейших характеристик чувствительности ВМ к тепловому импульсу является способность его воспламенения под воздействием внешнего источника тепла.

Необходимое количество тепла для его воспламенения зависит от природы ВМ и может быть оценено при помощи следующей зависимости:

$$Q = \frac{\lambda}{U_2} (T_k - T_o),$$

где  $\lambda$  — коэффициент теплопроводности ВМ, кал/г° С;  $U_2$  — скорость горения ВМ, мм/с;  $T_k$  — температура поверхности ВМ при воздействии источником поджигания;  $T_o$  — начальная температура ВМ.

Воспламеняемость ВМ является не только характеристикой, отражающей свойство ВМ, но также имеет практическое значение при конструировании воспламенителей для реактивных двигателей и артиллерийских выстрелов. Существует многообразие методов оценки воспламеняемости ВМ. Одним из простейших является метод оценки чувствительности к лучу огня от огнепроводного шнура. При этом методе определяют максимальное расстояние, при котором воспламеняется навеска (1 г) ВМ.

К.К. Андреев с сотрудниками предложили количественный метод оценки воспламеняемости, заключающийся в подборе минимальной навески воспламенителя при сжигании исследуемого образца ВМ в манометрическом приборе (прибор постоянного объема). По величине воспламеняющейся навески можно оценить необходимое количество энергии, достаточное для воспламенения исследуемого ВМ.

## 7. Оценка восприимчивости к детонации

### 7.1. Общие понятия о восприимчивости к детонации

Процессы взрывчатого разложения любого ВМ могут распространяться в виде горения и детонации. Если горение обуславливается главным образом теплопроводностью, то детонация может распространяться только под воздействием механической волны сжатия — ударной волны. Ударная волна в общем виде представляет собой скачок давления, возникающий в сжимаемой среде (газ, жидкость, твердое тело) в результате резкого удара, разряда электричества, и естественно, взрыва.

Стационарная ударная волна, которая постоянно поддерживается энергией, выделяющейся при химической реакции разложения ВМ, есть детонационная волна. Распространение устойчивого детонационного процесса по заряду ВМ возможно лишь при некоторых определенных условиях. Это в значительной мере определяется такими факторами, как природа или состав ВМ (смеси), диаметр заряда, плотность, начальная температура, оболочка заряда.

Явление детонации было объяснено в 1881 г. Бертло и Вьелем и ими были отмечены первые принципиальные особенности, заключающиеся в том, что процесс разло-

жения ВВ при детонации протекает выше скорости звука в данном веществе. Структура детонационной волны представлена схематически (рис. 7.1)

Если интенсивность волны выше критической величины, то за ее фронтом создается зона протекания интенсивных химических реакций. Глубина зоны в зависимости от природы ВМ будет составлять величину от долей мм до нескольких мм. Принято считать, что фронт ударной волны (передняя зона химических реакций) называют плоскостью химпика, а заднюю границу – фронтом детонационной волны.

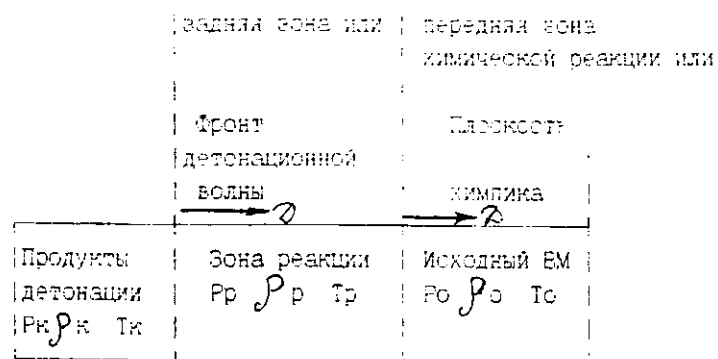


Рис. 7.1. Структурная схема детонационной волны

Ю.Б. Харитон сформулировал основной принцип протекания детонации, который можно представить следующим образом:

Всякая система, способная к экзотермическому превращению при определенных условиях, будет детонировать.

В связи с тем что при прохождении по заряду зоны разряжения ударной, волны происходит разброс вещества от периферии к центру заряда, принцип Ю.Б.

Харитона дает возможность оценить условия протекания стационарного детонационного режима, т.е.

$$\tau_1 \leq \tau_2,$$

где  $\tau_1$  — время протекания химической реакции в ВМ;  $\tau_2$  — время схождения волны разряжения к центру заряда.

Время протекания химической реакции для ВМ в конкретных условиях является величиной постоянной ( $\tau_1 = \text{const}$ ), и поэтому существует критическая величина диаметра заряда ( $d_{кр}$ ), при которой время схождения ( $\tau_2$ ) или путь ( $L$ ) прохождения волны разряжения к центру заряда ( $2L$ ) больше половины диаметра заряда  $\left(\frac{d}{2}\right)$  т.е.

$$d_{кр} \leq 2L_{кр}.$$

Таким образом, критическим диаметром можно называть такой диаметр заряда, выше которого возможно протекание стационарного детонационного процесса. Однако критический диаметр детонации характеризует только условия протекания химической реакции при процессе детонации, но не условия ее возбуждения, т.е. критические параметры давления во фронте ударной волны. Работами И.Я. Петровского, Б.И. Шехтера и других исследователей было показано, что при интенсивности ударной волны, воздействующей на заряд ВМ, ниже некоторого предела даже во взрывчатой системе не может возникнуть детонационный процесс, т.е. ударная волна пройдет по ВВ, как по инертному материалу.

Таким образом, восприимчивость ВМ к детонации характеризуется двумя факторами:

- возбудимостью химической реакции, измеряемой необходимой интенсивностью ( $U$ ) ударной волны (ударно-волновая чувствительность), характери-

зуемой критическим давлением возбуждения детонации в ВМ ( $P_{кр}$ ),

- продолжительностью химической реакции, измеряемой необходимой экстенсивностью ( $\mathcal{E}$ ), которая характеризуется критическим диаметром ВМ ( $d_{кр}$ ).

Для экспериментального определения критических параметров возбуждения детонации ( $d_{кр}$ ,  $P_{кр}$ ) ВМ, их полуфабрикатов и исходных взрывчатых компонентов используют следующие характеристики.

### 1. Критический диаметр

При определении критического диаметра детонации из шашки топлива на токарном станке вытачивают цилиндрический заряд длиной, равной 10 диаметрам. В том случае, если критический диаметр детонации меньше 20 мм, вытачивают один ступенчатый заряд.

Сыпучие или пастообразные материалы (порошки ВВ, твердые массы) помещают в заранее подготовленный цилиндр из бумаги, ацетатной пленки или стекла (рис. 7.2). Подготовленный заряд крепят на подложку из мягкого металла (свинец, латунь, алюминий). Иницирование испытуемого заряда осуществляют при помощи электродетонатора №8 через посредство промежуточного детонатора (нормальное иницирование) из бризантного ВВ (тротил, гексоген и т.п.) с параметрами, близкими к ожидаемым для испытуемого вещества. Длина дополнительного детонатора не менее 1,5 диаметров. Оценку результатов производят по длине характерного отпечатка на пластине-свидетеле (рис. 7.3). Определяют величину диаметра при прохождении детонации по всему заряду и при ее затухании с шагом 20% от величины испытуемого диаметра ( $d_{кр}$ ).

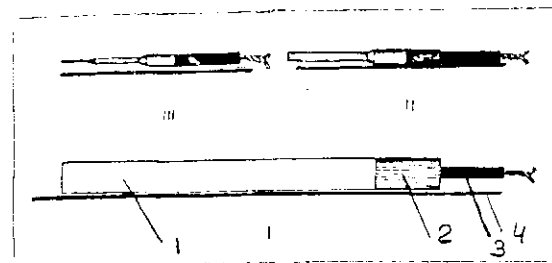


Рис. 7.2. Схема испытаний по определению критического диаметра детонации ВМ:

1 — испытуемый заряд; 2 — дополнительный детонатор; 3 — электродетонатор; 4 — пластина-свидетель

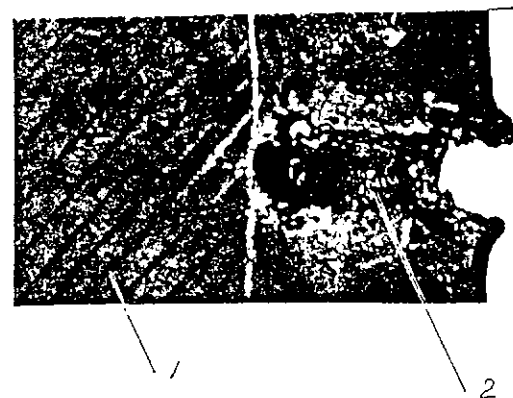


Рис. 7.3. Внешний вид пластины-свидетеля после испытаний по определению критического диаметра:

1 — пластина из мягкого металла; 2 — просечка (след) металла после прохождения детонации

### 2. Расстояние передачи детонации

Расстояние передачи детонации через воздушный промежуток характеризует относительную чувствительность к интенсивности ударной волны, т.е. возбудимость химической реакции при воздействии ударной волны на заряд ВМ. Два заряда размером 40-100 мм со-

осно устанавливают на стальной плите на определенном расстоянии при помощи бумажного цилиндра (рис. 7.4).

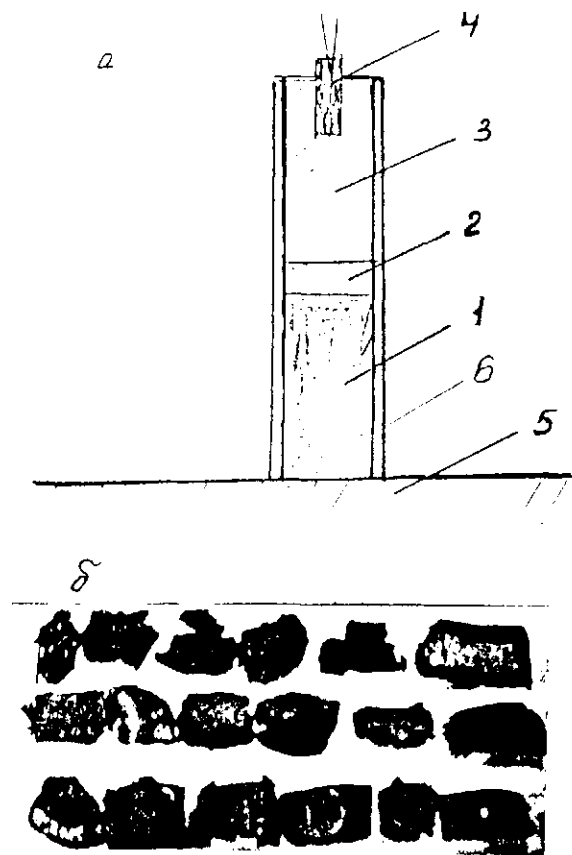


Рис. 7.4. Схема сборки (а) и характер дробления оболочки (б) после испытаний по определению критического давления возбуждения детонации:

1 — испытуемый заряд; 2 — плексигласовая преграда; 3 — ослабитель у в.; 4 — активный заряд; 5 — ст. плита; 6 — ст. оболочка

Находят расстояние передачи детонации от активного заряда, инициируемого электродетонатором, к пассивному (испытуемому) заряду ( $L_p$ ) как при 100% передаче детонации, так и при полном отказе с шагом 20% ( $L_n$ ). В случае большого критического диаметра испытуемого заряда его помещают в стальную трубу. Оценку результатов производят по наличию характерного отпечатка в стальной плите, на которой производят испытания (рис. 7.4).

### 3. Критическое давление возбуждения детонации ( $P_{кр}$ )

Данный показатель является логическим развитием описанной выше методики расстояния передачи детонации, так как также оценивает возбудимость химической реакции. Принципиальное отличие заключается в количественном измерении давления возбуждения детонации. Существуют две методики:

а) воздействие на испытуемый заряд ударной волной с плоским фронтом через набор плексигласовых или металлических пластин с известной ударной адиабатой от активного заряда с постоянными параметрами давления детонации;

б) воздействие на испытуемый заряд через преграду с постоянной толщиной (металл, плексиглас) заданным давлением от заряда из взрывчатой смеси (гексоген / поваренная соль) переменного состава.

С целью моделирования натуральных зарядов ВМ вся сборка помещается в стальную трубу ( $d_{вн} = 40$  мм,  $L = 200-250$  мм,  $\rho = 10$  мм). Определяют критическое давление срабатывания и отказа с шагом 20% ( $P_{кр} \pm$ ). Оценку результатов испытаний производят по отпечатку на стальной плите аналогично расстоянию передачи детонации или по степени дробления оболочки (рис. 7.4).

При определении величины критического диаметра, расстояния передачи детонации или критического давления возбуждении детонации также используют методы фоторегистрации при помощи высокоскоростных регистраторов типа СФР, ЖФР. Фактические данные по восприимчивости к детонации некоторых видов ВМ полуфабрикатов и исходных взрывчатых компонентов представлены в табл. 7.1.

Таблица 7.1

Параметры восприимчивости к детонации некоторых видов ВМ, полуфабрикатов и исходных компонентов

Наименование ВВ	Предельные значения			
	Критический диаметр, $d_{кр}$ , мм	Расстояние передачи детонации, мм	Критическое давление $P_{кр}$ , кбар	Скорость детонации, $V_{д}$ , м/с
1	2	3	4	5
РБП без минеральных добавок	15-30	6-8	70-90	6900
РПБ, содержащие минеральные добавки	1,5-14,0	10-20	40-45	7000
РПБ, содержащие кристаллические ВВ	2,5-4,5	20-40	25-35	7200-7500
Сухая крошка	10-20	1000	0,5-2	3000-3500
Таблетка	90	1000	5-7	4000-4500
ТТ на основе инертного связующего	> 90	—	> 200	
ТТ на основе инертного связующего и кристаллических ВВ	10-90	20-40	15-25	5500-6000
ТТ на основе активного связующего и кристаллического ВВ	10	40	15	6500
ПХА (порошок)	30-150	300-350	25	3000
ПХА + 1,5-2% горючих добавок (порош.)	6-10	400-500	10-15	3500
Гексоген (порошок)	1-3	1000	0,5-2	5500
Гексоген (прес.)	3	180	7	8100

Окончание таблицы 7.1

1	2	3	4	5
Октоген	4-10	1000	1-2	9100
Раздробленные ТТ всех видов (элементы 0,5-10)	10-120	1000	1-10	3000
ТНТ (пресс)	8-10	—	7-9	6500
ТНТ (литой)	30	—	14	6500
Аммонит типа 6ЖВ	10		15	3500
Динамон	25-30		25-30	3000

Влияние различных факторов на процессы детонации ВМ

Влияние оболочки на скорость и предельные условия распространения детонации обусловлено тем, что она сдерживает боковой разлет продуктов взрыва и тем самым препятствует проникновению волны разряжения в зону химических превращений, т.е. способствует более полному использованию потенциальной химической энергии в детонационной волне. Причем следует подчеркнуть, что решающую роль при этом играет не столько прочность, сколько масса оболочки. Из сказанного следует важный практический вывод, что при наличии оболочки критический диаметр конкретного ВМ будет меньше, чем без оболочки, т.е. нахождение ВМ в аппарате, изготовленном из прочного и тяжелого материала, будет облегчать процесс развития детонационного процесса в ВМ. С другой стороны, наличие оболочки приводит к частичному поглощению энергии на ее деформацию при протекании детонационного процесса. Это в свою очередь снижает внешнее действие взрыва, т.е. снижает работоспособность взрыва. Наличие оболочки практически для подавляющей номенклатуры ВВ не сказывается на зависимости скорости детонации от

диаметра заряда, т.к. при этом уже имеет место следующая зависимость (рис. 7.5).

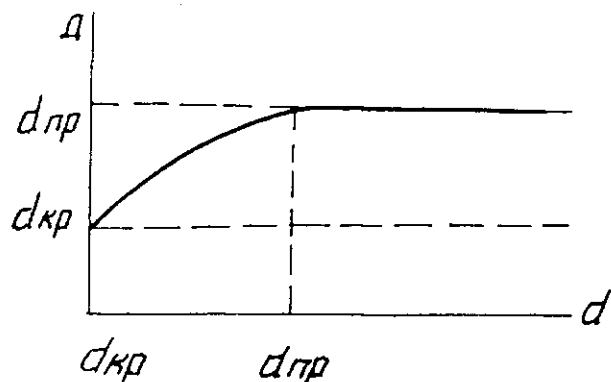


Рис. 7.5. Зависимость скорости детонации от диаметра заряда

Практически для всех смесевых ВМ имеет место зависимость критического диаметра от плотности  $d_{кр} = f(\rho)$ .

В частности, для промышленных ВВ типа аммонитов существует значение предельной плотности ( $\sim 1,4 \text{ г/см}^3$ ), выше которой ВВ уже не допускают к работе. С другой стороны, такая особенность поведения с ВВ является положительной для ТРТ.

Из представленных фактических данных видно:

- восприимчивость к детонации готовых РБП значительно ниже, чем у их полуфабрикатов. Введение минеральных добавок и особенно кристаллических

ВВ резко увеличивает их восприимчивость к детонации;

- ТТ на основе инертного связующего обладают низкой восприимчивостью к детонации (практически недетонационноспособны). Детонируют только в раздробленном состоянии, т.е. при малой плотности заряда;
- ТТ, содержащие кристаллические ВВ и особенно на основе активных связующих способны к устойчивой детонации в высокоплотном состоянии;
- ТРТ всех видов обладают более низкой восприимчивостью к детонации чем бризантные ВВ даже в высокоплотном состоянии;
- восприимчивость к детонации полуфабрикатов РБП находится на одном уровне с типичными ВВ типа гексогена в порошкообразном состоянии.

В целом ТРТ обладают низкой восприимчивостью к детонации и возбудить в них детонационный процесс возможно только при специальных условиях энергией подрыва ВВ.

## 7.2 Особенности детонации в заряде нарастающей плотности

На основе анализа большого экспериментального материала Ю.Б. Харитон показал, что при детонации ВМ могут реализовываться три основных механизма химических реакций: ударный, баллистический и смешанной.

Механизм детонационной химической реакции называют ударным, если ВМ вначале претерпевает сжатие и разогрев. Данный механизм характерен для гомогенных ВМ (жидкие ВВ, газы).

Баллистическим называют такой механизм взрывчатого превращения, когда происходит сгорание (химическая реакция) отдельных частиц вещества при прохождении ударной волны. Такой механизм характерен для малоплотных ВМ или систем, обладающих высокой газопроницаемостью (пористые системы).

Смесевым механизмом называют механизм детонационных реакций взаимодействия нескольких веществ, не находящихся в молекулярном контакте. Такой механизм характерен для гетерогенных систем. Процесс при этом проходит ряд стадий — разложение окислителя и горючего с дальнейшим взаимодействием продуктов их газификации.

Проведенные И.Я. Петровским и Л.Н. Волковым широкие исследования по восприимчивости к детонации РБП доказали, что их детонация протекает по центральному механизму, являющемуся разновидностью ударного механизма: под действием ударной волны химические реакции возникают в локальных очагах-центрах реакции, которыми являются прежде всего минеральные добавки, или кристаллы ВВ.

И.Я. Петровский и Л.В. Волков считают, что сущность влияния добавок на возбуждение и протекание детонационной реакции заключается в том, что при прохождении ударной волны по веществу частицы добавок, становятся активными центрами, поджигающими пластифицированную часть пороха, которая сгорает в условиях высоких детонационных давлений.

Отличительная особенность технологического процесса изготовления зарядов из РБП состоит в том, что при формовании заряда в шнек-пресс поступает полуфабрикат (таблетка) с низкой гравиметрической плотностью ( $\rho = 0,7-0,8 \text{ г/см}^3$ ), в котором постепенно увели-

чивается плотность вплоть до готового пороха ( $\rho = 1,6-1,7 \text{ г/см}^3$ ) Многочисленные экспериментальные данные, полученные И.Я. Петровским и Л.В. Волковым, показывают, что рыхлые структуры РБП при гравиметрической плотности в основном детонируют по баллистическому механизму с низкой (1000-4500 м/с) скоростью детонации. Только при специфических условиях полуфабрикаты некоторых РБП способны детонировать с высокой (7000-7500 м/с) скоростью по центральному механизму. Рыхлые структуры РБП разделяются на два вида: рыхлые структуры 1-го класса отличаются тем, что размер отдельного зерна в заряде меньше критического диаметра детонации готового пороха в виде шашки при высокой плотности. Таким образом, отдельные зерна способны детонировать отдельно, а только сгорать в общем фронте детонационной волны, т.е. детонировать только с низкой скоростью. Рыхлые структуры 2-го класса состоят из зерен, размер которых больше критического диаметра готового пороха в виде шашки при высокой плотности. Такие зерна могут не только сгорать, но и детонировать каждое в отдельности в общем фронте детонационной волны.

Таким образом, рыхлые структуры 2-го класса способны детонировать как по механизму низкой скорости (баллистический механизм), так и высокой (центральной механизм) в зависимости от условий инициирования. Низкие скорости детонации получаются, если заряды этого класса инициировать волной малой интенсивности, а высокие — если инициировать интенсивным импульсом. Если в заряде рыхлой структуры 2-го класса скорость детонации (по низкоскоростному режиму) достигает скорости 3000 м/с, то скорость скачкообразно возрастает и процесс детонации далее проходит по ре-

жиму высокой скорости, т.е. происходит смена механизма детонации с баллистического на центровой. Несложные расчеты с использованием известной зависимости

$$P = \frac{\rho \cdot V_d^2}{4},$$

где  $P$  — давление детонации, кг/см<sup>2</sup>,  $\rho$  — плотность заряда ВМ, г/см<sup>3</sup>,  $V_d$  — скорость детонации, м/с, показывают, что смена механизма детонации происходит, когда давление во фронте детонационной волны рыхлой структуры 2-го класса достигает величины 10-40 кбар в зависимости от природы пороха зависит от ряда факторов: природы пороха, качества полуфабриката (плотность, степень желатинизации, размера зерна и т.д.), также прочности и массы оболочки, а также диаметра заряда и закона нарастания плотности по длине заряда.

Сочетание влияния указанных факторов приводит к практически чрезвычайно важному явлению — разрыву процесса детонации в заряде нарастающей плотности при возбуждении в нем детонации по механизму низкой скорости.

И.Я. Петровский и Л.В. Волков, а позднее В.Н. Лапшин установили, что разрыв процесса детонации происходит в заряде с монотонно возрастающей плотностью при 1,2-1,3 г/см<sup>3</sup> при крутизне ее нарастания не менее 1,5 г/см<sup>3</sup>/м в зависимости от качества полуфабриката, диаметра заряда, а также прочности и массы оболочки.

Явление разрыва детонации в заряде, способным к устойчивой детонации по всей его длине, объясняется тем, что при определенной плотности заряда происходит смена механизмов детонации. На первом участке при малых плотностях детонационная реакция протекает по баллистическому механизму, т.е. путем сгорания

отдельных зерен с поверхности во фронте ударной волны, при достижении определенной плотности протекающая детонационная процесс затруднено. За счет того, что поверхность сгорания уменьшается и выделяющейся энергии уже недостаточно для поддержания химической реакции, т.е. детонационный процесс либо затухает, либо происходит смена его механизма. Смена механизма и дальнейшее протекание детонации в заряде нарастающей плотности происходят в том случае, если давление во фронте детонационной волны и длительность ее таковы, что она способна возбудить внутренние центры детонационной реакции в последующих более плотных слоях, т.е. по режиму высокоскоростной детонации. И наоборот, разрыв процесса детонации происходит, если давление во фронте ударной волны не достигает критических параметров, необходимых для последующих более плотных слоев заряда пороха. Определяющее значение в явлении разрыва детонационной цепи в заряде нарастающей плотности имеет закон нарастания плотности (крутизна нарастания плотности).

Сущность влияния этого закона представлена на рис. 7.6. Нарастание давления во фронте ударной волны при детонации заряда происходит таким образом, что при достижении процесса детонации по длине заряда до критической плотности смены механизмов.

Точка А — давление во фронте волны меньше критического, которое необходимо для возбуждения высокоскоростной детонации по центральному механизму, поэтому процесс затухает — точка Б, т.е. происходит разрыв процесса детонации. При нарастании давления достижение критического давления смены механизмов во фронте детонации происходит при плотности ниже критической (точка В) и по достижении критической плот-

ности (точка Г) процесс получает развитие по механизму высокоскоростной детонации, т.е. разрыва детонационной цепи не происходит.

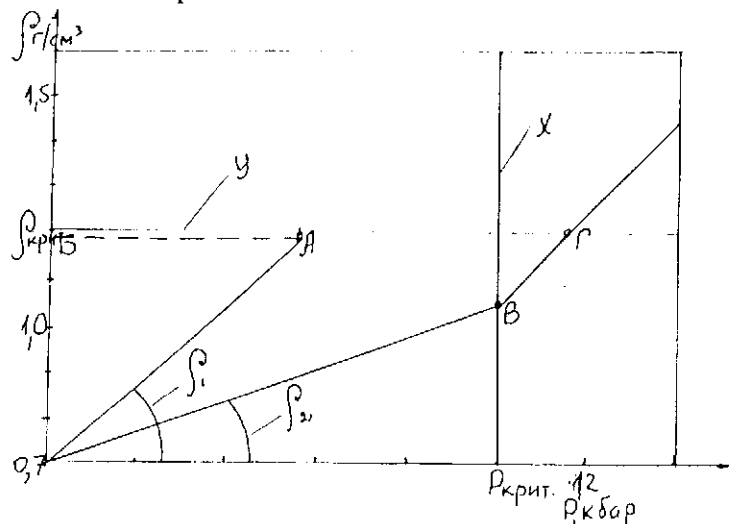


Рис. 7.6. Схема разрыва процесса детонации в заряде ВМ нарастающей плотности:

$X$  — предельное давление при смене механизма детонации в заряде нарастающей плотности;  $Y$  — уровень плотности ВМ при разрыве процесса детонации; 1 — кривая роста давления во фронте детонационной волны при законе нарастания плотности  $\rho$  ( $г/см^3$ ) по длине заряда  $> r_{кр}$ ; 2 — кривая роста давления во фронте детонационной волны при законе нарастания плотности  $\rho_2$  ( $г/см^3$ ) по длине заряда  $< r_{кр}$ .

В настоящее время закономерности и факторы, влияющие на явление разрыва детонационной цепи в зарядах нарастающей плотности, учитывают в конструкциях шнек-прессов, используемых при формовании зарядов из РБП. При этом крутизна нарастания плотности пороха в шнек-прессах различных конструкций в зависимости от их прочности и природы перерабатываемого пороха составляет величину более  $2 г/см^3/п.м.$  В практических условиях работы для каждого состава по-

роха и конструкции шнек-пресса путем испытаний специальных моделей подбираются такие параметры порохового полуфабриката (плотность, влажность, размер), которые исключают возможность выхода детонации из рыхлой части пороха в его плотную часть, т.е. из шнек-пресса в раструб и шашку пороха.

### 7.3. Влияние кристаллических ВВ на детонационный процесс СВМ

Известно, что первичная химическая реакция возникает на поверхности раздела частиц окислителя и горючего. При сжатии ударной волной плотного вещества зарядов в тепло переходит только часть работы сжатия. Если бы это тепло выделялось по всему объему совершенно равномерно, то его оказалось бы недостаточно для разогрева вещества до температур, при которых обеспечивается быстрое протекание химических реакций. В действительности выделение тепла по объему происходит неравномерно. Это связано с тем, что элементарные области СВМ имеют различные механические свойства и химическую активность. Частицы окислителя или другого кристаллического компонента отличаются малой сжимаемостью и малой способностью к изменению формы, наоборот, прослойки связующего между твердыми частицами окислителя или другого компонента способны значительно сжиматься и легко подвергаются деформации. Поэтому при сжатии вещества ударной волной происходит сближение частиц и течение между ними связующего.

На участках интенсивного течения связующего и происходит преимущественное выделение тепла с образованием так называемых «горячих точек», когда связующее инертное, загорание возможно лишь на поверхности раздела компонентов. Если же связующее ак-

тивное или топливо содержит высококалорийный компонент, то очаги реакции могут возникать также и внутри слоя самого связующего или высококалорийного компонента. При тонких прослойках связующего возможно возбуждение очагов химической реакции за счет ударного трения одних частиц о другие (окислитель, кристаллические наполнители). Увеличение величины прослойки будет затруднять возможность ударного трения одних кристаллических частиц о другие и снижать интенсивность течения между ними, так как частицы окислителя в топливе располагаются неравномерно, химическая реакция сначала перестает возбуждаться на поверхности наиболее удаленных между собой частиц. Снижение количества центров реакции приводит не только к снижению возбудимости детонационной реакции, но и к увеличению продолжительности (времени) ее протекания.

Введение в состав СВМ активных компонентов должно увеличить их восприимчивость к детонации. В связи с этим возникает практически важный вопрос о приемлемом уровне содержания таких компонентов и, в частности, кристаллических ВВ в составе топлива. Основными факторами, влияющими на протекание детонационной реакции, являются:

- количество кристаллического ВВ в составе топлива;
- гранулометрический состав ВВ;
- качество кристаллов ВВ.

Известно, что кристаллические ВВ, разбавленные инертными материалами, например поваренной солью, сохраняют способность детонировать при содержании ВВ в смеси всего 5%. Топливная масса же представляет собой суспензию твердых частиц ВВ и других наполнителей в жидком связующем с конечной вязкостью.

Таким образом, правомерно предположить, что кристаллические ВВ играют определяющую роль в химической детонационной реакции. При введении в состав ВМ кристаллических ВВ типа гексогена их восприимчивость к детонации возрастает (рис. 7.7). Если введение кристаллических ВВ в баллиститные композиции приводит только к количественному изменению параметров восприимчивости к детонации, то введение кристаллических ВВ в состав смесевых композиций приводит не только к количественному, но и качественному изменению. При введении кристаллических ВВ в ВМ последние приобретают способность детонировать в диаметрах реально используемых в практике зарядов.

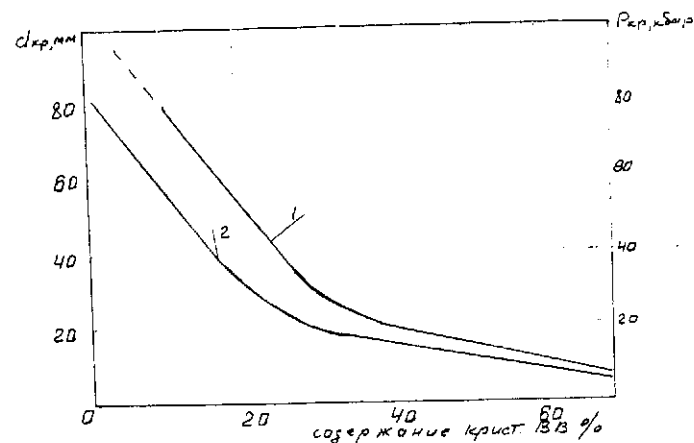


Рис. 7.7. Зависимость критического диаметра ( $d_{кр}$ ) и давления возбуждения ( $P_{кр}$ ) во ВМ в зависимости от содержания кристаллического ВВ:

1 — инертное горючее; 2 — активное горючее

Необходимо сразу отметить, что роль кристаллических ВВ в зависимости от их содержания в композиции, различна. До определенного содержания ВВ играет роль

центров реакции и тепло, выделяемое при сгорании частиц ВВ, идет на ускорение газификации окислителя и связующего, что приводит к снижению продолжительности протекания детонационной реакции, а следовательно, и критического диаметра детонации топлива. Начиная с определенного предела содержания ВВ, происходит смена механизмов реакции, т.е. по механизму зафлегматизированного индивидуального ВВ. Экспериментальные данные (рис. 7.7) показывают, что смена механизма наблюдается при содержании 30-35% кристаллического ВВ в составе. При малом содержании ВВ в составе или при его отсутствиях проявляется также роль активного связующего. При этом наблюдается значительная разница в значениях критических диаметров детонации для композиций на активном и пассивном связующем.

Чем можно объяснить, что при большом содержании ВВ топливо детонирует по механизму индивидуальных зафлегматизированных ВВ, т.е. в детонационной реакции участвует только ВВ типа гексогена и лишь в незначительной степени окислителя типа ПХА. Скорость процесса взрывчатого разложения ВВ типа гексогена в несколько раз превышает скорость газификации и взаимодействия продуктов газификации. Действительно, если время ( $\tau$ ) разложения гексогена во фронте ударной волны составляет величину меньше, чем  $1 \cdot 10^{-5}$  с, а радиус его частиц в среднем  $r = 200$  мкм, то фронт волны успевает распространиться по заряду на величину ( $L$ ) не более 5 мм. Время же газификации ПХА таково, что фронт волны проходит на величину ( $L$ ) не менее 15 мм, т.е. на порядок больше, чем для гексогена.

Следовательно, реакция в гексогене успевает уже завершиться, а остальные компоненты топлива разбрасы-

ваются волной разряжения в окружающую среду, не успевая прореагировать.

Исходя из высказанных соображений о роли соотношения размеров элементарных областей горючего и окислителя, а также зависимости пути прохождения ударной волны по заряду от величины размера частицы ВВ можно предположить, что с увеличением размера частиц ВВ (гексогена, октогена) входящего в состав СВМ, время разложения должно увеличиваться. Экспериментальные данные подтвердили это предположение (рис. 7.8). Чем же объясняется данное явление? С увеличением размера частиц ВВ их удельная поверхность будет уменьшаться, а прослойка связующего будет возрастать. Поскольку СВМ относятся к классу сплошных гетерогенных систем и в этом отношении их можно сравнить с водосодержащими ВВ, то на основании представлений А.Я. Апина о механизме детонации в крупных кристаллах ВВ можно считать, что воспламенение крупного кристалла ВВ в топливе осуществляется с поверхности зерна обращенной к фронту ударной волны. В зависимости от величины кристалла удельная поверхность изменяется и, следовательно, количество ВВ, одновременно участвующего в детонационной реакции, также будет изменяться. Кроме того, как было показано выше, будет происходить также изменение времени разложения отдельной частицы ВВ.

Таким образом, за счет указанных факторов в целом будет изменяться продолжительность времени детонационной реакции, а следовательно, и критического диаметра детонации топлива. Необходимо отметить, что в случае недостаточной прочности отдельных частиц (кристаллов) ВВ (раковины, газовые включения, неспаи) при прохождении ударной волны происходит их разрушение, что приводит к скачкообразному увеличению

удельной поверхности ВВ, а следовательно, и снижению продолжительности протекания детонационной реакции, т.е. механизм протекания детонационной реакции становится аналогичным (как при мелких кристаллах).

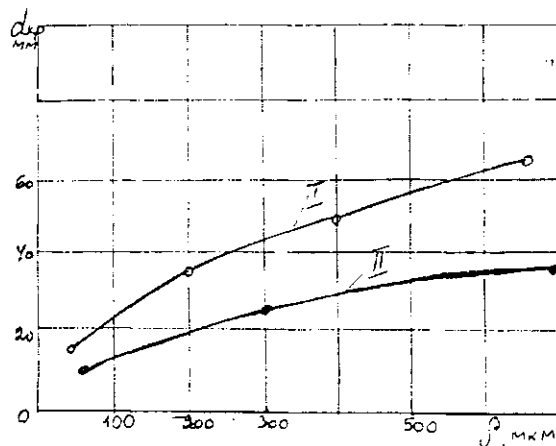


Рис. 7.8. Зависимость критического диаметра детонации смешевой композиции от размера частиц ВВ:

I — содержание ВВ — 20%; II — содержание ВВ — 30%

Для жидких ВВ, применяемых в качестве компонентов топлив, сохраняются общие закономерности влияния на протекание химической детонационной реакции, в частности, повышение восприимчивости к детонации с увеличением количества ВВ в составе. Однако, учитывая, что ударная сжимаемость жидких ВВ отличается от кристаллических ВВ и аналогична по этому показателю связующим, детонационная реакция в топливе протекает не по центровому механизму, а через гомогенный разогрев жидкого ВВ. В связи с этим продолжительность протекания детонационной реакции в топливе увеличивается, т.е. восприимчивость к детонации топлив, содержащих жидкие ВВ, ниже по сравнению с топливами, содержащими такое же количество кристаллических ВВ.

Поскольку СВМ представляет собой суспензию твердых частиц в связующем с конечной вязкостью, можно из формул Ю.Б. Харитона и А.Я. Апина по расчету критического диаметра ВВ в растворах аналитически оценить величину критического диаметра СВМ в зависимости от содержания ВВ.

Функционально эта зависимость, по Ю.Е. Зайчикову, может быть представлена в виде

$$d_{кр} = f\left(\alpha \exp A \frac{1-\alpha}{\alpha}\right),$$

где  $d_{кр}$  — критический диаметр ВМ;  $\alpha$  — весовая доля ВВ;  $A$  — эмпирический коэффициент, зависящий от свойств ВВ.

Для современных типов коэффициент  $A$  составляет величину 1,125–1,325 в зависимости от содержания ВВ. Расчет коэффициента  $A$  производится по выражению

$$A = 0,625 + 10[(1-\alpha) - 0,55]^2.$$

Опуская промежуточные преобразования, выражение для расчета критического диаметра детонации СВМ можно записать в виде

$$d_{кр} = d_{кр} 2 \exp\{0,625 + 10[(1-\alpha) - 0,55]^2\} \frac{1-\alpha}{\alpha},$$

где  $d_{кр}$  — критический диаметр детонации порошкообразного ВВ.

Используя приведенное выражение, можно на стадии проектирования конкретного состава наряду с расчетом основных параметров оценить также его детонационную способность.

#### 7.4. Возбуждение детонации при ударе быстролетающим телом

Возникновение детонационного процесса в любой взрывчатой системе (ВС) может происходить не только путем действия энергии другого ВВ, а также при ударе быстролетающего тела. В реальных условиях таким быстролетающим телом может быть пуля, осколок снаряда, а также осколки при разрыве технологической аппаратуры при аварийной ситуации. Причем в этом случае осколки могут быть самой различной конфигурации и веса, а также иметь широкий диапазон скорости. Быстролетающее тело в месте удара по топливу создает ударную волну, которая в определенных условиях может вызвать загорание или детонацию заряда ВМ.

Рассмотрим несколько подробнее явления, происходящие при ударе быстролетающего тела (осколка), имеющего скорость ( $v$ ). В месте удара возникает ударная волна с амплитудой давления  $P_0$ . Возникшая ударная волна распространяется равнозначно как в тело осколка, так и в массу ВМ, с параметрами  $P_0$ ,  $U_0$ .

Пограничный слой осколка – ВМ движется также со скоростью  $U_0$ . Учитывая, что осколок имел собственную скорость  $v_0$ , ударная волна, движущаяся по телу осколка будет иметь параметры ( $P_0$ ) и массовую скорость ( $v_0 - U_0$ ).

Аналитическая связь между основными параметрами выражается соотношениями:

- для ВМ  $P_0 = V_{\text{ВМ}} - U_0$
- для осколка  $P_0 = V_{\text{ос}}(v_0 - U_0)$ ,

где  $P_0$  — давление ударной волны;  $V_{\text{ВМ}}$  — скорость ударной волны;  $V_{\text{ос}}$  — собственная скорость осколка в момент удара.

Если известна скорость осколка, то, используя данные соотношения, можно оценить давление в ударной волне и наоборот — по известному давлению в ударной волне оценить скорость летящего осколка. Ударную волну с необходимыми для детонации топлива параметрами можно создать путем подрыва специального заряда-инициатора, имеющего регулируемое давление детонации на торце заряда, за счет изменения его состава, например, смесь гексогена с поваренной солью в различных соотношениях. Михалев В.С. и Бывалин Ю.Г. показали, что если диаметр заряда-инициатора равен диаметру осколка, то параметры ударной волны, возникающей при ударе цилиндрического быстролетающего тела, будут идентичны таковой при взрыве заряда-инициатора, т.е. если в лабораторных условиях произвести серию испытаний с помощью специальной сборки по определению параметров волны, возбуждающих ВМ (за счет изменении соотношения компонентов заряда-инициатора), то можно рассчитать скорость осколка при диаметре ( $d$ ), который при ударе вызовет детонацию в данном заряде ВМ.

Для расчета используется соотношение

$$V_{\text{ВМ}} = \frac{P_{\text{ос}}}{\rho_{\text{ВМ}} \cdot V_g} + \frac{P_{\text{ос}}}{\rho_{\text{ос}} \cdot V_{\text{ос}}},$$

где  $\rho_{\text{ВМ}}$  и  $\rho_{\text{ос}}$  — плотности ВМ и осколков.

Наряду с описанным способом оценки критической скорости возбуждения детонации топлива применяется прямой экспериментальный метод с использованием специального устройства метания осколка с необходимой скоростью. В качестве такого устройства используют либо баллистический ствол калибром  $d = 3$  мм или специальный заряд ВВ с укрепленным в его торце оскол-

ком. Скорость полета осколка регулируют в первом случае навеской пороха, а во втором — весом заряда ВВ. Размер исследуемого топлива подбирается таким образом, чтобы его диаметр превышал критический диаметр детонации топлива ( $d > d_{кр}$ ), а длина была 1-1,5 заряда. Путем серии испытаний определяют критическую скорость полета осколка, при которой возбуждается детонация.

Для иллюстрации в табл. 7.2 представлены данные по критическим параметрам возбуждения детонации при поражении некоторых видов ВМ осколком весом 10г.

Таблица 7.2  
Критические скорости осколка при возбуждении детонации в ВМ

Наименование	Критическая скорость осколка, м/с	Параметры восприимчивости к детонации	
		$d_{кр}$ , мм	$P_{кр}$ , кбар
РБП без минеральных добавок	2500	19	90
РБП с минеральными добавками	2000	1,5-14	40-45
РБП, содержащие ВВ	1500-2000	2,5-4	20-35
ВМ, содержащие кристаллические ВВ	2500	30-35	20
ВМ на основе активных связующих и ВВ	1000-1500	10-15	12-15
Флегматизированный гексоген (прессованный А-IX-1)	500	3	7
Тротил прессованный	800-1000	10	10-14

Следует отметить, что критическая скорость осколка, при которой происходит детонация, зависит не только от природы и физико-химических свойств конкретного ВМ, но также и таких факторов, как материал оболочки и масса поражающего элемента.

В общем виде зависимость критической скорости осколка от его массы может быть описана кривой вида (рис. 7.9).

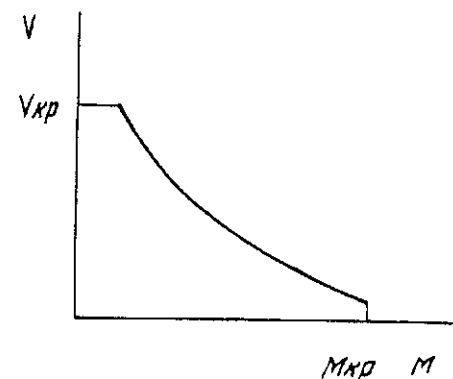


Рис. 7.9. Зависимость критической скорости осколка для возникновения детонации во ВМ от его массы

Так, по данным Абызова М.М., шашка РБП может детонировать при поражении ее осколком весом 60-70г. даже при скорости менее 500 м/сек, в то же время при весе осколка 10 г скорость должна составлять величину большую 2000 м/с. Что касается влияния преграды на снижение скорости встречи осколка непосредственно с ВМ, то ее величина в реальных условиях может быть снижена до 50%. Н.К. Преображенский на основе многочисленных экспериментальных данных дает следующую зависимость влияния материала на падение скорости осколка при прохождении его через преграду:

$$V_{экр} = V_0 \cdot (1 + 0,054\lambda^{4/3}),$$

где  $V_{экр}$  — сумарная скорость осколка;  $V_0$  — критическая скорость не защищенного ВМ;

$$\lambda = \frac{\rho}{q^{1/3}} \cdot \frac{1}{c},$$

где  $\rho$  — толщина стального экрана;  $q$  — масса осколка;  $c$  — константа от 0,5 до 1,5.

Таким образом, знание закономерностей возбуждения детонации при инициировании ВМ осколками имеет практическое значение при выборе конструкций аппарата и их взаимном расположении.

## 8. Возникновение взрывных процессов при загорании ВМ

### 8.1. Устойчивость процесса горения ВМ

Горение сложное физико-химическое явление, в основе которого лежит совокупность процессов, приводящих к превращению исходной конденсированной системы в нагретое до высокой (тысячи градусов) температуры газообразные и конденсированные продукты. Механизм горения конденсированных ВС управляется теплопроводностью и зависит от природы и свойств конкретного вещества. Главными факторами, влияющими на процесс горения и его скорость, являются давление и температура. Различают линейную скорость горения ВМ, которая выражается соотношением

$$U = \frac{dx}{d\varepsilon},$$

и массовую скорость горения

$$U_m = U \rho_0,$$

где  $\rho_0$  — плотность ВМ.

Горение ВМ (рис. 8.1) состоит из следующих основных стадий:

- конденсированной фазы в исходном ВМ (к-фаза),
- паро-дымовой фазы,
- зоны пламени.

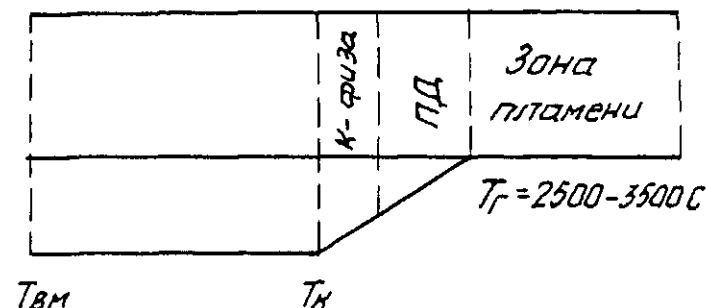


Рис. 8.1. Схема горения ВМ

Указанные факторы являются определяющими при образовании высокотемпературных продуктов сгорания. Если две последние стадии следствие химической реакции разложения исходного ВМ, то к-фаза, является генератором скорости протекания процесса, т.е., насколько быстро и глубоко будет подготовлена к химической реакции к-фаза, настолько быстро будет протекать процесс горения и образования высокотемпературных газов — источников образования волн сжатия. В свою очередь образование к-фазы зависит от скорости и количества подведенной энергии в виде тепла.

Одной из основной закономерностей при горении ВМ является его закон горения, выражаемый как

$$U = P \cdot \nu,$$

где  $U$  — скорость горения, мм;  $P$  — рабочее давление, кгс/см<sup>2</sup>;  $\nu$  — показатель, характеризующий изменение

скорости горения от внешних факторов и природы ВМ (устойчивость горения).

Показатель  $\nu$  для различных систем, способных к устойчивому горению, не может быть  $> 1$  и для современных ВМ лежит в пределах 0,15-0,7. Любое нарушение закона горения ВМ будет сопровождаться изменением таких параметров, как газоприход и давление, что в конечном счете приведет к взрывному эффекту. Поэтому немаловажным вопросом является знание закономерностей протекания нормального горения ВМ и условий его нарушения, т.е. оценки устойчивости горения. Так, горение ВМ в замкнутом или полужамкнутом объеме всегда будет сопровождаться взрывным эффектом, даже при нормальном послойном горении, если газоприход будет превышать газорасход  $\nu_{\text{прих}} > \nu_{\text{рас}}$ . В свою очередь газоприход зависит от целого ряда факторов природы физического состояния температуры вещества и т.п. В общем виде величина взрывного эффекта недетонационного характера будет больше, чем больше скорость нарастания давления во времени ( $dP/dt$ ), которая зависит еще и от прочности и массы оболочки.

В данном разделе не ставится задача рассматривать подробно все факторы, влияющие на закономерности горения ВМ. Остановимся только на тех, которые определяют возможность нарушения устойчивости горения, приводящего к взрывному эффекту. Так как СВМ являются высокоплотными системами, обладающими высокой прочностью и эластичностью, то их можно отнести к системам с замкнутой пористостью. Устойчивость же горения ВМ определяется прежде всего уровнем давления ( $P$ ), при котором происходит горение, и пористостью ( $m$ ), т.е.

$$P_{cp} = \lambda(m), \quad m = 1 - \frac{\rho_{\text{фак.}}}{\rho_{\text{теор.}}},$$

где  $P_{cp}$  — давление срыва нормального послойного горения СВМ, кгс/см<sup>2</sup>;  $\rho$  — теоретическая и фактическая плотности СВМ, г/см<sup>3</sup>.

Явление срыва нормального горения в ракетных порохах при достижении определенного давления в ракетной камере было установлено еще в начале сороковых годов Б.П. Жуковым, который объяснил это давление прорывом газов в глубь заряда, что неизменно ведет к интенсивному разрыву корпуса ракетной камеры. А.Ф. Беляев и А.А. Сулимов установили аналитическую связь между давлением срыва и замкнутой пористостью, которая описывается гиперболической зависимостью

$$P_{cp}(m - B) = A,$$

где  $A$ ,  $B$  — константы;  $A$  — суммарный параметр (показатель), характеризующий устойчивость горения, который определяется физико-химическими свойствами системы и для ТРТ составляет величину 3-7;  $B$  — величина, характеризующая значение закрытой пористости, которая по оценкам названных причин 0,025, при этом послойное горение сохраняется при условии  $m > B$ .

Анализируя данную зависимость, можно сказать, что при наличии пористости должно сохраняться послойное горение до высоких давлений. Многочисленные экспериментальные данные показывают, что фактическая пористость, обеспечивающая устойчивость горения современных ВМ в рабочем режиме давлений (до 100 кгс/см<sup>2</sup>), составляет величину до 0,03, т.е. 3% максимальной плотности системы.

Как смесевые, так и баллиститные пороха (топлива) ввиду специфики свойств (состояние поверхности, час-

Б.Н. КУТУЗОВ, Г.А. НИШПАЛ

тиц, гомогенность системы, величины частиц) проявляют большую устойчивость горения, чем бризантные в зависимости от пористости. При том для этих систем характерны замкнутая пористость, т.е. меньшая газопроницаемость. Бризантные индивидуальные ВВ (тротил, тэн, гексоген) обнаруживают большую зависимость к давлению срыва (потере устойчивости) от пористости. Это можно объяснить тем, что по своей природе эти вещества относятся к системам с сообщающейся пористостью, т.е. газопроницаемым системам. Описанные выше соображения в определенной мере объясняют факт большей склонности к потере устойчивости ВВ при горении и к более легким условиям развития взрывных процессов.

Существует несколько способов проверки устойчивости горения ВМ, однако в практике наиболее широкое применение нашли два способа.

1. Оценка устойчивости горения ВМ в приборе постоянного объема с вышибной мембраной при высокой плотности заряжания ( $\Delta = 0,65 \text{ г/см}^3$ ) (метод Ю.Н. Аксенова и И.В. Мильчакова).

Сущность метода (рис. 8.2) заключается в том, что бронированную по всей поверхности шашку диаметром 40 мм, длиной 60 мм без внутренних каналов помещают в прибор, герметизируют и производят сжигание. При помощи тензометрического усилителя и осциллографа производят запись  $P = f(\tau)$  и находят предел устойчивости горения ВМ. Для современных ВМ предел устойчивости, определенный по данному методу, составил величину более  $1000 \text{ кгс/см}^2$ . С учетом масштабного фактора критическое значение предела устойчивости для реальных систем  $300 \text{ кгс/см}^2$ .

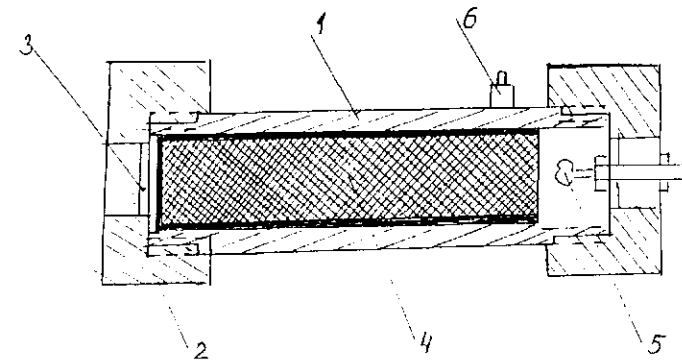


Рис. 8.2. Схема испытаний по оценке устойчивости горения в приборе постоянного объема с мембраной:

1 — корпус; 2 — крышки; 3 — срезные мембраны; 4 — образец; 5 — воспламенитель; 6 — датчик давления.

2. Оценка устойчивости горения в приборе постоянного объема (манометрическая бомба) при малой плотности заряжания ( $\Delta = 0,12 \text{ г/см}^3$ )

Сущность метода (рис. 8.3) заключается в том, что в герметично закрытую бомбу постоянного объема (100 мл.), выдерживающую давление до  $2000 \text{ кгс/см}^2$ , помещают образец ВМ массой 10-12 г и производят сжигание.

Оценку устойчивости горения производят как качественно, так и количественно по скорости нарастания давления ( $dP/d$ ). Расчет величины нарастания давления во времени производят по зависимости:

$$dP/d\tau = K v_p t g \alpha,$$

где  $K$  — тарировочный коэффициент,  $\text{кгс/см}^2$ ;  $v_p$  — скорость протяжки пленки,  $\text{мм/мс}$ ;  $dP/d\tau$  — скорость нарастания давления,  $\text{кгс/см}^2$ ;  $\alpha$  — угол наклона при записи процесса на пленке.

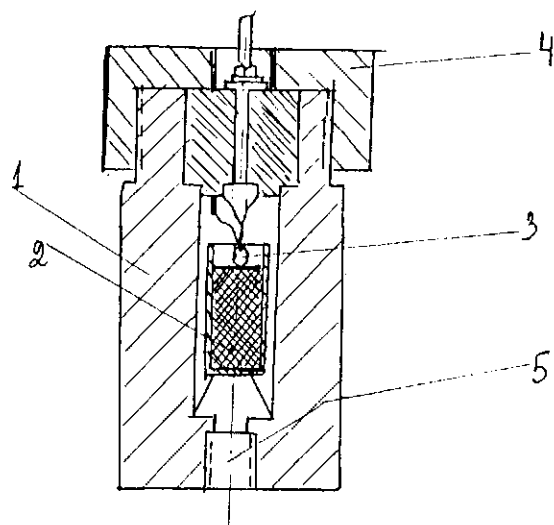


Рис. 8.3. Схема испытаний по оценке устойчивости горения в приборе постоянного объема:

1 — корпус; 2 — образец; 3 — воспламенитель; 4 — крышки; 5 — датчик.

Данные по уровню темпа роста давления некоторых ВМ представлены в табл. 8.1.

При горении образца топлива в приборе постоянного объема без срыва нормального горения кривая записи  $P = f(\tau)$  идет плавно без изломов (рис. 8.4 а).

При срыве же устойчивости горения на кривой наблюдается резкий излом, что свидетельствует о резком изменении давления в приборе постоянного объема (рис. 8.4 б).

подавляющее большинство топлив при высокой плотности (относительная пористость 0,05) сгорают нормально параллельными слоями до давлений больше  $1000 \text{ кгс/см}^2$  в широком диапазоне температур. Если горение носит неустойчивый характер, с резким нараста-

нием давления, то это свидетельствует о том, что в реальных условиях работы ракетной камеры оно может привести к ее разрыву (рис. 8.5).

Таблица 8.1

Показатель  $dP/d\tau$  для различных материалов

NN/ пп	Наименование	Физическое состояние (плотность, $\rho$ , г/см <sup>3</sup> )	Показатель $dP/d\tau$ , кгс/см <sup>2</sup> /мс
1	Твердое топливо (ТТ) с различной скоростью горения до 20 мм/с	Монолит 1,6-1,85	20-80
2	Пороховой полу-фабрикат таблетка 10×10 мм крошка до 5 мм	Монолит 1,6-1,85	30-180
		Зерно 1,4-1,5	200-300
3	Гексоген с величиной частиц до 250 мкм	Порошок 1,0	700-800
4	Тротил чешуируванный	Зерно 0,9	200
5	Крошка ПП (1-3 мм)	"-	500
6	Зерно ПП	"-	70-120

В ряде случаев при сжигании образцов топлив, имевших высокую плотность (пористость менее 0,01), горение сразу носило взрывной характер (рис. 8.6), т.е. объяснить такой характер горения только наличием пористости не представляется возможным. Такое явление получило название объемного (взрывного) горения. При явлениях срыва нормального послойного горения большую роль играют физико-химические свойства компонентов топлива и характер пор. Для распространения горения внутри структуры топлива наиболее благоприятны поры отслоения связующего от окислителя или пластифицированной части от наполнителя. В таких порах в прорывающихся горючих газах горение может быть

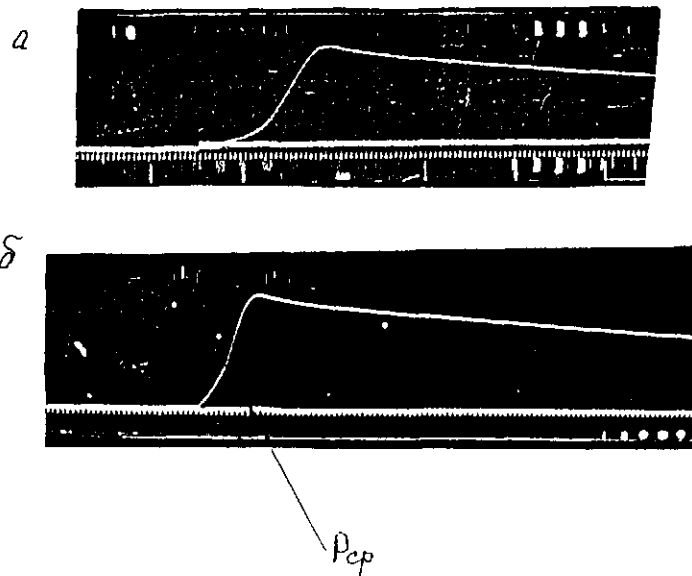


Рис. 8.4. Типичные осциллограммы  $P = f(\tau)$  при сжигании образца ВМ в приборе постоянного объема:  
 а — нормальное послышное горение, б — срыв нормального горения;  $P_{ср}$  — точка срыва

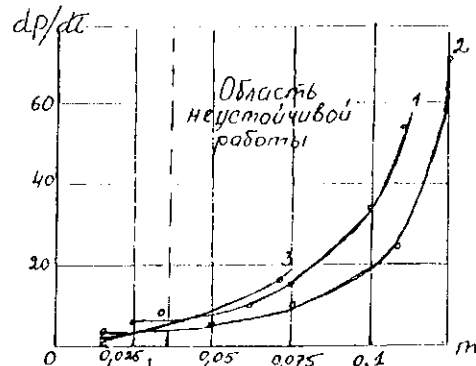


Рис. 8.5. Характер зависимости скорости нарастания давления ( $dP/d\tau$ ) от пористости для различных ВМ при горении в приборе постоянного объема

поддержано химической реакцией. Трудно представить быстрое проникание горючих газов внутрь структуры по порам без активной поддержки химической реакцией. Возможность объемного горения в ВМ связана с наличием следующих условий: в СВМ должно происходить отслоение связующего (пластифицированной части) от окислителя (наполнителя). При этом образование микропор не изменяет практически плотности. Этому явлению может способствовать неудовлетворительная адгезия компонентов или ее ухудшение в процессе старения, а также изменение структуры на поверхности контакта — наполнитель с выделением при этом на контактную поверхность наиболее реакционноспособных соединений типа радикалов. Охлаждение изделия вследствие разности коэффициентов объемного расширения компонентов также может вызвать отслоение по контактными поверхностям. Наконец, напряжения растяжения, в том числе и термические, могут явиться также причиной отслоения. Последнее играет очень существенную роль для крупногабаритных изделий СВМ с высокой степенью наполнения (88–92%) — отслоение связующего от наполнителя должно образовывать в исходном заряде систему сообщающихся пор либо систему пор, которая становится сообщающейся в процессе горения.

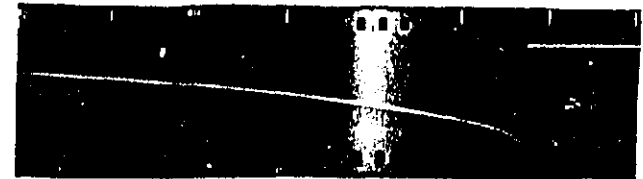


Рис. 8.6. Осциллограмма записи  $P = f(\tau)$  при объемном (взрывном) горении образца ВМ в приборе постоянного объема

Свойства, компонентов должны обеспечивать поддержание высокого давления газов за счет высокой ре-

акционной способности и экзотермичности компонентов на контактных поверхностях. Только обеспечением перечисленных условий возникновения и протекания объемного горения можно объяснить мощные взрывы при огневых стендовых испытаниях ракетной системы «Трайдет» (США). Как следует из литературных источников, заряды для системы «Трайдет» состояли из так называемого двухосновного топлива, в состав которого входили в качестве связующего НКЛ и НГЦ, а в качестве наполнителя — ПХА, Al и октоген (~50%). Сочетание таких компонентов и обеспечило условия для возникновения объемного горения, т.е. высокая гетерогенность системы, пониженная стойкость и высокая реакционная способность на контактных поверхностях. Из-за высокой восприимчивости к детонации данного топлива взрывы происходили по следующей схеме: ослабление адгезионных связей в процессе хранения с выделением НГЦ на поверхности ПХА или октогена. При срабатывании воспламенителя и выхода на режим работы создавался очаг давления, достаточный для возбуждения процесса объемного горения, который создавал условия образования ударной волны необходимой интенсивности и детонации основной массы заряда топлива массой порядка 30 т.

В настоящее время отсутствуют аналитические зависимости оценки условий возникновения и протекания объемного горения и все объяснения носят пока качественный характер и могут быть подтверждены только экспериментальным путем на достаточно представительных моделях.

## 8.2. Переход горения в детонацию

Одной из наиболее реальных опасностей при производстве и эксплуатации ВМ является переход горения во взрыв (детонацию). Действительно, вероятность загорания топлива и их полуфабрикатов в условиях производства полностью не исключена и, естественно, при проектировании производственных зданий и их расположении, построении технологического процесса и конструировании аппаратуры чрезвычайно важно знать, каковы условия перехода горения в детонацию конкретных составов.

Далеко не безразлично, чем может закончиться загорание ВМ в производстве — обычным пожаром или это горение может перейти во взрыв или детонацию, какие при этом необходимо разрабатывать меры защиты работающих и какие средства необходимо затратить. Достаточно привести один только пример, который ярко иллюстрирует сказанное.

На первоначальном этапе современного развития РБП при формовании зарядов использовали шнек-прессы таких конструкций, загорание полуфабриката в которых при определенных условиях давало переход горения в детонацию с дальнейшим распространением детонации на всю загрузку, т.е. к взрыву несколько сотен кг ВВ в эквиваленте ТНТ. Взрыв такого количества материала приводил практически к полному разрушению оборудования и строительных конструкций, т.е. полному выводу из строя производственных мощностей. Такое положение потребовало дополнительных капиталовложений на строительство обваловок, мощных железобетонных кабин, не говоря уже о затратах на восстановительные работы строительных конструкций и оборудования. Иначе говоря, материальные затраты на

построение технологического процесса, обеспечивающего безопасность обслуживающего персонала определяются в первую очередь и зависят от возможности реализации перехода горения в детонацию конкретного материала при его случайном загорании.

Изучением закономерностей горения конденсированных ВМ и, в частности, перехода горения их в детонацию занимались многие исследователи, в частности К.К. Андреев с сотрудниками (Б.С. Светлов, Б.И. Кондриков, Б.С. Самсонов и др.), А.Ф. Беляев, А.М. Коротков, А.А. Сулимов и многие другие.

Интересные работы в этом направлении были проведены за рубежом Патри и Мачеком. Достаточно широко освещены в литературе и имеют ту особенность, что в них представлены исследования общих закономерностей перехода горения в детонацию без привязки к конкретным условиям безопасности переработки ВМ. Впервые систематические исследования условий реализации перехода горения в детонацию в ВМ и механизмов протекания этого процесса в начале 60-х годов были проведены И.Я. Петровским с сотрудниками. В лабораторных условиях были воспроизведены конкретные условия возникновения и протекания горения в детонацию полуфабрикатов в РБП применительно к их переработке в шнек-прессе. На основе работ К.К. Андреева в области перехода горения в детонацию порошкообразных ВВ типа ТНТ, гексогена и других в стальных трубках  $d_{\text{вн}} = 40$  мм, толщиной стенки 4-6 мм, высотой — 200 мм (вес образца 50 — 200 г) т.н. трубки Андреева и работ Я.Б. Зельдовича, Ф.А. Баума, Б.И. Ше-хтера в области условий возникновения ударных волн в воздушной среде, И.Я. Петровским с сотрудниками (Михалев, Нолков, Нишпал) была высказана и экспериментально

подтверждена гипотеза механизма перехода горения в детонацию в конденсированных ВМ.

Переход горения в детонацию — это явление с качественно отличными механизмами — горением, который управляется теплопередачей, и детонацией, управляемой ударной волной. Каковы же должны быть условия, при которых образуется ударная волна при горении ВМ.

К.К. Андреев в своих работах указывал, что условием образования ударной волны является наличие нарастающего давления ( $dP/d\tau$ ). Однако, как показала практика, этого условия еще недостаточно для подавляющего большинства конденсированных ВМ, чтобы образовать ударную волну необходимой интенсивности для возбуждения детонационного процесса при горении ВМ.

И.Я. Петровский, не исключая данного условия, показал, что для обеспечения перехода горения в детонацию (ПГД) обязательно соблюдение двух условий:

- наличие нарастающего давления ( $dP/d\tau > 0$ );
- наличие бегущей волны давления ( $dP/dL \neq 0$ ).

Естественно, что эти условия будут реализовываться тем легче, чем выше восприимчивость к детонации конкретного ВМ. Именно по этой причине в трубках К.К. Андреева такие порошкообразные ВВ, как гексоген, легко давали ПГД, а полуфабрикаты РБП давали отказы даже при разрыве трубки.

Указанные условия создания ударной волны с необходимыми для возникновения в ВМ детонационного процесса параметрами проще всего реализуются в удлиненной прочной трубке даже без закрытых торцов ( $L \geq d$ ) Практика показывает, что для подавляющего большинства порошкообразных (кристаллических и зерновых)

взрывчатых материалов достаточно соотношение, когда  $L = 15 - 20d$ .

Естественно, что эти условия могут реализовываться также и при других видах оболочки. При исследованиях же в лабораторных условиях наибольшее распространение получил метод длинной трубки. Этот метод (рис. 8.7) позволяет при помощи фотирегистрации, например, с помощью фоторазверток типа ЖФР определить скорость и характер процесса, замерить длину преддетонационного участка, рассчитать критическую прочность оболочки в зависимости от ее диаметра и т.п. Универсальность, простота, надежность и возможность точности измерений данного метода испытаний очень быстро придали ему популярность и самое широкое распространение не только в нашей стране, но и за рубежом. Представленный для рассмотрения в Комитет экспертов ООН, этот метод включен в сборник международных методов, как приоритетный. Широкие исследования полуфабрикатов в РБП, дробленых структур ВМ, взрывчатых компонент СВМ, типичных порошкообразных бризантных ВВ типа гексогена позволяют кратко представить механизм перехода горения в детонацию в некоторых его разновидностях.

Отличительной особенностью *основного (первого)* или поршневого механизма ПГД является то, что в зоне воспламенения ВМ за счет газообразования продуктов горения возникает давление, что приводит, как известно, к увеличению скорости горения ВМ [ $U = (P)$ ]. Под действием давления близлежащие еще не воспламенившиеся слои ВМ начинают двигаться и создают из себя как бы поршень, впереди которого на определенном расстоянии возникает ударная волна (рис. 8.8). Такой механизм подобен классической задаче Я.Б. Зельдовича

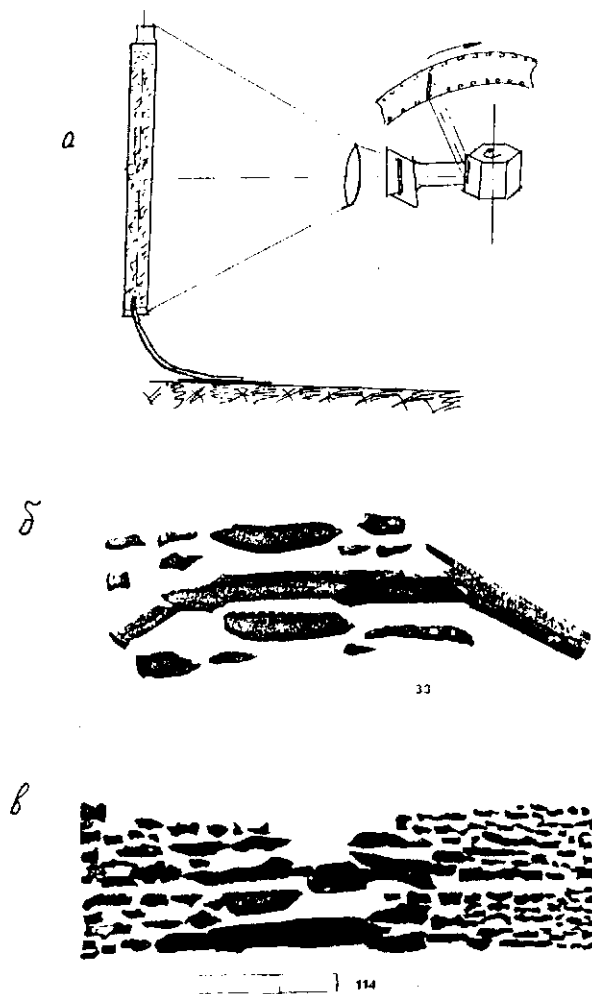


Рис. 8.7. Схема опыта и регистрации ПГД ВМ при испытании:  
а — в длинной трубе ( $L > d$ ); б — внешний вид трубы при отсутствии ПГД; в — внешний вид трубы при наличии ПГД

при движении поршня в трубе в воздушной среде.

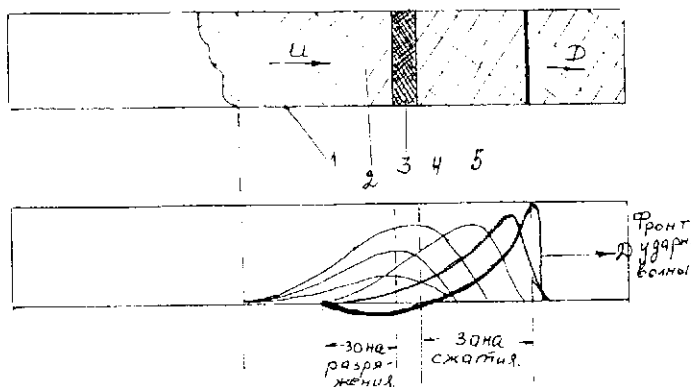


Рис. 8.8. Схема возникновения ударной волны при горении ВМ в длинной прочной оболочке:

1 — оболочка; 2 — зона горения; 3 — зона сжатого ВМ; 4 — несжатый ВМ; 5 — зона возникновения детонационной реакции во ВМ

Если ударная волна по мере процесса (до разрыва оболочки) достигает необходимой интенсивности, то на определенном расстоянии от зоны воспламенения возникает детонационный процесс (рис. 8.9). При этом часть

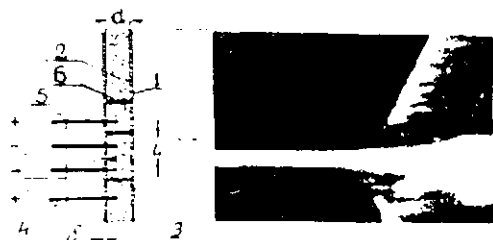


Рис. 8.9. Схема опыта и фотохронограмма ПГД ВМ при насыпной плотности по поршневому (первому) механизму:

1 — стальная оболочка; 2 — испытуемый ВМ; 3 — воспламенитель; 4 — индикаторы детонации; 5 — пластины-свидетели детонации

часть ВМ (зона сжатого ВМ) может не прореагировать, однако эта часть составляет очень малую величину порядка 1-3% общего количества вещества.

Описанный механизм типичен для полуфабрикатов РБП средней калорийности, стружки и мелких кусочков ВМ на основе перхлората аммония.

Особенностью перехода горения в детонацию по так называемому механизму волнового горения (второй механизм) является наличие «опережающего поджигания».

Сущность этого явления заключается в том, что горением охватывается значительная по протяженности часть заряда с быстрым ростом давления.  $P = f(\tau)$ . Если теперь в одном из мест горящего материала возникает перепад давления конечной амплитуды (даже с пологим фронтом), то он может распространяться по горящему ВМ, увеличивая амплитуду, крутизну, скорость распространения. Это связано с тем, что участки волны сжатия с большим давлением получают и больший приток энергии за счет большей скорости горения ВМ при повышенном давлении. При распространении по горячей массе ВМ от волны еще не требуется возбуждения химической реакции, поэтому параметры такой волны могут быть ниже предельных, необходимых для возбуждения детонации. Если интенсивность волны, при распространении по горячей массе ВМ достигает предельных параметров, то она приобретает способность самостоятельно возбуждать детонационную реакцию, в том числе и по невоспламенившемуся ВМ (рис. 8.10). Реализация такого процесса характерна для ВМ, обладающих высокой чувствительностью к ударной волне, в частности для стружки топлив, порошкообразных ВВ типа гексогена, т.е. имеющих небольшие (0,5-3 кбар) критические давления возбуждения детонации. В том случае, если интенсивности ударной волны, распространяющейся по

горящему ВМ, недостаточно для самостоятельности возбуждения детонационной реакции в негорящем материале, ПГД может осуществляться по поршневому механизму.



Рис. 8.10. Фотохронограмма ПГД по волновому механизму (второй механизм)



Рис. 8.11. Фотохронограмма ПГД для ВМ с повышенной воспламеняемостью (третий механизм)

Существует еще одна разновидность механизма ПГД (третий механизм), который характерен для ВМ, обладающих не только высокой чувствительностью к интенсивности ударной волны, но и обладающих высокой воспламеняемостью и скоростью горения. При этом ударная волна не только возникает в зоне горения, но и приобретает в ней критические параметры для возбуждения детонации (рис. 8.11). По-видимому, подобный механизм характерен для таких ВМ, как гремучая ртуть, БГВВ и т.п.

В сферическом случае отношение объема сжатого вещества к объему вещества, охваченного горением, не больше, чем это имеет место в линейном случае (трубе). Ударная волна без «подпитки» за счет реакции в зоне сжатия может распространиться не дальше, чем на расстояние, определенное присоединенной массой.

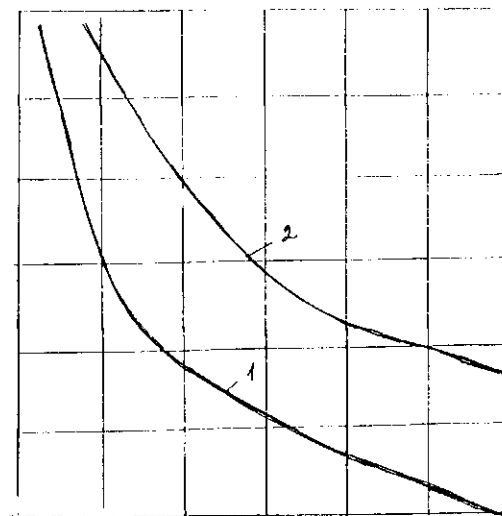


Рис. 8.12. Граничная кривая по переходу горения в детонацию  $P = f(d)$  для порошкообразных ВМ типа гексогена

Таким образом, по условиям разгрузки свободная (не охваченная реакцией) поверхность должна находиться к месту воспламенения не ближе, чем на  $R$  сферы, а толщина слоя сжатого вещества должна быть по условиям устойчивости взрывного процесса не больше критического диаметра детонации вещества. Для реализации ПГД минимальный размер преддетонационного участка для образования сферической расходящейся волны по оценкам специалистов составляет  $R = 8 - 10d_{кр}$ . Существует также и иная точка зрения на количественные зависимости длины преддетонационного участка, связанные не критическим диаметром детонации, а критическим диаметром горения вещества в данных условиях.

Таблица 8.2

NN п/п	Индекс со- става	Восприимчивость к детонации		Параметры оболочки			Плотность заряда, г/см <sup>3</sup>	Длина пред- детона- ционного участка, L, мм	Скорос- ть про- цесса, V, м/с	Результат
		d <sub>кр</sub> , мм	R <sub>кр</sub> , кбар	d <sub>ин</sub> , мм	R <sub>раз.ст.</sub> кгс/см <sup>2</sup>	Масса на ед. поверх- ности, г/см <sup>2</sup>				
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	Гексоген	3	0,5-2	20	400	0,27	1,0	50	5000	ПГД
				40	100	0,27	1,0	100	5000	ПГД
				40	50	0,10	1,0	—	—	ПГД нет
				360	20	0,81	1,0	—	—	ПГД
2	Октоген	4-10	1-2	20	400	0,27	1,1	50	6000	ПГД
3	ПХА (су- хой) 50- 300 мкм	30-150	25	46	1600	11,7	1,1	1800	2300	ПГД
				40	1300	7,9	1,1			ПГД нет
4	ПХА+1, 5- 2% горю- чих доба- вок	6-10	10-15	40	1300	7,9	1,1	200-300	3000	ПГД
				40	850	3,9	1,1			ПГД нет
5	Сухая крошка РПБ	10	0,5-2	25	600	0,24	0,7	150	2500	ПГД
				40	100	0,27	0,7	—	—	ПГД нет
				40	1000	12	0,7	200	—	ПГД

Окончание таблицы 8.2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
6	Таблетка РБП	90	5-7	40	1300	7,9	0,8	700	2500-	ПГД
				40	850	3,9	0,8	—	4500	ПГД нет
7	Раздробл. ВМ с эле- мент. до 5 мм	10-120	1-10	40	1300	7,9	0,9- 1,1	50-300	2500- 4000	ПГД
8	Раздробл. ВМ с элем. > 5 мм	120	10	40	1300	7,9	1,1	—	—	ПГД нет
9	Стружка с ВМ	8-10	0,5-2	20	400	0,27	0,9	50	до 4000	ПГД
				40	100	0,27	0,9	100	до 4000	ПГД
10	Топлив- ная масса	30-80	20-40	40	1600	11,7	1,7- 1,8			
11	Тротил	10	7-14	40	1300	7,9	1,0	250	4500	ПГД

K — 0,5 (K — коэффициент пропорциональности, учитывающий размерность)

Полученные результаты экспериментов по изучению ПГД различных ВМ (табл. 8.2) показывают, что реализация описанных механизмов зависит, с одной стороны, от восприимчивости к детонации испытуемого ВМ, а с другой — от многочисленных внешних факторов:

- физического состояния ВМ (размер частиц, удельная поверхность, газопроницаемость, воспламеняемость, плотность), количества ВМ, одновременно участвующего в процессе, общей массы ВМ, и наконец, прочности и массы оболочки, т.е. от условий образования ударной волны необходимых критических параметров для конкретных случаев. В общем виде критерий, характеризующий склонность к переходу горения в детонацию конкретного ВМ, можно записать в виде

$$P = \frac{QUmVWP_o qn}{\rho\eta},$$

где  $P$  — критерий склонности к переходу горения ВМ;  $Q$  — теплота взрывчатого превращения;  $U$  — скорость горения;  $m$  — пористость;  $V$  — объем газов;  $n$  — газопроницаемость;  $W$  — количество ВМ;  $P_o$  — разрывная прочность оболочки;  $q$  — удельная масса оболочки;  $\rho$  — плотность ВМ;  $\eta$  — вязкость ВМ.

Как видно из приведенной зависимости, увеличение всех параметров, за исключением плотности и вязкости, способствует увеличению склонности к переходу горения в детонацию.

Вклад каждого из приведенных параметров будет определяться конкретными условиями для каждого ВМ. Остановимся на влиянии только некоторых основных факторов, имеющих практическое значение:

- взаимодействие прочности оболочки и количества, ВМ, участвующего в процессе взрывчатого превращения;
- влияние плотности на склонность к переходу горения в детонацию;
- влияние прочности и массы оболочки заряда, в котором произошло загорание.

При исследовании ряда ВМ было замечено (см. табл. 8.2), что при увеличении диаметра заряда критическая разрывная прочность оболочки, при которой происходит ПГД, снижается, т.е. наблюдается функциональная зависимость

$$P = \sqrt{f(d)},$$

где  $P$  — разрывная прочность оболочки;  $d$  — диаметр заряда.

Специально проведенными экспериментами было установлено, что эта зависимость описывается гиперболлической кривой, (рис. 8.12). Аналитическая зависимость экспериментальных результатов испытаний порошкообразных ВМ типа гексогена при насыпной ( $\rho = 1$  г/см<sup>3</sup>) плотности, полученной методом подбора и выравнивая, имеет вид:

$$P_{раз} = 1,5 \cdot 10^4 d^{4/3}$$

Преобразуя приведенную аналитическую зависимость при помощи метода наименьших квадратов, Ю.Е. Зайчиков дает удобный для инженерных расчетов вид эмпирической зависимости разрывной прочности аппарата, в котором исключается ПГ при случайном загорании ВМ

$$P_{кр} = \frac{800}{d} - 4,$$

где  $P_{кр}$  — разрывная прочность аппарата, кгс/см<sup>2</sup>;  $d$  — внутренний диаметр аппарата, см.

При расчете разрывной прочности  $P_{раз}$  с достаточной для практических нужд степенью точности и надежности можно использовать известную зависимость для расчета прочности тонкостенных сосудов

$$P_{раз} = \frac{\zeta^2 \cdot \delta}{d},$$

где  $\zeta$  — временная прочность используемого материала, кг/см<sup>2</sup>;  $\delta$  — толщина стенки, см;  $d$  — диаметр сосуда, см.

При совместном решении приведенных выше зависимостей можно получить выражение для расчета толщины стенки ( $\delta_{кр}$ ) аппарата

$$\delta_{кр} = \frac{1}{K} \cdot \frac{200 - d}{\zeta},$$

где  $K = 0,5$  ( $K$  — коэффициент пропорциональности, учитывающий размерность).

Использование приведенной зависимости при конструировании аппаратов представляет определенные трудности, требует отступлений от традиционных методов конструирования аппаратов. Однако, как показывает практика применения новых легких конструкционных материалов и принципов динамического ослабления, можно успешно создавать аппаратуру, отвечающую современным требованиям, в части их взрывозащищенности.

Весьма существенным вкладом прикладного характера являются исследования, проведенные А.А. Сулимовым совместно с С.Е. Малининым, которые установили существование критической величины слоя ВМ, при котором происходит ПГД. Впервые на возможность дан-

ной зависимости обратил внимание А.В. Соколов при проведении лабораторных экспериментов. При этом в оболочке, превышающей требования выше представленной зависимости  $P = f(d)$ , критическая высота слоя составляет величину 600-650 мм.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что даже в массе ВВ не имеющей внешней оболочки, а только определенную массу, могут дать переход горения в детонацию.

Указанными авторами, а также С.П. Смирновым с сотрудниками при проведении крупномасштабных испытаний по горению больших масс ВВ (3-10 т) было установлено, что при развитии давления в зоне горения ВВ до 5-6 кгс/см<sup>3</sup> обеспечиваются условия ПГД.

Следует отметить, что данная аналитическая зависимость может носить универсальный характер, если учесть при этом влияние плотности и характера процесса газообразования при горении ВМ. Исходя из общезначимых посылок следует ожидать, что с увеличением плотности ВМ, например, при увеличении плотности в процессе смешения твердой массы ВМ критическая прочность аппарата, при которой исключается ПГД, при прочих равных условиях, будет увеличиваться, т.е. зависимость примет в общем виде характер представленный на рис. 8.13.

При этом характер граничных кривых склонности к ПГД практически сохранится, особенно в области больших диаметров, т.е. в области реальных размеров аппаратов.

Приведенная выше аналитическая зависимость для расчета плотности аппаратов может быть распространена при использовании ВМ повышенной плотности с учетом коэффициента пропорциональности  $K$  и примет вид:

$$\delta = K \frac{200 - d}{0,5}$$

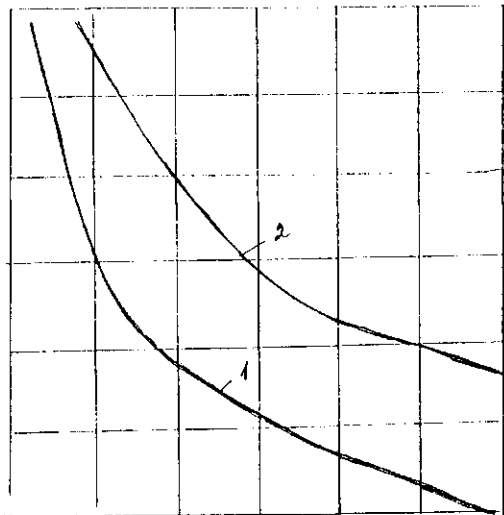


Рис. 8.13. Граничные условия по ПГД в зависимости от прочности аппарата (оболочки) при различной плотности ВМ:  
1 — граничная кривая при насыпной плотности ВМ; 2 — граничная кривая при максимальной плотности ВМ

Коэффициент  $K$  пропорционален плотности ВМ и может быть подобран опытным путем. Например, этот коэффициент для СВМ может быть в пределах 20-30. Решающее влияние плотности на уменьшение склонности к переходу горения в детонацию СВМ объясняется не только тем, что затрудняется образования ударной волны необходимых параметров, но и тем, что при возрастании плотности возрастает критическое давление возбуждения детонации испытуемого СВМ.

Приведем только один пример. Критическое давление возбуждения детонации полуфабриката РБП (таблетка) при насыпной плотности ( $0,8 \text{ г/см}^3$ ) составляет величину 5-7 кбар (явление в производстве реальное), в то время как величина критического давления детонации наиболее восприимчива к детонации готового пороха составляет более 25 кбар.

Естественно, что образование в реальных условиях переработки порохов ударной волны с такими параметрами — явление маловероятное. Из приведенных выше данных видно, что на условия ПГД ВМ большое влияние оказывают прочность и масса оболочки. При этом в каждом конкретном случае решающее значение приобретает тот или иной параметр. Однако можно утверждать, что снижение прочности и массы оболочки будет снижать вероятность образования ударной волны, необходимой для возбуждения детонации ВМ. Снижение статической разрывной оболочки аппаратов (втулки, шнек-прессов, пресс-инструментов, емкостных аппаратов и т.п.) в большинстве случаев затруднено по двум причинам:

- необходимое статическое давление разрыва оболочки по условиям отсутствия ПГД ниже, чем необходимые технологические давления;
- ввиду необходимой низкой статической прочности теряется конструктивная жесткость аппарата и его эксплуатация в практических условиях производства становится затруднительной.

Для исключения указанных недостатков при конструировании технологических аппаратов применяется принцип динамического ослабления прочности аппаратов. Причем практически установлено, что для обеспе-

чения взрывозащиты аппаратов достаточно ослабление 30 – 40% его общей поверхности.

Динамическое ослабление аппаратов основывается на двух основных принципах:

- максимально возможным снижением удельной массы оболочки ( $\text{г/см}^2$ ), которое достигается снижением толщины вышибного элемента и применением легких конструкционных материалов.
- работой на срез отдельного вышибного элемента в отличие от работы на растяжение всей конструкции (оболочки) для конструкций неослабленного типа.

В.С. Михалев предлагает следующий подход, к расчету вышибных элементов. Оболочка без вышибных элементов работает как сосуд, подвергнутый внутреннему давлению. Прочность такого сосуда тогда оценивается по приведенному выше выражению для тонкостенных сосудов, т.е.

$$P = \frac{\sigma_p 2\delta_1}{d_y}, \text{ кг/см}^2.$$

Оболочка же с вышибными элементами выдерживает давление

$$P = \frac{\tau \cdot 2\delta_2}{B},$$

где  $P$  — давление, выдерживаемое сосудом с вышибными элементами;  $\delta$  — толщина вышибного элемента;  $B$  — ширина вышибного элемента. При этом  $\sigma_p = 2 \div 5\tau$ .

Приведенный метод расчета показывает, что при прочих равных условиях, не теряя прочности и жесткости конструкции аппарата, можно снизить удельную массу более чем на порядок. Такое резкое снижение ди-

намического сопротивления сильно сказывается на склонности к ПГД.

Таким образом, применение принципа динамического ослабления при конструировании технологических аппаратов может увеличить их взрывозащиту, обеспечивая отсутствие ПГД при случайном загорании перерабатываемого ВМ.

## 9. Основы создания взрывобезопасных технологических процессов производства ВМ

Безопасность технологического процесса при производстве ВМ основывается на оценке уровня взрывчатых свойств перерабатываемого материала, т.е. на исключении условий достижения критических параметров воздействий, приводящих к начальному очагу загорания и развитию взрывных процессов. С другой стороны, безопасность определяется уровнем воздействий на перерабатываемый ВМ, т.е. надежностью и точностью работы технологических аппаратов и контрольно-измерительных приборов. Если точность аппаратов и приборов в первую очередь определяется качеством изготавливаемых изделий из ВМ, то надежность их работы является главным условием, определяющим безопасность их переработки. Существующее в настоящее время понятие «наработка на отказ» отдельного узла аппарата или агрегата в целом, имеет двойное значение, т.е. одни виды отказов могут привести только к остановке оборудования без аварийных последствий, а другие виды являются причиной возникновения аварийных ситуаций. Например, на первоначальном этапе отработки смесительной аппаратуры для изготовления топливных масс

ВМ использовали дозирующие устройства для жидковязких компонентов высокой точности (1,0 %), но как оказалось с недостаточным для обеспечения технологического цикла изготовления изделия временем работы на отказ, т.е. с низкой надежностью. Таким образом, в процессе работы происходило изменение соотношений компонентов топлива с образованием системы, обладающей повышенным уровнем взрывчатых свойств, т.е. имеющей более высокую вероятность возникновения аварийной ситуации. Доработка дозирующих устройств в части их безотказности (надежности) повысили взрывобезопасность производства данного класса топлив.

При выборе технологического процесса изготовления изделия из конкретного ВМ, обеспечивающего взрывобезопасность его производства, необходимо руководствоваться следующими основными положениями:

- уровнем комплекса взрывчатых свойств (чувствительность к механическим воздействиям, склонность к ПГД, восприимчивость к детонации) не только композиций рецептурного регламентированного состава, а также промежуточных композиций с возможными отклонениями исходных взрывчатых компонентов от регламентированного состава;
- анализом технологической аппаратуры с точки зрения ее удовлетворения требованиям взрывобезопасности применительно к уровню взрывчатых свойств конкретного ВМ;
- выбором категоричности по фазам производства, в зависимости от уровня взрывозащищенности оборудования для определения мер защиты обслуживающего персонала при аварийной ситуации.

Приведенные положения не исключают требований, предъявляемых к ВМ, чисто технологического характера (реология, живучесть, вязкость и т.п.). Однако в данном курсе эти вопросы не рассматриваются, а обращается внимание только на факторы, непосредственно связанные с взрывозащитой при переработке ВМ.

Уровень комплекса взрывчатых свойств топлив и промежуточных технологических смесей, а также полуфабрикатов и исходных взрывчатых компонентов дают возможность выбрать наиболее оптимальный порядок загрузки компонентов в аппарат, позволяющий не только снизить вероятность загорания, но также внешний взрывной эффект при аварийной ситуации, создать наиболее оптимальные фазы производства. Например, перхлорат аммония в чистом виде является достаточно безопасным ВМ и организация его переработки (сушка, измельчение, рассев) в производстве не требует принятия особых мер по обеспечению взрывобезопасности, так как он не горит при обычных условиях и для его подрыва необходим мощный инициатор в виде энергии другого ВВ, т.е. склонность к ПГД чистого ПХА очень мала. Смеси же перхлората аммония с горючими порошками, органического или неорганического происхождения, обладают повышенным уровнем взрывчатых свойств, начиная с определенного содержания горючих добавок. Так, чистый перхлорат аммония с дисперсностью частиц 50 мкм горит от мощного воспламенителя при давлении выше 30 кгс/см<sup>2</sup> и не горит на открытом воздухе. Детонация в нем может быть возбуждена в диаметре больше 30 мм при помощи мощного промежуточного детонатора. Переход горения в детонацию в нем удалось осуществить только в трубе  $d_{\text{вн}} = 60$  мм при длине преддетонационного участка более 1800 мм. В то же время смесь ПХА уже с 1,5% горючей добавки горит

на открытом воздухе, детонирует в диаметре менее 10 мм и дает устойчивый переход горения в детонацию в стандартных условиях при длине преддетонационного участка 600-700мм.

Организация безопасной переработки таких смесей связана с принятием специальных мер, т.е. применением специальной взрывозащищенной аппаратуры и организации специальной фазы производства. Изменение порядка ввода компонентов — введение горючих порошкообразных добавок в связующее не требует создания специальной фазы приготовления взрывоопасной смеси ПХА с горючими добавками.

Знание свойств смесей ПХА с горючими добавками важно для исключения из конструкций по переработке ПХА горючих материалов (сальники, горючие смазки и т.п.), что повышает безопасность его переработки.

В процессе технологической переработки промежуточные продукты или смеси продуктов могут обладать значительно более высокой степенью взрывоопасности, чем конечный продукт, и в случае аварийной ситуации внешний эффект действия может быть значительно выше, при этом защитные устройства на такое действие могут быть не рассчитаны. Знание же уровня взрывчатых свойств различных комбинаций промежуточных продуктов позволяет выбрать наиболее оптимальные технологические приемы и параметры процесса. Например, при смешении твердой массы одновременная загрузка всего порошкообразного взрывчатого компонента (ПХА, октоген и т.п.) неизменно приводит к временному образованию промежуточных смесей, обладающих повышенной взрывоопасностью, за счет высокого содержания окислителя в смеси и ее пониженной плотности. Загрузка отдельными порциями значительно повышает безопасность фазы смешения твердой массы.

Исходя из наиболее взрывоопасного состояния перерабатываемой продукции, должны приниматься меры по обеспечению обслуживающего персонала (нормы загрузки, категоричность, разрыва и т.п.) как для данного производственного помещения, так и других зданий. Аналогичные подходы правомерны и для других окислителей, в том числе для АС.

При организации безопасности технологического процесса переработки ВМ принципиальное значение имеет его аппаратное оформление, т.е. конструкция аппарата и качество его изготовления. Используемая в производстве аппаратура должна отвечать следующим основным требованиям:

- длительность работы на отказ в целом аппарата должна превышать длительность технологического цикла, изготавливаемого изделия;
- уровень длительных и импульсных механических воздействии ( $P$ ,  $V$ ,  $L$ ,  $\rho$ ) не должен превышать критических значений этих воздействий при загорании перерабатываемого материала;
- единовременная загрузка аппарата, в котором имеется наибольшая вероятность возникновения взрывных процессов, должна ограничиваться величиной, локализуемой в помещении при взрыве перерабатываемого ВМ, или при этом должны обеспечиваться безопасные расстояния согласно отраслевым правилам;
- с целью снижения эффекта взрыва все аппараты, емкости, транспортные трубопроводы должны иметь статическое и динамическое ослабление, обеспечивающее выполнение граничных условий по отсутствию перехода горения во взрыв (детонацию);

- фазы производства и аппараты, соединенные непрерывным технологическим потоком продуктов, должны иметь надежные разрывы от мест концентрации ВМ. Это может быть выполнено как дискретностью производства, так и в виде аварийного раскрытия и отсечения массопроводов.

Выполнение приведенных требований к конструкциям аппаратов и условиям их использования является гарантией обеспечения безопасности при изготовлении изделий. Однако выполнение полностью этих требований в ряде случаев наталкивается на трудности, связанные с отсутствием исходных данных по свойствам перерабатываемого материала, материалов для изготовления аппаратов и т.п., и поэтому в реальном производстве нельзя полностью исключить возникновение аварийных ситуаций. С этой целью для защиты обслуживающего персонала и оборудования устанавливаются определенные правила устройства по производству ВМ и их эксплуатации, т.е. определяется категоричность производства по видам процессов, могущих возникнуть при аварийной ситуации и оценке уровня их последствий.

В зависимости от категоричности по фазам производства, которая зависит от вида прогнозируемого взрывного процесса при аварийной ситуации, все производственные здания в соответствии с действующими «Правилами устройства», делятся на пять категорий по степени пожаровзрывоопасности:

Категории «А» и «Б» являются взрывоопасными, т.е. при возникновении аварийной ситуации в производстве не исключается возникновение взрывного процесса в перерабатываемом ВМ.

К категории «А» относятся такие производственные сооружения, возможный взрыв в которых сопровождается не только разрушением данного здания, но может

вызвать существенные повреждения соседних зданий (поломка дверей, оконных переплетов, отдельные разрушения кирпичной кладки). Конструктивно здания категории «А» являются обычными облегченными строительными конструкциями (ж/бетонные колонны, с кладкой стен кирпичом и др. подобными материалами, с легкой кровлей).

К категории «А» относятся здания и сооружения, возможный взрыв в которых локализуется инженерными средствами, т.е. действие взрыва не распространяется на другие здания и сооружения. Современные средства локализации могут быть разнообразными. Это обвалование обычных зданий выше его среза по высоте с целью препятствия разлета осколков и гашения ударной волны и наиболее традиционный способ применения ж/бетонных кабин, иногда с внутренней облицовкой. Для повышения загрузки ВМ существуют конструкции кабин с вышибной поверхностью и двориком, локализирующим взрыв.

В настоящее время созданы кабины, могущие локализовать взрыв 2500-3000 кг ВМ и оставаться ремонтно-пригодными.

К категории «В» относятся здания и сооружения, взрыв в которых маловероятен. Согласно Правил величина вероятности такого события определена как  $1 \cdot 10^{-4}$  в год. Однако это не уровень риска, который включает в себя как вероятность события, так и экономические и социальные последствия. Как правило, на действующих заводах к этой категории фаз производства относятся такие сооружения, взрыв в которых будет локализован. Более подробно об уровне риска будет изложено ниже.

Категории «В» и «Г» являются пожароопасными, т.е. при возникновении аварийной ситуации в производстве

возможен только пожар вследствие горения перерабатываемого ВМ.

К категории «В» относятся такие производственные сооружения, возможный пожар в которых воздействует на соседние здания, в которых может вызвать существенные повреждения (загорание ВМ, находящихся в данном помещении, загорание конструкций и т.п.).

Здания категории «В» представляют собой обычные строительные конструкции облегченного типа.

К категории «Г» относятся помещения, возможный пожар в которых локализуется внутри данного помещения. Локализация может достигаться различными способами, в том числе и с помощью автоматической пожарной защиты (АПЗ).

Прогнозирование вида взрывного процесса и его масштабов внешнего действия, что является определяющим фактором при выборе категории здания, производится на основе изучения комплекса взрывчатых свойств перерабатываемых ВМ применительно к конкретным условиям и оценки степени реализации энергии при взрывном разложении ВМ по т.н. «тротиловому эквиваленту взрыва». Что касается изучения взрывчатых свойств, то методология, виды исследования и их объем подробно рассмотрены в предыдущих разделах, а на рассмотрении оценки «тротилового эквивалента взрыва» и подходе загрузки и безопасных расстояний остановимся несколько подробнее.

Известно, что максимальная величина тротилового эквивалента ВМ может быть определена экспериментально или, что удобнее, с достаточной для практики точностью может быть вычислена по соотношению теплот взрывчатого превращения конкретного ВМ и тротила

$$\alpha = \frac{Q(v)_{ВМ}}{Q(v)_{ТНТ}},$$

где для  $Q(v)_{ТНТ}$  общепринято принимать 1000 ккал/кг.

Однако, приведенное выражение справедливо только при полном выделении энергии, т.е. при детонационном процессе. Величина тротилового эквивалента в значительной степени определяет размер капиталовложений в строительство производственных помещений и их расположение. Теплота взрывчатого разложения современных ВМ достигает 1200-1700 ккал/кг, т.е. величина тротилового эквивалента при детонационном процессе будет составлять величины (с учетом потерь) порядка 1-1,25.

При принудительном детонационном процессе, как показывают крупномасштабные полевые испытания натурных зарядов тротилового эквивалент оценивается даже как 2,5 по отношению к тротилу.

Реальная же величина тротилового эквивалента зависит не столько от общего энергетического уровня ВМ, сколько от возможности и степени реализуемости того или иного взрывного процесса, определяющего количество и скорость выделения энергии сжатых газов. Принципиальная возможность детонационного процесса в ВМ еще не означает возможности его возникновения в реальных условиях переработки или эксплуатации и поэтому не дает основания из этих предпосылок исходить при определении тротилового эквивалента взрыва. Например, ТТ, содержащие в своем составе кристаллические ВВ, являются детонационноспособными взрывчатыми системами. Однако было бы неправильно считать, что загорание топливной массы в смесительном аппарате или отвержденного топлива в изложнице приведет непременно к детонации и поэтому взрывной эффект

необходимо оценивать исходя из полного тротилового эквивалента. Иное дело, если технологический поток продуктов имеет неразрывную связь и в этом потоке есть хотя бы один аппарат, в котором может реализоваться ПГД. Например, загорание порошкообразного ВВ в емкости или трубопроводе, не отвечающего требованиям отсутствия (ПГД), то в таком случае тротильный эквивалент взрыва определяется по максимальному значению и эффект взрыва исчисляется из суммарной загрузки технологического потока. Так, перхлорат аммония, является в производстве безопасным веществом, не способным давать ПГД в реальном производстве, его хранение и переработку можно осуществлять исходя из категории «Г». Однако, если его хранение и переработку осуществлять одновременно с октогеном (гексоген), способным давать ПГД в реальных условиях (категория «А»), то категоричность определяется исходя из наиболее взрывоопасного продукта и возможный эффект взрыва необходимо исчислять из суммарной загрузки этих ВМ.

Организация современного производства ВМ направлена на то, чтобы исключить возможность таких явлений и, как показывает практика, реализация детонационного процесса при аварийной ситуации явление крайне редкое. Поэтому практический тротильный эквивалент для топливных масс и готовых изделий значительно ниже, и взрыв происходит за счет сгорания значительных количеств ВМ в замкнутом объеме. Как было показано А.Ф. Беляевым, «тротильный эквивалент взрыва зависит от полноты превращения ВМ в газы при беспредельном адиабатическом расширении».

Таким образом, при определении тротилового эквивалента необходимо правильно оценить возможность реализации вида взрывного процесса, т.е. скорость и

полноту превращения ВМ в газы, а также соотношение начального и конечного их объема, при котором определяется работоспособность.

Используя известное уравнение для работы газов при адиабатическом расширении, получим

$$A = \frac{PV}{K-1} \left[ 1 - \left( \frac{P_2^{\frac{k-1}{k}}}{P_1} \right) \right],$$

где  $A$  — работа расширения;  $P_1$  — начальное давление газов;  $P_2$  — атмосферное давление;  $K$  — показатель адиабаты продуктов взрыва;  $V$  — объем технологического аппарата.

Можно оценить работу взрыва при конкретных условиях загорания. Если выразить эквивалент взрыва в кг ТНТ, объем —  $V$  м<sup>3</sup>, давление  $P_1$  кгс/см<sup>2</sup> можно получить следующее выражение для оценки тротилового эквивалента взрыва при сгорании ВМ в замкнутом объеме:

$$C = \frac{0,023PV}{K-1} \left[ 1 - \left( \frac{P_2^{\frac{k-1}{k}}}{P_1} \right) \right],$$

где  $C$  — эквивалент взрыва технологического аппарата в кг ТНТ.

В.Н. Лапшин и Н.К. Преображенский провели преобразование и дали выражение, удобное для инженерных расчетов оценки эквивалента взрыва (кг ТНТ) при горении ВМ (без перехода горения в детонацию) в замкнутом объеме, хотя бы с частичным разрывом оболочки, которое имеет следующий вид:

$$C = KPV.$$

Коэффициент  $K$  является эмпирическим и его величина зависит от энергетического уровня СВМ, состояния поверхности горения, скорости нарастания давления при горении в замкнутом объеме. Коэффициент  $K$  колеблется по разным оценкам в пределах от 0,1 до 20 в зависимости от природы состояния и стадии изготовления ВМ.

Каковы же наиболее существенные факторы возможного взрыва при аварийной ситуации, действующие на окружающую среду:

- ударная (воздушная) волна;
- действие пламени и светового излучения;
- разлет и поражение осколками.

В соответствии с перечисленными факторами нормативной документацией устанавливаются т.н. безопасные расстояния.

Безопасные (допустимые) расстояния разделяются на внешние и внутренние. Внешние безопасные расстояния между производственными огнеопасными и взрывоопасными мастерскими, складами и погребками ВМ до границ населенных пунктов, застроек жилыми, общественными и хозяйственными застройками, а также автомагистралями оцениваются минимально допустимыми значениями по формулам:

для зданий категории «А»

$$S = 30 - 50\sqrt{P\alpha};$$

для зданий категории «В»

$$S = 5\sqrt[3]{P},$$

где  $S$  — безопасное расстояние, м;  $P$  — расчетная нагрузка здания, кг;  $\alpha$  — тротиловый эквивалент.

Внутренние безопасные расстояния между взрывоопасными зданиями и складскими помещениями катего-

рии «А», а также между другими зданиями оцениваются по формуле

$$S = K\sqrt{P\alpha},$$

где коэффициент  $K$  имеет величины:

- между двумя обвалованными зданиями — 0,6;
- между обвалованным и необвалованным зданием — 1,2;
- между необвалованными зданиями — 2,8;
- по разлету осколков — 4,5.

Минимальное расстояние зданий категории «А» и «Б» независимо от расчета составляет величину не менее 35 м.

Внутренние безопасные расстояния производственных и складских помещений, зависят

- от характера, количества и места расположения ВМ;
- конструктивной и планировочной характеристики здания;
- от взаимного расположения зданий на площадке завода.

Здания по отношению к внешним УВВ (ударно-воздушные волны) могут быть трех степеней: устойчивые, каркасные и бескаркасные с жесткой конструктивной схемой, а также арочного типа, выполненные из монолитного или сборного ж/бетона.

Допустимый предел во фронте падающей ударной волны 15 кгс/см<sup>2</sup> (15 кПА).

Здания с жесткой конструктивной схемой, многоэтажные (до 3 этажей), каркасные и ж/бетонные перекрытия, несущие стены, кирпич не менее 400 мм, удвоенная прочность стандартных связей, бескаркасные стены, кирпич не менее 510 мм, ж/бетон не менее 400 мм и

ж/бетонные перекрытия, давление во фронте  $P$  до 25 кгс/см<sup>2</sup> (25 кПА).

Малоустойчивые — панельно-каркасные здания и из легких металлоконструкций.

Конструктивная характеристика зданий категории «В» заключается в наличии вышибных поверхностей, разрушающихся при возникновении пожара при малых давлениях. Прочность вышибных поверхностей не должна превышать 250 кг/м<sup>2</sup>, а вес более 150 кг/м<sup>2</sup>. Минимальная величина вышибных поверхностей,

$$F = 1,5 - 3P,$$

в зависимости от весовых характеристик ВМ и его поверхности, где  $F$  — общая поверхность вышибных поверхностей, м<sup>2</sup>;  $P$  — расчетная загрузка зданий ВМ, кг.

Безопасные расстояния между этой категорией зданий до других зданий определяется по формуле

$$S = K\sqrt[3]{P},$$

где  $S$  — безопасное расстояние, м;  $K$  — коэффициент, зависящий от конструктивной характеристики активного и пассивных зданий;  $P$  — расчетная загрузка огнеопасным продуктом, кг.

По степени повреждений зданий и сооружений при аварийной ситуации нормами предусматривается следующая классификация:

**слабые:** разрушение остекления, частичное повреждение оконных переплетов;

**средние:** разрушение оконных проемов, дверей, трещины в стенах;

**сильные:** деформация аппаратов, разрушение стен, перекрытий, технологических площадок.

В зависимости от возможной степени разрушений определяется и уровень защиты обслуживающего персонала и оборудования:

1. Первый уровень защиты (УЗ-1) обеспечивает защиту находящихся в зданиях (помещениях) людей, а также ценного оборудования и систем управления, влияющих на работу производства в целом. Для зданий первого уровня защиты допускается слабая степень разрушения.

2. Второй уровень защиты (УЗ-2) обеспечивает защиту размещаемых в зданиях технологических процессов, оборудования, веществ и изделий. Допускается средняя степень разрушения.

3. Третий уровень защиты (УЗ-3) обеспечивает непередачу детонации. Для УЗ-3 допускается сильная степень разрушения и возможность вторичного взрыва при обрушении строительной конструкции.

Таким образом, построение взрывобезопасного технологического процесса является сложным и ответственным делом, которое базируется на глубоком знании химии и технологии ВМ, конструкции технологического оборудования, а также знаниях комплекса взрывчатых свойств конкретного ВМ и, безусловно условий возникновения и развития взрывных процессов при несанкционированном загорании. Выполнение требований нормативной документации как при проектировании производства, так и эксплуатации этого производства в процессе изготовления ВМ, является залогом безаварийной работы.

## Список литературы

1. Дубнов Л.В., Бахаревич Н.С., Романов Л.И. Промышленные взрывчатые вещества. М.: Недра, 1988, 358 с.
2. Поздняков З.Г., Росси Б.Д. Справочник по промышленным взрывчатым веществам и средствам взрывания. М.: Недра, 1977, 253 с.
3. Кутузов Б.Н., Скоробогатов В.М., Ерофеев И.Е. и др. Справочник взрывника. Недра, 1988, 510 с.
4. Кук М.А. Наука о промышленных взрывчатых веществах. М. Недра, 1980, 455 с.
5. Барон В.Л., Кантор В.Х. Техника и технология взрывных работ в США. М.Недра, 1989, 375 с.
6. Яременко Н.Е., Светлов Б.Я. Теория и технология промышленных взрывчатых веществ. Промстройиздат, 1975, 239 с.
7. VI Всероссийское Собрание по взрывным работам. Сб. докладов. Междуреченск, 1997, 152с.
8. Кутузов Б.Н. Разрушение горных пород взрывом. М.: МГГУ, 1992, 515 с.
9. Кутузов Б.Н. Разрушение горных пород взрывом. Взрывные технологии в промышленности. М.: МГГУ, 1994, 445 с.
10. Щукин Ю.Г., Кутузов Б.Н., Мацневич Б.В., Татищев А.В. Промышленные ВВ на основе утилизированных боеприпасов. Недра, 1997, 318 с.

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>ВВЕДЕНИЕ</b> .....	5
1. Классификация промышленных ВВ, изготавливаемых на горных предприятиях .....	7
2. Краткая характеристика компонентов промышленных ВВ .....	11
2.1. Аммиачная селитра .....	11
2.2. Натриевая, калиевая и кальциевая селитры .....	21
2.3. Металлические горючие в составе промышленных ВВ .....	24
2.4. Жидкие нефтепродукты и другие горючие .....	28
2.5. Загустители .....	32
3. Характеристика ВВ, изготавливаемых вблизи мест потребления .....	36
3.1. Бестротиловые гранулированные ВВ .....	36
3.2. Гранулированные тротилосодержащие ВВ .....	52
3.3. Водосодержащие ВВ .....	56
4. Оборудование для приготовления ВВ вблизи мест их применения. ....	76
4.1. Общие сведения .....	76
4.2. Оборудование для подготовки компонентов гранулированных ВВ .....	78
4.3. Классификация оборудования для смешения компонентов и получения готовых гранулированных ВВ .....	80
4.4. Схемы и оборудование стационарных пунктов для приготовления гранулированных ВВ .....	81
4.5. Технология работы и оборудование стационарных пунктов для водосодержащих ВВ .....	85
А. Суспензионные гелеобразные ВВ .....	86
Б. Эмульсионные ВВ .....	91
В. Разработка и внедрение акватаола Т-20ГК .....	110
5. Технологическая безопасность взрывчатых материалов .....	120
5.1. Общие и исторические сведения .....	120
5.2. Понятия и критерии технологической безопасности производства и применения ВМ .....	126

6. Причины и условия возникновения начального очага загорания .....	140
6.1. Общие сведения о чувствительности к механическим воздействиям .....	140
6.2. Количественная оценка начального очага загорания при механических воздействиях .....	151
6.3. Статическое электричество как причина начального очага загорания .....	160
6.4. Чувствительность к тепловым воздействиям .....	170
7. Оценка восприимчивости к детонации .....	173
7.1. Общие понятия о восприимчивости к детонации .....	173
7.2. Особенности детонации в заряде нарастающей плотности .....	183
7.3. Влияние кристаллических ВВ на детонационный процесс СВМ .....	189
7.4. Возбуждение детонации при ударе быстролетящим телом .....	196
8. Возникновение взрывных процессов при загорании ВМ .....	200
8.1. Устойчивость процесса горения ВМ .....	200
8.2. Переход горения в детонацию .....	211
9. Основы создания взрывобезопасных технологических процессов производства ВВ .....	229
Список литературы .....	244

## **ВЫСШЕЕ ГОРНОЕ ОБРАЗОВАНИЕ**

**Борис Николаевич Кутузов**  
**Геннадий Антонович Нишпал**

**ТЕХНОЛОГИЯ И БЕЗОПАСНОСТЬ  
ИЗГОТОВЛЕНИЯ И ПРИМЕНЕНИЯ  
ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ  
НА ГОРНЫХ ПРЕДПРИЯТИЯХ**

*Режим выпуска «стандартный»*

Редактор текста *А.Н. Сытдыкова*  
Набор *С.А. Макеева*

Компьютерная верстка и подготовка  
оригинал-макета *Е.В. Воронцова*  
Дизайн серии *Е.Б. Капралова*  
Зав. производством *Н.Д. Урбушкина*

*Диалозитивы изготовлены  
в Издательстве МГГУ*

Подписано в печать 29.03.2004. Формат 60×90/16.  
Бумага офсетная № 1. Гарнитура «Times». Печать  
офсетная. Усл. печ. л. 15,5. Тираж 1000 экз.  
Заказ 183

**ИЗДАТЕЛЬСТВО МОСКОВСКОГО  
ГОСУДАРСТВЕННОГО ГОРНОГО УНИВЕРСИТЕТА**

*Лицензия на издательскую деятельность  
ЛР № 062809. Код издательства 5X7(03)*

*Оригинал-макет подготовлен ООО «Горная книга»*

Отпечатано в ОАО «Московская типография № 6»  
115088 Москва, ул. Южнопортовая, 24

Магниевые штампы изготовлены  
в Первой Образцовой типографии

**119991 Москва, ГСП-1, Ленинский  
проспект, 6, Издательство МГГУ;  
тел. (095) 236-97-80; факс (095) 956-90-40;  
тел./факс (095) 737-32-65**



Б.Н. Кутузов  
Г.А. Нишпал

---

ТЕХНОЛОГИЯ  
И БЕЗОПАСНОСТЬ  
ИЗГОТОВЛЕНИЯ И ПРИМЕНЕНИЯ  
ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ  
НА ГОРНЫХ  
ПРЕДПРИЯТИЯХ



---

ВЫСШЕЕ ГОРНОЕ ОБРАЗОВАНИЕ

---