



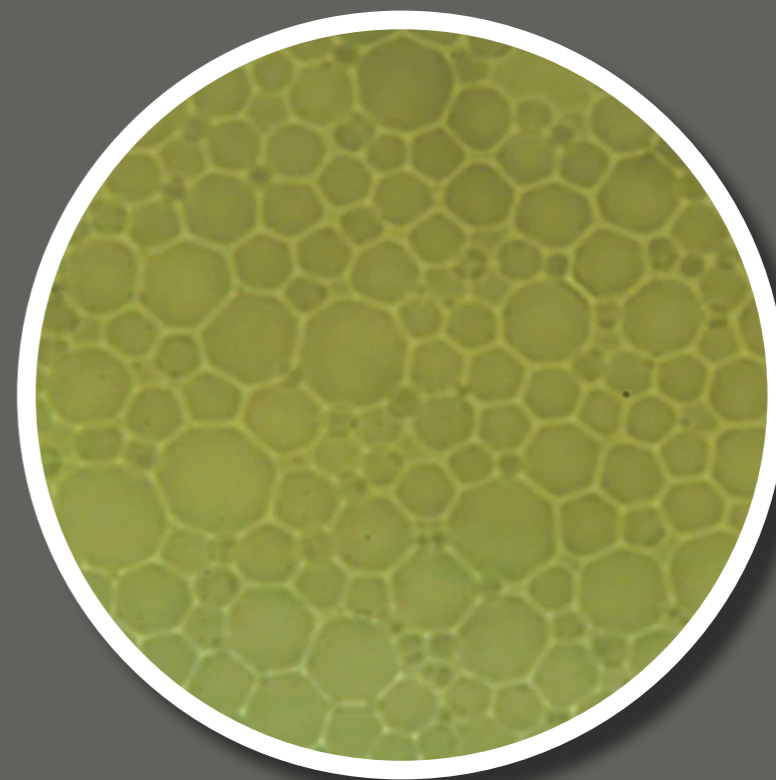
**Горинов Сергей Александрович**

*Доктор технических наук, горный инженер.  
Автор около 90 научных работ в области  
технологии и безопасности взрывных работ,  
инициирования и детонации промышленных  
взрывчатых веществ, разрушения горных  
пород взрывом.*

**ИНИЦИИРОВАНИЕ И ДЕТОНАЦИЯ ЭМУЛЬСИОННЫХ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ**

**С.А. Горинов**

**ИНИЦИИРОВАНИЕ  
И ДЕТОНАЦИЯ ЭМУЛЬСИОННЫХ  
ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ**



**С. А. ГОРИНОВ**

**ИНИЦИИРОВАНИЕ И ДЕТОНАЦИЯ  
ЭМУЛЬСИОННЫХ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ**

*Под редакцией  
академика РАН АДУШКИНА В. В.*

**СТРИНГ  
Йошкар-Ола  
2020**

**УДК 622.235**

**ББК 24.54**

**Г 69**

**ISBN 978-5-91716-635-3**

С.А. Горинов

**Инициирование и детонация эмульсионных взрывчатых веществ. –**

Йошкар-Ола: Стринг, 2020. – 214 с.

В монографии представлены закономерности возникновения и распространения детонации в эмульсионных взрывчатых веществах (ЭВВ) с учетом рецептурно-технологических, энергетических и микроструктурных характеристик ЭВВ и параметров возбуждающего импульса.

Книга предназначена для специалистов, занимающихся вопросами развития и совершенствования взрывных работ с применением ЭВВ.

Научное издание

Под ред. академика РАН Адушкина В.В.

**УДК 622.235**

**ББК 24.54**

ISBN 978-5- 91716-635-3

© Горинов С.А., 2020

## СОДЕРЖАНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ РЕДАКТОРА .....	5
ВВЕДЕНИЕ .....	7
ГЛАВА 1. АНАЛИЗ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ СВЕДЕНИЙ ОБ ИНИЦИИРОВАНИИ И РАСПРОСТРАНЕНИИ ДЕТОНАЦИИ ПО СКВАЖИННОМУ ЗАРЯДУ ЭВВ .....	11
1.1 Эмульсионные взрывчатые вещества. Научно-технические основы создания, свойства, достоинства, перспективы применения и нерешенные проблемы. ....	11
1.2. Анализ современных моделей детонации ЭВВ .....	17
1.3. Анализ научно-технических основ выбора промежуточных детонаторов для инициирования ЭВВ .....	27
Выводы по главе 1 .....	38
ГЛАВА 2. ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДЕТОНАЦИИ ЭВВ.....	40
2.1. Схема детонационного процесса.....	40
2.2. Физико-математические основы детонации ЭВВ, сенсibilизированных газовыми порами. Стационарный режим .....	44
2.3. Определение характеристической плотности ЭВВ .....	54
2.4. Особенности структуры окислительной фазы эмульсии .....	61
2.5. Алгоритм расчета детонационных параметров ЭВВ, сенсibilизированных газовыми порами .....	75
Выводы по главе 2.....	80
ГЛАВА 3. УСТОЙЧИВОСТЬ ДЕТОНАЦИИ ЭВВ.....	82
3.1. Теоретический анализ неустойчивости детонации ЭВВ, сенсibilизированных газовыми порами .....	84
3.2. Экспериментальное подтверждение ячеистой структуры детонационного фронта в ЭВВ.....	91
3.3. Условие возникновения нейтральной устойчивости детонационной волны в ЭВВ.....	96
3.4. Анализ экспериментальных данных о неустойчивости детонации ЭВВ, сенсibilизированных газовыми порами.....	104
Выводы по главе 3.....	109
ГЛАВА 4. ИНИЦИИРОВАНИЕ ДЕТОНАЦИИ В ЭВВ ПРОМЕЖУТОЧНЫМИ ДЕТОНАТОРАМИ .....	112
4.1. Инициирование ЭВВ при фронтальном ударе продуктов взрыва ПД.....	113
4.2. Инициирование ЭВВ при взрыве удлиненного (линейного) ПД ....	126

4.3. Иницирование ЭВВ системой сближенных сосредоточенных зарядов. ....	130
4.4. Анализ экспериментальных данных по иницированию ЭВВ различными ПД.....	136
Выводы по главе 4.....	154
ГЛАВА 5. Обеспечение устойчивой детонации ЭВВ в технологиях взрывного разрушения горных пород.....	156
5.1. Оценка возможности прохождения детонации по всей длине скважинного заряда ЭВВ .....	156
5.2. Выбор и промышленное испытание ПД для иницирования скважинного заряда ЭВВ .....	159
5.3. Обоснование параметров эмульсионного УПД .....	163
5.4. Влияние рецептурного состава и структуры иницируемых ЭВВ на параметры эмульсионных ПД.....	173
Выводы по главе 5.....	179
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	181
СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ.....	185
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	207
Приложение 1. Результаты синхронного термического анализа аммиачной селитры .....	207
Приложение 2. Расчет коэффициентов теплопроводности и теплоемкости матричной эмульсии.....	207
Приложение 3. Зависимость вязкости эмульсии от размера частиц дисперсной фазы.....	209

## ПРЕДИСЛОВИЕ РЕДАКТОРА

Потребление эмульсионных взрывчатых веществ (ЭВВ) в горнодобывающих отраслях промышленности страны в течение нескольких последних лет превышает половину всех используемых взрывчатых веществ, что делает ЭВВ наиболее востребованными и распространёнными при подготовке твердых полезных ископаемых к выемке. Это объясняется высокими потребительскими свойствами ЭВВ, обусловленными их водоустойчивостью, относительной безопасностью, экономичностью, экологичностью и способностью разрушать даже крепкие горные породы. Однако ЭВВ являются сложными многокомпонентными веществами, что предъявляет высокие требования к научному обеспечению технологий их изготовления и применения.

Данная монография, посвященная вопросам инициирования и распространения детонации в ЭВВ, в полной мере соответствует таким требованиям к необходимому научному обеспечению, поскольку именно на основе понимания механизмов возбуждения детонации и дальнейшего распространения детонационной волны и могут формироваться и совершенствоваться технологии изготовления и применения ЭВВ.

Монография целиком посвящена всестороннему изучению и описанию особенностей возбуждения, протекания и затухания детонации в ЭВВ с широким привлечением физико-математического аппарата. Нестационарность структуры детонационной волны в неоднородных многокомпонентных веществах, каковыми являются ЭВВ, обуславливает возникновение неустойчивых и пульсирующих режимов детонации, что не позволяет описывать происходящие в ЭВВ детонационные процессы на основе классической теории детонации конденсированных взрывчатых веществ.

В монографии представлены результаты многочисленных экспериментов в области возбуждения и распространения детонации в ЭВВ и результаты их аналитического описания автором. Например, приведены:

физико-математическая модель детонации ЭВВ;

методика расчета детонационных параметров ЭВВ с учетом рецептурного состава, плотности смеси и эмульсии, размера сенсibiliзирующих пор и частиц дисперсной фазы эмульсии, а также параметров инициирующего воздействия;

описание особенностей распространения детонационной волны по скважинному заряду ЭВВ;

условия реализации устойчивого распространения детонационной волны по скважинному заряду ЭВВ;

зависимости для определения параметров промежуточных детонаторов для инициирования ЭВВ, в которых учтены их детонационные и геометрические характеристики, а также рецептурно-микроструктурные характеристики самих ЭВВ;

Наконец, отметим предложенные автором технологии формирования и взрывания скважинных зарядов ЭВВ, обеспечивающие условия прохождения детонации по всей длине скважинного заряда

Представленные в монографии результаты исследований являются существенным вкладом в теорию и практику инициирования и детонации многокомпонентных эмульсионных взрывчатых смесей. В настоящее время интенсивного развития и совершенствования ЭВВ эти результаты, безусловно, актуальны и злободневны.

Следует также отметить, что некоторые представления и взгляды автора на процессы, происходящие при формировании режимов детонации в ЭВВ, являются дискуссионными. Однако сама постановка вопросов уже стимулирует дальнейшие исследования этих сложных, но широко применяемых диспергированных систем – эмульсий типа «вода в масле».

Монография, безусловно, послужит важным этапом в развитии теоретических представлений об особенностях развития детонации ЭВВ и подобных многокомпонентных взрывчатых систем.

В целом монография будет интересна и полезна для многих специалистов взрывного дела, занимающихся техническим развитием современных промышленных взрывчатых веществ, а также научным сотрудникам и инженерам, непосредственно участвующим в решении вопросов разработки и применения ЭВВ в горнодобывающих отраслях промышленности.

май 2020 г.

академик РАН В.В. Адушкин

## ВВЕДЕНИЕ

При промышленной добыче твердых полезных ископаемых, играющих исключительно большое значение в обеспечении жизнедеятельности населения планеты, значимое место занимают взрывные технологии, которым нет альтернативы на ближайшую перспективу. Основой любой взрывной технологии является применяемое взрывчатое вещество (ВВ).

В настоящее время в горнодобывающей промышленности России и за рубежом широкое распространение получили эмульсионные взрывчатые вещества (ЭВВ). Анализ данных российских и зарубежных исследователей показывает, что объем ЭВВ, потребляемых мировой горнодобывающей промышленностью, непрерывно растет. Согласно данным ГосНИИ «Кристалл» в России в 2015 году потребление ЭВВ составило 825 тыс. тонн, при этом основная масса ЭВВ – 685 тыс. тонн была произведена непосредственно на горных предприятиях.

Значительную роль в распространении ЭВВ и совершенствовании технологии их производства и применения внесли российские ученые Жученко Е.И., Иоффе В.Б., Державец А.С., Соснин В.А., Колганов Е.В., Кутузов Б.Н., Белин В.А., Викторов С.Д. и др.

Большое значение в технологии производства эмульсии для получения ЭВВ, а также в области технологий использования ЭВВ в промышленности имеют труды зарубежных исследователей: Блюма Г.Ф., Вейда С.Г., Олнея Р.С., Конрада К.Л., Сьюгуана В., Куприна В.П., Шимана Л.Н. и др.

Непрерывный рост объемов использования и расширение областей применения ЭВВ требует углубления наших знаний и представлений о закономерностях взрывчатого разложения данных промышленных ВВ (ПВВ) и факторах, позволяющих управлять данным процессом. Это важно для дальнейшего повышения безопасности при изготовлении и применении ЭВВ, а также для увеличения эффективности его использования при ведении взрывных работ при добыче минерального сырья, выполнении отдельного вида промышленных и строительных работ.

Современная теория детонации конденсированных ВВ опирается на классические труды Харитона Ю.Б., Ландау Л.Д., Станюковича К.П., Зельдовича Я.Б., Компанейца А.С., Апина А.Я. и др. Однако распространенные в настоящее время ПВВ по своему химическому составу значительно отличаются от индивидуальных ВВ. Это обуславливает наличие у данных ВВ определенных



особенностей протекания детонационных процессов, которые не укладываются в классическую теорию детонации.

Существующие представления о механизме детонации ЭВВ во многом опираются на исследования детонации жидких ВВ, в которые значительный вклад внесли работы российских и зарубежных ученых: Дубовика А.В., Дремина А.И., Трофимова В.С., Юханссона К., Шоудри М., Мадера С., Кемпелла А.В. и др. Важные результаты в понимании механизма детонации водосодержащих аммиачно-селитренных ВВ получены Влодарчиком Э., Анниковым В.Э., Куком М.А. и др., а в механизме детонации ЭВВ – Дерибасом А.А., Медведевым А.Е., Бордзиловским С.А., Сильвестровым В.В., Хасайновым Б.А., Ли Дж., Перссоном П. и др.

Анализ моделей возникновения детонации в ЭВВ показал, что в основе всех моделей лежит концепция Боудена Ф. и Иоффе А., согласно которой при ударном воздействии на неоднородное ВВ в местах неоднородностей возникают локальные очаги разогрева – «горячие точки». В данных очагах происходит возгорание ВВ, переходящее в последующем в детонацию. При этом анализ моделей механизма детонации ЭВВ показал, что в них не находит отражение влияния дисперсности окислительной фазы на детонационные показатели ЭВВ, а в ряде моделей не учитывается и размер газовых пор. Между тем анализ экспериментальных данных по детонации ЭВВ показывает их зависимость от внутренней структуры ЭВВ, включая дисперсность эмульсии.

Необходимо отметить, что в практике ведения взрывных работ скважинными зарядами ЭВВ, сенсibilизированных газовыми порами, отмечено возникновение неожиданных обрывов (или переходов на низкоскоростные режимы) детонации в процессе ее распространения по заряду.

Затухающие взрывные процессы в скважинных зарядах ЭВВ зафиксированы сотрудниками ИПХФ РАН К.К. Шведовым и В.В. Лавровым, а также группой исследователей под руководством Е.И. Жученко. Для объяснения данных процессов было выдвинуто предложение, что детонационная волна способна распространяться в заряде ЭВВ даже тогда, когда его диаметр меньше критического. При этом длина распространения затухающего взрывного процесса зависит от соотношения между диаметром заряда и критическим диаметром детонации.

Однако анализ научно-технической литературы показывает, что данные явления могут быть вызваны проявлением неустойчивостей при распростра-

нении детонации в ЭВВ, подобно неустойчивостям, наблюдаемым при детонации смесевых аммиачно-селитренных порошкообразных и гранулированных ВВ, а также в игданигах (Даниленко В.А.), при детонации в жидких ВВ (Дремин А.Н.) при детонации плотных смесевых плавов индивидуальных ВВ (Кондриков Б.Н.). Поэтому эмпирические зависимости по длине пробега детонационной волны вдоль скважинного заряда при затухающих взрывных процессах могут быть лишь отражением возникновения неустойчивостей при распространении детонации в ЭВВ.

Эксперименты по измерению скорости детонации в скважинных зарядах также показали, что наряду с затухающими детонационными процессами возможны режимы распространения детонации с практически постоянной скоростью по колонке восстающего заряда ЭВВ, сенсублизованного газовыми порами. Однако данное явление не укладывается в существующие модели, описывающие распространения детонации в ЭВВ, т.к. по мере подъема по колонке заряда отмечается уменьшение плотности ЭВВ, что должно повлечь за собой постепенное снижение скорости детонации.

Таким образом, в настоящее время вопросы надежного прохождения детонационной волны по скважинному заряду и связанная с этим полнота энерговыделения при взрыве заряда ЭВВ остаются во многом неясными и нерешенными.

В работах Калякина С.А., Добрынина И.А. и Маслова И.Ю. экспериментально зафиксирована зависимость скорости детонации в ЭВВ от параметров промежуточного детонатора, что также не находит объяснения в рассмотренных моделях детонации ЭВВ.

В работах Атенкова А.В., Соловьева В.С., Афанасенкова А.Н., Воскобойникова И.М., Васильева В.А., Мейдера Ч., Каупертвейта М. и др. представлены исследования по выявлению минимальных (критических) параметров ударной волны, вызывающей детонационные процессы в индивидуальных и смесевых конденсированных ВВ. Однако данные критерии выполняются в случаях, когда химические превращения в ВВ обусловлены его равномерным объемным разогревом во фронте волны при ударном сжатии. Это делает весьма ненадежным использование данных критериев для расчета параметров промежуточных детонаторов (ПД) для инициирования ЭВВ, для которых существенными являются локальности разогрева ВВ.

Анализ данных работ показал, что в настоящее время, ввиду отсутствия разработок, позволяющих учитывать при выборе ПД ударную сжимаемость

вещества ЭВВ, кинетику процесса воспламенения эмульсии и рецептурно-технологические параметры ЭВВ, выбор ПД для инициирования ЭВВ осуществляется методом экспериментального подбора. Однако ввиду разнообразия возможных геометрических форм ПД, вида ВВ, из которых может быть изготовлен ПД, а также характеристик инициируемого ЭВВ данный метод трудоемок, требует существенных финансовых затрат и не гарантирует оптимальности и универсальности полученного результата.

В настоящей книге основное внимание направлено на:

анализ теоретических представлений и экспериментальных данных об инициировании и распространении детонации по скважинному заряду ЭВВ (**глава 1**);

разработку физико-математической модели детонации ЭВВ, сенсibilизированных газовыми порами, учитывающей не только рецептурный состав, плотность эмульсии, плотность ЭВВ, радиус сенсibilизирующих пор, но и размер частиц дисперсной фазы эмульсии, а также параметры инициирующего воздействия (**глава 2**);

определение закономерностей распространения детонации в скважинных зарядах ЭВВ и условий потери устойчивости (срыва) детонации в скважинных зарядах ЭВВ (**глава 3**);

экспериментально-теоретическое обоснование параметров ПД для возбуждения детонации в скважинных зарядах ЭВВ, учитывающее рецептурно-технологические и микроструктурные характеристики ЭВВ (**глава 4**);

разработку и обоснование технологий формирования и взрывания скважинных зарядов ЭВВ, при которых детонационная волна проходит по всей длине заряда (**глава 5**).

Автор выражает искреннюю благодарность академику РАН Адушкину В.В. за поддержку исследований и ценные советы по улучшению качества рукописи.

Глубокая признательность докторам технических наук Андрееву В.В, Державцу А.С. и Кутузову Б.Н. за полезные обсуждения особенностей протекания детонационных процессов в ЭВВ.

Автор благодарит кандидатов технических наук Маслова И.Ю., Шеменева В.Г. и инженера Брагина П.А., оказавшим содействие и помощь при проведении описанных в книге промышленных экспериментов.

## **ГЛАВА 1. АНАЛИЗ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ СВЕДЕНИЙ ОБ ИНИЦИИРОВАНИИ И РАСПРОСТРАНЕНИИ ДЕТОНАЦИИ ПО СКВАЖИННОМУ ЗАРЯДУ ЭВВ**

### **1.1 Эмульсионные взрывчатые вещества. Научно-технические основы создания, свойства, достоинства, перспективы применения и нерешенные проблемы.**

При промышленной добыче твердых полезных ископаемых, играющих исключительно большое значение в обеспечении жизнедеятельности населения планеты, значимое место занимают взрывные технологии, которым нет альтернативы на ближайшую перспективу. Основой любой взрывной технологии является применяемое взрывчатое вещество (ВВ).

С последней трети прошлого века в странах с достаточно развитой горнодобывающей промышленностью нашли применение эмульсионные взрывчатые вещества (ЭВВ), отвечающие по своим взрывчато-техническим и эксплуатационным характеристикам комплексу требований к ПВВ (промышленным ВВ). При этом значительная часть данных ПВВ производится на местах их использования.

Согласно современным воззрениям ЭВВ представляют собой сенсibilизированную высококонцентрированную обратную эмульсию (эмульсия типа «вода в масле»), где окислительная фаза является дисперсной фазой, а топливная фаза – дисперсионной средой [117, 169, 183, 224-230]. Размер частиц дисперсной фазы (окислителя) составляет несколько микрон, а толщина пленки топливной фазы – доли микрона. Водостойчивость обратной эмульсии обусловлена ее структурой.

В основе создания эмульсии типа «вода в масле» лежат фундаментальные исследования по вопросам формирования и стабилизации различных структур при смешении взаимно нерастворимых жидкостей [1, 111] и разработки в области технических средств для производства эмульсий [37, 118, 183].

Основными компонентами ЭВВ являются:

окислительная фаза, представленная высококонцентрированным раствором аммиачной селитры (смеси аммиачной и натриевой, аммиачной и кальциевой селитр);

топливная фаза, представленная жидким углеводородным горючим с растворенным в нем поверхностно-активным веществом (ПАВ);

сенсбилизатор;

различные специальные добавки.

Массовая доля топливной фазы в составе эмульсии близка к нулевому кислородному балансу смеси и в зависимости от химического состава окислительной фазы составляет 6 – 9 %.

Высококцентрированные эмульсии характеризуются значительной поверхностной энергией раздела фаз, поэтому могут быть получены и сохранены только с применением ПАВ (эмульгатора), уменьшающего величину межфазного поверхностного натяжения.

При этом эмульгатор увеличивает стабильность эмульсии или посредством создания мономолекулярного слоя из молекул эмульгатора, который препятствует коалесценции (слиянию) смежных частиц дисперсной среды, или посредством повышения вязкости дисперсионной среды.

Показано, что обратная эмульсия легко образуется и имеет хорошую устойчивость, если используется эмульгатор с величиной гидрофильно-липофильного баланса (баланс между группами атомов в молекуле эмульгатора, обладающими химическим сродством к воде, и группами атомов, обладающими химическим сродством к маслу) в диапазоне 3 – 6.

В настоящее время разработаны различные эмульгаторы, позволяющие получать устойчивые микродисперсные системы типа «вода в масле» из высококонцентрированного водного раствора аммиачной селитры (смесей селитр) и жидкого углеводородного горючего. Установлено, что, используя в качестве эмульгатора не индивидуальное ПАВ, а композицию из индивидуальных ПАВ с различными свойствами, вследствие синергетического эффекта удастся получить более эффективный эмульгатор.

Для ЭВВ характерно однородное распределение компонентов по объему вещества и значительная площадь контакта окислителя с горючим, которая в тысячи раз больше аналогичной величины в смесях «аммиачная селитра – дизельное топливо» (АС-ДТ). Это обуславливает более высокие детонационные параметры ЭВВ по сравнению со смесями АС-ДТ.

Эмульсию получают путем дробления дисперсной среды эмульсии на отдельные частицы посредством создания в смешиваемых средах сдвиговых напряжений. В промышленных условиях это может осуществляться на различ-

ных аппаратах эмульгирования: на коллоидной мельнице, на гомогенизаторе или при помощи смесителей лопастного, турбинного и пропеллерного типов. При этом наименее энергозатратным является метод использования смесителей лопастного, турбинного и пропеллерного типов, который нашел широкое применение при создании эмульсий для ЭВВ. В этом случае раствор АС (АС и натриевой селитры; АС и кальциевой селитры), нагретый до 60 – 90°C, диспергируется в жидком углеводородном топливе, содержащем эмульгатор, за счет интенсивного перемешивания.

Размер частиц, на которые дробится дисперсная среда, зависит от аппарата эмульгирования, плотности, вязкости и соотношения объемов дисперсионной и дисперсной фаз, скорости сдвига, продолжительности перемешивания и величины межфазного поверхностного натяжения. При определенной скорости сдвига существует предельный размер частиц, меньше которого дисперсная среда не дробится даже при увеличении продолжительности перемешивания. Чтобы более тонко раздробить частицы дисперсной среды, нужно обеспечить более значительные скорости сдвига, что приводит к увеличению энергетических затрат на эмульгирование. Однако и в этом случае существует предел, определяемый физико-химическими свойствами компонентов топливной фазы (жидким горючим и эмульгатором) и относительным объемом жидкого горючего и (или) относительным объемом эмульгатора в общем объеме эмульсии. Кроме этого, размер дисперсной частицы эмульсии не может быть меньше некоторого критического размера, при котором крупные частицы эмульсии поглощают образовавшуюся мелкую частицу (явление переконденсации).

Дисперсность эмульсии существенно влияет на стабильность, реологические и электрические свойства эмульсии, а также на чувствительность и детонационные способности ЭВВ, изготовленного на основе этой эмульсии. Согласно экспериментальным данным с уменьшением размера частиц дисперсной фазы:

- увеличивается стабильность эмульсии;

- повышается чувствительность к инициирующему импульсу и скорость детонации ЭВВ;

- снижается температура кристаллизации эмульсии;

- возрастает вязкость эмульсии.

На стабильность эмульсии также большое влияние оказывает качество окислителя, горючего и эмульгатора. Наличие примесей затрудняет получение

эмульсии и делает ее неустойчивой. При этом чем эффективнее эмульгатор, тем меньше его нужно для получения стабильной эмульсии.

Эмульсия приобретает детонационные свойства только в случае ее сенсibilизации, что обусловлено невозможностью возбудить в ней детонацию даже под действием чрезвычайно больших ударно-волновых нагрузок [4, 173].

В качестве сенсibilизатора эмульсии используются любые введенные в нее включения, способствующие созданию локальных областей сильного разогрева эмульсии («горячих точек»), обуславливающих возникновение детонационных явлений.

Это могут быть:

мощные твердые индивидуальные ВВ (ТЭН, тринитротолуол и т.п.) или растворимые в топливной фазе жидкие ВВ (эферы азотной кислоты, аминонитраты);

газовые микропоры, образованные или введением воздушных пузырьков, или с помощью химических газообразующих веществ. При этом чувствительность ЭВВ можно повысить, добавив в окислительную фазу ЭВВ органические аминонитраты или небольшое количество водорастворимых соединений стронция;

микроферы из стекла или синтетического материала;

гранулы вспененного полистирола;

вспученный порошкообразный перлит или гранулы высокопористых материалов, имеющих преимущественно закрытую пористость.

порошок ферросилиция;

гранулы пористой аммиачной селитры.

Из возможных способов сенсibilизации эмульсии наибольшее распространение получили способы, связанные с организацией в эмульсии микропор, что объясняется или большей безопасностью, или большей экономичностью, или обоими упомянутыми факторами. Экспериментальные и теоретические исследования показывают, что размеры сенсibilизирующих пор влияют на детонационные характеристики ЭВВ [10, 148, 176, 177, 225 и др.]. Однако единого взгляда на наиболее эффективный размер пор не существует. С точки зрения [176], оптимальный размер поры составляет около 50 мкм, с позиций работы [183], эффективность пор возрастает с уменьшением их размера. Надежное управление размерами пор в настоящее время возможно, если поры создаются калиброванными стеклянными или пластиковыми микроферами.

Детонационные параметры ЭВВ также зависят от плотности. Управление плотностью ЭВВ осуществляется регулированием величиной вводимого в эмульсию объема сенсibiliзирующего агента. При этом относительная плотность ЭВВ (отношение плотности ЭВВ к плотности эмульсии) при определенном диаметре заряда не должна превышать величину, зависящую от критического диаметра заряда ЭВВ, т.к. в противном случае детонация в ЭВВ не возникает из-за срыва детонации. Например, при диаметре скважинного заряда ЭВВ 200 мм предельная относительная плотность ЭВВ «Сибирит-1200» равна 0,96 [92]. Зависимость скорости детонации ЭВВ от плотности имеет характерную колоколообразную форму: сначала по мере роста плотности скорость детонации растет по линейной зависимости, далее рост скорости детонации снижается, при некоторой плотности ЭВВ скорость детонации достигает наибольшего значения, и при дальнейшем повышении плотности скорость детонации уменьшается. Наконец, при достижении плотностью ЭВВ некоторого предельного значения детонация прекращается. При этом при увеличении диаметра заряда ЭВВ величина плотности, при которой скорость детонации достигает наибольшего значения, увеличивается. Также увеличивается и значение этой наибольшей скорости детонации (по сравнению с наибольшей скоростью детонации при меньшем диаметре заряда).

Необходимо отметить, что ЭВВ имеют следующие положительные свойства:

матричная (несенсибилизированная) эмульсия имеет очень низкую чувствительность по отношению к механическим и тепловым воздействиям. Это позволило отнести ее по теплоустойчивости, чувствительности к сильному удару и нагреванию в ограниченном объеме к подклассу 5.1 класса 5 ГОСТ 19433-88 «Грузы опасные. Классификация и маркировка» (аналогично классификации ДОПОГ) [64]. Принадлежность матричной эмульсии к подклассу 5.1 класса 5 делает ее пригодной к перевозке в специально оборудованных автомобилях (автоприцепах) по дорогам общего пользования без дорогостоящих специальных мероприятий, выполняемых при перевозке ВВ и ВМ (взрывчатых материалов) [163];

при выполнении зарядных работ отсутствует пыление и электризация ЭВВ; существует возможность создания смесевых и комбинированных взрывчатых составов на основе матричной эмульсии ЭВВ;

ЭВВ изготавливаются из нетоксичных и невзрывоопасных материалов;



существует возможность изменения чувствительности и взрывчатых параметров на основе изменения химического состава, плотности и способов сенсибилизации;

ЭВВ характеризуются низкой газовой вредностью;

благодаря специальным добавкам в окислительную фазу или формированию окислительной фазы на основе бинарного раствора аммиачной и кальциевой селитр ЭВВ можно применять при разрушении сульфидных пород и руд;

ЭВВ изготавливаются из доступного и недорогого сырья по достаточно простой и недорогой технологии, что делает их одними из самых недорогих промышленных ВВ;

ЭВВ можно использовать на открытых, подземных горных работах, изготавливать из них промежуточные детонаторы, применять при сварке взрывом и других специальных работах.

По консистенции ЭВВ, применяемые в горной промышленности, могут быть твердыми, пастообразными и льющимися в зависимости от их химического состава и типа эмульгатора.

Консистенция ЭВВ определяет технологические схемы их производства и применения.

Твердые и пастообразные ЭВВ используются в патронированном виде, поэтому, наряду с технологическими линиями по производству ЭВВ, применяются также технологические линии по патронировке ЭВВ.

Бестарные (льющися) ЭВВ производят как в стационарных пунктах, расположенных вблизи потребителей ЭВВ, так и в малогабаритных мобильных модулях вблизи указанных потребителей или с помощью специальных машин непосредственно на месте применения.

Данные ЭВВ имеют текучую консистенцию, не упаковываются и, как правило, используются или сразу, или вскоре после их получения. Динамическая вязкость льющихся ЭВВ меньше, чем ЭВВ, применяемых при производстве патронов, и при стандартных измерениях не должна превосходить 100 – 120 Па\*с, т.к. в противном случае затруднено поступление перекачиваемой эмульсии в рабочую зону насосов.

Приведенные положительные качества ЭВВ послужили основанием для их широкого распространения при добыче твердых полезных ископаемых во всем мире. В России в 2015 году потребление ЭВВ составило 825 тыс. тонн, при

этом основная масса ЭВВ – 685 тыс. тонн – произведена непосредственно на горных предприятиях [178].

Наиболее распространенными являются бестарные ЭВВ, содержащие в своем составе 15 – 20 % масс. долей воды и сенсibilизированные газовыми порами, получаемыми методом химической газогенерации. Согласно данным ГосНИИ «Кристалл», объем производства данного вида ЭВВ достиг в России в 2015 году 685 тыс. тонн, что составляет 83 % от объема всех произведенных ЭВВ и 55 % от всего объема потребляемых ПВВ [178].

Ввиду значительного объема потребления бестарных ЭВВ повышение их эффективности имеет огромное государственное значение для решения проблемы увеличения экономичности, интенсивности, безопасности горных работ при добыче твердых полезных ископаемых с одновременным снижением экологического вреда, наносимого окружающей среде.

Приведенный анализ научно-технических основ создания ЭВВ показал, что, несмотря на высокие эксплуатационно-технические параметры современных ЭВВ, им присущи и существенные недостатки, которые в первую очередь связаны с отсутствием физико-технических основ создания ЭВВ с заданными детонационными параметрами. Действительно, анализ обширного научного материала показал, что детонационные показатели ЭВВ существенным образом зависят от дисперсности окислительной фазы эмульсии, плотности, химического состава и способа сенсibilизации ЭВВ. Однако в настоящее время отсутствуют физико-математические модели детонации ЭВВ, учитывающие весь спектр их рецептурно-технологических особенностей: плотность, химический состав ЭВВ, размеры сенсibilизирующих пор и частиц дисперсной фазы эмульсии. Это приводит к тому, что получение ЭВВ с заранее заданными свойствами возможно только экспериментальным путем, который очень трудоемок, дорог и при этом не всегда ведет к успеху.

Таким образом, для повышения эффективности ЭВВ необходимо проанализировать современные модели его детонации.

## **1.2. Анализ современных моделей детонации ЭВВ**

В п. 1.1 отмечено, что ЭВВ представляют собой сенсibilизированную эмульсию. Введение сенсibilизатора делает эмульсию неоднородной. Поэтому в основе современных воззрений на механизм детонации ЭВВ лежат пред-

ставления о механизме детонации неоднородных ВВ, изложенные в работе Боудена Ф. и Иоффе А. [26].

Согласно [26], тепловое поле, возникающее при ударном воздействии на неоднородное ВВ, отличается крайней неравномерностью. Вблизи неоднородностей среды наблюдаются значительные скачки температуры – в среде возникают локальные (точечные) очаги разогрева.

Основные пути возникновения данных очагов следующие:

адиабатическое сжатие мельчайших газовых включений (пор);

нагрев за счет трения (частиц ВВ о частицы ВВ; частиц ВВ с твердыми примесями или поверхностями, находящимися в соприкосновении с ВВ);

вязкий нагрев ВВ при вытекании из зазора между поверхностями соударяющихся тел.

Согласно Боудену Ф. и Иоффе А., последний из указанных путей возникновения очагов разогрева осуществляется только в исключительных случаях, поэтому большее значение приобретают первые два механизма.

Анализируя экспериментальные данные, авторы работы [26] пришли к выводу, что чувствительность к удару жидких, желеобразных или пластичных взрывчатых веществ связана с наличием в ВВ газовых пор. Газ в этих порах нагревается вследствие их адиабатического сжатия при ударе, что является главным источником воспламенения ВВ.

Однако Юханссон К. и Персон П. [205] пришли к выводу, что адиабатический разогрев газа является далеко не основной причиной инициирования жидких ВВ. Авторы [205] утверждают, что, как правило, схлопывание сферической поры асимметрично, что приводит к образованию струй и диспергированию поверхности пузырька. Внутри поры происходит возгорание мельчайших брызг, что является преимущественным механизмом детонации. Дополнительно Юханссон К. и Персон П. отмечают, что теплота вязкого трения может привести к детонации и без пор.

В работе Дубовика А.В. и Боболева В.К. [87] весьма подробно рассмотрены возможные механизмы возбуждения детонации жидких ВВ. Выяснено, что теплоты, выделяемой при адиабатическом сжатии вследствие существенно разных термических активностей газа внутри поры и вещества ВВ, недостаточно для инициирования ВВ. Одновременно для маловязких ВВ вязкий разогрев на поверхности поры также не приводит к возбуждению детонации. Поэтому авторы [87] склоняются к точке зрения авторов работы [205], что возникнове-

ние взрыва объясняется воспламенением мельчайших капель в поре. При этом масса капель должна составлять величину порядка массы газа в поре.

Мадер К. в работах [222, 223], анализируя опыты Кемпелла А. [207], объясняет причину детонации жидких ВВ образованием гидродинамических горячих точек. Он считает, что вследствие воздействия ударной волны, распространяющейся по ВВ, на неоднородности, имеющиеся в ВВ (поры и твердые включения), возникают области, в которых плотность энергии и температура вещества ВВ почти вдвое превышают свои начальные значения за фронтом волны. Наблюдается ударный разогрев вещества ВВ, имеющий чисто гидродинамическую природу и не зависящий от температуры и вида газа в поре.

В работе Шоудри М. и Фильда Дж. [209] опубликованы результаты опытов по инициированию кристаллов азидов свинца, азидов серебра, помещенных в воду, с расположением на их поверхности пор газа (воздуха, аргона, гелия, бутана) диаметром 1 – 50 мкм. Авторы [209], анализируя причину инициирования водосодержащих ВВ, пришли к выводу, что ни гидродинамический поток, ни возгорание капелек ВВ в полости поры, ни нагрев ВВ вследствие вязкого трения сами по себе не могут вызвать детонацию. Взрывной процесс происходит вследствие разогрева ВВ при адиабатическом сжатии газовых включений.

На основании опытов, приведенных в [209], Влодарчик Э. [34] предложил физико-математическую модель возникновения детонации в водосодержащих аммиачно-селитренных ВВ, имеющих газовые поры. В основу модели автор [34] положил следующие утверждения:

Схлопывание газовых пор происходит в гидродинамическом режиме, т.к. радиус газовых пор  $R_{пор}$  больше критического радиуса Забабахина  $R_{zab}$  [93]:

$$R_{пор} \gg R_{zab}, \text{ где } R_{zab} = 8,4 \frac{\eta}{\rho_3} \sqrt{\frac{\rho_3}{P_f}}, \quad (1.1)$$

где  $\eta$ ,  $\rho_3$  – динамическая вязкость и плотность матричной эмульсии,  $P_f$  – величина фронтального давления в детонационной волне.

Адиабатическое сжатие газовой поры происходит сферически симметрично.

Основываясь на данных положениях и физико-химических свойствах аммиачной селитры, Влодарчик Э. показал, что температура воздуха в порах (начальное давление –  $10^5$  Па) при сжатии их давлением 10 ГПа может достигать 5091°К. Воздух при столь высокой температуре способен разогреть вещество ВВ на поверхности поры до 1694°К (несмотря на значительную разницу в тер-

мической активности газа, заполняющего пору, и вещества ВВ). Время поддержания высокой температуры в уплотненной поре оказалось сравнимым со временем индукции взрывной реакции в водонаполненном взрывчатом веществе. Следовательно, произойдет инициирование детонационного процесса.

Однако применимость предложенной модели к объяснению инициирования ЭВВ у нас вызывает следующие возражения:

1. Экспериментальные исследования процесса схлопывания газовой поры в жидкости под действием ударной волны методом скоростной киносъемки показали, что данный процесс происходит асимметрично [206]. Поток втекающей в пору жидкости заполняет ее примерно до половины объема (заполняется полусфера, обращенная выпуклостью к потоку). Далее оставшаяся часть поры распадается на большое количество мельчайших пор. Таким образом, модель равномерного всестороннего сжатия поры внешним давлением, принятая в работе [34], несостоятельна.

2. При расчете температуры воздуха в поре исходят из величины мольной теплоемкости  $-\frac{7}{2}R$  ( $R$  – универсальная газовая постоянная, Дж/моль\*град).

Однако при температурах 5000°К происходит диссоциация молекул азота и кислорода. Согласно исследованиям Буркхарда [17], при  $T=5000^\circ\text{K}$  воздух состоит из смеси  $N_2$ ,  $O_2$ ,  $NO$ ,  $N$ ,  $O$ , теплоемкость которой почти в 1,5 раза выше, чем принятое при расчетах значение  $\frac{7}{2}R$ . Данное обстоятельство приводит к тому, что фактическая температура воздуха внутри поры не превысит 3500°К. Однако возгорания вещества при этой температуре, по данным той же работы [34], не происходит ввиду кратковременности ее поддержания. Необходимо отметить, что температура взрыва эмульсии, согласно экспериментальным данным работы [171], имеет значение около 3000 – 3200°К.

В работе [195] Хасинов Б.А. и Ермолаев Б.С. для объяснения образования горячих точек при ударном сжатии ЭВВ, сенсibilизированном стеклянными микросферами, решили воспользоваться результатами работ по возбуждению детонации в пористых прессованных и литых индивидуальных ВВ [13, 196].

В основу модели были положены следующие представления:

стеклянная оболочка микросферы под действием высокого внешнего давления деформируется вязкопластическим образом, и стекло в вязком режиме втекает в пору, разогреваясь при этом;

матричная эмульсия, окружающая стеклянную микросферу, поджигается разогретым вследствие вязкопластического деформирования стеклом оболочкой.

Основанием вязкого режима втекания материала оболочки в пору, с точки зрения указанных авторов, служит то обстоятельство, что ввиду значительной вязкости стекла радиус микросфер будет меньше величины  $4 \frac{\mu_{cm}}{\rho_{cm}} \sqrt{\frac{\rho_{cm}}{P_f}}$ , где

$\mu_{cm}$ ,  $\rho_{cm}$  – динамическая вязкость и плотность стекла,  $P_f$  – давление во фронте детонационной волны [195]. Последняя величина пропорциональна критическому радиусу Забабахина, разделяющего режимы вязкого затекания материала в пору и рэлеевский режим схлопывания поры [93].

Однако данные рассуждения справедливы, если разрушение стеклянной оболочки действительно будет происходить в вязкопластическом режиме. Согласно [199], вязкопластический механизм разрушения будет наблюдаться в случае, если  $t_{fr} \gg T_{rel}$ , где  $t_{fr}$  – время действия разрушающей нагрузки;  $T_{rel}$  – характерное время релаксации напряжений в разрушаемом материале.

В рассматриваемом случае  $T_{rel} \sim \frac{\mu_{cm}}{E_{cm}}$  [199];  $t_{fr} \sim \frac{2h_{cm}}{C_{cm}}$  ( $h_{cm}$  – толщина

стеклянной оболочки;  $E_{cm}$ ,  $C_{cm}$  – модуль упругости стекла и скорость продольных волн в стекле). Принимая  $\mu_{cm} = 1,26 \cdot 10^4$  Па\*с и  $h_{cm} \cong 1,5 \cdot 10^{-6}$  м [195], определяем ( $E_{cm} \cong 6,5 \cdot 10^{10}$  Па,  $C_{cm} = 5500$  м/с):

$$T_{rel} \sim 2 \cdot 10^{-7} \text{ с. } t_{fr} \sim 5 \cdot 10^{-10} \text{ с.}$$

Выполняется обратное условие, а именно –  $t_{fr} \ll T_{rel}$ .

Следовательно, в рассматриваемом случае разрушение стеклянной оболочки осуществляется не вязкопластическим, а хрупким образом. При хрупком разрушении стеклянная оболочка разбивается в отраженной волне напряжений на мельчайшие осколки, которые отбирают тепло у разогретейшей при ударе эмульсии, а не поджигают ее. Это делает неприемлемой предложенную в [195] модель описания возбуждения детонации при ударно-волновом сжатии ЭВВ, содержащем стеклянные микросферы.

Дополнительно необходимо отметить, что экспериментально определенное время формирования «горячей точки» имеет порядок  $10^{-8}$ – $10^{-7}$ с [106], что на

один-два порядка меньше, чем время формирования «горячей точки» по механизму [195].

Рассмотрим эмпирико-теоретический подход к описанию детонации эмульсионных ВВ. Для определения верхней границы скорости детонации Дж. Ли и П. Перссон воспользовались уравнением состояния Беккера-Вильсона-Кистяковского (ВВК), а также соотношением между давлением и скоростью детонации в точке Чепмена-Жуге. В результате они рассчитали зависимость идеальной скорости детонации от плотности [220, 221]. Близкую зависимость для идеальной скорости детонации получили и японские исследователи, взяв газовое уравнение состояния Кихара [183]. Аналогичные расчеты по уравнению ВВК для ряда ЭВВ выполнены группой чешских и польских исследователей [127]. При выполнении упомянутых выше расчетов учитывались только начальный химический состав ЭВВ и конечный состав продуктов взрыва. Структурные особенности ЭВВ, оказывающие существенное влияние на детонационные показатели [117, 176, 177, 183, 216-218], при данных оценочных расчетах не учитывались.

В работах Дерибаса А.А., Медведева А.Е. и др. [72, 148, 167] предложена полуэмпирическая модель детонации ЭВВ. За фронтом проходящей ударной волны происходит разрушение микросфер и формируются «горячие точки» по механизму, изложенному в работе [34]. Иницируется химическая реакция, распространяющаяся радиально от центра рассматриваемой «горячей точки». Скорость химической реакции предполагается постоянной. Сферы выгорания характеризуются предельным радиусом. Используя результаты Е.И. Забабахина [94] для смесей индивидуальных ВВ и представления, что точка Чепмена-Жуге соответствует моменту выгорания сфер горения (от «горячих точек»), авторы получили эмпирико-теоретическую зависимость для скорости детонации. Данные представления позволили объяснить снижение скорости детонации при возрастании плотности ВВ выше некоторой характерной для данного состава ВВ плотности. Показано, что скорость детонации зависит от удельной поверхности микросфер. Однако практическое использование аналитических выражений, вытекающих из данной теории, осложнено необходимостью определения экспериментальным путем трех параметров. Последнее весьма трудоемко, дорогостояще, требует наличия полигона, где можно взрывать заряды массой десятки килограммов. Кроме этого, в данной модели не находит отражение влияние дисперсности окислительной фазы на детонационные показатели [117, 183, 219].

Ранее в работе Кука М.А. [129] было получено выражение для скорости детонации зарядов индивидуальных жидких ВВ в зависимости от диаметра заряда. При расчете данной скорости также принималась концепция «горячих точек» и радиальное выгорание инициируемого ВВ. Сложности использования формул, предложенных в работе [129], связаны с необходимостью экспериментального определения предельного диаметра заряда и скорости детонации при предельном диаметре, что также трудоемко, дорогостояще, требует наличия полигона, где можно взрывать заряды массой десятки килограммов.

В работе Рафейчика С.И. [166] предложен способ описания процесса детонации ЭВВ, сенсibilизированного стеклянными микросферами, без рассмотрения микроскопического процесса схлопывания пор. Использовался метод исследования формализованных макрокинетических уравнений, в котором текущий состав вещества ЭВВ в зоне реакции характеризовался только координатой реакции (степенью разложения) [24]. Вещество в зоне реакции представлялось двухкомпонентным – непрореагировавшее ЭВВ и продукты детонации. Оказалось, что подбором двух параметров кинетического уравнения удастся получить хорошее согласие расчетных и экспериментальных значений ряда детонационных параметров (скорости детонации, давления в т. Чепмена-Жуге, ширины зоны химической реакции) в зависимости от плотности ЭВВ. Однако при изменении состава окислительной, топливных фаз и применении микросфер, имеющих характеристики, отличные от используемых при опытах (стеклянные микросферы МС-В), следует заново подбирать параметры кинетического уравнения. В модели [166] не предусмотрен учет зависимости детонационных параметров от размеров микросфер и частиц эмульсии, наблюдаемых при проведении экспериментальных работ [117, 183, 219].

В практике ведения взрывных работ скважинными зарядами ЭВВ, сенсibilизированных газовыми порами, отмечено возникновение неожиданных обрывов (или переходов на низкоскоростные режимы) детонации в процессе ее распространения по заряду [22, 155, 156].

В работе [155] описаны эксперименты Шеменова В.Г., зафиксировавшие обрывы высокоскоростных детонационных процессов по время экспериментов с ЭВВ «Фортис-100». Взрывались скважинные заряды диаметром 250 мм. Длина скважин – 14 м, длина колонкового заряда – 7 м. Иницирование ниже. Детонация осуществлялась сдвоенными тротильовыми промежуточными детонаторами ТС-400 (2x0,4 кг). Характерный график, описывающий зависи-



мость расстояния, пройденного детонационной волной от времени, при срыве детонационного процесса показан на рис. 1.1.

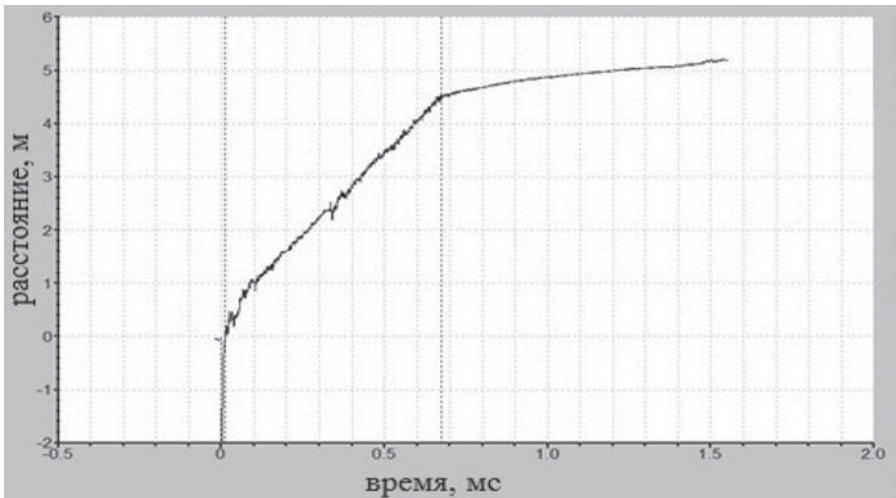


Рис. 1.1. Зависимость расстояния, пройденного детонационной волной от времени ([155]).

На рис. 1.2 изображена построенная на основании рис. 1.1 зависимость скорости детонационной волны от пройденного ею расстояния.

Детонационная волна с большой скоростью проходит 4,5 метра (18 калибров заряда). Затем происходит резкий обрыв детонационного процесса.



Рис.1.2. Зависимость скорости детонационной волны от места инициирования.

Скачкообразное изменение скорости по длине скважинного заряда при нижнем иницировании смесового эмульсионного ВВ Иремекс-560 зафиксировано в работе [22].

В работе [138] отмечается, что в пористых ВВ различной химической природы могут возникать затухающие взрывные процессы. При этом для относительной длины пробега  $S$  затухающего взрывного процесса в пористых ВВ

$$\text{предложена зависимость } \frac{S}{d} = a_{\oplus} + \frac{b_{\oplus}}{\frac{d_{\text{крит}}}{d} - 1}, \quad (1.2)$$

где  $a_{\oplus}$ ,  $b_{\oplus}$  - эмпирические константы ВВ.

Возникновение режимов затухания при распространении детонации в ЭВВ, сенсibilизированных газовыми порами, отмечено в работах Жученко Е.И., Иоффе В.Б. и др. [91, 130].

В этих работах для определения относительной длины пробега затухающего взрывного процесса предложена зависимость

$$\frac{S}{d} = \frac{G_*}{1 - \frac{d}{d_{\text{крит}}}}, \quad (1.3)$$

где  $d_{\text{крит}} = a + b \exp(c \cdot \rho_{\text{омн}})$ , где  $\rho_{\text{омн}}$  равно отношению плотности ЭВВ к плотности эмульсии. Здесь  $d$ ,  $d_{\text{крит}}$  - диаметр заряда и критический диаметр ЭВВ соответственно;  $G_*$ ,  $a$ ,  $b$ ,  $c$  - эмпирические константы ЭВВ.

Общим для работ [91, 130, 138] является то, что при объяснении возникновения затухающих режимов детонации авторы исходят из представления, что детонационные процессы в заряде ЭВВ возможны при его диаметре заряда меньше критического.

С нашей точки зрения данное объяснение нуждается в уточнении.

Во-первых, одна и та же относительная плотность может быть достигнута газовыми порами различных размеров. Однако детонационная способность ЭВВ зависит от размеров пор. При сенсibilизации эмульсии с очень мелкими порами (с радиусом меньше  $R_{\text{zab}}$ ) затекание эмульсии в пору будет осуществляться в режиме вязкопластического течения. Согласно теоретическому анализу, приведенному в работе [195], возгорание втекающей в пору в режиме

вязкопластического течения эмульсии происходит за время порядка нескольких микросекунд, однако опыты, представленные в работе [106], свидетельствуют, что «горячая точка» формируется за значительно меньшее время (на один-два порядка). Следовательно, слишком мелкие газовые поры не оказывают сенсibiliзирующего действия на эмульсию и возбуждения ЭВВ не возникает. Для того чтобы для сенсibiliзации использовать очень крупные поры, необходимо иметь значительные размеры заряда, т.к. в противном случае эмульсия, заполняющая межпоровое пространство, может не успеть прогореть за время химической реакции. Поэтому в реализуемых на практике размерах заряда ЭВВ их сенсibiliзация крупными порами неэффективна [146].

Во-вторых, в работах [91, 130, 138] произошло изменение в понимании критического диаметра, предложенного в работе [194], как диаметра, меньше которого детонация невозможна из-за потери энергии в зоне реакции вследствие боковых волн разряжения, на представление о критическом диаметре как о диаметре, больше которого детонационный процесс становится незатухающим.

Однако это разные понятия, т.к. при распространении детонационной волны в протяженном цилиндрическом заряде ЭВВ, имеющем диаметр, превышающий критический в понимании работы [194], возможно возникновение неустойчивостей данной волны. Данные неустойчивости могут привести к срыву распространения волны, переходу ее распространения на менее скоростной режим или к движению со снижающейся скоростью [68-70, 78, 81, 82, 115, 128]. Поэтому эмпирические зависимости (1.2), (1.3) могут быть отражением возникновения неустойчивости при распространении детонации в ЭВВ.

Эксперименты по измерению скорости детонации в скважинных зарядах показали, что наряду с затухающими детонационными процессами возможны режимы распространения детонации с практически постоянной скоростью по колонке восстающего заряда ЭВВ, сенсibiliзированного газовыми порами [126, 144]. Однако данное явление не укладывается в модели, описывающие распространение детонации в ЭВВ [72, 148, 167], т.к. по мере подъема по колонке заряда отмечается уменьшение плотности ЭВВ [92, 193], что должно повлечь за собой плавное снижение скорости детонации.

В работах [75, 76, 145] экспериментально зафиксирована зависимость скорости детонации в ЭВВ от параметров промежуточного детонатора, что также не находит объяснения в предложенных моделях детонации ЭВВ [72, 148, 166, 167, 177].

Анализируя вышеприведенные факты, приходим к выводу, что в настоящее время отсутствует модель детонации ЭВВ, в которой одновременно:

комплексно учитывается вся совокупность характеристик ЭВВ: плотность ЭВВ, размер газовых пор (микросфер), дисперсность и химический состав эмульсии;

объясняется явление обрыва (перехода на низкоскоростные режимы) детонации в скважинных зарядах;

объясняется влияние параметров промежуточного детонатора на скорость возбуждаемой в ЭВВ детонации.

В конечном итоге отсутствие модели детонации ЭВВ, учитывающей структуру ЭВВ, выражается в отсутствии разработки научно обоснованных положений и практических способов построения взрывобезопасной, экологически и экономически целесообразной системы технологий обеспечения устойчивой, с заданными параметрами детонации скважинных зарядов ЭВВ, основанной на использовании комплекса современных способов регулирования структуры ЭВВ.

### **1.3. Анализ научно-технических основ выбора промежуточных детонаторов для инициирования ЭВВ**

В промышленности применяются ВВ [160], для возбуждения детонации в которых необходимо использовать специальные средства инициирования: капсули-детонаторы (КД, ЭД), капсульные средства неэлектрического взрывания (КСН), оптические системы инициирования или промежуточные шашки-детонаторы (ПД), возбуждаемые КД, ЭД, КСН, ОПСИН или детонирующим шнуром (ДШ). При этом в некоторых случаях в качестве ПД может использоваться ДШ [20].

Это позволяет:

повысить безопасность транспортировки и хранения ВВ, погрузо-разгрузочных и взрывных работ;

осуществлять (совместно со средствами взрывания) пространственно-временное управление взрывом зарядов ВВ посредством возбуждения в них детонационных процессов в нужный момент времени [133, 137].

Известно, что во взрывчатых веществах под действием разнообразных внешних воздействий могут возникать различные режимы химических пре-

вращений [5, 17, 18, 190]. Данное обстоятельство обусловило обязательное проведение тестовых испытаний ВВ на возбуждение в них взрывчатых процессов при различных типах воздействия: тепловом импульсе, ударе, трении (для первичных ВВ – наколе твердым острием), инерциальных напряжений, инициирующих воздействий со стороны других ВВ. Данные испытания направлены на обеспечение безопасности при транспортировке и хранении ВВ, погрузо-разгрузочных и зарядных работах, а также на проверку восприимчивости ВВ к детонации при инициирующем воздействии со стороны как тестового заряда, так и ударной воздушной волны (проверка передачи детонации через воздушный промежуток). Однако данные тесты далеко не всегда могут служить обоснованием эффективности выбираемого способа и средства инициирования ВВ вследствие редкости совпадения условий, принятых при тестовых испытаниях, и условий, возникающих в практической деятельности [30].

Усиленное внимание к промежуточным детонаторам при производстве промышленных взрывов связано с расширенным применением низко чувствительных ВВ. С одной стороны, это свойство делает все работы, связанные с ВВ, более безопасными и позволяет механизировать трудоемкие зарядные работы, с другой – возникают определенные сложности с инициированием ВВ. В наставлениях по горнорудному делу [179], обобщающих опыт добычи твердых полезных ископаемых к концу 50-х годов прошлого века, о промежуточных детонаторах упомянуто лишь короткой фразой: «... для детонации чешуйчатого и литого тротила необходимо применение промежуточного детонатора (обычно из порошкообразного или прессованного тротила)» ([179], с. 169). Это объясняется тем, что ассортимент промышленных ВВ в указанное время ограничивался аммонитами, тротилом, оксиликвитами, порохами и нитроглицериновыми ВВ, которые детонируют от капсюлей-детонаторов и детонирующего шнура [179, 180].

Применение простейших (смесь гранулированной аммиачной селитры с жидкими углеводородами) и гранулированных аммиачно-селитренных ВВ стало возможным только с применением промежуточных детонаторов. Длительное время в качестве промежуточных детонаторов применяли шашки ТП200, ТП400, Тет-150, ПТ-300, Т-400Г, ТГ-500 и патроны аммонитов. При этом вопрос недостаточности инициирующего импульса решался простым увеличением числа используемых тротиловых шашек или массой патрона (коли-

чеством патронов) аммонита [104-106, 147, 201]. Однако внедрение в практику горнодобывающих работ горячельющихся аммиачно-селитренных ВВ и наливных эмульсионных ВВ, применяемых при температурах 70 – 80°C и выше, обусловило разработку и производство как шашек-детонаторов из устойчивых к повышенной температуре взрывчатых веществ (температура плавления тротила – 80,6°C), так и тротильных шашек в пластмассовых корпусах.

В настоящее время промышленность выпускает десятки наименований шашек-детонаторов, которые имеют различную массу, форму, оболочку и изготавливаются из различных ВВ.

Анализ ассортимента выпускаемых промышленностью шашек-детонаторов (ПД) показывает, что одновременно с расширением применения в горнодобывающей промышленности водосодержащих ВВ происходит расширение использования мощных ПД. В настоящее время в России, наряду с ПД массой до 500 г, производятся шашки-детонаторы увеличенной массы – 850 г и более, для изготовления которых используются высокобризантные составы: «тротил-гексоген» (ТГФ-850П), «тротил-тэн» (ПТ-П850), «тротил-тетрил» (ТТ-900Л). Кроме этого, в пластмассовых корпусах выпускаются также удлиненные тротильные шашки массой до 2 кг с пентолитовыми («тротил-тэн») вставками (ТлВ-П2-70). В США компания «Trojan Corporation» выпускает для применения в промышленности пентолитовые шашки-детонаторы С-30 массой 0,9 кг [201]. Целесообразность применения мощных ПД для инициирования ЭВВ и гранэммитов подтверждается экспериментальными данными работ [75, 76, 104-106, 145].

В основе современных подходов к аналитическому решению проблемы инициирования детонации в ВВ ударными волнами лежит идея Ю.Б. Харитона о том, что требования к параметрам инициирующего воздействия определяются характеристиками и особенностями протекания детонационного процесса в возбуждаемом ВВ [194].

В работах российских [6, 13, 14, 30, 87, 174] и зарубежных исследователей [74, 150, 205] представлены исследования по выявлению минимальных (критических) параметров ударной волны, вызывающей детонационные процессы в индивидуальных и смесевых конденсированных ВВ. Данные исследования позволили выявить многие особенности развития детонации в гомогенных и гетерогенных ВВ, а также предложить различные критерии, позволяющие осуществлять оценку опасности инициирующего воздействия.

Согласно [38] макроскопические критерии ударно-волновой чувствительности выполняются в случаях, когда химические превращения ВВ обусловлены их объемным разогревом при ударном сжатии. Данные критерии не могут применяться для оценки чувствительности ВВ в случаях, когда существенными являются локальности разогрева ВВ, размеры и распределения частиц ВВ и неоднородностей по объему ВВ. Поэтому расчет параметров ПД для инициирования аммиачно-селитренных ПВВ по критериям, предложенным для индивидуальных ВВ, не применим. Для оценки параметров ПД для указанных ПВВ предложены следующие подходы:

метод экспериментального подбора [129], когда по схеме «взрыв-отказ» масса ПД подбирается последовательным увеличением ее массы от опыта с отметкой «отказ» к последующему опыту в геометрической прогрессии (например, вдвое шашки серии Р имеют семь номеров и массу 5, 10, 20, 40, 80, 160, 320 г);

метод апробирования шашек-детонаторов и ДШ, выпускаемых промышленностью [20, 66, 67, 76, 116, 185, 203];

инженерный метод расчета параметров ПД [83-85, 102-105, 192].

Предлагаемые нестандартные инженерные решения для выбора и основания характеристик ПД (например, [120]) всегда требуют индивидуального рассмотрения, что выходит за рамки нашего исследования. Из других упомянутых методов наиболее предпочтительным является подход, предполагающий разработку методики предварительного инженерного расчета параметров ПД, т.к. это, наряду с сокращением временных и материальных затрат на определение параметров ПД, позволяет предварительно оценивать безопасность применения ПД и конструировать новые эффективные ПД.

В настоящее время для расчета параметров промежуточных детонаторов предложены следующие инженерные методики:

энергетическая методика [85];

импульсная методика [84, 102];

метод нестандартных инженерных решений [120];

методика «необходимой мощности» [103-105];

термодинамическая методика [192].

В основу энергетической методики работы [85] положены представления, что энергия инициирующей волны должна быть не меньше, чем минимальная энергия детонационной волны в возбуждаемом ВВ (энергия детонационной

волны при критическом диаметре заряда  $d_{кр}$ ). На основании указанных представлений для минимального диаметра ПД получено выражение

$$d_{ПД} = d_{кр} \left( \frac{\rho_{ВВ} D_{кр}^2}{\rho_{ПД} D_{ПД}^2} \right)^{\frac{1}{3}}, \quad (1.4)$$

где  $\rho_{ВВ}$ ,  $D_{кр}$  – плотность иницируемого ВВ и скорость его детонации при критическом диаметре заряда;  $\rho_{ПД}$ ,  $D_{ПД}$  – плотность ВВ в ПД и скорость детонации ВВ ПД.

Выражение (1.4) справедливо при  $\frac{h_{ПД}}{d_{ПД}} > 2,25$ , где  $h_{ПД}$  – высота ПД.

При  $\frac{h_{ПД}}{d_{ПД}} > 1,5$  величину (1.4) необходимо умножить на поправочный ко-

эффициент 1,02.

Согласно [85] экспериментальная проверка энергетической методики на индивидуальных и тонкодисперсных смесевых ВВ показала достаточно точное (не более 14 %) совпадение расчетных и опытных данных. Однако для расчета рациональных параметров ПД для возбуждения низко чувствительных ВВ данная методика малоприменима. Действительно, согласно исследованиям [231], при сравнении показателей иницирования скважинного заряда АС-ДТ цилиндрической пентолитовой шашкой массой 0,56 кг (размеры, близкие к оптимальным: длина – 120 мм, диаметр – 57 мм) и конусной пентолитовой шашкой массой 0,45 кг лучшую возбуждающую способность показала конусная шашка. Расстояние «разгона» детонации при иницировании цилиндрической шашкой – 0,75 м, а при иницировании шашкой конической формы – 0,35 м. Данный опыт не укладывается в энергетический принцип, положенный в основу методики [85].

В основу импульсной методики работы [84] положены следующие представления:

для возбуждения ВВ необходимо, чтобы импульс, переданный ВВ от ПД, превышал минимально допустимую для данного ВВ величину;

изменение параметров детонационной волны ПД при ее переходе в возбуждаемое ВВ можно рассчитывать в акустическом приближении;

расчет активной массы заряда ПД осуществляется по формулам, предложенным в работе [17].



На основании указанных представлений получены следующие выражения для расчета геометрических параметров ПД:

$$\text{а) при } \frac{h_{\text{ПД}}}{d_{\text{ПД}}} \geq 2,25, \quad d_{\text{ПД}} = d_{\text{кр}} \left( \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{\rho_{\text{ВВ}} D_{\text{ВВ}}}{\rho_{\text{ПД}} D_{\text{ПД}}} \right) \right)^{\frac{1}{2}} \quad (1.5)$$

где  $D_{\text{ВВ}}$  - скорость детонации в возбуждаемом ВВ.

$$\text{б) при } \frac{h_{\text{ПД}}}{d_{\text{ПД}}} < 2,25,$$

$$d_{\text{ПД}} = d_{\text{кр}}^{\frac{2}{3}} \left( 0,375 \left( 1 + \frac{\rho_{\text{ВВ}} D_{\text{ВВ}}}{\rho_{\text{ПД}} D_{\text{ПД}}} \right) h_{\text{ПД}}^{-1} (1 - 0,445x + 0,0658x^2)^{-1} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (1.6)$$

$$\text{где } x = \frac{h_{\text{ПД}}}{d_{\text{ПД}}}.$$

Анализируя выражения (1.5), (1.6), автор работы [84] приходит к выводу, что рациональные геометрические параметры ПД будут достигаться, при

$$1 \leq \frac{h_{\text{ПД}}}{d_{\text{ПД}}} \leq 1,5$$

В этом случае величина инициирующего импульса будет составлять 80 % от максимальной (при  $\frac{h_{\text{ПД}}}{d_{\text{ПД}}} = 2,25$ ), а масса ПД меньше в 2 раза и больше, чем

в случае  $\frac{h_{\text{ПД}}}{d_{\text{ПД}}} = 2,25$ . Кроме этого, при инициировании зарядов с инертными

наполнителями (до 15 % масс.) массу рациональных ПД необходимо увеличивать на 60 – 80 % по сравнению с массой ПД для инициирования ВВ без примесей [84].

Импульсная методика показала свою работоспособность при расчете параметров ПД для инициирования зарядов гранулированных ВВ (зерногранулиты 50/50, 80/20, 79/21 и гранулит АС) [83, 84], однако в случае смесевых эмульсионных ВВ не подтверждается зависимость параметров детонации в возбуждаемом ВВ от величины импульса, переданного ВВ при взрыве ПД (см. табл. 1.1). Данное обстоятельство делает невозможным использование импульсной методики, изложенной в работе [84], для расчета параметров ПД для инициирования эмульсионных ВВ.

Табл. 1.1. Экспериментальные данные о скорости детонации при иницировании смесового эмульсионного ВВ «Эмулит ВЭТ-700» различными ПД и расчетные значения величины импульса  $J_{эфф}$ , переданного «ВЭТ-700» при взрыве ПД.

Тип ПД	$\rho_{ПД}$ , г/см <sup>3</sup>	$D_{ПД}$ , м/с	$d_{ПД}$ , мм	$h_{ПД}$ , мм	Актив. масса, г	$J_{эфф}$ , кг*м/с	$D_{ВВ}$ , м/с
ТГФ-850Э	1,62	7800	79	115	199,3	<b>303,5</b>	<b>4648</b>
Т-1000Л	1,48	6700	68	185	274	<b>369,9</b>	<b>3824</b>
Аммонит 6ЖВ	1,0	5000	240	25	479,7	<b>795,9</b>	<b>4830</b>
—    —	—    —	—    —	110	120	298,9	<b>500,2</b>	<b>5089</b>
—    —	—    —	—    —	77	240	268,9	<b>460,5</b>	<b>5121</b>
—    —	—    —	—    —	54	480	92,7	<b>159,9</b>	<b>5206</b>

Примечание: экспериментальные данные заимствованы из работы [145]. Масса ПД из аммонита 6ЖВ во всех опытах  $m_{ПД} = 1$  кг;  $\rho_{ВВ} = 1,26$  г/см<sup>3</sup>. Расчет величины  $J_{эфф}$  осуществлялся по методике работы [17] с уточнениями, изложенными в [84].

Согласно работам [103 – 105] при расчете параметров ПД, обеспечивающих возбуждение высокоскоростного детонационного процесса в ANFO, необходимо, чтобы мощность инициирующей детонационной волны  $N_D$  не уступала мощности детонационной волны в инициируемом ВВ  $N_{ВВ}$ , а отношение массы ПД к массе возбуждаемого ВВ превосходило показатель  $k_{крит}^*$ , функционально зависящий от диаметра скважины  $d_{скв}$ .

Мощность инициирующей детонационной волны равна

$$N_D = \frac{m_{ПД}}{L_{ПД}} \cdot \frac{D_{ПД}^2}{n_{ПД} + 1} \cdot K_{пр}, \tag{1.7}$$

где  $m_{ПД}$ ,  $L_{ПД}$  - масса и длина ПД соответственно;

$n_{ПД}$  – показатель политропы ВВ промежуточного детонатора;  $K_{пр}$  - коэффициент преломления детонационной волны ПД при иницировании ВВ.

$$K_{np} = \frac{2}{1 + \frac{\rho_{ПД} D_{ПД}}{\rho_{ВВ} D_{ВВ}}}. \quad (1.8)$$

Мощность детонационной волны в инициируемом ВВ равна

$$N_D = \frac{m_{ВВ}}{L_{ВВ}} \cdot \frac{D_{ВВ}^2}{n_{ВВ} + 1}, \quad (1.9)$$

где  $m_{ВВ}$ ,  $L_{ВВ}$  - масса и длина скважинного заряда инициируемого ВВ соответственно;  $n_{ВВ}$  - показатель политропы инициируемого ВВ.

$$\text{Требуемое ограничение на мощность ПД: } N_D \geq N_{ВВ}. \quad (1.10)$$

Исходя из (1.8) – (1.10), в работе [103] сформулирован критерий, связывающий минимальную массу и длину ПД с массой и длиной заряда ВВ, когда обеспечивается стационарная детонация на протяжении всей длины заряда:

$$\frac{m_{ПД}}{m_{ВВ}} \cdot \frac{L_{ВВ}}{L_{ПД}} \cdot \left( \frac{D_{ПД}}{D_{ВВ}} \right)^3 \frac{n_{ВВ} + 1}{n_{ПД} + 1} \cdot \frac{2}{1 + \frac{\rho_{ПД} D_{ПД}}{\rho_{ВВ} D_{ВВ}}} = 1. \quad (1.11)$$

С учетом того, что  $\frac{m_{ПД}}{m_{ВВ}} = k_{крит}^*$ , в работах [103-105] получено следующее

выражение для отношения длины стационарно детонирующего заряда ВВ к длине ПД, обеспечивающего необходимый режим детонации:

$$\frac{L_{ВВ}}{L_{ПД}} = \frac{1}{k_{крит}^*} \cdot \left( \frac{D_{ВВ}}{D_{ПД}} \right)^3 \frac{n_{ПД} + 1}{n_{ВВ} + 1} \cdot \frac{1 + \frac{\rho_{ПД} D_{ПД}}{\rho_{ВВ} D_{ВВ}}}{2}. \quad (1.12)$$

Тогда при инициировании ANFO ( $\rho_{ВВ} = 0,9$  г/см<sup>3</sup>,  $n_{ПД} = 2$ ,  $D_{ВВ} = 4100$  м/с) тротил-гексогеновым ПД ( $\rho_{ПД} = 1,62$  г/см<sup>3</sup>,  $n_{ПД} = 3$ ,  $D_{ПД} = 7800$  м/с) при  $k_{крит}^* = 0,0187$  получаем –  $\frac{L_{ВВ}}{L_{ПД}} = 12,9$ . Следовательно, для инициирования

заряда ANFO плотностью 0,9 г/см<sup>3</sup> и длиной 10 м со скоростью 4100 м/с в скважине диаметром 250 мм потребуется тротил-гексогеновый ПД длиной 0,78 м и массой 62 кг, что значительно превосходит экспериментальные данные, приведенные в работах [116, 129].

Применительно к инициированию ЭВВ в работах [76, 103] рекомендовано значение  $k_{крит}^* = 0,00343$ . Тогда для заряда длиной 10 м и диаметром 250 мм при  $\rho_{ВВ} = 1,15 \text{ г/см}^3$ ,  $n_{ВВ} = 2,7$ ,  $D_{кр} = 4700 \text{ м/с}$  и при использовании тротил-гексогенового ПД, получаем  $m_{ПД} = 8 \text{ кг}$ . Это значительно превышает экспериментальные данные работ [66, 67, 145].

Таким образом, методика «необходимой мощности», предложенная в работах [103-105], может давать значительно завышенные (в разы) массы сосредоточенных ПД, которые необходимы для инициирования скважинных зарядов как простейших, так и эмульсионных ВВ.

В случае применения линейных ПД в работе [102] предложено их инициирующую способность характеризовать с помощью импульса взрыва –  $J_{ПД} = m_{ПД} D_{ПД}$ . Импульс основного заряда принимается равным –  $J_{ВВ} = m_{ВВ} D_{ВВ}$ .

Согласно [102] в заряде ВВ устанавливается режим устойчивой детонации при  $\frac{J_{ПД}}{J_{ВВ}} \geq k_{крит}^*$ .

Тогда минимальный диаметр ПД определяется из уравнения

$$d_{ПД} = d_{ВВ} \left( k_{крит}^* \frac{\rho_{ВВ} D_{ВВ}}{\rho_{ПД} D_{ПД}} \right)^{0,5}, \quad (1.13)$$

где  $d_{ВВ}$  – диаметр заряда ВВ, а длина ПД принимается равной длине заряда.

В работе [20] показано, что скважинные заряды зерногранулита 79/21 ( $\rho_{ВВ} = 0,9 \text{ г/см}^3$ ) надежно детонировали в 214-миллиметровых скважинах от 4-х ниток ДШ-А, размещенных по всей длине 12-метрового заряда. При этом авторами [20] из опытов по инициированию зарядов рассматриваемого ВВ сосредоточенными ПД показано, что масса ПД должна быть в пределах 3 – 10 % от массы заряда.

Расчет по формуле (1.10) дает  $d_{ПД} = 214 \left( 0,03 \cdot \frac{0,9 \cdot 3900}{1,25 \cdot 6500} \right)^{0,5} = 23,4 \text{ мм}$

( $\rho_{ПД} = 1,25 \text{ г/см}^3$ ,  $D_{ПД} = 6500 \text{ м/с}$ ,  $D_{ВВ} = 3900 \text{ м/с}$ ).

Погонная плотность расчетного линейного ПД будет равна 537 г/п.м.

Фактическая погонная плотность 4-х ниток ДШ-А – 50 г/п.м.

Таким образом, расчеты, основанные на критерии  $\frac{J_{\text{ПД}}}{J_{\text{ВВ}}} \geq k_{\text{крит}}^*$ , как и на критерии  $N_D \geq N_{\text{ВВ}}$ , могут давать сильно завышенные значения параметров ПД.

В работе [192] предлагается повысить эффективность и надежность обратного инициирования скважинных зарядов ЭВВ, сенсibilизированных газовыми порами, за счет применения удлиненных шашек-детонаторов (УШД). В указанной работе представлена методика расчета геометрических параметров УШД. В основу этой методики положены следующие положения:

а) при определении диаметра УШД полагается, что:

деформация ЭВВ, окружающего УШД, под действием расширяющихся продуктов детонации УШД происходит исключительно за счет уменьшения пористости ЭВВ;

уменьшение пористости ЭВВ происходит равномерно во всем объеме ЭВВ между расширяющимися продуктами детонации УШД и стенками скважины;

сжатие газа в порах является адиабатическим процессом;

для обеспечения инициирования ЭВВ температура газа в сжимающихся порах должна достигнуть величины 1700 – 1800°C;

б) при определении длины УШД полагается, что:

процесс сжатия должен охватить все поперечное сечение колонки скважинного заряда;

перед расширяющимися продуктами детонации УШД образуется зона уплотнения, распространяющаяся в ЭВВ со скоростью звука;

сжатие газа в порах ЭВВ до необходимой температуры должно осуществиться до момента завершения детонации УШД.

Однако ряд положений рассматриваемой методики вызывает следующие возражения:

1. Зона уплотнения перед расширяющимися продуктами детонации УШД распространяется в ЭВВ вслед за ударной волной, которая имеет сверхзвуковую скорость, а не скорость звука. Скорость распространения ударных волн можно определить, зная ударные адиабаты ЭВВ [3, 100, 139, 172] и детонационные характеристики ВВ, из которого изготовлен УШД [17, 190].

2. Определение температуры газа в порах ЭВВ на основе представлений о равномерном уменьшении пористости ЭВВ во всем объеме ЭВВ между расширяющимися продуктами детонации УШД и стенками скважины возможно,

если время схлопывания поры будет значительно больше времени распространения ударной волны от поверхности УШД до стенки скважины.

Сравним время схлопывания газовой поры со временем распространения ударной волны от поверхности УШД до стенки скважины.

Время распространения ударной волны от поверхности УШД до стенки скважины равно

$$t_1 = \frac{R_{скб} - r_{УШД}}{D_{y0}}, \quad (1.14)$$

где  $R_{скб}$ ,  $r_{УШД}$  - радиус скважины и УШД соответственно;

$D_{y0}$  - скорость ударной волны.

Скорость ударной волны и давление во фронте ударной волны можно определить из уравнений ударной адиабаты

$$D_{y0} = A + Bu, \quad (1.15)$$

$$P_f = \rho_{ВВ} D_{y0} u, \quad (1.16)$$

где  $A$ ,  $B$  - параметры ударной адиабаты эмульсии;  $u$  - массовая скорость за фронтом ударной волны (для эмульсии с окислительной фазой только из аммиачной селитры -  $A=1920$  м/с;  $B=1,98$  [100]).

Критический радиус поры в эмульсии  $R_k$ , ниже которого происходит ограниченный рост скорости ее схлопывания, находится из выражения (1.1) ( $R_{zab} = R_k$ ). При характерных значениях параметров (1.4)  $\eta \approx 2$  Па·с;  $P_f \approx 2$  ГПа;  $\rho_3 \approx 1350$  кг/м<sup>3</sup>,  $R_k \approx 10$  мкм.

Согласно [117, 183] размер газовой поры в ЭВВ колеблется в диапазоне 30 - 50 мкм. Следовательно, ее схлопывание будет происходить в гидродинамическом режиме. В этом случае время схлопывания  $t_2$  поры радиусом  $R_0$  ( $R_0 > R_k$ ) будет равно [34]

$$t_2 = 0,915 R_0 \sqrt{\frac{\rho_3}{P_f}}. \quad (1.17)$$

Подставляя в уравнения (1.9), (1.13) характерные значения параметров:

$$\mu_3 \approx 2 \text{ Па} \cdot \text{с}; P_f \approx 2 \text{ ГПа}; \rho_3 \approx 1350 \text{ кг/м}^3, R_0 = 50 \text{ мкм};$$

$$R_{скб} = 0,125 \text{ м}; r_{УШД} = 0,04 \text{ м}; D_{y0} = 3000 \text{ м/с},$$

определяем -  $t_1 = 3 \cdot 10^{-5}$ с,  $t_2 = 4 \cdot 10^{-8}$ с.

Имеем  $t_1 \gg t_2$ .

Таким образом, схлопывание газовых пор происходит за время значительно меньше, чем время распространения ударной волны от поверхности УШД до стенки скважины. Поэтому определение температуры газа в порах ЭВВ на основании принятых в работе [192] квазистатических представлений неверно.

Если встать на позиции представлений, что возгорание эмульсии обусловлено ее нагревом от горячего газа пор, то величины температуры газа в сжимающихся порах 1700 – 1800°C недостаточно для обеспечения возгорания эмульсии, т.к. термоактивность газа значительно уступает термоактивности вещества эмульсии [34, 205].

На основании вышесказанного можно сделать вывод, что термодинамическая методика [192] нуждается в переработке.

Таким образом, в настоящее время отсутствуют корректные методики расчета параметров ПД для инициирования ЭВВ. Выбор ПД для инициирования ЭВВ возможен только методом экспериментального подбора. Однако ввиду разнообразия возможных геометрических форм ПД, вида ВВ, из которых может быть изготовлен ПД, а также характеристик иницилируемого ЭВВ данный метод трудоемок, требует существенных финансовых затрат, а также полигона, где можно взрывать заряды ЭВВ весом десятки килограммов. Организация такого полигона имеет значительные сложности как юридического, так и материально-технического характера. Поэтому разработки научно обоснованных положений выбора ПД для инициирования ЭВВ в условиях скважинной отбойки горных пород весьма актуальны и практически значимы.

## **Выводы по главе 1**

Анализ имеющегося обширного научного материала, посвященного научно-техническим основам создания и применения ЭВВ показывает, что ЭВВ имеет исключительно высокие потребительские характеристики, обеспечивающие им значительные преимущества на рынке современных ПВВ для горнодобывающей промышленности. Однако, несмотря на высокие эксплуатационно-технические параметры ЭВВ, при их применении возникают трудности, связанные с недостаточно разработанными:

физико-математическими моделями детонации ЭВВ, учитывающими их рецептурно-технологические особенности: плотность, химический состав

ЭВВ, размеры сенсibiliзирующих пор и частиц дисперсной фазы эмульсии, а также параметров инициирующего воздействия;

объяснениями причин возникновения срыва (перехода на низкоскоростные режимы) детонации зарядов ЭВВ в вертикальных (наклонных) скважинных зарядах;

обоснованиями параметров ПД для возбуждения детонации в скважинных зарядах, учитывающими рецептурно-технологические и микроструктурные характеристики ЭВВ;

обоснованиями технологий взрывания скважинных зарядов ЭВВ, при которых происходит детонационное разложение ЭВВ на всей длине скважинного заряда.

Для решения указанных вопросов необходимо было изучить систему «эмульсионное взрывчатое вещество – промежуточный детонатор» с целью установления закономерностей возникновения и распространения детонации в ЭВВ с учетом рецептурно-технологических, энергетических и микроструктурных характеристик ЭВВ и параметров возбуждающего импульса. Результаты исследований автора, посвященные данному вопросу, изложены в настоящей книге.



## ГЛАВА 2. ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДЕТОНАЦИИ ЭВВ

Анализ экспериментальных и аналитических исследований детонации ЭВВ, приведенный в первой главе, показывает, что детонационные характеристики данных ВВ зависят от размера газовых включений (микросфер), плотности ЭВВ, дисперсности и химического состава эмульсии, а также от детонационных параметров промежуточного детонатора. Однако до настоящего момента отсутствуют физико-математические модели детонации данных ВВ, позволяющие учитывать в полном объеме указанные параметры.

В настоящей главе представлена физико-математическая модель стационарной детонации ЭВВ, сенсibilизированных газовыми порами, в которой при определении детонационных характеристик учитывается зависимость от радиуса газовых включений (микросфер), плотности ЭВВ, а также плотности, дисперсности и химического состава эмульсии.

### 2.1. Схема детонационного процесса

ЭВВ являются пористыми телами. Распространение ударных волн в пористых средах имеет свои особенности по сравнению с распространением данных волн в однородных средах. В начальные моменты времени под действием ударной волны интенсивностью в несколько десятков тысяч атмосфер в среде, имеющей пористость порядка десятка процентов, происходит изменение плотности среды преимущественно за счет втекания ее в поры. В этот период саму среду можно рассматривать как несжимаемую [65, 87-89, 99, 106, 108-110, 168, 190, 208].

Согласно данным работы [117] величина детонационного давления в ЭВВ, сенсibilизированного газовыми порами, имеет порядок 10 ГПа, а сами ЭВВ имеют пористость 10 - 25 %. Данное давление не вызывает мгновенного разложения ЭВВ [4, 106, 173, 220, 221], поэтому до начала разложения данное вещество можно рассматривать, как инертное.

Критический радиус пузырька, ниже которого происходит ограниченный рост скорости его схлопывания, определяется выражением (1.1) и при характерных значениях параметров  $\mu_s \approx 2 \text{ Па} \cdot \text{с}$ ;  $P_f \approx 10 \text{ ГПа}$ ;

$$\rho_s \approx 1330 \text{ кг/м}^3, R_k \approx 4,6 \text{ мкм.}$$

Рассмотрим сферическую пору радиусом  $R_0$  ( $R_0 > R_c$ ), расположенную в эмульсии с характерным размером частицы  $\Delta$ .

Время охвата детонационной волной поры равно  $t_1 = \frac{2R_0}{D}$ , а время макси-

мального схлопывания определяется выражением (1.13).

При решении задачи о схлопывании поры допустимо использовать представление о симметричном втекании вещества в пору при  $t_2 \gg t_1$ .

Данное условие выполняется при  $D \cdot \sqrt{\frac{\rho_3}{P_f}} \gg 2,2$ . Согласно [117, 167]

$D \approx 5000$  м/с,  $P_f \approx 10$  ГПа;  $\rho_3 \approx 1330$  кг/м<sup>3</sup>. Тогда  $D \cdot \sqrt{\frac{\rho_3}{P_f}} \approx 1,8$ .

Следовательно, при рассмотрении схлопывания поры в ЭВВ необходимо учитывать асимметричность втекания эмульсии в пору.

Данное утверждение экспериментально подтверждено в работе [206]. Кроме этого, в работе [106] на основе методики, изложенной в [25], изучались процессы схлопывания стеклянных и полимерных микросфер под действием ударной волны. В результате авторы [106] пришли к выводу, что при уровне фронтального давления в волне больше 5 ГПа схлопывание происходит в гидродинамическом режиме.

Образование струй не происходит из-за особенностей внутренней структуры эмульсии и высокой поперечной (по отношению к направлению движения детонационной волны) скорости набегания  $V_{набег}$  соседних частиц эмульсии друг на друга ( $V_{набег} \approx 2W \frac{\Delta}{R_0}$ , где  $W$  – массовая скорость за фронтом ударной волны). Число Вебера  $We$ , определяющее процесс слияния капель (частиц эмульсии), при характерных значениях параметров эмульсии –  $\Delta \approx 2$  мкм;  $\sigma \approx 30 \cdot 10^{-3}$  н/м;  $R_0 \approx 40$  мкм, начальная массовая скорость вещества эмульсии при втекании в пору ( $W \approx 2400$  м/с)

$$We \approx \frac{4\rho_3 W^2 \Delta^2}{\sigma R_0} \approx 25000 \gg 100.$$

Согласно [11] при данном значении числа Вебера сталкивающиеся частицы не сливаются, а распадаются на мельчайшие отдельные части.

Рассмотрим столкновение образовавшегося осколка частиц эмульсии со стенкой пузырька. Вследствие удара температура данной частицы поднимется

на величину  $\Delta T = \frac{1}{c_s} \left( \frac{2W^2}{\psi} - \zeta_1 L_1 \right) \approx 107^\circ K$  (где  $\zeta_1$  - массовая доля воды;

– удельная теплота парообразования воды;  $\psi = 5$  – учитывается присоединенная масса эмульсии в месте удара;  $c_s$  – теплоемкость эмульсии), что недостаточно для инициирования горения ВВ (полагаем, что реакция может начаться при температуре, превышающей температуру, при которой начинается самоподдерживающееся экзотермическое разложение наименее стойкого компонента – аммиачной селитры, равной  $520 - 530^\circ K$  – [117] и Приложение 1).

Таким образом, механизм инициирования жидких ВВ, предложенный в работах [222, 223], не объясняет причину возникновения детонации в ЭВВ, сенсibilизированных газовыми порами.

Как показали исследования, представленные ниже, зажигание эмульсии происходит при величине  $z$  не менее 0,5 ( $z$  - относительное уменьшение объема поры). Температура газов в поре при их адиабатическом сжатии до указанного объема будет равной

$$T = T_0 \left( \frac{1}{z} \right)^{\gamma_n - 1} \approx 400^\circ K$$

( $\gamma_n \approx 1,4$  – показатель адиабаты газов, заполняющих пору), что меньше температуры начала автокаталитического разложения аммиачной селитры.

Поэтому участие даже мельчайших диспергированных в полости поры частиц не вызывает возгорания эмульсии ЭВВ при однократном ударном воздействии. Следовательно, механизм возбуждения детонации, описанный в работах [87, 205] и характерный для индивидуальных жидких ВВ, не способен объяснить возникновение детонации в ЭВВ.

Рассмотрим следующую физическую модель описания детонационного процесса в ЭВВ, сенсibilизированных газовыми порами [63, 136, 214].

ЭВВ, сенсibilизированные газовыми порами, являются энергонасыщенными пористыми веществами, имеющими замедленную кинетику воспламенения. Деформирование данных сред ударной волной имеет свои особенности, обусловленные различием в поведении ЭВВ при его деформировании до начала возгорания эмульсии и после возгорания.

На начальном этапе (до воспламенения) эмульсия ведет себя как инертное вещество. Под действием фронтального детонационного давления вещество эмульсии в гидродинамическом режиме втекает в поры. Втекание происходит асимметричным образом. При этом плотность самого вещества эмульсии практически постоянна, а изменение плотности среды определяется уменьшением пористости. Это связано с тем, что сопротивление втеканию эмульсии в поры, обусловленное ее вязкостью и прочностью на сдвиг, чрезвычайно мало по сравнению с давлением во фронте ударной волны и модулем объемного сжатия эмульсии.

В процессе втекания происходит локальный разогрев и последующее возгорание вещества эмульсии. Данный процесс осуществляется за счет совместного действия теплоты внутреннего трения при втекании эмульсии в пору и теплоты сжатых газов в поре. После возгорания вещества эмульсии в порах среды возникает противодействие, среда начинает воспринимать нагрузку, как непористое вещество [99]. В среде резко возрастает давление (по закону ударной адиабаты). Одновременно начинает происходить разложение ВВ из центров «горячих точек» в радиальном направлении. После слияния сфер горения происходит расширение газообразных продуктов взрыва, сопровождаемое падением давления и переходом на адиабату расширения газообразных продуктов детонации.

На начальном этапе вследствие асимметричности процесса втекания вещества эмульсии в поры среда приобретает определенную скорость в направлении распространения детонационной волны. Величина данной скорости определяется инерционными свойствами среды, величиной фронтального давления и длительностью промежутка времени между моментом подхода фронта детонационной волны к поре и моментом времени, соответствующим началу разложения. Для ВВ с относительно низкой чувствительностью данное приращение скорости может быть весьма существенным (сотни метров в секунду).

Таким образом, вещество ЭВВ на начальном этапе уплотняется и приобретает некоторую массовую скорость движения в направлении распространения детонационной волны. Дальнейшее возрастание массовой скорости среды происходит после возгорания уплотненной эмульсии и определяется удельным тепловыделением с учетом затрат энергии на сообщение среде массовой скорости на начальном этапе. Эти обстоятельства делают необходимым при расчете детонационных параметров ЭВВ учет массовой скорости  $U$  и плотности

$\rho_0$  вещества ЭВВ в момент начала экзотермического разложения ЭВВ (момент перехода на ударную адиабату). Данные особенности не нашли отражения в схемах описания детонации ЭВВ, предложенных в работах [72, 148, 167, 195], авторы которых при расчете детонационных параметров ЭВВ исходили из концепции сферически симметричного затекания вещества эмульсии в сенсibiliзирующую пору. Это обусловило необходимость разработки методики расчета детонационных параметров ЭВВ, учитывающей наряду с дисперсностью эмульсии также указанные особенности детонации ЭВВ.

В дальнейшем при изложении физико-математических основ детонации ЭВВ, сенсibiliзированных газовыми порами, и расчете характеристической плотности ЭВВ исходим из результатов работ [43, 46, 56, 60, 63, 136, 214].

## 2.2. Физико-математические основы детонации ЭВВ, сенсibiliзированных газовыми порами. Стационарный режим

Рассмотрим детонацию цилиндрического заряда ЭВВ, имеющего диаметр больше предельного. При этом полагаем, что структура детонационной волны стационарна и однородна по ее площади. В этом случае распределение термодинамических параметров продуктов взрыва в зоне химической реакции будет зависеть только от одной координаты – вдоль ширины зоны реакции [140].

Допустим, что при детонации рассматриваемых ВВ происходит химическая реакция согласно уравнению (состояние в т. Чепмена-Жуге):

$$\sum a_m A_m = \sum b_i X_i + \sum f_j Y_j, \quad (2.1)$$

где  $A_m$  – начальные вещества;  $X_i$  – газообразные продукты взрыва;  $Y_j$  – твердотельные продукты взрыва;  $a_m, b_i, f_j$  – мольные коэффициенты.

Предварительно определим значения вспомогательных параметров для дальнейших расчетов.

Масса ВВ, вступившего в реакцию, равна:

$$G = \sum a_m \mu_{A_m}, \quad (2.2)$$

где  $\mu_{A_m}$  – молекулярная масса продукта  $A_m$ .

Количество молей газообразных продуктов взрыва на основании (2.1) равно:

$$\Delta b = \sum b_i. \quad (2.3)$$

Удельная теплота взрыва определяется из уравнения Гесса [17]:

$$Q_V = \frac{1}{G} \left[ \sum b_i Q_P^{X_i} + \sum f_j Q_P^{Y_j} - \sum a_m Q_P^{A_m} + 2,48 \Delta b \right], \quad (2.4)$$

где  $Q_V^{(3)}$ , кДж/моль – стандартная теплота образования вещества  $\mathfrak{Z}$  ( $\mathfrak{Z} \rightarrow X_i$  и  $Y_j$ );  $G$  – масса вещества, вступившего в реакцию;  $\Delta b$  – количество молей газообразных продуктов взрыва.

В соответствии с [32] среднее значение коволюма взрывных газов равно:

$$\alpha = \frac{1}{G} \left[ \sum b_i \alpha_i + \sum f_j \alpha_j \right], \quad (2.5)$$

где  $\alpha_{i(j)}$  – коволюм  $i(j)$  – вещества.

Учитывая, относительно невысокую плотность ЭВВ (практически значимая область плотностей ЭВВ находится в пределах 0,8 - 1,3 г/см<sup>3</sup> [117, 169, 183]), принимаем в качестве уравнения состояния взрывных газов закон Абеля. При этом в соответствии с предположением работы [32] будем считать, что величина  $\alpha$  определяется согласно (2.5), т.е. будем полагать, что коволюм будет определяться больше упаковкой, чем деформацией молекул. Тогда

$$P_H (V_H - \alpha) = \frac{RT_H}{\bar{\mu}}, \quad (2.6)$$

где  $P_H$  – начальное давление взрывных газов;  $T_H$  – начальная температура взрывных газов;  $V_H$  – начальный удельный объем продуктов взрыва;  $\bar{\mu}$  – средняя молекулярная масса газообразных продуктов взрыва;  $R$  – универсальная газовая постоянная.

$$\bar{\mu} = G \left( 1 - \sum \beta_j \right) (\Delta b)^{-1}, \quad (2.7)$$

$\beta_j$  – массовая доля твердотельного  $j$ -вещества.

Аппроксимируем кривую Гюгонио  $P = P(V)$ , описывающую расширение взрывных газов, двухполитропным приближением (предложение Л.Д. Ландау, К.П. Станюковича [17]):

$$P = \begin{cases} P_H \left( \frac{V_H}{V} \right)^k & \text{при } V_H \leq V \leq V_* \\ P_H \left( \frac{V_H}{V_*} \right)^k \left( \frac{V_*}{V} \right)^\gamma & \text{при } V > V_* \end{cases}, \quad (2.8)$$

где  $V_*$  – удельный объем продуктов взрыва в точке сопряжения политропы;  $k$  – показатель политропы взрывных газов; показатель адиабаты  $\gamma$  находится из уравнения:

$$\gamma = 1 + \frac{R\Delta b}{\sum b_i C_V^{(X_i)}(T)}, \quad (2.9)$$

где  $C_V^{(X_i)}(T)$  – мольная теплоемкость  $X_i$  – газа при температуре  $T$ ;  $T$  – температура взрывных газов в точке сопряжения.

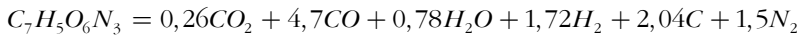
Предварительно оценим значение величины  $V_+$ . Для этого, следуя [42, 135], проанализируем данные работы [198] по взрыву тротила плотностью  $1,5 \text{ г/см}^3$ .

Согласно [198] при двухполитропном приближении описания давления во взрывных газах при взрыве тротила плотностью  $1,5 \text{ г/см}^3$  объем газов в точке сопряжения превышает начальный объем ВВ в  $3,572$  раза.

Следовательно, удельный объем взрывных газов в точке сопряжения в данном случае равен:

$$V_+ = \frac{3,572}{1,5} = 2,3814 \text{ см}^3/\text{г}.$$

Расчет по методике работы [17] показывает, что при данной плотности тротил разлагается по формуле



Используя данные работы [32] по величине коволюма продуктов взрыва, находим, что коволюм образовавшихся продуктов взрыва в данном случае равен  $\alpha = 0,5412 \text{ см}^3/\text{г}$ .

$$\text{Величина } \frac{V_+}{\alpha} = K_+ = \frac{2,3814}{0,5412} = 4,4 \text{ показывает, во сколько раз в точке со-}$$

пряжения политропы и адиабаты продуктов взрыва, удельный объем взрывчатых газов превышает их коволюм.

Примем эту величину в качестве критериальной при двухполитропном приближении кривой Гюгонио, т.е. положим, что [42, 135]:

$$K_+ \equiv 4,4. \quad (2.10)$$

Тогда оценка температуры взрывных газов в т. сопряжения не вызывает затруднений. Действительно, т.к. термодинамические характеристики  $(P, V, T)$  удовлетворяют уравнению Абеля и зависимости  $PV^k = const$ , имеем  $P_H V_H^k = P^* V^{*k}$ ,

$$P_H (V_H - \alpha) = \frac{R}{\bar{\mu}} \cdot \frac{2kT_B}{k+1} \quad (2.12)$$

$$P(V - \alpha) = \frac{R}{\mu} \cdot T_*, \quad (2.13)$$

где  $P, T_*$  – давление и температура взрывных газов в т. сопряжения.

$$\text{При написании (2.12) учтено, что [17]: } T_H = \frac{2k}{k+1} T_B \quad (2.14)$$

На основании (2.8), (2.11) – (2.13), учитывая, что  $V_* = K_+ \alpha$ , получаем

$$T_* = 2T_B \left( \frac{k}{k+1} \right)^k \cdot \left( \frac{1}{K_+ \rho_o^{*3} \alpha} \right)^{k-1} \cdot \frac{K_+ - 1}{K_+} \cdot \frac{1}{1 - \frac{k+1}{k} \rho_o^{*3} \alpha}, \quad (2.15)$$

где  $T_B$  – температура взрыва, которую имели бы продукты детонации при мгновенном выравнивании давления.

$$T_B = \frac{Q_V \bar{\mu}}{C_V^\Sigma} + T_o, \quad (2.16)$$

где  $Q_V$  – удельная теплота взрыва;  $T_o$  – начальная температура ВВ;  $C_V^\Sigma$  – средняя молярная теплоемкость продуктов взрыва.

Тогда, пренебрегая потерями тепла в процессе непосредственного детонационного разложения ВВ, на основании уравнения теплового баланса имеем следующее равенство:

$$(T_B - T_o) R \left[ \sum b_i \bar{c}_V^{(X_i)}(T_B) + 3 \sum f_j \xi_j \right] = G Q_V, \quad (2.17)$$

где  $\xi_j$  – количество атомов в твердотельном  $j$ -веществе;  $\bar{c}_V^{(X_i)}(T_B) = \frac{C_V^{(X_i)}}{R}$ ,

$C_V^{(X_i)}$  – молярная теплоемкость,  $X_i$  – газа при температуре  $T_B$ , определяемая на основании соотношений Эйнштейна-Дебая [17].

$$\text{Согласно [17]: } C_V^{(Z)} = \frac{5}{2} R + R \sum_p \frac{\left( \frac{\Theta_p}{T} \right)^2 e^{\frac{\Theta_p}{T}}}{\left( e^{\frac{\Theta_p}{T}} - 1 \right)^2} - \text{ для 2-атомных или линейных}$$

многоатомных молекул  $Z$  - вещества;



$$C_V^{(Z)} = 3R + R \sum_p \frac{\left(\frac{\Theta_p}{T}\right)^2 e^{\frac{\Theta_p}{T}}}{\left(e^{\frac{\Theta_p}{T}} - 1\right)^2} - \text{для 3-атомных или многоатомных нелиней-}$$

ных молекул  $Z$  - вещества;  $\{\Theta_p\}$  – температура (температуры) Дебая  $Z$  – вещества.

Разрешая (2.17) методом итераций, определяем  $T_B$ .

Расчеты по вышеприведенным формулам Эйнштейна показывают, что теплоемкость характерных для рассматриваемых ВВ взрывных газов ( $N_2, CO, NO, H_2O, CO_2, NO_2$ ) при изменении их температуры в диапазоне 1500 - 2200°К изменяется в пределах (среднем) 5 %. Поэтому при вычислении  $T_H$  будем полагать, что  $C_V(T_i) \approx C_V(T_B)$ . Введем безразмерный параметр  $\bar{c}$ :

$$\bar{c} = \frac{C_V^\Sigma}{R}. \quad (2.18)$$

Тогда на основании (2.6), (2.7), (2.14), (2.16) - (2.18) получаем следующее уравнение:

$$\frac{Q_V}{D^2} = \frac{\bar{c}}{2(k+1)} \left(1 - \frac{k+1}{k} \alpha \rho_o^{z_{a3}}\right) \left(1 - \sum_j \beta_j\right), \quad (2.19)$$

где  $k$  - показатель политропы взрывных газов;  $\alpha$  – среднее значение коволюма продуктов взрыва;  $\beta_j$  – удельная масса  $j$  – твердого продукта взрыва;  $\bar{c}$  - относительная мольная теплоемкость (2.18); где  $D$  – скорость детонации ЭВВ в системе координат, двигающейся со скоростью в направлении детонации;  $\rho_o^{z_{a3}}$  – плотность «газовой части» вещества ЭВВ в момент начала экзотермического разложения эмульсии при втекании в пору («газовая часть» – часть вещества эмульсии, из которой образуются газообразные продукты взрыва):

$$\rho_o^{z_{a3}} = \frac{\rho_o \left(1 - \sum_j \beta_j\right)}{1 - \rho_o \sum_j \frac{\beta_j}{\rho_j}}, \quad (2.20)$$

где  $\rho_0$  – плотность ВВ в момент начала разложения экзотермического разложения эмульсии при втекании в пору;  $\rho_j$  – удельная масса  $j$ -твердого продукта взрыва.

Согласно первому закону термодинамики при расширении продуктов взрыва единицы массы ВВ выполняется равенство:

$$\Delta E = Q_V + A_{сж}, \quad (2.21)$$

где  $\Delta E$  – изменение полной удельной энергии продуктов взрыва при их расширении;  $Q_V$  – удельная теплота взрыва;  $A_{сж}$  – работа, затраченная на сжатие продуктов взрыва, образующихся при взрывном разложении единицы массы ВВ.

В случае ЭВВ имеем

$$\Delta E = \Delta U_{мен.г}^{газ} + \Delta U_{мен.т}^{тв} + W_{кин}^{газ} + W_{кин}^{тв}, \quad (2.22)$$

где  $\Delta U_{мен.г}^{газ}$ ,  $\Delta U_{мен.т}^{тв}$  – изменение тепловой энергии газовых и твердофазных продуктов взрыва соответственно;  $W_{кин}^{газ}$ ,  $W_{кин}^{тв}$  – кинетическая энергия, приобретенная газовыми и твердофазными продуктами взрыва соответственно.

$$A_{сж} = A_{сж}^{газ} + A_{сж}^{тв}, \quad (2.23)$$

где  $A_{сж}^{газ}$ ,  $A_{сж}^{тв}$  – работа, затраченная на сжатие газообразных и твердофазных продуктов взрыва, образующихся при взрывном разложении единицы массы ВВ.

Зависимость  $P = P(V)$  для газообразных продуктов взрыва задана выражением (2.8).

Зависимость  $P = P(V)$  для твердофазных продуктов взрыва описываем уравнением Тэта [17, 190]:

$$P = \frac{\rho_{0j} (c_{0j}^{зв})^2}{n_j} \left( \left( \frac{\rho_j}{\rho_{0j}} \right)^{n_j} - 1 \right), \quad (2.24)$$

где  $\rho_{0j}$ ,  $\rho_j$  – начальная и текущая плотности  $j$ -твердофазного вещества;  $c_{0j}^{зв}$  – объемная скорость звука при плотности  $\rho_{0j}$ ;  $n_j$  – параметр Тэта для  $j$ -твердофазного вещества (0, 1, 2, ..., N\*, где N\* – количество твердофазных веществ).

В соответствии с принятой схемой детонации ЭВВ массовая скорость продуктов взрыва за фронтом детонационной волны будет равна [42, 135]

$$W = \frac{D}{k+1} + U, \quad (2.25)$$

а измеряемая скорость детонации –  $D = D + U$ . (2.26)

В случае если  $V_{конеч} \gg V_*$ , имеем:

$$\Delta U_{мен.л}^{эл3} = \frac{P_{II} V_{II}}{k-1} - \frac{P_* V_*}{k-1} + \frac{P V_*}{\gamma-1}. \quad (2.27)$$

Учитывая (2.8), на основании (2.23), (2.27) получаем

$$\Delta U_{мен.л}^{эл3} = \frac{D^2}{k+1} \left( \frac{k}{k^2-1} + \frac{k-\gamma}{(k-1)(\gamma-1)} \left( \frac{k}{k+1} \right)^k \left( \frac{1}{K_+ \rho_0^{эл3} \alpha} \right)^{k-1} \right). \quad (2.28)$$

Для определения теплоемкости твердофазных веществ используем правило Дюлонга-Пти. Тогда

$$\Delta U_{мен.л}^{мб} = \frac{3R(T_B - T_0)}{G} \sum_j f_j \xi_j. \quad (2.29)$$

Учитывая (2.17), (2.19) и (п. 2.29), получаем

$$\Delta U_{мен.л}^{мб} = \frac{3Q_V}{C \Delta b} \sum_j f_j \xi_j. \quad (2.30)$$

Для твердофазных продуктов взрыва имеем

$$W_{кин}^{мб} = \frac{1}{2} W^2 \sum_j \beta_j = \frac{D^2}{2(k+1)^2} \left( 1 + (k+1) \frac{U}{D} \right)^2 \sum_j \beta_j. \quad (2.31)$$

Удобнее определять величину  $A_{сж}^{эл3} - W_{кин}^{эл3}$ . Имеем

$$A_{сж}^{эл3} - W_{кин}^{эл3} = \frac{P_f}{2} (V_{00}^{эл3} - V_{II}), \quad (2.32)$$

где  $P_f = \rho_{00} D W$  – фронтальное детонационное давление; (2.33)

$V_{00}^{эл3} = \frac{1}{\rho_{00}^{эл3}}$  – начальный удельный объем ВВ.

Легко видеть, что  $\rho_{00}^{эл3} = \rho_{00} \frac{1 \sum_j \beta_j}{1 - \rho_{00} \sum_j \frac{\beta_j}{\rho_j}}$ , (2.34)

где  $\rho_{00}$  – начальная плотность ВВ.

На основании (2.32) – (2.34) получаем

$$A_{сж}^{zu3} - W_{куи}^{zu3} = \frac{D^2}{2(k+1)^2} \cdot \frac{1 - \rho_{oo} \sum_j \frac{\beta_j}{\rho_j}}{1 - \sum_j \beta_j} \cdot \left( 1 + k \left[ 1 - \frac{\rho_{oo}}{\rho_o} \cdot \frac{1 - \rho_o \sum_j \frac{\beta_j}{\rho_j}}{1 - \rho_{oo} \sum_j \frac{\beta_j}{\rho_j}} \right] \right) \cdot \left( 1 + (k+2) \frac{U}{D} + (k+1) \frac{U^2}{D^2} \right) \quad (2.35)$$

Работа по сжатию твердофазных продуктов детонации

$$A_{сж}^{m6} = - \int P dV. \quad (2.36)$$

Исходя из (2.24) и (2.36), получаем

$$A_{сж}^{m6} = \sum_j \frac{\beta_j (c_j^{36})^2}{n_j} \left( \frac{1}{n_j - 1} \left( \frac{\rho_j}{\rho_{oj}} \right)^{n_j - 1} - 1 \right) + \frac{\rho_j}{\rho_{oj}} - 1. \quad (2.37)$$

Оценим величину  $A_{сж}^{m6}$  для ЭВВ «Украинит ПП-2». В продуктах взрыва данного ВВ – 10,8 % окиси кальция. Принимая  $P = 10$  ГПа;  $\rho_{CaO} = 2500$  кг/м<sup>3</sup>;  $c_{зв}^{CaO} \approx 3500$  м/с;  $n_{CaO} = 4$ , находим:

$$A_{сж}^{m6} = 170 \text{ КДж/кг} \ll 2500\text{-}3000 \text{ КДж/кг (теплота взрыва ЭВВ)}.$$

Таким образом,  $A_{сж}^{m6} \ll Q_V$ . (2.38)

На основании (2.21), (2.23), (2.26) – (2.28), (2.31), (2.35), пренебрегая сжимаемостью твердофазных продуктов взрыва, получаем уравнение сохранения энергии для продуктов взрыва ЭВВ:

$$\frac{Q_V}{D^2} \left( 1 - \frac{3 \sum_j f_j \xi_j}{\bar{c} \Delta d} \right) = \frac{1}{2(k+1)}. \quad (2.39)$$

$$\left\{ \frac{1}{k-1} + \frac{2(k-\gamma)}{(k-1)(\gamma-1)} \left( \frac{k}{k+1} \right)^k \left( \frac{1}{K_+ \alpha \rho_o^{2\alpha 3}} \right)^{(k-1)} + \frac{\sum_j \beta_j}{k+1} \left( 1 + (k+1) \frac{U}{D} \right)^2 - \right. \\ \left. - \frac{1}{k+1} \left[ \begin{aligned} & k \frac{\frac{1}{\rho_{oo}} - \frac{1}{\rho_o}}{1 - \sum_j \frac{\beta_j}{\rho_j}} + \left( k+2 + (k+1) \frac{U}{D} \right) \left( 1 + k \frac{\frac{1}{\rho_{oo}} - \frac{1}{\rho_o}}{1 - \sum_j \frac{\beta_j}{\rho_j}} \right) \frac{U}{D} + \\ & \frac{\sum_j \beta_j - \rho_{oo} \sum_j \frac{\beta_j}{\rho_j}}{1 - \sum_j \beta_j} \left[ 1 + \left( k+2 + (k+1) \frac{U}{D} \right) \frac{U}{D} \right] \left( 1 + k \frac{\frac{1}{\rho_{oo}} - \frac{1}{\rho_o}}{\frac{1}{\rho_{oo}} - \sum_j \frac{\beta_j}{\rho_j}} \right) \right] \right\}$$

Величина  $U/D$  определяется на основе законов сохранения массы и импульса. Пренебрегая начальным давлением в среде по сравнению с детонационным давлением, из законов сохранения массы и импульса получаем [17]

$$W = \sqrt{P_f (V_{oo} - V_{CJ})}, \quad (2.40)$$

где  $V_{CJ}$  – удельный объем продуктов взрыва в точке Чепмена-Жуге.

Исходя из (2.39), (2.29), (2.30) и (2.33), получаем

$$\frac{U}{D} = \frac{k}{k+1} \cdot \frac{\rho_{CJ}}{\rho_{oo}} - 1, \quad (2.41)$$

где  $\rho_{CJ} = V_{CJ}^{-1}$  – плотность продуктов взрыва в точке Чепмена-Жуге.

Плотность продуктов взрыва в точке Чепмена-Жуге равна

$$\rho_{CJ} = \frac{1}{1 - \sum_j \frac{\beta_j}{\rho_{CJ}^{2\alpha 3}} + \sum_j \frac{\beta_j}{\rho_j^{CJ}}}, \quad (2.42)$$

где  $\rho_{CJ}^{2\alpha 3}$ ,  $\rho_j^{CJ}$  – плотность взрывных газов и твердофазного  $j$ -вещества в точке Чепмена-Жуге соответственно.

Плотность взрывных газов в точке Чепмена-Жуге равна

$$\rho_{CJ}^{zaz} = \frac{k+1}{k} \rho_o^{zaz} = \frac{k+1}{k} \cdot \frac{\rho_o \left(1 - \sum_j \beta_j\right)}{1 - \rho_o \sum_j \frac{\beta_j}{\rho_j}}, \quad (2.43)$$

В соответствии с (2.24) можно записать, что

$$\rho_j^{CJ} = \varphi_j \rho_j, \quad (2.44)$$

где  $\varphi_j = \left(1 + \frac{n_j P_f}{\rho_j (c_j^{36})^2}\right)^{\frac{1}{n_j}}$  – коэффициент уплотнения твердофазного j-вещества в точке Чепмена-Жуге.

На основании (2.41) – (2.44) получаем зависимость для определения величины  $\frac{U}{D}$ :

$$\frac{U}{D} = \frac{\rho_o}{\rho_{oo}} \cdot \frac{1}{1 + \rho_o \left( \frac{k+1}{k} \sum_j \frac{\beta_j}{\varphi_j \rho_j} - \sum_j \frac{\beta_j}{\rho_j} \right)} - 1. \quad (2.45)$$

В случае пренебрежения сжимаемостью твердофазных продуктов взрыва ( $\varphi_j \approx 1$  при любых j)

$$\frac{U}{D} = \left( \left( \frac{1}{\rho_{oo}} - \frac{1}{\rho_o} \right) k - \sum_j \frac{\beta_j}{\rho_j} \right) \left( \frac{k}{\rho_o} + \sum_j \frac{\beta_j}{\rho_j} \right)^{-1}. \quad (2.46)$$

На основании (2.19) скорость детонации (без учета скорости сноса) равна:

$$D^2 = \frac{2(k+1)Q_V}{\bar{C} \left( 1 - \frac{k+1}{k} \alpha \rho_o^{zaz} \right) \left( 1 - \sum_j \beta_j \right)}. \quad (2.47)$$

Давление газообразных продуктов взрыва в точке Чепмена-Жуге может быть найдено по формуле

$$P_{II} = \frac{\rho_o^{zaz}}{k+1} D^2. \quad (2.48)$$

Формула (2.48) позволяет определять начальное детонационное давление как в случае наличия в ЭВВ инертных добавок из твердых веществ (например,

стеклянные микросферы), так и в случае образования твердых инертных веществ в результате химических реакций при взрыве ЭВВ. Сравнение результатов расчета начального детонационного давления по формуле (2.48) и формуле для определения начального детонационного давления при взрыве смесевых ВВ с инертными добавками, предложенное в работе [36], показало, что результаты расчетов отличаются менее чем на 1 %.

В случае ЭВВ, сенсибилизированных газовыми порами,  $\rho_o$  определяется из уравнения [43, 56, 63]

$$\rho_o = z\rho_{oo} + (1 - z)\rho_s \quad (2.49)$$

где  $z$  – отношение пористости ЭВВ в момент начала взрывного разложения к начальной пористости.

Таким образом, задача определения детонационных параметров ЭВВ будет решена, если будет известна плотность  $\rho_o$ , которую в дальнейшем будем называть характеристической.

### 2.3. Определение характеристической плотности ЭВВ

При определении характеристической плотности ЭВВ принимаем, что: эмульсия почти на 90 % внутреннего объема представлена окислительной фазой;

разогрев вещества эмульсии при втекании в поры происходит как за счет вязкого трения, так и под действием тепла разогретых при сжатии газов, заполняющих поры.

В результате разогрева начинается экзотермическое разложение аммиачной селитры (АС), которая является как основным компонентом окислительной фазы, так и наименее стойким к повышению температуры веществом, способным при этом к автокаталитическому экзотермическому разложению. Согласно выполненным нами исследованиям по изучению изменений свойств АС при изменении температуры методом синхронного термического анализа (одновременное выполнение дифференциально-сканирующей калориметрии и термогравиметрического анализа), а также данным, изложенным в работах [117, 184], интенсивное автокаталитическое разложение АС начинается при достижении температуры селитры 520 – 530°K.

Результаты синхронного термического анализа представлены в Приложении 1. Начало автокаталитического разложения АС сопровождается выделением тепла и резким возрастанием давления газа в порах.

Учитывая вышесказанное,  $\rho_0$  будем определять из условия достижения температуры эмульсии, втекающей в поры, величины  $T_{AC}^* = 250^\circ\text{C}$  ( $523^\circ\text{K}$ ). При этом в зависимости от структурных особенностей эмульсии существует два варианта развития в ней деформаций.

Первый. Окислительная фаза представляет собой бесструктурную однородную субстанцию – раствор. Тогда деформация эмульсии описывается законом непрерывного сдвигового деформирования вещества. Разогрев втекающего в пору вещества происходит вследствие вязкого трения. При этом происходит объемное нагревание втекающей в пору эмульсии. Распределение температуры внутри втекающей в пору эмульсии будет характеризоваться монотонной функцией.

Второй. Окислительная фаза представляет собой вещество, имеющее внутреннюю структуру. Этот вопрос требует дополнительного обсуждения.

Возможность наличия в окислительной фазе определенной структуры следует из анализа ее образования. Окислительная фаза обычно представляется пресыщенным водным раствором АС (АС + натриевая селитра, АС + кальциевая селитра), где массовая доля воды составляет 12 – 20 %. Однако диссоциации селитры (селитр) в этом случае не происходит. Действительно, рассмотрим стандартный раствор аммиачной селитры, применяемый в качестве окислительной фазы бестарного ЭВВ. Массовая доля  $NH_4NO_3$  в стандартном растворе составляет 80 % [117]:  $NH_4NO_3 + 1,111H_2O$ . Соотношение количества

молекул  $NH_4NO_3$  и  $H_2O$  равно  $\frac{N_{NH_4NO_3}}{N_{H_2O}} = 0,9$ . При данном соотношении

диссоциация аммиачной селитры на ионы не протекает (т.к. диссоциация возможна в случае, если координационное число не меньше 4 [151], а в нашем случае оно равно 1,11). Поэтому в окислительной фазе эмульсии следует ожидать значительного количества чрезвычайно мелких кристалликов аммиачной селитры. В этом случае при втекании эмульсии под действием ударной волны в газовую пору может наблюдаться разбитие ее потока на дискретные слои. Деформация вещества эмульсии происходит по локализованным слоям втекающего потока, а разогрев вещества будет происходить по контакту данных сло-



ев (наблюдается аналогия со сдвиговой деформацией сыпучих сред по механизму, описанному в работе [202]).

Рассмотрим данные вопросы подробнее.

1. При непрерывном сдвиговом деформировании эмульсия моделируется несжимаемой вязкой жидкостью, втекающей в пору. Данная задача в случае определенных допущений имеет точное аналитическое решение.

Рассмотрим находящуюся в жидкости пору радиуса  $R_0$  с внутренним давлением газа в пору  $P_0$ .

В среде неожиданно возникает давление  $P > P_0$ . Под действием данного давления жидкость начинает втекать в пору. Рассмотрим предварительно сферически симметричный процесс.

Положим, что выполняются следующие условия:

$$P \gg P_0; \rho_{\text{газ}} \ll \rho_3; \frac{2\sigma}{R_0} \ll P; \frac{\eta}{\rho_3 R_0} \sqrt{\frac{\rho_3}{P}} < 0,119, \quad (2.50)$$

где  $\rho_{\text{газ}}$  - плотность газа внутри поры;  $\sigma$  и  $\eta$  – поверхностное натяжение и сдвиговая вязкость эмульсии соответственно. Последнее условие в (2.50) – это условие (1.1) для реализации гидродинамического режима схлопывания поры.

Введем обозначения:

$v(R)$  – радиальная скорость движения частицы среды на расстоянии  $R$  от центра поры;

$r$  – радиус от центра поры до произвольной точки в объеме эмульсии;

$\tau^{ij}, e_{ij}$  – компоненты тензора вязких напряжений и скоростей деформации ( $i, j$ - индексы координат );

$\Delta T = T_{AC}^* - T_0$  – необходимое приращение температуры эмульсии до момента начала экзотермического разложения наименее стойкого компонента эмульсии (аммиачной селитры);

$T_{sp}$  – температура на границе эмульсия – газ, заполняющий пору;

$z$  – относительная пористость ЭВВ ( $z = \frac{\chi}{\chi_0}$ ,  $\chi_0$  – начальная пористость ЭВВ,

$\chi$  – пористость ЭВВ в момент начала экзотермического разложения аммиачной селитры);

$\Delta T$  – изменение температуры эмульсии под действием сил внутреннего трения;

$\Delta T_{zp} = T_{zp} - T_o$  – изменение температуры эмульсии под действием тепла разогретых при сжатии газов, заполняющих поры;

$T_{zp}$  – температура границы раздела эмульсия - газ.

$$\text{Очевидно, что } \Delta T. = \Delta T_{zp} + \Delta T_o. \quad (2.51)$$

$$\text{Из условия несжимаемости среды } \frac{\partial v}{\partial r} + 2 \frac{v}{r} = 0 \quad (2.52)$$

$$\text{определяем } v(r) = v(R) \frac{R^2}{r^2}. \quad (2.53)$$

Мощность выделяемого в сферическом слое  $[R; R + dR]$  тепла равна [168]

$$\frac{dQ}{dt} = \int_R^{R+dR} \tau^{ij} e_{ij} \cdot 4\pi r^2 dr. \quad (2.54)$$

В силу сферической симметрии тензора скоростей деформаций и вязких напряжений имеют диагональный вид, при этом:

$$e_{rr} = \frac{\partial v}{\partial r}; \quad e_{\varphi\varphi} = e_{\theta\theta} = \frac{v}{r} \quad (2.55)$$

$$\tau_{rr} = 2\eta e_{rr}; \quad \tau_{\varphi\varphi} = 2\eta e_{\varphi\varphi} \quad \tau_{\theta\theta} = 2\eta e_{\theta\theta}. \quad (2.56)$$

На основании (2.16) – (2.19) получаем

$$\frac{d^2Q}{dt dR} = 48\pi\eta v_R^2, \quad (2.57)$$

где  $v_r = v(R)$ .

Выделившееся тепло идет на разогрев эмульсии, т.к. сжатие микропор в сильной ударной волне происходит практически без потерь тепла из-за теплопроводности [168]:

$$dQ = \rho_3 c_3 \Delta T \cdot 4\pi R^2 dR. \quad (2.58)$$

Исходя из (2.57) и (2.58), получаем (2.58), дифференцируем по  $dt$  и используем равенство  $v_R = \frac{dR}{dt}$ .

$$v(R) = \frac{\rho_3 c_3 \Delta T}{6\eta} R. \quad (2.59)$$

Согласно [168] при выполнении условий (2.50) скорость схлопывания поры при сферически симметричном втекании вещества определяется уравнением

$$v_{\Pi} = \sqrt{\frac{2P}{3\rho_{3,u}} \left( \frac{1}{z} - 1 \right)}, \quad (2.60)$$

где  $\frac{R^3}{R_0^3} = z$ .

На основании (2.59), (2.60) величина  $z$  при сферически симметричном втекании вещества в пору (пузырек) определится из уравнения

$$z^{-\frac{5}{3}} - z^{-\frac{2}{3}} = \frac{3\rho_3 \left( \frac{\rho_3 c_3 \Delta TR_0}{6\eta} \right)^2}{2P_f}. \quad (2.61)$$

Согласно оценкам, сделанным в п. 2.1, и экспериментальным данным, приведенным в работе [206], затекание вещества в поры осуществляется в асимметричном режиме. Поэтому необходимо учитывать наличие начальной массовой скорости втекания (скорость движения вещества вслед за фронтом детонационной волны  $\frac{D}{k+1} + U$  [42, 135]) и особенности схлопывания пор. Умень-

шение геометрических размеров пор происходит в виде «сплющивания» (уменьшаются размеры поры вдоль оси параллельной скорости детонационной волны) [206]. Тогда, полагая, что приращение скорости вещества при втекании будет определяться формулой (2.61), имеем

$$\frac{D}{k+1} + U + \sqrt{\frac{2P_f}{3\rho_3} \left( \frac{1}{z} - 1 \right)} \cong z \left( \frac{\rho_3 c_3 \Delta TR_0}{6\eta} \right). \quad (2.62)$$

Величина  $\Delta T$  определяется из уравнения (2.51):

$$\Delta T = T_{AC}^* - T_{sp}, \quad (2.63)$$

где  $T_{AC}^* = 523^\circ\text{K}$  – температура начала автокаталитической реакции разложения аммиачной селитры.

$$\text{Согласно [34]} \quad T_{sp} = \frac{T_0 + k_\varepsilon T_u}{1 + k_\varepsilon}, \quad (2.64)$$

где  $T_u$  – температура газа на границе раздела эмульсии – газ;  $k_\varepsilon$  – коэффициент относительной термоактивности в системе «газ – эмульсия».

$$k_\varepsilon = \sqrt{\frac{\lambda_1 c_{1V} \rho_1}{\lambda_3 c_3 \rho_3}}, \quad (2.65)$$

где  $\lambda_1, c_{1V}, \rho_1$  – коэффициент теплопроводности, средняя теплоемкость и плотность газов в поре (в ударной волне);  $\lambda_3, c_3, \rho_3$  – коэффициент теплопроводности, теплоемкость и плотность эмульсии.

Температура газа на границе раздела эмульсии – газ равна [131]

$$T_u = T_o + \frac{v^2}{2c_{1V}}, \quad (2.66)$$

где  $v$  – скорость втекания эмульсии в пору.

Величину  $\rho_1$  примем равной [17]

$$\rho_1 = \rho_1^o \frac{\gamma_1 + 1}{\gamma_1 - 1}, \quad (2.67)$$

( $\rho_1^o$  – начальная плотность газов в поре).

Коэффициент теплопроводности газов, заполняющих пору, определяем на основании уравнения Сатерленда для вязкости газов и известного соотношения

$$\lambda = \varepsilon \eta_s c_V, \quad \text{где } \varepsilon = \frac{1}{4} \left( \frac{9c_p}{c_V} - 5 \right), \quad c_p, \quad - \text{теплоемкость газа при постоянном давлении, } \eta_s - \text{вязкость газа [112]}$$

ном давлении,  $\eta_s$  – вязкость газа [112]

$$\lambda_i(T_u) = \sum_i a_i \lambda_i(T_o) \cdot \frac{T_o + c_{iS}}{T_u + c_{iS}} \cdot \left( \frac{T_u}{T_o} \right)^{\frac{2}{3}} \cdot \frac{1 + \frac{4}{9} \bar{c}_{iV}(T_u)}{1 + \frac{4}{9} \bar{c}_{iV}(T_o)}, \quad (2.68)$$

где  $i$  – индекс нумерации газа, входящего в состав газовой смеси, содержащейся в поре;  $a_i$  – мольная доля  $i$ -газа;  $\lambda_i(T_o)$  – коэффициент теплопроводности  $i$ -газа при температуре  $T_o$ ;  $c_{iS}$  – постоянная Сазерленда  $i$ -газа;  $\bar{c}_V(T)$  – относительная теплоемкость при постоянном объеме  $i$ -газа при температуре  $T$ .

Значения  $\bar{c}_V(T)$  находятся по формулам Эйнштейна [17].

Искомое значение характеристической плотности определится из уравнения (2.49)

## 2. Режим дискретного сдвигового деформирования вещества.

При втекании эмульсии под действием ударной волны в газовую пору наблюдается разбитие ее потока на дискретные слои. Деформация вещества эмульсии происходит по локализованным слоям втекающего потока, а разогрев вещества будет происходить по контакту данных слоев. Между берегами слоев возникают значительные силы трения, что обуславливает быстрое нагревание вещества, примыкающего к трущимся поверхностям (происходит «чирканье» мельчайших кристаллов аммиачной селитры друг о друга).

Наблюдается аналогия между представляемым механизмом разогрева вещества эмульсии под действием ударной нагрузки с представлениями о начальном разогреве твердых индивидуальных ВВ при их ударном инициировании [15, 86].

В этом случае при деформации данной среды в ней не реализуется режим непрерывного сдвигового деформирования вещества, при котором температура втекающей эмульсии является монотонной функцией пространственных координат.

Согласно [34, 142] изменение температуры вещества на поверхности соприкосновения двух трущихся между собой тел из одинакового вещества равно

$$T - T_0 = \frac{2q_s}{\lambda_{AC}} \sqrt{\frac{\lambda_{AC} t}{\pi \rho_{AC} c_{AC}}}, \quad (2.69)$$

где  $t$  – время взаимодействия;  $\rho_{AC}$ ,  $\lambda_{AC}$ ,  $c_{AC}$  – плотность, коэффициент теплопроводности и удельная теплоемкость аммиачной селитры соответственно;  $q_s$  – мощность источника тепла на границе соприкосновения

( $q_s = \mu_{mp} N \cdot v$ ,  $\mu_{mp}$  – внутренний коэффициент трения аммиачной селитры,  $N$  – нормальное давление,  $v$  – относительная скорость скольжения).

Рассмотрим частицу дисперсной фазы эмульсии, которую пересекает трещина сдвига. Пусть  $W$  – массовая скорость данной частицы. Тогда

$$v = W \frac{\Delta}{R_0} \text{ и } N = \frac{\rho_s v^2}{2}. \quad (2.70)$$

На основании (2.69) и (2.70) определяем значение времени  $t_*$ , когда температура поверхности берегов трещины сдвига достигнет величины  $T_{AC}^*$ :

$$t_* = \frac{4\pi\lambda_{AC}c_{AC}(T_{AC}^* - T_{ip})^2}{\mu_{mp}^2\rho_s W^6} \left(\frac{R_0}{\Delta}\right)^6. \quad (2.71)$$

Полагая, что  $W_* = \frac{D}{k+1} + U + \sqrt{\frac{2P_f}{3\rho_s} \left( \frac{1}{z} - 1 \right)}$ , из (2.71) получаем

$$t_* = \frac{4\pi (T_{AC}^* - T_{i,p})^2 \lambda_{AC} c_{AC}}{\mu_{mp}^2 \rho_{AC} \left( \frac{D}{k+1} + U + \sqrt{\frac{2P_f}{3\rho_s} \left( \frac{1}{z} - 1 \right)} \right)^6} \left( \frac{R_o}{\Delta} \right)^6. \quad (2.72)$$

Учитывая асимметричность втекания вещества в пору, получаем следующее уравнение для определения :

$$z \cong 1 - \frac{\frac{D}{k+1} + U + \frac{1}{2} \sqrt{\frac{2P_f}{3\rho_s} \left( \frac{1}{z} - 1 \right)}}{2R_o} \cdot t_*. \quad (2.73)$$

Величина  $\rho_o$  для ЭВВ вычисляется по формуле (2.49).

Для выбора модели деформирования вещества эмульсии при оценке величины  $\rho_o$  необходимо более детально рассмотреть структуру окислительной фазы эмульсии.

## 2.4. Особенности структуры окислительной фазы эмульсии

При освещении данного вопроса исходим из результатов работ [47, 59, 215].

В предыдущем параграфе представлены две оценки величины  $\rho_o$ , полученные из представлений, что:

окислительная фаза представляет собой бесструктурную однородную субстанцию – раствор. В этом случае деформация эмульсии описывается законами непрерывного сдвигового деформирования вещества, а распределение температуры во втекающей в пору эмульсии будет монотонным. Разогрев втекающего в пору вещества происходит вследствие вязкого трения;

окислительная фаза представляет собой вещество, содержащее значительное количество чрезвычайно мелких кристалликов аммиачной селитры. В этом случае при втекании эмульсии в пору может происходить разбитие потока на локализованные слои. Разогрев вещества будет происходить по контакту слоев.

Рассмотрим экспериментальные данные, приведенные в работах [47, 59, 114, 215] и позволяющие отдать предпочтение второй модели окислительной фазы эмульсии.

### ***I. Результаты турбидиметрических исследований***

В работе [114] описан следующий опыт. Исследовалась эмульсия на основе аммиачной и кальциевой селитр. Соотношение компонентов эмульсии следующее: ( $NH_4NO_3$  – 43,0 %,  $Ca$  - 30,0 %,  $H_2O$  - 18 %,  $DT$  - 6,0 %, эмульгатор – 3,0 %).

Готовили раствор: навеску эмульсии в количестве 1,1 г вводили в 100 мл  $CCl_4$ , затем полученную смесь разбавляли тем же растворителем еще в 55 раз. Фоновый раствор получали аналогичным образом, используя навеску компонентов масляной фазы в количестве 0,1 г.

Полученный раствор изучали на предмет наличия твердой дисперсной фазы и ее размеров турбидиметрическим методом. Турбидиметрический (от лат. turbidus – мутный) метод основан на сравнении интенсивностей света определенной длины волны, проходящего через кювету, содержащую коллоидный раствор, чаще всего через суспензию, образованную частицами вещества, размеры которых определяются с интенсивностью света, проходящего через кювету с фоновым раствором.

В результате измерений было определено, что средний размер частиц, на которые в четыреххлористом углероде распалась эмульсия, составляет 35,2 нм.

### ***II. Результаты рентгенографических исследований***

В работе [117] представлены результаты рентгенографического исследования аммиачной селитры и аммиачно-селитренной эмульсии. На дифрактометре ДРОН-3М изучалась дифракционная картина рассеяния на указанных веществах. Результаты исследований приведены на рис. 2.1.

Для расширения данных по рентгеноструктурному анализу вещества эмульсии нами дополнительно на дифрактометре D8 Discover фирмы “BRURERAXS GbmH” (Германия) изучалась дифракционная картина рассеяния рентгеновского излучения [47, 215]:

сухой аммиачной селитры;

охлажденного до 25°C 80-процентного водного раствора аммиачной селитры;

аммиачно-селитренной эмульсии.

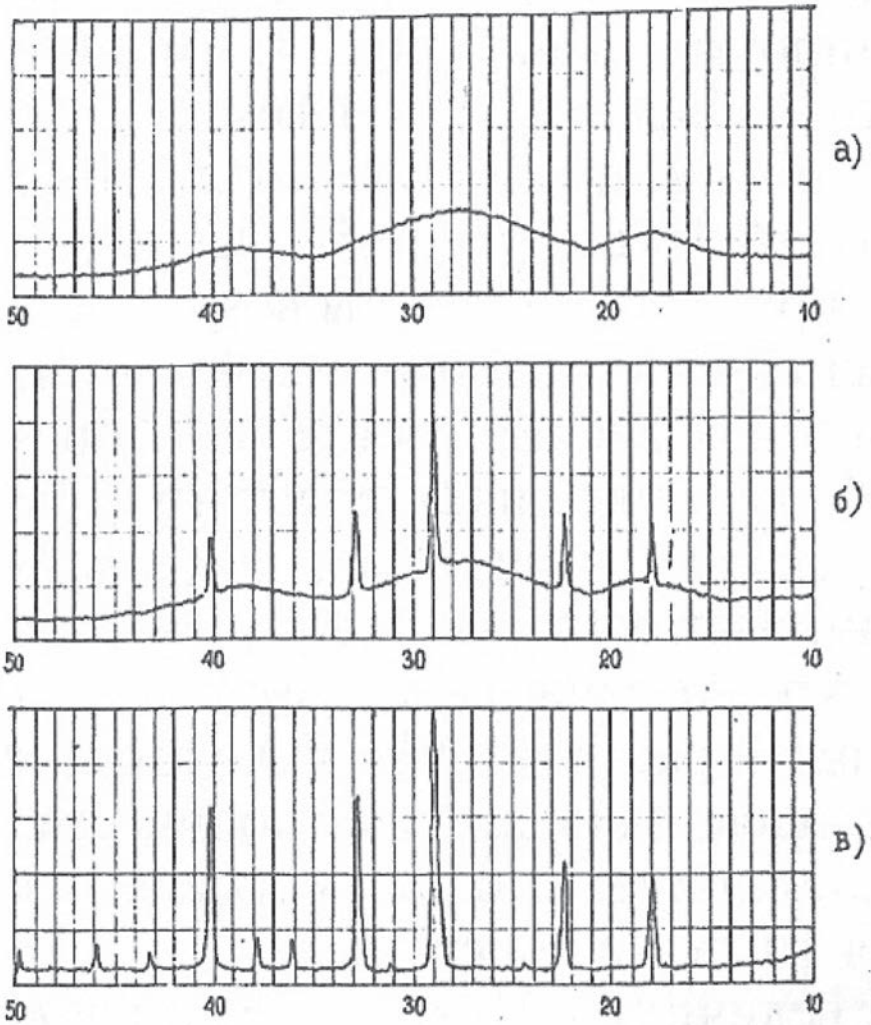


Рис. 2.1. Дифрактограммы эмульсии [117, с. 283]:

- а) сразу после приготовления;
- б) в процессе старения;
- в) справочная дифрактограмма аммиачной селитры.

Результаты исследований приведены на рис. 2.2 и 2.3. На рис. 2.3 красным цветом обозначены данные по сухой аммиачной селите, а зеленым – 80-процентного водного раствора аммиачной селитры.



На дифрактограммах, представленных на рис. 2.1 – 2.3, на оси ординат указана интенсивность отражения (рефлекс), а на оси абсцисс – угол рассеяния рентгеновского излучения.

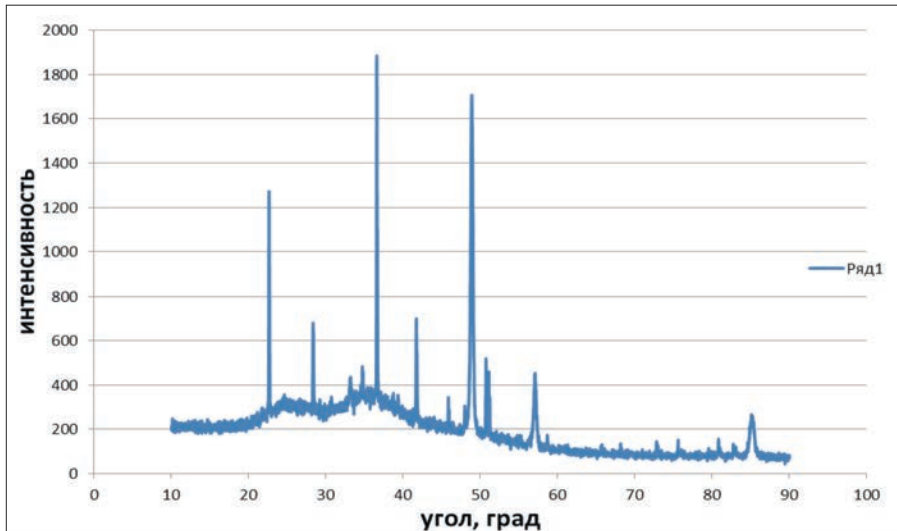


Рис. 2.2. Дифрактограмма матричной эмульсии с окислительной фазой на основе аммиачной селитры

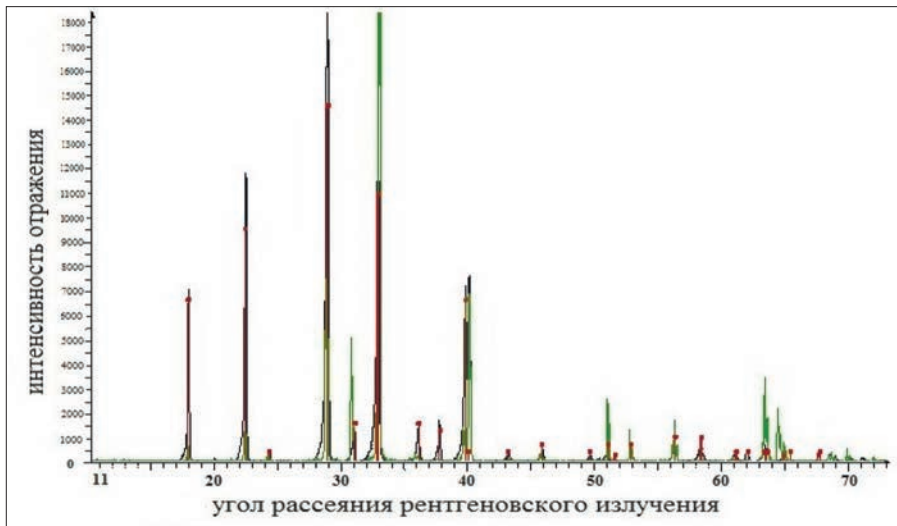
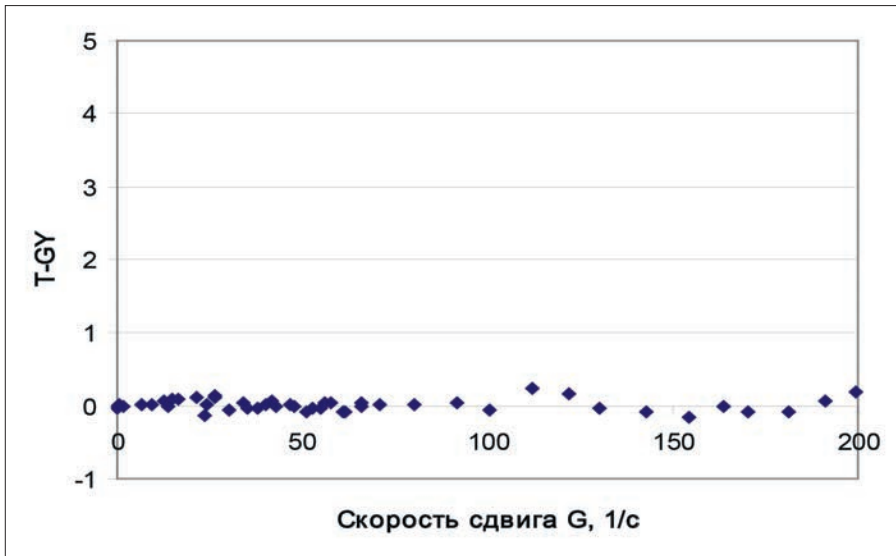


Рис. 2.3. Дифрактограмма сухой аммиачной селитры и охлажденного до 25оС 80-процентного водного раствора аммиачной селитры.

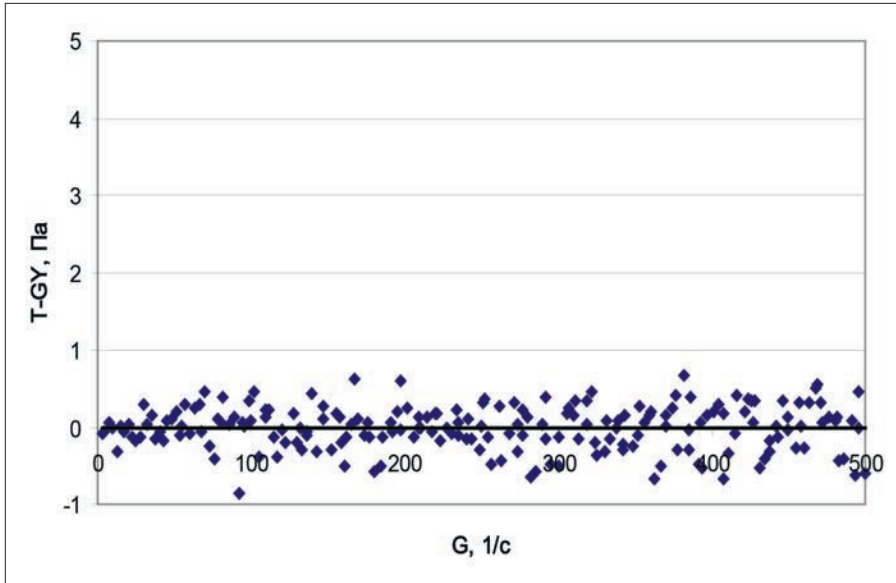
### III. Результаты реологических исследований

Эксперименты [59] проводились с помощью реометра ротационного модели НААКЕ MARS фирмы «Thermo Electron» (Германия), который оборудован рабочими узлами «цилиндр-цилиндр» и «конус-плита», жидкостным термостатом и воздушным безмасляным компрессором. Точность измерений составляет 1 % отн. Реометр позволял изучать поведение эмульсий в диапазоне скоростей сдвига от  $2 \cdot 10^{-4} \text{ c}^{-1}$  до  $500 \text{ c}^{-1}$  при различных температурах образцов.

Ниже представлены характерные зависимости для эмульсии на основе аммиачной селитры /  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  – 75,44%,  $\text{H}_2\text{O}$  – 16,56%, ДТ – 7%, эмульгатор – 1,0%, размер частиц эмульсии 3,6 мкм/ (рис. 2.4А, 2.5А) и для эмульсий на основе аммиачной и кальциевой селитр /  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  – 50%,  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$  – 25%,  $\text{H}_2\text{O}$  – 16%, ДТ – 7%, эмульгатор – 1%), размер частиц эмульсии 8 мкм/ (рис. 2.4Б, 2.5Б).

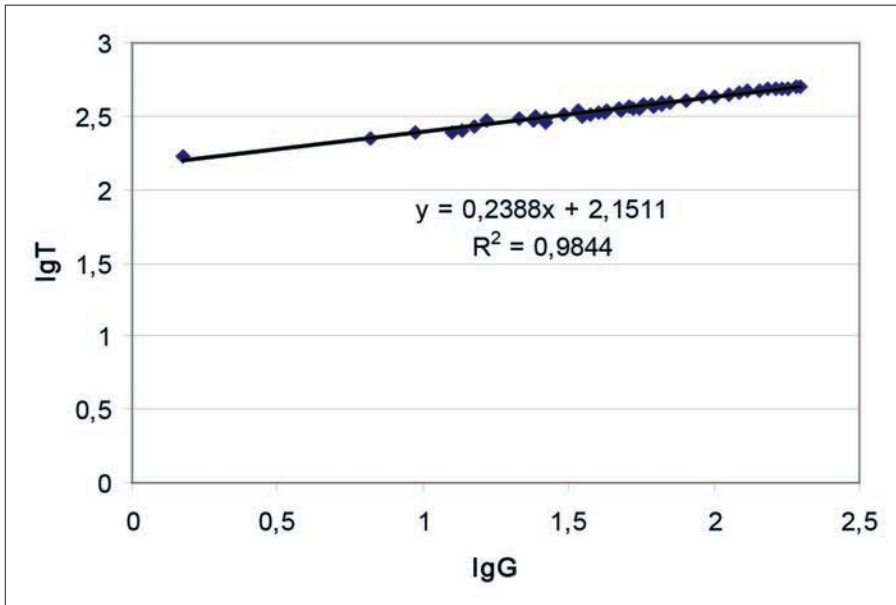


А). Эмульсия на основе аммиачной селитры.

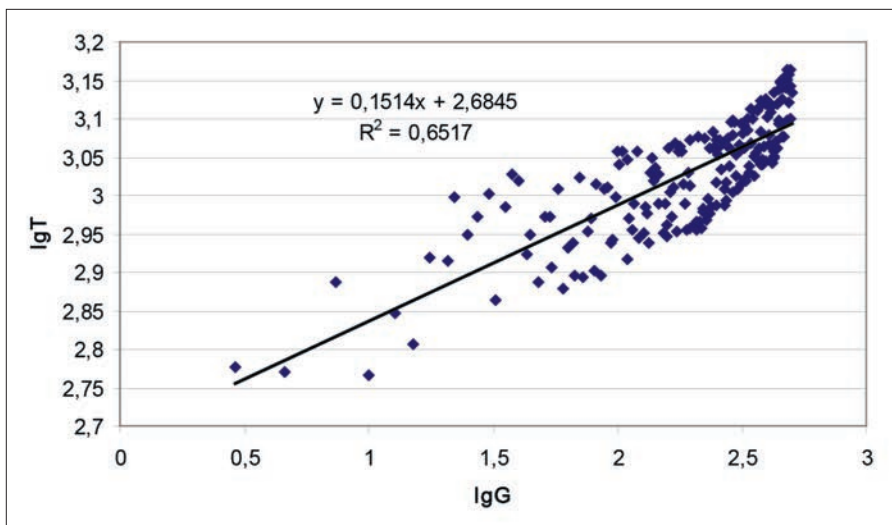


Б). Эмульсия на основе аммиачной и кальциевой селитры

Рис. 2.4. Зависимость разности напряжений сдвига ( $T$ ) и величины ( $G \cdot Y$ ) от скорости сдвига ( $G$ ) при температуре эмульсии  $20,00 \pm 0,25^\circ\text{C}$ .



А). Эмульсия на основе аммиачной селитры.



Б). Эмульсия на основе аммиачной и кальциевой селитры

Рис. 2.5. Логарифмическая зависимость напряжений ( $T$ ) от скорости сдвига ( $G$ ) при температуре эмульсии  $20,00 \pm 0,25^\circ\text{C}$ .

На рис. 2.4 представлена зависимость разности напряжений сдвига ( $T$ ) и вязкости ( $G \cdot Y$ ) от скорости сдвига ( $G$ ) (разность  $T - G \cdot Y$  равна предельному напряжению сдвига в законе Бингама-Шведова).  $Y$  – коэффициент динамической структурной вязкости.

На рис. 2.5 представлена логарифмическая зависимость напряжений сдвига ( $T$ ) от скорости сдвига ( $G$ ) (позволяет найти константы в уравнении Оствальда-Рейнера).

#### *IV. Модель структуры окислительной фазы*

Представление, что окислительная фаза представляет собой бесструктурную однородную субстанцию, не позволяет объяснить вышеприведенные экспериментальные факты. Необходима модель окислительной фазы, позволяющая объяснить опытные данные.

При построении модели среды исходим из того, как уже отмечалось в п. 2.2, что в пресыщенных растворах  $NH_4NO_3$  или смесях растворов  $NH_4NO_3$  с нитратами различных металлов (массовая доля основного окислителя  $NH_4NO_3$  составляет 50 - 95 %, а другие соли добавляются не более 40 % от его массовой доли) диссоциации селитры (селитр) не происходит.

Рассмотрим следующую модель окислительной фазы ЭВВ (модель вещества эмульсии представлена на рис. 2.6Б; фотография микроструктуры ЭВВ представлена на рис. 2.6А) [47, 59, 215].

Среда представляется смесью частиц селитр, поверхность которых покрыта мономолекулярным слоем  $H_2O$ .

Определим средний размер данной частицы. Пусть  $R_C$  – осредненный радиус объема, занимаемого молекулой селитры. Тогда

$$\frac{\bar{\mu}}{\bar{\rho}} = N_A \frac{4}{3} \pi R_C^3, \quad (2.74)$$

где  $\bar{\mu}$  – средняя молекулярная масса;  $\bar{\rho}$  – средняя плотность частицы;  $R_A$  – число Авогадро.

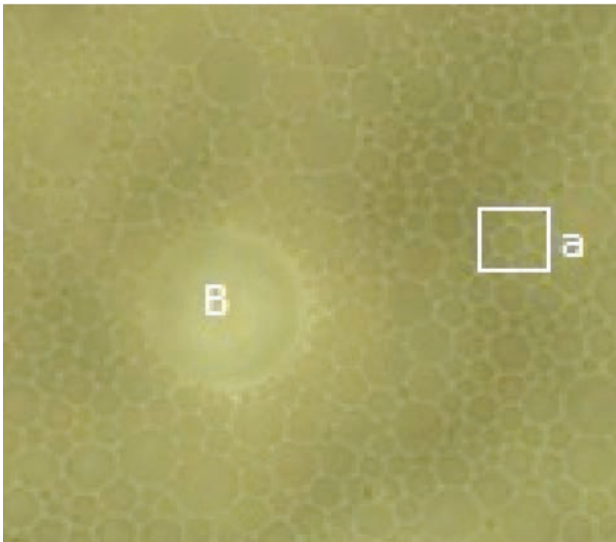
Объем частицы равен:

$$V_{NK} = \frac{4}{3} \pi n_1 R_C^3 = \frac{4}{3} \pi R_{NK}^3, \quad (2.75)$$

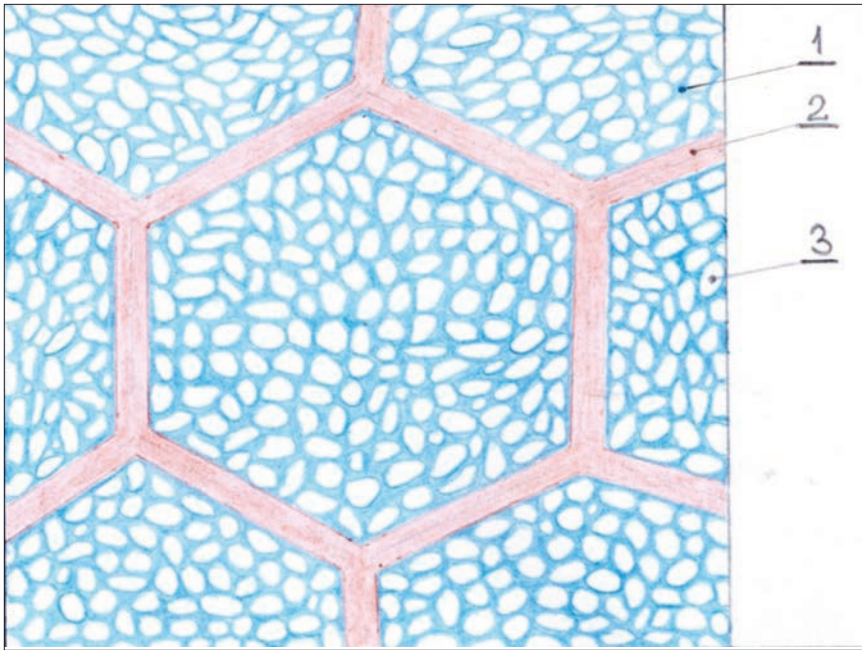
где  $n_1$  – количество молекул селитры в частице;  $R_{NK}$  – радиус частицы.

$$\text{Имеем: } R_{NK} = (n_1)^{\frac{1}{3}} R_C \quad (2.76)$$

Обозначим через  $R_{H_2O}$  и  $n_2$  характерный радиус объема, занимаемого молекулой  $H_2O$  в воде, и количество молекул  $H_2O$  на поверхности частицы соответственно.



А).



Б).

Рис. 2.6. Структура ЭВВ. А). Фотография ЭВВ (В – газовая пора; а – участок эмульсии, представленный на рис. 2.6Б). Б). Модель вещества эмульсии (участок «а» из рис. 2.6А). 1 – прожилки воды; 2 – пленки жидкого углеводородного горючего; 3 – нанокристаллы аммиачной селитры.

Исходя из рассматриваемой модели, получаем

$$4\pi R_{NK}^2 = n_2 R_{H_2O}^2 \tag{2.77}$$

На основании (2.74), (2.76) и (2.77) имеем

$$n_1 = (4\pi)^3 \left( \frac{N_C}{N_{H_2O}} \right)^3 \left( \frac{\bar{\mu}}{\mu_{H_2O}} \frac{\rho_{H_2O}}{\bar{\rho}} \right)^2, \tag{2.78}$$

где  $N_C$ ,  $N_{H_2O}$  – число молей селитры и воды в окислительной фазе ЭВВ соответственно;  $\mu_{H_2O}$  – молекулярная масса воды;  $\rho_{H_2O}$  – плотность воды.

Исходя из (2.74), (2.76) и (2.78) получаем:

$$D_{NK} = 8\pi \left( \frac{N_C}{N_{H_2O}} \right) \left( \frac{\bar{\mu}}{\mu_{H_2O}} \frac{\rho_{H_2O}}{\bar{\rho}} \right)^{\frac{2}{3}} \left( \frac{3}{4\pi} \frac{\bar{\mu}}{N_A \bar{\rho}} \right)^{\frac{1}{3}}, \tag{2.79}$$

где  $D_{NK} = 2R_{NK}$  – диаметр частицы.

В качестве примера определим размер частицы монораствора аммиачной селитры ( $NH_4NO_3 + 1,111 H_2O$ ):  $\frac{N_C}{N_{H_2O}} = 0,9$ ,  $\bar{\mu} = 80$  г/моль,  $\mu_{H_2O} = 18$  г/моль,  $\rho_{H_2O} = 1$  г/см<sup>3</sup>;  $\bar{\rho} = 1,6$  г/см<sup>3</sup>,  $N_A = 6,02 \cdot 10^{23}$  моль<sup>-1</sup>, из (2.7) получаем  $D_{НК} \approx 13$  нм.

Проанализируем приведенные экспериментальные данные:

### 1. Турбидиметрический метод

Проверка корректности оценки размеров нанокристаллов в окислительной фазе ЭВВ по формуле (2.79) осуществлялась на основании сравнения расчетных значений данной величины и экспериментальных данных, представленных в работе [114].

Ввиду возможности образования кристаллогидратов кальциевой селитры были проведены опыты для определения состояния воды в ЭВВ. Для этого использовали метод ИК-спектроскопии. На ИК-Фурье спектрометре NICOLET 6700 фирмы «Thermo» устанавливали приставку НПВО. Снимали спектр сравнения по воздуху. Затем помещали 0,3 г эмульсии ( $NH_4NO_3 - 43,0\%$ ,  $Ca(NO_3)_2 - 30,0\%$ ,  $H_2O - 16\%$ ,  $DT - 6,0\%$ , эмульгатор – 3,0 %) на кристалл приставки НПВО и с помощью пресса приставки прижимали образец плотно к кристаллу. Характерный ИК-спектр эмульсии представлен на рис. 2.7. Условия съемки исследуемых образцов и образца сравнения: диапазон сканирования 3700-3000 см<sup>-1</sup>, разрешение 2 см<sup>-1</sup>, число сканов 128.

Анализ рис. 2.7 указывает на смещение валентных симметричных и антисимметричных колебаний молекул чистой жидкой воды (3600 см<sup>-1</sup> и 3450 см<sup>-1</sup>) [107] в область меньших частот. Происходит значительное смещение характерных частот до 3413,6 см<sup>-1</sup> и 3216,6 см<sup>-1</sup>. В связи с тем что среднее координационное число в данной системе равно  $1,23 < 4$ , то гидратация селитр не происходит. Поэтому смещение полос поглощения воды можно объяснить только образованием гидратов кальциевой селитры:  $Ca(NO_3)_2 \cdot 2H_2O$  и  $Ca(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$ . Образование гидратов в пресыщенных растворах кальциевой селитры также показано в работе [153].

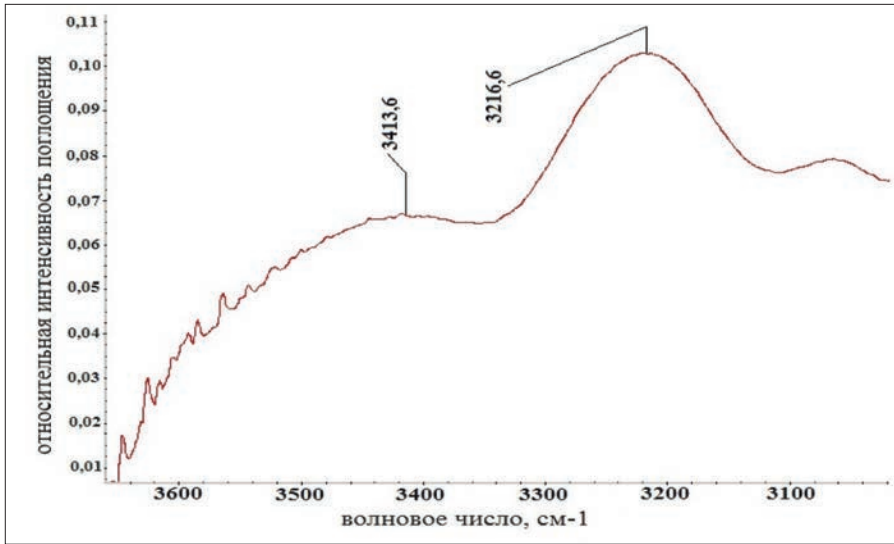


Рис. 2.7. Спектр НПВО в диапазоне частот (3700-3000)  $\text{см}^{-1}$  образца эмульсии ( $\text{NH}_4\text{NO}_3$  – 43,0 %,  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$  – 30,0 %,  $\text{H}_2\text{O}$  – 16 %, ДТ – 6,0 %, эмульгатор – 3,0 %). Ось абсцисс – волновое число,  $\text{см}^{-1}$ ; ось ординат – оптическая плотность (безразмерная величина).

Изучение данной эмульсии методом ИК-спектроскопии показало наличие гидратов  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ . Положим, что 50% кальциевой селитры образует  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ , а 50% –  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ . Тогда для рассматриваемой окислительной фазы имеем:  $\bar{\mu} = 115$  г/моль;  $\bar{\rho} = 1,8$  г/см<sup>3</sup>;  $\frac{N_c}{N_{\text{H}_2\text{O}}} = 2,11$ .

Расчет средних размеров частиц окислительной фазы рассматриваемой эмульсии по уравнению (2.79) дает следующее значение – 36,2 нм, а результаты измерений – 35,2 нм. Наблюдается согласие расчетного и измеренного размера частиц [114] окислительной фазы эмульсии, что подтверждает корректность предлагаемой модели окислительной фазы ЭВВ для объяснения результатов работы [114].

## 2. Рентгенографический метод

Сравнение дифрактограмм свежеприготовленной эмульсии и хранившейся эмульсии (рис. 2.1а, рис. 2.1б) с дифрактограммой поликристаллической аммиачной селитрой (рис. 2.1в) ясно показывает, что максимумы наблюдаемых гало свежеприготовленной эмульсии соответствуют характерным углам отражения поликристаллической аммиачной селитры (рис. 2.1в). Представление,



что пресыщенный раствор является однородной субстанцией, не позволяет объяснить вышеприведенные экспериментальные факты. Это обстоятельство и амплитуда данных максимумов свидетельствуют о том, что окислительная фаза эмульсии содержит значительное количество частиц селитры, находящихся на фазе формирования кристаллической структуры. На данной фазе формирования различные дислокации оказывают влияние на эффективную величину межплоскостных расстояний [189], что и объясняет само формирование гало вблизи характерных углов отражения.

Таким образом, для объяснения дифрактограмм ЭВВ необходимо положить, что размеры зарождающихся кристалликов селитры в окислительной фазе ЭВВ должны быть достаточно велики, чтобы начала проявляться кристаллическая природа данных частиц, но в то же время размер данных образований не может быть сколько-нибудь значительным ввиду проявления дефектов зарождения кристалла. Выполнение данных условий возможно, если размеры данных зарождающихся кристаллов селитры будут порядка 10 - 50 размеров молекулы аммиачной селитры, т.е. порядка десяти - тридцати нанометров.

Результаты представленных выше экспериментальных данных свидетельствуют о наличии в окислительной фазе значительного количества кристаллических зародышей аммиачной селитры (селитр) размером порядка десяти нанометров.

Это утверждение согласуется с нашими рентгенографическими исследованиями, выполненными на дифрактометре D8 Discover производства фирмы «BRUKERAXS GmbH» (Германия) [215], представленными на рис. 2.2 и 2.3, при изучении высококонцентрированного раствора аммиачной селитры и эмульсии с окислительной фазой на основе аммиачной селитры.

### **3. Метод ротационной вискозиметрии**

Анализ реологических свойств изучаемых систем показывает, что при деформировании эмульсий выполняется закономерность

$$T - G\dot{\gamma} = 0, \quad (2.80)$$

а реологические свойства описываются законом:

$$T = a \cdot G^p, \quad (2.81)$$

где  $a$  и  $p$  – параметры рассматриваемой системы (при этом  $p < 1$ ).

Зависимость (2.81) при  $p < 1$  отражает подчинение реологических свойств эмульсий закону Оствальда-Рейнера для псевдопластических жидкостей.

Известно [141], что данным законом описывается поведение высококонцентрированных суспензий асимметричных частиц.

Рассматриваемая модель окислительной фазы ЭВВ предполагает, что окислительная фаза является высококонцентрированной суспензией зародышей кристаллов селитры (селитр). При этом зародыши кристаллов аммиачной селитры как раз образуют игольчатые кристаллы. Реологическое поведение высококонцентрированных суспензий асимметричных частиц описывается законом Оствальда-Рейнера, что согласуется с проведенными исследованиями.

Таким образом, экспериментальные данные по изучению структуры окислительной фазы ЭВВ турбидиметрическим и рентгенографическим методами объясняются представлениями, что окислительная фаза эмульсии ВВ состоит из твердофазных зародышей кристаллов селитры (селитр), покрытых пленками воды. Дополнительным косвенным подтверждением непротиворечивости данных представлений являются результаты ротационной вискозиметрии.

Оценим характер зависимости скорости детонации ЭВВ, сенсibilизированного газовыми порами, от размеров частиц эмульсии для различных моделей определения величины характеристической плотности.

На рис. 2.8 представлены зависимости скорости детонации от размеров частиц эмульсии для ЭВВ, сенсibilизированного газовыми порами диаметром 80 мкм и имеющего следующий химический состав:  $NH_4NO_3$  – 51 %,  $Ca(NO_3)_2$  – 25 %,  $H_2O$  – 16 %, топливная фаза (общая) – 8 %. Плотность матричной эмульсии – 1,48 г/см<sup>3</sup>. Плотность ЭВВ – 1,18 г/см<sup>3</sup>.

Химическая реакция взрывчатого превращения рассчитывалась в соответствии с принципом Бринкли-Вильсона [17]. Расчет теплофизических параметров эмульсии определялся на основании работы [61]. Подробно методика расчета теплофизических параметров приведена в Приложении 2.

В первой модели вязкость эмульсии в уравнении (2.62) рассчитывалась по уравнению

$$\eta = 6,5 - 0,6\Delta \text{ (Па*с)} \quad (2.82)$$

Для вывода уравнения (2.82) были выполнены вискозиметрические и микроскопические исследования для эмульсии указанного химического состава при различных размерах частиц дисперсной фазы эмульсии. Размер частиц дисперсной фазы эмульсии регулировался содержанием эмульгатора и определялся микроскопическим методом. Результаты указанных исследований приведены в Приложении 3.

Зависимости скорости детонации от размеров частиц эмульсии рассчитаны по моделям:

непрерывных сдвиговых деформаций – (кривая 1);

дискретных сдвиговых деформаций – (кривая 2).

Для сравнения на рис. 2.8 представлено решение для вязкой несжимаемой жидкости при сферически симметричном втекании вещества в пору – кривая 3.

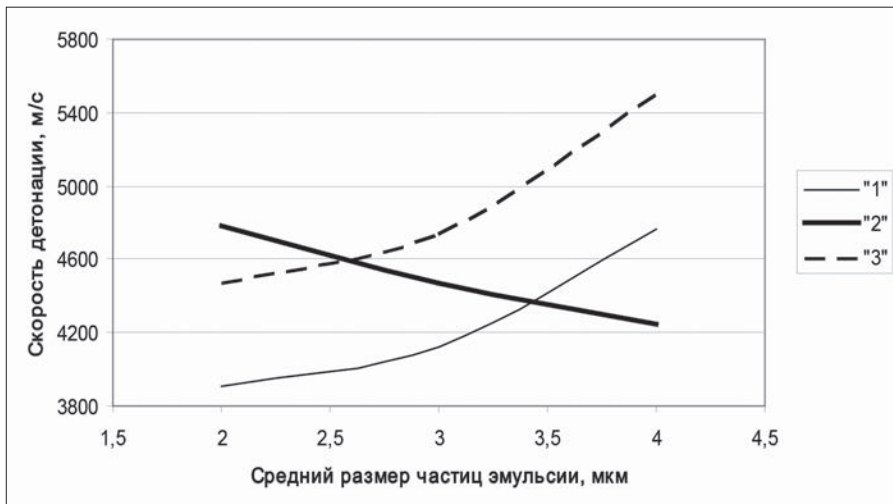


Рис. 2.8. Зависимости скорости детонации ЭВВ от размеров частиц эмульсии при различных моделях деформации вещества эмульсии.

Анализ графиков, представленных на рис. 2.8, показывает, что в случае представления эмульсии вязкой несжимаемой жидкостью скорость детонации с увеличением размеров частиц эмульсии возрастает. Однако это противоречит экспериментальным данным, приведенным в работах [117, 143, 219], согласно которым при увеличении размеров частиц эмульсии (при неизменных прочих параметрах) скорость детонации снижается.

В то же время модель дискретных сдвиговых деформаций (кривая 2) дает зависимость, согласующуюся с указанными экспериментальными данными. Это служит дополнительным подтверждением корректности модели среды ЭВВ, изложенной в п. 2.4.

Необходимо отметить, что изучение процессов формирования условий возникновения детонации в твердых индивидуальных ВВ показало, что при ударном нагружении образца ВВ непрерывная сетка линий скольжения в образце

перестраивается в локализованные полосы «адиабатического» сдвига [15, 86]. В результате инициирование ВВ происходит из-за трибомеханического разогрева поверхностей скольжения.

Таким образом, в расчетной модели детонации ЭВВ необходимо исходить из концепции, что при заполнении эмульсией газовой поры в режиме гидродинамического течения наблюдается дискретное сдвиговое деформирование вещества эмульсии в соответствии с механизмом, описанным в работе [202].

**2.5. Алгоритм расчета детонационных параметров ЭВВ, сенсibiliзированных газовыми порами**

На основании решений, приведенных в п. 2.2 – 2.4 и в приложениях 1, 2, предлагается следующий алгоритм расчета детонационных параметров ЭВВ для зарядов, имеющих диаметр больше предельного:

Задаемся уравнением химической реакции при взрывном разложении ЭВВ –  $\sum a_m A_m = \sum b_i X_i + \sum f_j Y_j$ ;

Находим массу ВВ –  $G = \sum a_m \mu_{A_m}$  и объем газообразных продуктов взрыва –  $\Delta b = \sum b_i$ ;

Определяем теплоту взрыва –

$$Q_V = -[\sum b_i Q_P^{X_i} + \sum f_j Q_P^{Y_j} - \sum a_m Q_P^{A_m} + 2,48\Delta b];$$

Находим удельный коволюм продуктов взрыва –  $\alpha = \frac{1}{G}[\sum b_i \alpha_i + \sum f_j \alpha_j]$ .

Используя метод итераций, решаем представленную ниже систему 9 уравнений (2.83) – (2.91) с 9 неизвестными  $\left(k, \rho_o^{zls}, \rho_o, z, D, \frac{U}{D}, T_B, T_{l,p}, \Delta T\right)$ :

$$a) T_B = T_o + \frac{GQ_V}{R\left(\sum \bar{c}_V^{(X_i)}(T_B) + 3\sum f_j \xi_j\right)}, \tag{2.83}$$

где  $\bar{c}_V^{(X_i)}(T_B) = \frac{c_V^{(X_i)}}{R}$ ;  $c_V^{(Z)} = \frac{5}{2}R + R\sum_p \frac{\left(\frac{\Theta_p}{T}\right)^2 e^{\frac{\Theta_p}{T}}}{\left(e^{\frac{\Theta_p}{T}} - 1\right)^2}$  – для 2-атомных или линей-

ных многоатомных молекул Z - вещества;

$$c_V^{(Z)} = 3R + R \sum_p \frac{\left(\frac{\Theta_p}{T}\right)^2 e^{\frac{\Theta_p}{T}}}{\left(e^{\frac{\Theta_p}{T}} - 1\right)^2} - \text{ для 3-атомных или многоатомных нелиней-}$$

ных молекул  $Z$  - вещества;  $\{\Theta_p\}$  – температура (температуры) Дебая  $Z$  – вещества;

$$\gamma = 1 + \frac{R\Delta b}{\sum b_i c_V^{(X_i)}(T)},$$

$$\text{где } T_* = 2T_B \left(\frac{k}{k+1}\right)^k \cdot \left(\frac{1}{K_+ \rho_o^{2\alpha}}\right)^{k-1} \cdot \frac{K_+ - 1}{K_+} \cdot \frac{1}{1 - \frac{k+1}{k} \rho_o^{2\alpha}}.$$

b)

$$\begin{aligned} & \frac{1}{k-1} + \frac{2(k-\gamma)}{(k-1)(\gamma-1)} \left(\frac{k}{k+1}\right)^k \left(\frac{1}{K_+ \alpha \rho_o^{2\alpha}}\right) + \frac{\sum_j \beta_j}{k+1} \left(1 + (k+1) \frac{U}{D}\right)^2 - \\ & - \frac{1}{k+1} \left[ k \cdot \frac{\frac{1}{\rho_{oo}} - \frac{1}{\rho_o}}{\frac{1}{\rho_{oo}} - \sum_j \frac{\beta_j}{\rho_j}} + \left(k+2 + (k+1) \frac{U}{D}\right) \cdot \left(1 + k \cdot \frac{\frac{1}{\rho_{oo}} - \frac{1}{\rho_o}}{\frac{1}{\rho_{oo}} - \sum_j \frac{\beta_j}{\rho_j}}\right) \frac{U}{D} \right] - \\ & - \frac{1}{k+1} \cdot \frac{\sum_j \beta_j - \rho_{oo} \sum_j \frac{\beta_j}{\rho_j}}{1 - \sum_j \beta_j} \cdot \left(1 + k \cdot \frac{\frac{1}{\rho_{oo}} - \frac{1}{\rho_o}}{\frac{1}{\rho_{oo}} - \sum_j \frac{\beta_j}{\rho_j}}\right) \left(1 + \left(k+2 + (k+1) \frac{U}{D}\right) \frac{U}{D}\right) = \\ & = \bar{C} \left(1 - \sum_j \beta_j\right) \left(1 - \frac{3 \sum_j f_j \xi_j}{\bar{C} \Delta b}\right) \left(1 - \frac{k+1}{k} \alpha \rho_o^{2\alpha}\right) \end{aligned} \quad (2.84)$$

$$\text{c) } \rho_o^{2\alpha} = \rho_o \frac{1 - \sum_j \beta_j}{1 - \rho_o \sum_j \frac{\beta_j}{\rho_j}}; \quad (2.85)$$

$$d) \rho_o = \rho_{oo}z + \rho_s(1-z); \quad (2.86)$$

$$e) D^2 = \frac{2(k+1)Q_v}{\bar{C} \left( 1 - \sum_j \beta_j \right) \left( 1 - \frac{k+1}{k} \alpha \rho_o^{2u3} \right)}; \quad (2.87)$$

$$f) \frac{U}{D} = \frac{\rho_o}{\rho_{oo}} \cdot \frac{1}{1 + \frac{\rho_o}{k} \sum_j \frac{\beta_j}{\rho_j}} - 1; \quad (2.88)$$

$$g) \Delta T = T_{AC}^* - T_{\nu p}; \quad (2.89)$$

$$h) T_{\nu p} = \frac{T_o + k_\varepsilon T_u}{1 + k_\varepsilon}, \quad (2.90)$$

$$\text{где } k_\varepsilon = \sqrt{\frac{\lambda_1 c_{1V} \rho_1}{\lambda_3 c_3 \rho_3}}, \quad T_u = T_o + \frac{v^2}{2c_{1V}}, \quad \rho_1 = \rho_o^0 \frac{\gamma_1 + 1}{\gamma_1 - 1},$$

$$\lambda_1(T_u) = \sum_i \alpha_i \lambda_i(T_o) \cdot \frac{T_o + C_{iS}}{T_u + C_{iS}} \cdot \left( \frac{T_u}{T_o} \right)^{\frac{3}{2}} \cdot \frac{1 + \frac{4}{9} \overline{C_{iV}}(T_u)}{1 + \frac{4}{9} \overline{C_{iV}}(T_o)},$$

$$v = \frac{D}{k+1} + U + \sqrt{\frac{2P_f}{3\rho_3} \left( \frac{1}{z} - 1 \right)}, \quad c_3 = \sum_{i=1}^{i=4} \alpha_i c_i,$$

$$\lambda_3 = \frac{1}{\left( 1 + \sum_{i=1}^{i=4} \delta_i \right) \left( \frac{1}{k_i} + 2 \sum_{i=1}^{i=4} \delta_i \right)} \left( \frac{1 + 2 \sum_{i=1}^{i=4} \delta_i}{\frac{1}{k_i} + 2 \sum_{i=1}^{i=4} \delta_i} + 4(k_2 \delta_2 + k_3 \delta_3 (1 + \delta_2) + k_4 \delta_4 (1 + \delta_2 + \delta_3)) \right);$$

$$i) z \cong 1 - \frac{\frac{D}{k+1} + U + \frac{1}{2} \sqrt{\frac{2P_f}{3\rho_3} \left( \frac{1}{z} - 1 \right)}}{2R_o} \cdot t, \quad (2.91)$$

$$\text{где } t = \frac{4\pi (T_{AC}^* - T_{\nu p})^2 \lambda_{AC} c_{AC}}{H_{mp}^2 \rho_{AC} \left( \frac{D}{k+1} + U + \sqrt{\frac{2P_f}{3\rho_3} \left( \frac{1}{z} - 1 \right)} \right)^6} \left( \frac{R_o}{\Delta} \right)^6$$

$$P_f = \rho_{oo} (D + U) \left( \frac{D}{k+1} + U \right).$$

Для проверки корректности предлагаемой методики расчетов детонационных параметров ЭВВ были проведены испытания эмульсионного ВВ Украинит-ПП-2, который представляет собой газонаполненную эмульсию на основе кальциевой и аммиачной селитры, на полигоне «Запорожвзрывпрома» и карьерах Ингулецкого ГОКа [56].

Результаты предварительных микроскопических исследований показали, что средний размер частиц эмульсии составляет 3 мкм.

Химический состав Украинит-ПП-2:  $NH_4NO_3$  – 44,0 %,  $Ca(NO_3)_2$  – 32 %,  $H_2O$  – 16,0 %, топливная фаза – 8,0 %.

Результаты полигонных испытаний показали, что в пластиковых трубах диаметром 100 мм при плотности ЭВВ 1,26 г/см<sup>3</sup> измеренная скорость детонации по методике, аналогичной описанным в работах [126, 144], составила 5110 м/с.

Результаты расчетов показывают, что достижимая скорость детонации при среднем радиусе пор 50 – 70 мкм и среднем размере частиц дисперсной фазы эмульсии 4 мкм составляет 5080 – 5270 м/с.

При испытании в скважинах диаметром 250 мм фиксируемые параметры: при плотностях ВВ 1,15 г/см<sup>3</sup> – 5107 м/с, при 1,21 г/см<sup>3</sup> – 5211 м/с. Дисперсность газовых включений в объеме эмульсии составляла 100 – 150 мкм.

По результатам расчетов при данном среднем диаметре «пор» соответствующие параметры равны 5260 и 5300 м/с.

Значения измеренных скоростей детонации при полигонных испытаниях (диаметр заряда 100 мм) и взрыве скважинных 250-миллиметровых зарядов практически совпадают, что свидетельствует о том, что диаметр 250 мм больше предельного.

Относительные отклонения расчетных параметров от экспериментальных не превосходят 3 %, что находится в пределах погрешности измерений скорости детонации современными приборами [126, 144].

Дополнительно в качестве обсуждения результатов определим детонационные параметры ЭВВ, исследуемые в работе [127], состав которых приведен в таблице 2.1. Расчетные и экспериментальные данные по скорости детонации представлены в таблице 2.2.

Химические реакции рассчитывались по методу Бринкли-Вильсона [17].

В качестве сенсibilизации использовались стеклянные, заполненные воздухом микросферы диаметром 80 мкм в количестве 3 % от веса эмульсии (сверх 100 %).

Средние значения расчетной скорости детонации по предложенной методике составляют:  $D_{AN} = 5343$  м/с;  $D_{AN-CaN} = 5240$  м/с;  $D_{AN-NaN} = 5088$  м/с.

Относительные отклонения расчетных параметров от экспериментальных не превосходят 2,7 %.

Таким образом, также наблюдается согласие между расчетными и экспериментальными данными.

Табл. 2.1. Составы ЭВВ [127]

ВВ	Массовое содержание компонентов, %						
	$NH_4NO_3$ (AN)	$H_2O$	Эмуль- гатор	Минер. Масло	Полибу- тадиен	$Ca(NO_3)_2$ $\cdot 4H_2O$ (CaN)	$NaNO_3$ (NaN)
AN	82,0	12,0	2,2	3,3	0,5	-	-
AN- CaN	65,6	13,0	2,0	3,6	0,8	15,0	-
AN- NaN	65,7	13,0	2,0	3,6	0,7	-	15,0

Табл. 2.2. Расчетные  $D$  и экспериментальные [127] значения скорости детонации

ВВ	Начальная плотность $\rho_{00}$ , кг/м <sup>3</sup>	$D_{exp}$ , м/с	$D_{ideal}$ , м/с по ВВК	$D$ , м/с (по предложенной модели в Главе 2)		
				Размер частиц эмульсии, мкм		
				1,5	2,0	2,5
AN	1062	5490	5973	5662	5318	5048
AN-CaN	1065	5095	5680	5602	5212	4908
AN-NaN	1079	5040	5584	5397	5066	4802



## Выводы по главе 2

Представлена физическо-математическая модель стационарной детонации зарядов ЭВВ, сенсibilизированных газовыми порами, с диаметром заряда больше предельного.

Согласно данной модели в начальный период под действием детонационной волны происходит втекание вещества ЭВВ в гидродинамическом режиме в сенсibilизирующие газовые поры. В процессе втекания происходит локальный разогрев и последующее возгорание вещества эмульсии, что приводит к развитию детонационного процесса. Процесс втекания вещества в пору происходит асимметрично, поэтому среда до начала химических реакций приобретает определенную скорость в направлении распространения детонационной волны. Процессы взрывчатого разложения начинаются и происходят уже в движущейся среде. Величина данной скорости определяется инерционными свойствами среды, фронтальным детонационным давлением и величиной промежутка времени между моментом подхода фронта детонационной волны к поре и моментом времени, соответствующим началу разложения. Для ВВ с относительно низкой чувствительностью данное приращение скорости может быть весьма существенным (сотни метров в секунду). При этом возгорание вещества под действием ударной волны в рассматриваемых ВВ осуществляется за счет совместного действия теплоты внутреннего трения при втекании эмульсии в пору и теплоты сжатых газов поры. Вещество ЭВВ, наряду с приобретением некоторой скорости движения в направлении распространения детонационной волны, перед началом экзотермического распада уплотняется. На осуществление данного процесса расходуется часть выделяемой при взрыве энергии, а детонационному превращению подвергается уплотненное и двигающееся в направлении детонации вещество ЭВВ.

На основе анализа имеющихся турбидиметрических и рентгенографических исследований структуры эмульсии ЭВВ, а также выполненных рентгенографических и реологических исследований указанного вещества показано, что при расчете условий возгорания эмульсии корректно представление, что окислительная фаза эмульсии ВВ состоит из твердофазных зародышей кристаллов селитры (селитр), покрытых пленками воды. Данное обстоятельство приводит к тому, что при втекании эмульсии под действием ударной волны в газовую пору будет наблюдаться развитие ее потока на дискретные слои.

Деформация вещества эмульсии будет происходить по локализованным слоям втекающего потока, а разогрев вещества будет происходить по контакту данных слоев.

На основании предложенной модели разработана физико-математическая методика расчета детонационных параметров ЭВВ, позволяющая осуществлять расчет всех основных детонационных параметров данных ЭВВ с учетом их рецептурно-технологических характеристик: плотности эмульсии, плотности и химического состава ЭВВ, размеров сенсibiliзирующих пор и частиц дисперсной фазы эмульсии.

Сравнение экспериментальных данных по скорости детонации ЭВВ, имеющих различные плотности, химический состав и структуру, с расчетными значениями данной величины, полученными на основе разработанной физико-математической модели, показало, что они находятся в удовлетворительном согласии.

### ГЛАВА 3. УСТОЙЧИВОСТЬ ДЕТОНАЦИИ ЭВВ

В главе 2 представлена физико-математическая модель описания стационарной детонации однородных бестарных ЭВВ. Однако в практике ведения взрывных работ с использованием бестарных ЭВВ, сенсibilизированных газовыми порами, приходится практически постоянно иметь дело с отклонениями от условий однородности ЭВВ и стационарности процесса детонации:

при взрывании вертикальных (наклонных) скважинных зарядов ЭВВ наблюдается неоднородность ЭВВ в направлении распространения детонации, обусловленная изменением плотности ЭВВ, т.к. размеры газовых пор зависят от гидростатического давления в ЭВВ [92, 193];

возникают режимы распространения детонации со скачкообразным изменением скорости, свидетельствующие о проявлении нестационарности детонационных процессов [22, 53, 62, 155, 156].

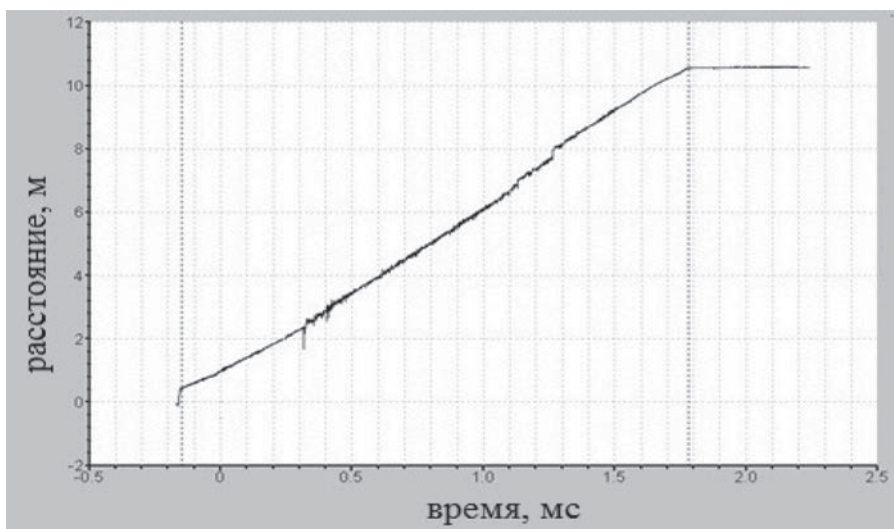


Рис. 3.1. Зависимость расстояния, пройденного детонационной волной от времени (карьер «Хайбулинский») [156].

Наряду со скачкообразным изменением скорости детонации при взрывании вертикальных (наклонных) скважинных зарядов ЭВВ имеются многочисленные измерения в промышленных условиях скорости детонации бестарных ЭВВ, сенсibilизированных газовыми порами, по длине вертикального (крутонаклонного) скважинного заряда, которые свидетельствуют о прохождении

детонации по всей длине заряда с практически постоянной скоростью. Для иллюстрации сказанного на рис. 3.1 представлена запись зависимости расстояния, пройденного детонационной волной, от времени, выполненная авторами [156] при проведении исследовательских работ на карьере «Хайбулинский» (ООО «Башкирская медь»).

Длина скважины – 16 м. Применяемое ЭВВ – Фортис-100 ( $NH_4NO_3$  – 75,2 % +  $H_2O$  – 18,8 % + 6 % топлив. фаза).

Длина заряда – 10,1 м. Средняя плотность ЭВВ – 1,10 г/см<sup>3</sup>. Плотность эмульсии ЭВВ – 1,33 г/см<sup>3</sup>. Диаметр скважины – 216 мм.

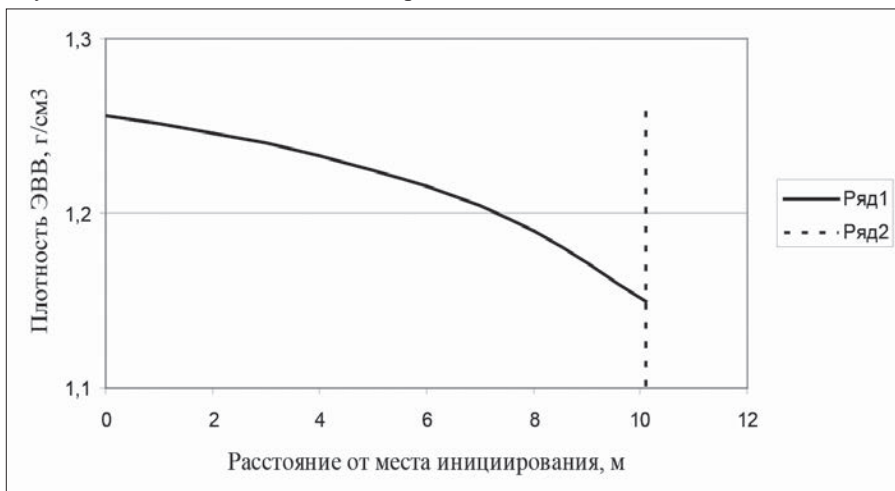


Рис. 3.2. Плотность ЭВВ в зависимости от удаления от места инициирования (----- – верхняя граница скважинного заряда). Зависимость построена на основании методики, изложенной в работе [193].

Конструкция заряда – колонковая. Иницирование – нижнее, шашкой ПДП-600. Коэффициент крепости горных пород по Протодяконову  $f = 8$ . Уровень воды в скважине на 4 м выше верхней границы заряда.

Согласно [92, 193] в вертикальных (наклонных) скважинах при применении бестарных ЭВВ, сенсibiliзированных газовыми порами, наблюдается уплотнение ЭВВ под действием гидростатического давления. На рис. 3.2 представлена зависимость изменения плотности ЭВВ «Фортис-100» от удаления от места инициирования заряда для опыта, описываемого выше.

Расчеты показали, что плотность ЭВВ в нижней части заряда равна 1,26 г/см<sup>3</sup>, а в верхней части – 1,16 г/см<sup>3</sup>. Плотность в нижней части заряда

ниже критического значения плотности согласно [92] ( $1,28 \text{ г/см}^3$  – для ЭВВ с эмульсией плотностью  $1,33 \text{ г/см}^3$ ), выше которой возбуждение детонации трудноосуществимо. Разница в плотности ЭВВ по длине заряда составляет  $0,1 \text{ г/см}^3$ . Согласно [117, 183] вследствие разности плотностей ЭВВ скорость детонации в верхней части заряда должна быть почти на  $500 \text{ м/с}$  меньше, чем в нижней части. Однако этого не наблюдается. Следовательно, детонационный процесс в ЭВВ переменной плотности, имеющий представленный на рис. 3.1 характер изменения скорости детонации по длине заряда, происходит в нестационарном режиме.

### **3.1. Теоретический анализ неустойчивости детонации ЭВВ, сенсibilизированных газовыми порами**

Материалы данного параграфа основываются на результатах работ [48, 54, 213].

Согласно модели детонации Зельдовича-Неймана-Деринга химическая реакция инициируется одновременно по всему фронту детонационной волны, а вещество ВВ до ударного перехода не разлагается и сохраняет свою природу [96, 211, 233]. Структура детонационной волны в этом случае однородна и стационарна по всей ее площади.

Однако экспериментальные исследования показывают, что фактическая структура детонационной волны в гетерогенных ВВ является нестационарной и существенно трехмерной [68 – 70, 78, 79, 81, 82, 115, 128, 129].

Данное обстоятельство обуславливает возникновение неустойчивых и пульсирующих режимов детонации в смесевых (смесь твердых порошков типа «ВВ+ВВ», «ВВ+ инертное вещество», «аммиачная селитра + жидкое горючее», «ВВ+ вода (раствор селитры)» [68 – 70, 128], индивидуальных жидких ВВ [78, 79, 81, 82] и даже в плотных смесевых сплавах индивидуальных взрывчатых веществ [115]. Прорыв струй как в зону реакции, так и вперед детонационного фронта при детонации гранулированных ВВ отмечено в работе [129].

В работах [119, 204] изучалась зона реакции ЭВВ с регистрацией профилей массовой скорости с помощью лазерного доплеровского интерферометра VISAR и рентгеновской томографией плотности вещества в зоне реакции с помощью синхротронного излучения от электронного ускорителя ВЭП-3. Анализ экспериментальных данных, полученных при этих исследованиях, а также теоретические представления работ [72, 129, 148, 167] показывают, что для

детонационной волны в ЭВВ корректно следующее представление о зоне реакции – зона реакции имеет двухслойную структуру [136]:

головная часть – зона сжатия, представленная конденсированным веществом, в расширяющихся из-за горения порах которого происходит разложение ЭВВ;

газовая часть – зона, представленная сильно уплотненным газовым телом, в котором происходит догорание ЭВВ.

При распространении детонационной волны в ЭВВ возможны следующие проявления неустойчивости во фронте детонационной волны, представленном внешней поверхностью зоны сжатия:

на поверхности зоны сжатия возникают экспоненциально возрастающие со временем возмущения, обуславливающие разрыв детонационной волны на неограниченно возрастающие струи;

на поверхности зоны сжатия возникают устойчивые возмущения (состояние нейтральной устойчивости).

Возмущения, возникающие на поверхности зоны сжатия, являются экспоненциально угасающими со временем (состояние абсолютной устойчивости).

В работах [90, 121] получены критерии неустойчивостей при распространении ударных волн в произвольных средах. При определении данных критериев использовались только требование эволюционности ударных волн и условия непрерывности потоков плотностей массы, энергии и импульса [140]. Указанные условия непрерывности выполняются и на детонационной волне в ЭВВ. Следовательно, критерии Дьякова-Конторовича [90, 121] применимы к описанию неустойчивости фронта детонационной волны в ЭВВ.

Введем обозначения:

$j$  – плотность потока массы;  $v$ ,  $c$  – скорость распространения детонационной волны относительно движущегося вещества и скорость звука в веществе на границе «зона сжатия – газовая зона»;  $D$  – скорость распространения детонационной волны.

В соответствии с [90, 121, 140] имеем следующие условия неустойчивости зоны сжатия:

$$1). \text{ При } j^2 \frac{dV_f}{dP_f} < -1 \quad (3.1)$$

$$\text{или } j^2 \frac{dV_f}{dP_f} > 1 + 2 \frac{v}{c} \quad (3.2)$$

на поверхности зоны сжатия возникают экспоненциально возрастающие со временем возмущения. Происходит разрыв детонационной волны на неограниченно возрастающие струи.

$$2). \text{ При } \frac{1 - \frac{v^2}{c^2} - \frac{vD_s}{c^2}}{1 - \frac{v^2}{c^2} + \frac{vD_s}{c^2}} < j^2 \frac{dV_f}{dP_f} < 1 + 2\frac{v}{c} \quad (3.3)$$

на поверхности зоны сжатия возникают устойчивые возмущения /нейтральная устойчивость/.

$$3). \text{ При } -1 < j^2 \frac{dV_f}{dP_f} < \frac{1 - \frac{v^2}{c^2} - \frac{vD_s}{c^2}}{1 - \frac{v^2}{c^2} + \frac{vD_s}{c^2}} \quad (3.4)$$

на поверхности зоны сжатия возникают экспоненциально угасающие со временем возмущения, и процесс распространения детонации описывается одномерной теорией Зельдовича-Неймана-Деринга (абсолютная устойчивость) [96, 211, 233].

При выполнении оценочных расчетов исходим из следующих положений: скорость ударной волны равна

$$D_y = A + BW, \quad (3.5)$$

где  $A, B$  – параметры ударной адиабаты в линейной форме;

$W$  – массовая скорость за фронтом ударной волны;

поведение неразложившегося вещества в зоне сжатия удовлетворяет закону Тэта [17, 190]

$$P = \frac{k_s}{n} \left[ \left( \frac{V_o}{V} \right)^n - 1 \right] + P_a, \quad (3.6)$$

где  $P$  – давление в веществе;

$k_s$  – модуль объемного сжатия при  $V = V_o$  ( $V_{o0}$  – начальный удельный объем /т. О на рис. 3.3/  $V_o, V_f$  – удельные объемы в момент начала экзотермической реакции в поре и в момент наибольшего сжатия соответственно /т. А(А1), С(С1)/ на рис. 3.3),  $P_a$  – давление в веществе при  $V = V_o$ ;  $V$  – удельный объем;  $n$  – степенной параметр Тэта.

Поведение разложившегося вещества ВВ (взрывных газов), заполняющего расширяющиеся поры в момент их слияния (момент распада зоны сжатия детонационной волны) будем описывать законом Абеля [17, 32].

Согласно оценкам, в рассматриваемом случае справедливо соотношение

$$P_f \gg P_a. \quad (3.7)$$

Тогда на основании (3.6) определяем 
$$\frac{dV_f}{dP_f} = -\frac{V_f}{nP_f + k}, \quad (3.8)$$

где  $k \approx \frac{A^2}{V_o}$ . 
$$(3.9)$$

Невыполнимость условий (3.1) и (3.2) следует из простых соображений.

Действительно, согласно (3.8)  $\frac{dV_f}{dP_f} < 0$ , следовательно, условие (3.2) не

выполняется.

Тогда, учитывая, что  $j = \frac{D_*}{V_{oo}} = \frac{D_* - W'}{V_*}$  
$$(3.10)$$

где  $W'$  – массовая скорость в т.  $V_*$ , а  $P_f = \frac{D_* W'}{V_{oo}}$ , на основании (3.1), (3.8)

будем иметь следующее неравенство: 
$$\left( \frac{D_*}{W'} - 1 \right) \frac{1}{V_*} > \frac{n}{V_f} \left( 1 + \frac{k}{nP_f} \right). \quad (3.11)$$

Однако данное неравенство не выполняется.

Действительно, имеем:  $\frac{D_*}{W'} - 1 < k$  [42];  $\frac{1}{V_*} < \frac{1}{V_f}$  [17, 190];  $n > k$  [154].

Тогда, с учетом (3.11.) имеем

$$\frac{n}{V_f} \left( 1 + \frac{k}{nP_f} \right) > \frac{n}{V_f} > \frac{k}{V_*} > \left( \frac{D_*}{W'} - 1 \right) \frac{1}{V_*}. \quad (3.12)$$

Таким образом, неравенство (3.11) не выполняется. Это свидетельствует о том, что предположение о выполнении (3.1) для ЭВВ неверно.



Следовательно, в ЭВВ разрыва детонационной волны на неограниченно возрастающие струи не происходит.

Реализуются только режимы детонации, когда на поверхности зоны сжатия возникают или устойчивые возмущения, или экспоненциально угасающие со временем возмущения. В случае угасающих со временем возмущений будет наблюдаться стационарная детонация с гладким детонационным фронтом.

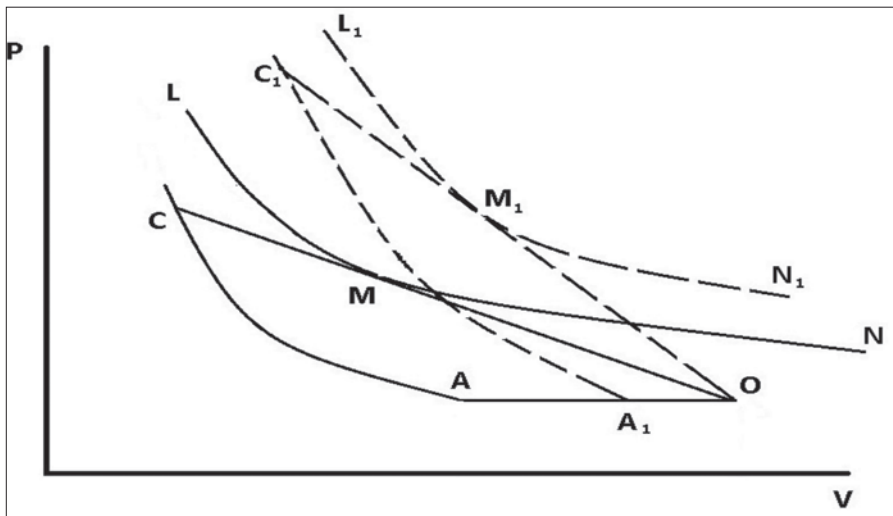


Рис. 3.3. P-V- диаграмма ЭВВ, сенсibilизированного газовыми порами.

Данный вывод согласуется с исследованиями [12] и [122, 123].

В работе [12] авторы на основе теоретического анализа устойчивости детонационных волн в конденсированных ВВ на примере литого тротила показали, что в этом случае неограниченно возрастающих деформаций детонационного фронта не происходит.

В работах [122, 123] доказывается, что при распространении ударных волн в вандерваальсовском газе разрыва фронта ударной волны не происходит, а возможны только абсолютно устойчивые или нейтрально устойчивые режимы распространения данных волн. К числу сред, в которых возможно распространение ударной волны в режиме нейтральной устойчивости, относятся жидкости, находящиеся в области фазового перехода «жидкость-газ» [122]. При прохождении ударной волны через данную среду происходит переход ее (полностью или частично) в газообразное состояние. Во многом подобный

процесс происходит при прохождении детонационной волны по ЭВВ, сенсibilизированному газовыми порами, когда ударная волна инициирует в «горячих точках» распад конденсированного вещества ЭВВ на газообразные продукты. Однако у данных процессов есть различие:

- в первом случае среда, испаряясь, поглощает энергию ударной волны;
- во втором – при распаде среды на газы происходит выделение энергии.

Согласно исследованиям [158, 212] при выполнении условия  $\frac{dV_f}{dP_f} < 0$

протекание химической реакции за фронтом детонационной волны не влияет на устойчивость этой волны. Устойчивость детонационной волны будет определяться устойчивостью ее фронта, представляющего из себя фронт ударной волны, распространяющейся по ВВ. Следовательно, ЭВВ, сенсibilизированные газовыми порами, относятся к средам, в которых возможно распространение ударной волны в режиме нейтральной устойчивости. Однако нейтральная устойчивость может реализовываться в случае, если изохорная теплоемкость вещества превышает  $5R$  [123]. В зоне сжатия, являющейся головной частью детонационной волны в ЭВВ, вещество представляет собой смесь неразложившейся эмульсии и продуктов детонации. Наличие конденсированной фазы обуславливает то, что даже минимальное значение изохорной теплоемкости данной смеси, достигаемое в момент соприкосновения сфер горения от смежных «горячих точек», будет удовлетворять указанному условию  $I2R > 5R$ .

В случае возникновения на поверхности зоны сжатия устойчивых возмущений (гофрировки) детонационного фронта в областях выпуклости детонационной волны (по направлению к зоне реакции) возникают зоны повышенного давления [140, 152]. Это обусловлено тем обстоятельством, что продукты детонации, двигаясь вглубь данной области, будут находиться в стесненных условиях и их сжатие, будет передаваться фронту волны (аналогично случаям, рассмотренным в работах [2, 97, 187]). Кроме этого, в случае нейтральной устойчивости будет наблюдаться косое отражение звуковых волн, спонтанно испускаемых детонационным фронтом, от поверхности разрыва [90, 140]. Таким образом, при данном режиме происходит концентрация энергии реакции в указанных областях, что создает высокую энергетическую плотность в этих частях зоны реакции и снижает в других. В итоге данные процессы обуславливают возникновение поперечных ударных волн, приводящих к формированию

многофронтного (ячеистого) режима детонации. Данный вывод подтверждается численными экспериментами, выполненными в работе [124]. Многомерные 2D- и 3D-расчеты показали, что при распространении в вязком газе ударной волны с периодическим возмущением ее фронта во фронте «формируется «ячеистая» структура с конечной по величине амплитудой возмущений, не убывающей и не растущей во времени» [124].

Необходимо отметить, что возникновение данного режима детонации порождает автоколебательные процессы, вызываемые перераспределением тепловой и кинетической энергии взрывных газов в зоне химической реакции ЭВВ. В случаях, когда в кинетическую энергию взрывных газов переходит слишком большое количество внутренней энергии, фронт детонационной волны начинает отрываться от газовой зоны реакции. Однако это одновременно снижает давление во взрывных газах в зоне реакции, что приводит к торможению детонационного фронта. Торможение же приводит к росту теплового давления в газах, которое снова способствует ускорению детонационного фронта и т.д. Рост амплитуды данных пульсаций с неизбежностью приводит к ликвидации рассматриваемого режима детонации.

При разрушении ячеистой структуры фронта ликвидируются поперечные детонации, что приводит к снижению температуры в зоне реакции и замедлению химических процессов. Это обуславливает резкое возрастание критического диаметра, экспериментально зафиксированное в исследованиях [139]. В результате возникают явления перехода детонации на низкоскоростные режимы или даже обрыв детонации.

Необходимо отметить, что возникновение автоколебательных процессов при распространении детонации в порошковых гетерогенных ВВ, содержащих индивидуальное ВВ, и игданитах, а также их роль в устойчивости детонационной волны для указанных гетерогенных ВВ впервые отмечена в работах [69, 70, 128].

Однако приведенные рассуждения о влиянии ячеистой структуры фронта детонационной волны на устойчивость ее распространения нуждаются в экспериментальном подтверждении существования этой структуры при детонации ЭВВ.

Следующий параграф посвящен экспериментальному доказательству, что при детонации ЭВВ в зоне реакции формируются ячеистые структуры.

### 3.2. Экспериментальное подтверждение ячеистой структуры детонационного фронта в ЭВВ

Многофронтную (ячеистую) структуру зоны химических реакций в ЭВВ удалось зафиксировать в ходе специальных опытов [53, 62].

Были выполнены опытные взрывы цилиндрических зарядов ЭВВ с использованием эмульсий, изготовленных с окислительной фазой как на монорастворе аммиачной селитры, так и на бинарных растворах селитр (АС + кальциевая селитра; АС + натриевая селитра). В опытах осуществлялась:

фиксация отпечатков воздействия взрывных газов при истечении с боковой поверхности заряда на свинцовой пластине;

фиксация пульсаций детонационного давления в центральной области заряда при помощи медной трубки, размещенной по оси заряда.

ЭВВ инициировалось от промежуточного детонатора, состоящего из патрона Аммонита 6ЖВ-32 (250 гр., 32 мм диам.) и детонирующего шнура ДШЭ-12. Используемое ЭВВ – смесь эмульсии с пенополистиролом в объемном соотношении. На рис. 3.4 – 3.11 приведены характерные результаты опытов. Показано воздействие на свинцовую пластину (рис. 3.5) взрывных газов при взрыве заряда ЭВВ (плотность –  $1,02 \text{ г/см}^3$ , длина – 1000 мм, диаметр – 90 мм) с окислительной фазой на основе АС.

На рис. 3.4 приведена зависимость длины пробега детонационной волны от времени. Запись сделана на приборе Handi Trap.

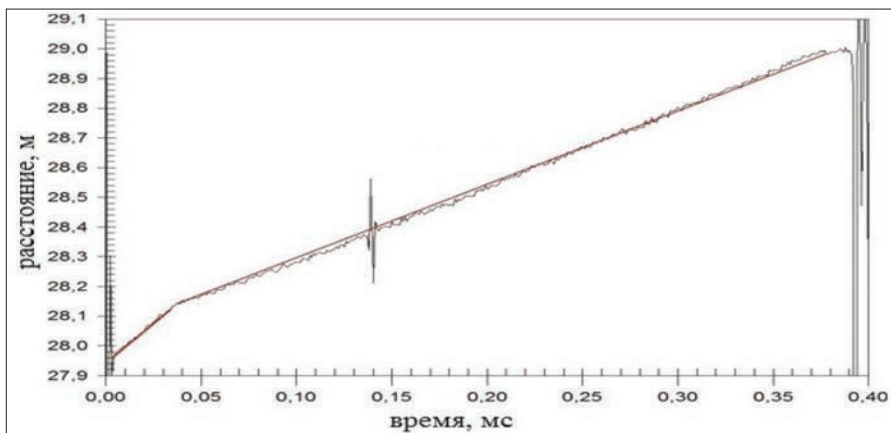


Рис. 3.4. Зависимость длины пробега детонационной волны от времени (первое значение скорости (на участке 20 см) – патрон Аммонита 6ЖВ, второе значение скорости (на участке 85 см) – ЭВВ).

На рис. 3.6, 3.7 показано взаиморасположение цилиндрического заряда ЭВВ и свинцовой пластинки.

На рис. 3.8, 3.9 представлены имеющие регулярный характер отпечатки на свинцовой пластине от воздействия на нее взрывных газов при истечении с боковой поверхности заряда, а на рис. 3.11 показана регулярная деформация медной трубки, помещенной перед взрывом вдоль оси цилиндрического заряда (рис. 3.10).

Анализ результатов опытов показывает, что детонация в эмульсионных взрывчатых веществах (ЭВВ), сенсibilизированных газовыми порами, проходит с образованием ячеистой структуры фронта детонационной волны.

Согласно данным работ [69, 70, 128] при распространении в гетерогенных ВВ детонации с ячеистой структурой фронта волны могут возникать прогрессирующие пульсации давления и температуры продуктов взрыва в детонационном фронте, обуславливающие переход детонации в ЭВВ на низкоскоростные режимы или даже обрыв процесса.



Рис. 3.5. Свинцовая пластинка (длина x ширина x толщина – 220 x 150 x 12 мм), зафиксированная скобами на песчаной подушке.





Рис. 3.6. Расположение заряда ВВ относительно пластины-свидетеля.



Рис. 3.7. Расположение заряда ВВ с пластиной-свидетелем в плане.



Рис. 3.8. Общий вид пластины после взрыва.



Рис. 3.9. Пластина-свидетель после взрыва. Красным цветом отмечены бороздки.





Рис. 3.10. Медная трубка в заряде ЭВВ. Показан момент вставки ее снизу заряда ЭВВ.



Рис. 3.11. Медная трубка до и после взрыва.



### 3.3. Условие возникновения нейтральной устойчивости детонационной волны в ЭВВ

При рассмотрении обозначенного вопроса следуем работам [53-55, 58].

Согласно [30] при детонации ВВ, в отличие от других режимов химического превращения этого вещества, полная энергия вещества в зоне реакции превышает энергию этого превращения.

В точке окончания реакции полная удельная энергия продуктов взрыва будет равна

$$\varepsilon = Q_v + P_{c,r} (V_{00} - V_{c,r}), \quad (3.13)$$

где  $P_{c,r}$ ,  $V_{c,r}$ , – давление и удельный объем продуктов взрыва в момент окончания химической реакции (точка  $(P_{c,r}, V_{c,r})$  лежит на адиабате продуктов детонации, построенной в PV- координатах).

При этом общем случае  $P_{c,r} \neq P$ ,  $V_{c,r} \neq V$ . [17, 30, 190].

В случае плоского детонационного фронта выделение энергии происходит только в прямой волне падения на детонационный фронт (в системе координат, связанной с фронтом волны). При этом в случае стационарной самоподдерживающей детонации выполняется условие  $P_{c,r} = P$ ,  $V_{c,r} = V$ . [17, 190]. Распространение детонационной волны с параметрами  $P_{c,r} > P$ ,  $V_{c,r} < V$  (пересажатая детонация) возможно только при наличии поршня, подпирающего зону реакции и перемещающегося вслед за зоной реакции со скоростью детонационной волны [17, 140].

Согласно п. 3.2 при распространении детонационной волны в ЭВВ в режиме нейтральной устойчивости детонационного фронта образуется ячеистая структура детонационного фронта с конечной по величине амплитудой возмущений, не убывающей и не растущей во времени. Следовательно, если при формировании детонационной волны в ЭВВ в зону реакции поступит энергия больше необходимой по условию Чепмена-Жуге, то ее плотность будет поддерживаться особенностью прохождения реакций в ячеистом фронте, созданном на базе нейтральной устойчивости детонационного фронта. В этих условиях поперечные детонации, свойственные ячеистой структуре, проходят в пересжатом режиме и создают более высокие давление и температуру в зоне реакции по сравнению с плоской детонационной волной. Это в свою очередь создает условия для увеличения скорости реакций (соответственно, уменьшения ширины зоны реакции и снижения критического и предельного диаметра)

и увеличения скорости детонации. Детонация ЭВВ будет проходить в пересжатом (по сравнению с плоским фронтом) режиме.

Таким образом, в случае нейтральной устойчивости детонационного фронта детонационная волна в ЭВВ приобретает особое свойство по сравнению с плоской волной в индивидуальных ВВ. В индивидуальных ВВ амплитуда и скорость детонационной волны определяются плотностью удельной химической энергии вещества ВВ. В ЭВВ на детонационную волну влияют не только плотность и химическая энергия ЭВВ, но и состояние продуктов детонации за фронтом волны.

Представим уравнение (3.13) в следующем виде

$$Q_v + P_{c,r} (V_{oo} - V_{c,r}) = k_n Q_v + P (V_{oo} - V_*), \quad (3.14)$$

где  $k_n$  - коэффициент пересжатости, показывающий относительное (относительно  $Q_v$ ) возрастание работы сил ударного сжатия вещества ЭВВ и кинетической энергии продуктов взрыва по отношению к аналогичным параметрам при детонации с плоским фронтом в режиме Чепмена-Жуге.

Из (3.14) и политропической зависимости между давлением во взрывных газах и их удельным объемом имеем

$$k_n \approx 1 + \frac{P_*}{\rho_{oo} Q_v} \left[ \frac{P_{c,r}}{P_*} \left( 1 - \frac{k}{k+1} \left( \frac{P_*}{P_{c,r}} \right)^{\frac{1}{k}} \right) - \frac{1}{k+1} \right]. \quad (3.15)$$

Фактически рассматривается усреднение по объему образующихся детонационных ячеек, прилегающих к поверхности детонационной волны, а не по плоскому сечению, перпендикулярному распространению детонационной волны, как в [188], где рассмотрено усреднение параметров продуктов детонации в порошкообразных и гранулированных ВВ.

На основании (3.14) и (3.15) находим выражение для определения коэффициента увеличения полной удельной внутренней энергии вещества  $k_{\text{вн.энерг}}$  в зоне реакции при пересжатии детонации:

$$k_{\text{вн.энерг}} = \frac{k_n Q_v + P_* (V_{oo} - V_*)}{Q_v + P_* (V_{oo} - V_*)} = 1 + \frac{k_n - 1}{1 + \frac{P_*}{(k+1)\rho_{oo}Q_v}}. \quad (3.16)$$

Расчет параметров детонации ЭВВ в пересжатом режиме можно вести по методике, изложенной в гл. 2, если вместо  $Q_v$  использовать величину

$$Q_{эфф} = k_n Q_v, \quad (3.17)$$

что является отражением неравномерности давления и температуры в зоне химической реакции при ячеистой детонации.

Процесс детонации в этом случае на P-V-диаграмме будет описываться штриховыми линиями (рис. 3.3). Анализ рис. 3.3 показывает, что чем выше давление в падающей ударной волне, тем меньше достигаемая плотность ЭВВ. Это полностью согласуется с выводом работы [95] о нагружении пористых тел ударными волнами (при высокой пористости тел их разогрев при ударном сжатии может быть настолько большим, что чем больше давление в ударной волне, тем меньше достигаемая плотность при ударном сжатии).

$$\text{Согласно (3.8) в случае ЭВВ } \frac{dV_f}{dP_f} < 0, \text{ поэтому условие } j^2 \frac{dV_f}{dP_f} < 1 + 2 \frac{v}{c}$$

выполняется всегда. Тогда, в соответствии с (3.5), для формирования детонационного фронта с нейтральной устойчивостью необходимо выполнение условия

$$j^2 \frac{dV_f}{dP_f} < \frac{1 - \frac{v^2}{c^2} - \frac{vD_*}{c^2}}{1 - \frac{v^2}{c^2} + \frac{vD_*}{c^2}}. \quad (3.18)$$

На основании (3.10) и (3.12) неравенство (3.18) можно переписать в виде

$$\frac{\frac{v^2}{c^2} + \frac{vD_*}{c^2} - 1}{1 - \frac{v^2}{c^2} + \frac{vD_*}{c^2}} - \frac{D_*^2}{V_{00}^2} \frac{V_f}{nP_f + k_*}.$$

Введем в рассмотрение коэффициент гофрировки

$$k_{гофр} = \frac{\frac{v^2}{c^2} + \frac{vD_*}{c^2} - 1}{1 - \frac{v^2}{c^2} + \frac{vD_*}{c^2}} - \frac{D_*^2}{V_{00}^2} \frac{V_f}{nP_f + k_*}, \quad (3.19)$$

Если ввести в рассмотрение число  $n = \frac{D_s}{W'} - 1$  (показатель политропы

продуктов взрыва при однополитропном приближении [17, 190]), то условие (3.19) запишется в виде неравенства

$$k_{\text{зофр}} = \frac{\left(1 + \frac{V_f}{V_{o0}}\right) \frac{V_f}{V_{o0}} \left(\frac{D_s}{c}\right)^2 - 1}{\left(1 - \frac{V_f}{V_{o0}}\right) \frac{V_f}{V_{o0}} \left(\frac{D_s}{c}\right)^2 + 1} - \frac{V_o - V_f}{V_o + V_f} \left(\frac{V_o}{V_f} (n_s + 1) - 1\right) > 0. \quad (3.20)$$

Из вышесказанного ясно, что если  $k_{\text{зофр}} > 0$ , то возникает нейтральная устойчивость детонационного фронта, при которой возможно распространение волны в пересжатом режиме; если  $k_{\text{зофр}} < 0$ , то нейтральная устойчивость становится невозможной, детонация возможна только с плоским фронтом в устойчивом режиме. Пересжатия детонации не происходит.

На рис. 3.12 приведены зависимости скорости детонации в ЭВВ ( $NH_4NO_3 - 75\%$ ,  $H_2O - 19\%$ , топлив. фаза  $- 6\%$ ) при различных  $k_n$  при нижнем инициировании 12-метрового скважинного заряда (величина частиц дисперсной фазы эмульсии  $- 2,5$  мкм, радиус газовых пор при внешнем давлении 1 атм  $- 50$  мкм, плотность при атмосферном давлении  $- 1,07$  г/см<sup>3</sup>).

Сравнение зависимостей скорости детонации, приведенных на рис. 3.12, с экспериментальными данными, представленными на рис. 3.16, показывает их качественное совпадение.

Это свидетельствует о корректности наших представлений о закономерностях распространения детонационных волн в ЭВВ.

Срыв детонации объясняется изменением структуры ЭВВ (укрупнение газовых пор) по мере продвижения детонационной волны вверх по заряду.

Аналитически это проявляется в переходе в зону  $k_{\text{зофр}} < 0$ . Укрупнение газовых пор приводит не только к изменениям в структуре ЭВВ, но и к изменениям их плотности.

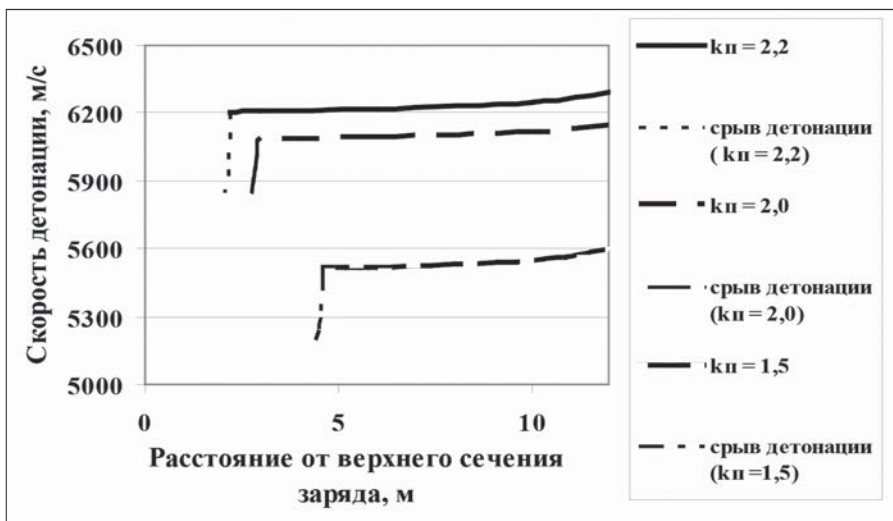


Рис. 3.12. Зависимость скорости детонации по длине скважинного заряда при нижнем инициировании при различных значениях  $k_p$  ( $x=0$  – верх заряда;  $x=12$  – точка инициирования).

Область допустимых значений начальной плотности ЭВВ, при которых детонация происходит в режиме нейтральной устойчивости (высокоскоростном режиме), имеет следующие границы: сверху область ограничена прямой «максимально допустимой плотности» [92], слева – величиной минимально возможного радиуса поры (1.1), снизу – кривой «границной плотности». Положение нижней границы соответствует таким плотностям ЭВВ, меньше которых возможно распространение только абсолютно устойчивого процесса.

На рис. 3.13, 3.14 представлены области, где детонационный процесс проходит в режиме нейтральной устойчивости и в режиме абсолютной устойчивости (рассматриваются заряды без забойки, в том числе водяной).

Рис. 3.13 соответствует эмульсии, имеющей следующий химический состав:  $NH_4NO_3$  – 75 %,  $H_2O$  – 18 %, топлив. фаза – 7 %. Размер частиц эмульсии – 2 мкм, плотность матричной эмульсии – 1,33 г/см<sup>3</sup>.

На рис. 3.13 нанесены отрезки линий (с I-I по IV), а на рис. 3.14 – отрезки Ia-Ia, IIa-IIa, IIIa-IIIa, соответствующие зависимостям плотности ЭВВ от размера газовых пор в вертикальных скважинных зарядах, характеристики которых указаны на рисунках. Здесь  $h$  – расстояние от верхнего сечения до текущего сечения заряда.

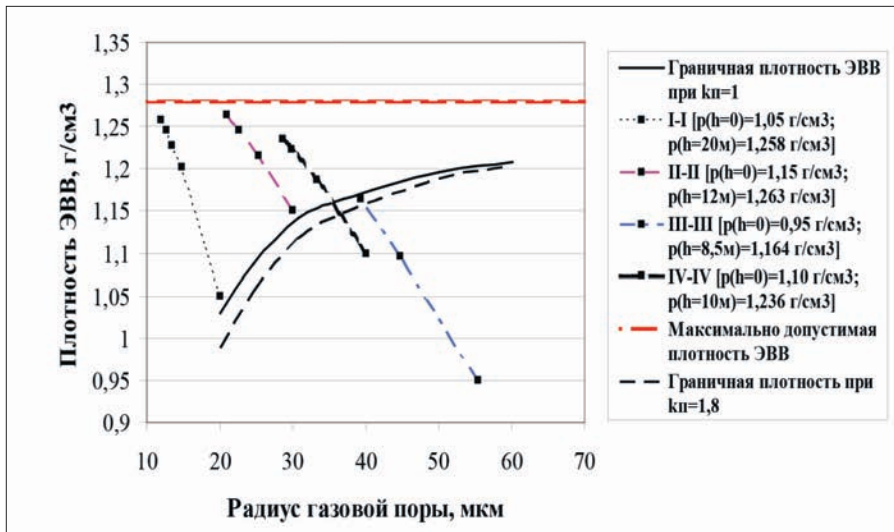


Рис. 3.13. Зависимость граничной плотности ЭВВ состава 1 от радиуса газовых пор при размере частиц эмульсии 2 мкм.

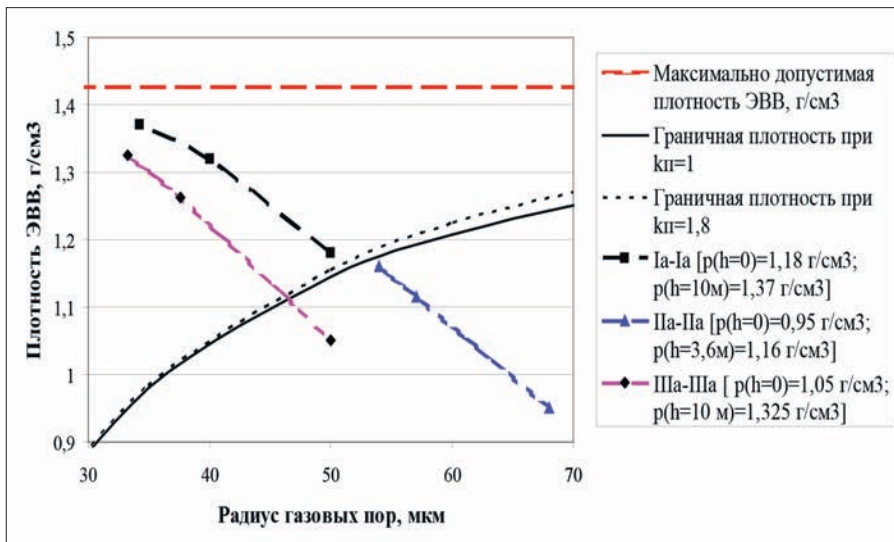


Рис. 3.14. Зависимость граничной плотности ЭВВ состава 2 от радиуса газовых пор при размере частиц эмульсии 3,5 мкм.

Рис. 3.14 соответствует эмульсии, имеющей следующий химический состав:  $NH_4NO_3$  – 45,45 %,  $Ca(NO_3)_2$  – 30 %,  $H_2O$  – 16 %, топлив. фаза – 8,55%. Размер частиц эмульсии – 3,5 мкм, плотность матричной эмульсии – 1,487 г/см<sup>3</sup>.

Детонация скважинных зарядов I-I, II-II (рис. 3.13), Ia-Ia (рис. 3.14) при нижнем инициировании проходит в высокоскоростном режиме без «срывов» процесса, т.к. параметры данных зарядов целиком расположены в области нейтральной устойчивости.

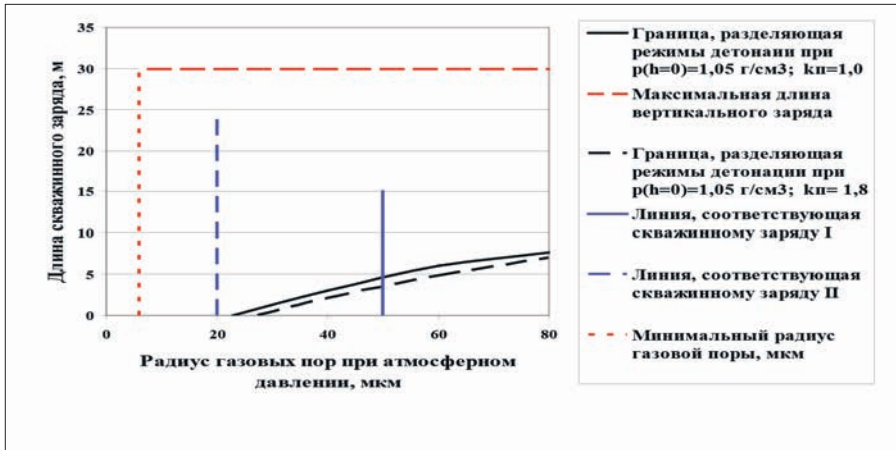
Детонация скважинных зарядов III-III (рис. 3.13), IIa-IIa (рис. 3.14) при нижнем инициировании проходит в режиме абсолютной устойчивости процесса, т.к. параметры данных зарядов целиком расположены в области абсолютной устойчивости.

Детонация скважинных зарядов IV-IV (рис. 3.13), IIIa-IIIa (рис. 3.14) при нижнем инициировании начинает проходить в высокоскоростном режиме, но при пересечении линии граничной плотности состояние нейтральной устойчивости детонационного фронта пропадает. Происходит разрушение ячеистого режима детонации, что приводит к ликвидации пересжатого режима детонации. В соответствии с зависимостью (3.15) происходит снижение энергетической плотности полной внутренней энергии в зоне реакции ( $k_n \rightarrow 1$ ), приводящее к падению температуры в зоне реакции и замедлению химических реакций. Это приводит к резкому возрастанию предельного и критического диаметров. В результате наблюдается быстрое снижение скорости детонации вплоть до полной остановки детонационного процесса.

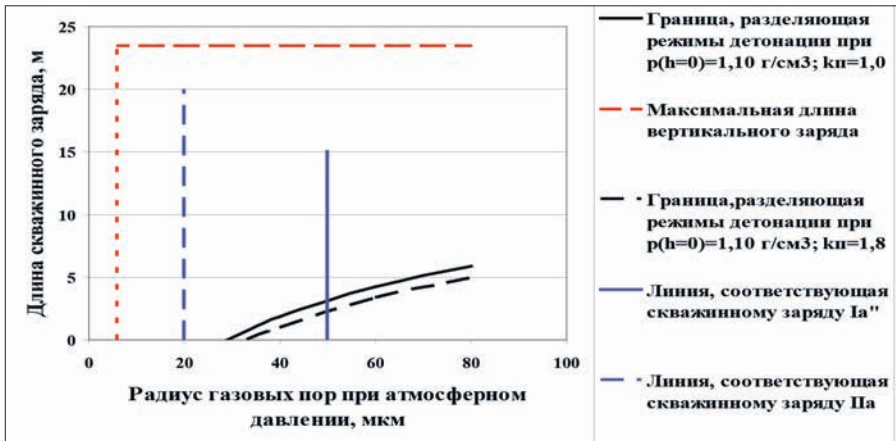
Для большей наглядности на рис. 3.15 (А, Б) представлены зависимости удаления границы, разделяющей режимы распространения детонационной волны, от верхнего сечения вертикального скважинного заряда ЭВВ при нижнем инициировании данного заряда от радиуса газовых пор при атмосферном давлении при различных начальных плотностях ЭВВ.

На рис. 3.15 длина отрезка на линии, соответствующей скважинному заряду, между осью абсцисс и точкой пересечения этой линии с линией границы, разделяющей режимы детонации, соответствует длине в верхней части заряда, на которой наблюдается «срыв» детонации. Представлены вертикальные скважинные заряды ЭВВ, имеющие следующие длины и плотности при атмосферном давлении:

заряд I – длина 15 м, плотность 1,05 г/см<sup>3</sup>; заряд II – длина 25 м, плотность – 1,05 г/см<sup>3</sup>; заряд Ia – длина 15 м, плотность – 1,10 г/см<sup>3</sup>; заряд IIa – длина 20 м, плотность – 1,10 г/см<sup>3</sup>.



А).



Б).

Рис. 3.15. Зависимости удаления границы, разделяющей режимы распространения детонационной волны, от верхнего сечения вертикального скважинного заряда ЭВВ от радиуса газовых пор при атмосферном давлении при различной начальной плотности ЭВВ (нижнее инициирование).

При распространении детонации в обратном направлении (в направлении уменьшения радиуса газовых пор) гидродинамических ограничений на устойчивость детонационной волны не возникает. Это объясняется тем, что в этом случае наблюдается обратная картина: плотность внутренней энергии в зоне реакции возрастает (вследствие увеличения плотности ЭВВ), а для распространения детонации не требуется увеличения кинетической энергии взрывных газов в спутном потоке за фронтом детонационной волны. Поэтому паде-



ния теплового давления во взрывных газах за фронтом детонационной волны не наблюдается. Детонация будет распространяться до тех пор, пока плотность ЭВВ не превысит максимально допустимую.

Анализ зависимостей, представленных на рис. 3.12, показывает, что скорость распространения детонации в ЭВВ при прочих равных условиях связана с начальной величиной полной удельной энергии продуктов взрыва, которая, помимо теплоты взрыва, зависит от инициирующего воздействия. Более сильный и продолжительный инициирующий импульс создает более высокое значение плотности энергии в зоне реакции детонационной волны по сравнению с менее сильным и менее продолжительным воздействием (т.е. будут реализовываться режимы с более высоким значением коэффициента пересжатости детонации).

Влияние инициирующего воздействия на параметры детонации ЭВВ будет рассмотрено в следующей главе.

#### **3.4. Анализ экспериментальных данных о неустойчивости детонации ЭВВ, сенсibilизированных газовыми порами**

В работе [155] описаны эксперименты, зафиксировавшие обрывы высокоскоростных детонационных процессов по время экспериментов с ЭВВ «Фортис-100». Взрывались скважинные заряды диаметром 250 мм. Длина скважин – 12 – 14 м, длина колонкового заряда – 6 – 9 м. Иницирование нижнее. Детонация осуществлялась сдвоенными тротильовыми промежуточными детонаторами ТС-400 (2х0,4 кг). Характерный график, описывающий изменение скорости детонации в зависимости от удаления от точки инициирования, приведен на рис. 3.16.

Возбужденная промежуточным детонатором высокоскоростная детонация, пройдя некоторую часть заряда (16 – 20 калибров), прекращалась, а оставшаяся часть заряда выгорала.

Авторы работы [155] пришли к выводу, что в описываемых опытах не детонировало примерно 30 % от общей массы использованных зарядов.

Обрывы детонации происходили при использовании как усиленных обрезками ДШ сдвоенных боевиков ТС-400 (2х0,4 кг тротила), так и просто сдвоенными боевиками ТС-400. При этом обрывы происходили в областях, где скорость детонации уже стабильна и высока (около 6000 м/с), что свидетельство-

вало о том, что инициирующая способность всех примененных комбинаций промежуточных детонаторов достаточна и ее недостаток не является причиной обрывов.



Рис. 3.16. Зависимость скорости детонации скважинного заряда от удаления от места инициирования (Сибай).

С аналогичными явлениями автор этой работы столкнулся при изучении влияния способов инициирования ЭВВ на карьере Асбестовского ГОКа [62].

Взрывались скважинные заряды Порэмита-1А диаметром 250 мм. Длина скважин – 16 – 17 м, длина колонкового заряда – 10 – 12 м. Инициирование нижнее. Детонация осуществлялась различными промежуточными детонаторами: из одной шашки ПТП-750 (0,75 кг); двойными шашками ПТП-750; двойными шашками ПТП-750 и Т-500.

Характерный график, описывающий изменение скорости детонации в зависимости от удаления от точки инициирования, приведен на рис. 3.17 (ПД из одной шашки ПТП-750). Химический состав эмульсии ЭВВ:  $NH_4NO_3$  – 75 %,  $H_2O$  – 18 %, топлив. фаза – 7 %. Длина скважины – 17 м, длина колонкового заряда – 12 м. Используемая аппаратура: прибор VOD Mate, непрерывно измеряющий величину сопротивления электрической цепи проводника-датчика. Принятые обозначения на рис. 3.17 – 3.19: сплошная линия – экспериментальное значение скорости детонации, штриховая линия – верхняя граница заряда.

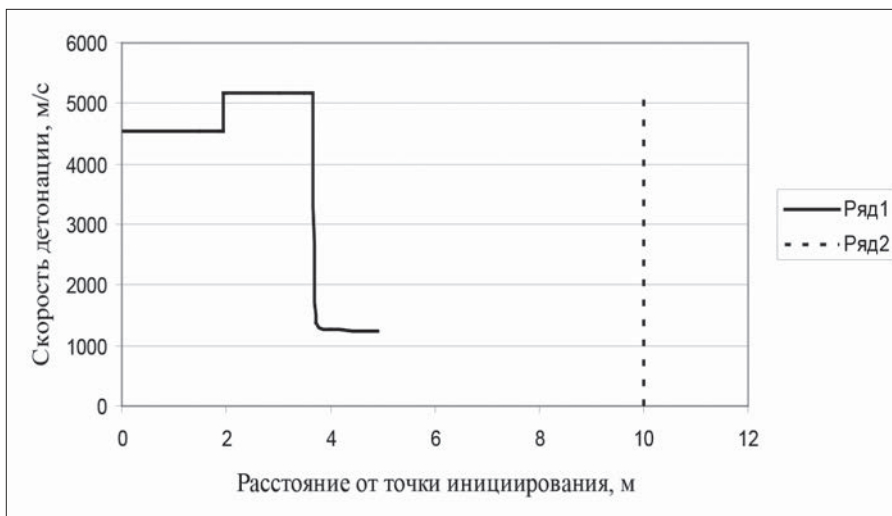


Рис. 3.17. Зависимость скорости детонации скважинного заряда от удаления от места инициирования (промежуточный детонатор – 1 шт. ПТП-750) /Асбест.

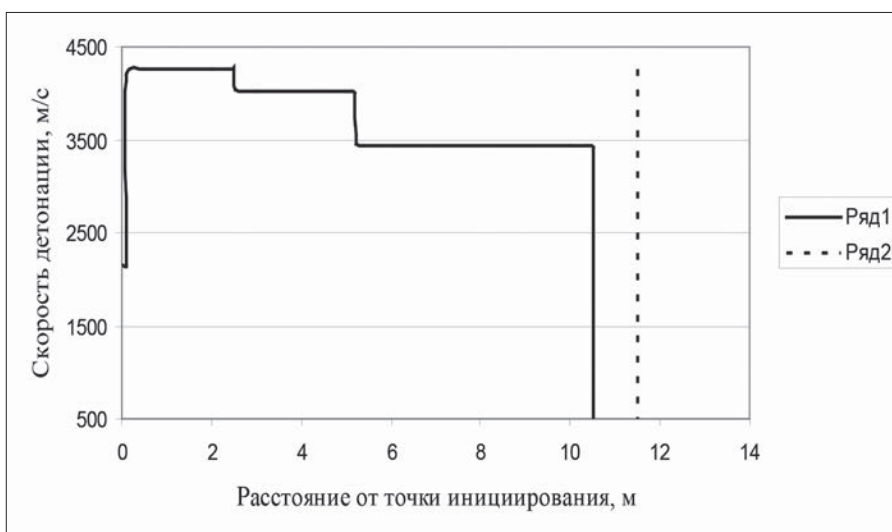


Рис. 3.18. Зависимость скорости детонации скважинного заряда от удаления от места инициирования (по данным [22]).

Скачкообразное изменение скорости по длине скважинного заряда при нижнем инициировании смесового эмульсионного ВВ Иремекс-560 зафиксировано в работе [22]. Опыты проводились на карьере Айхальского ГОКа.

Авторы [22] пришли к выводу, что практически 10 – 15 % не участвует в реакции взрывчатого разложения.

На рис. 3.18 представлен график зависимости скорости детонации скважинного заряда от удаления от места инициирования, построенный на основании данных работы [22].

Явление обрыва, идущего с большой скоростью детонационного процесса, в ЭВВ наблюдается при различном химическом составе ВВ.

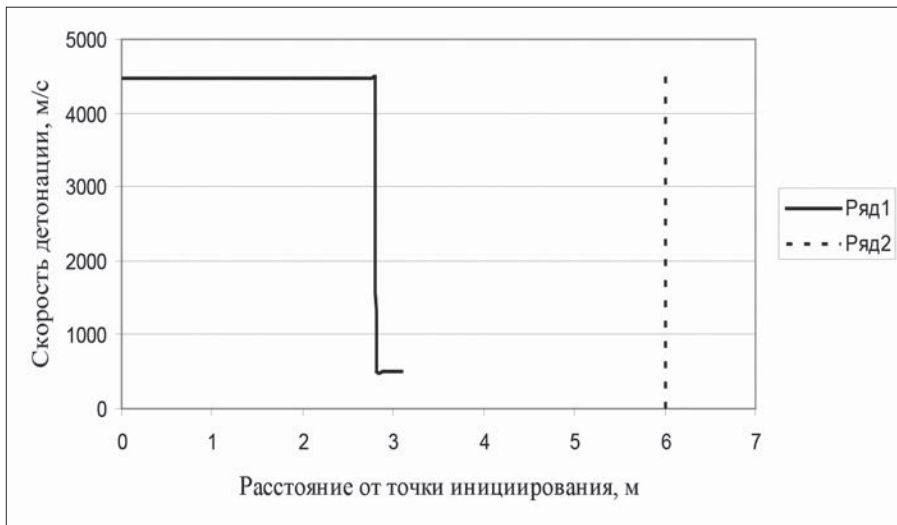


Рис. 3.19. Зависимость скорости детонации скважинного заряда от удаления от места инициирования [213].

На рис. 3.19 представлен график зависимости скорости детонации скважинного заряда от удаления от места инициирования для ЭВВ, имеющего химический состав:  $NH_4NO_3$  – 43 %,  $Ca(NO_3)_2$  – 32 %,  $H_2O$  – 16 %, топлив. фаза – 9 % [213].

Объяснение экспериментальных данных недостаточным по амплитуде и продолжительности возбуждающим импульсом несостоятельно, т.к. обрывается высокоскоростная детонация, прошедшая расстояние в несколько десятков калибров.

Объяснение экспериментальных данных, исходя из нарушений технологии изготовления ЭВВ или процесса зарядки, также некорректно, т.к. данное явление наблюдается у разных исследователей, в разное время, при разных технологиях производства, зарядки и т.д.

Не объясняет явление и предположение о нарушении кабелей для замера, т.к. в работе [22] осуществлялись замеры при взрыве одиночных скважин, когда подбой кабеля исключен.

Не объясняет явление и предположение, что в ЭВВ попадают инородные предметы (буровая мелочь, осыпание стенок скважины, водяная пробка) [91], т.к. взрывание зарядов, описанное в [213], осуществлялось в защитном рукаве.

Не объясняет явление и предположение, что на ЭВВ в скважине могут оказывать опережающие детонационную волну воздействия стенки скважин, деформирующихся под воздействием взрывного импульса.

Действительно, при распространении возмущения по стенке скважины возможно существование трех типов поверхностных волн: Рэлея, Лэмба-Стоунли и Лява [191].

Далее приняты следующие обозначения:  $v_p$ ,  $v_s$  – скорости распространения продольных и поперечных волн в среде соответственно;  $v_l$  – скорость распространения волны во внутрискважинной жидкости (в нашем случае  $v_l = D$ ).

Волна Рэлея обладает вертикальной поляризацией (вектор колебательного смещения частиц среды в волне перпендикулярен стенке скважины). Скорость распространения  $v_R$  волны Рэлея определяется преимущественно скоростью поперечной волны в твердом теле ( $v_R = \xi \cdot v_s$ , где  $0,87 \leq \xi \leq 0,955$ ) [199].

Волна Лэмба-Стоунли также является волной с вертикальной поляризацией, но имеет иную по сравнению с волной Рэлея форму колебаний. Она состоит из слабо неоднородной волны в жидкости, амплитуды которой медленно убывают при удалении от границы, и двух (продольной и поперечной) сильно неоднородных волн в твердом теле. По этой причине энергия волны и движение частиц локализованы в основном в жидкости. Скорость волны меньше скоростей распространения упругих волн в обеих средах, то есть  $v_{st} < v_s < v_p$ ,  $v_{st} < v_l$ .

Волна Лява с горизонтальной поляризацией распространяется вдоль границы твердого полупространства с твердым слоем (аналог – обсаженная скважина с хорошо зацементированной колонной). Она представляет собой чисто сдвиговую волну и обладает дисперсией скорости. Если толщина слоя стремится к нулю, скорость волны стремится к скорости  $v_s$  поперечной волны в неограниченном пространстве, а волна преобразуется в обычную объемную поперечную волну.

Скорость поперечных волн в горных породах, как правило, не превышает 3500 – 4000 м/с [165], что ниже скорости детонации ЭВВ в рассмотренных опытах. Поэтому поверхностные волны не могли оказать влияние на ЭВВ перед детонационной волной, т.е. не могли оказать влияние на ход детонационных процессов.

Анализ представленных экспериментальных исследований показывает, что детонация вертикальных (наклонных) скважинных зарядов ЭВВ, сенсibilизированных газовыми порами, происходит в нестационарном режиме. При этом, независимо от химической природы их окислительной фазы, в них могут возникать скачкообразные переходы высокоскоростной детонации на низкоскоростные режимы или даже обрывы детонационного процесса на расстояниях 15 – 20 и более калибров заряда от места инициирования.

Данные явления не могут быть объяснены недостаточной инициирующей способностью промежуточных детонаторов, нарушением технологии изготовления ЭВВ или процесса зарядки, нарушением измерительных кабелей приборов для замера скорости детонации ЭВВ и попаданием инородных тел в ЭВВ, а также опережающим детонацию воздействием со стороны массива горных пород на ВВ.

Однако данные явления, как показано в пп. 3.1–3.3, объясняются возникновением неустойчивостей детонационного фронта в ЭВВ.

### **Выводы по главе 3**

Анализ экспериментальных исследований показывает, что при детонации эмульсионных взрывчатых веществ (ЭВВ), сенсibilизированных газовыми порами, независимо от химической природы их окислительной фазы и размеров частиц эмульсии могут возникать скачкообразные переходы на низкоскоростные режимы детонации или даже обрывы детонационного процесса на расстояниях 15 – 20 и более калибров заряда от места инициирования. При этом обрывы (или переходы на низкоскоростные режимы) детонации происходят в областях, где скорость детонации стабильна и высока (до 5500 – 6000 м/с).

Данные явления не могут быть объяснены недостаточной инициирующей способностью промежуточных детонаторов, нарушением технологии изготовления ЭВВ или процесса зарядки, нарушением измерительных кабелей приборов для замера скорости детонации ЭВВ.

Однако данные явления могут быть объяснены потерей устойчивости при распространении детонационной волны в заряде ЭВВ.

Исследования показали, что в ЭВВ реализуются только следующие режимы детонации:

нейтрально устойчивый режим (на поверхности детонационной волны возникают устойчивые возмущения);

абсолютно устойчивый режим (возмущения на поверхности детонационной волны экспоненциально угасают во времени).

Режим разрыва детонационной волны на неограниченно возрастающие струи не реализуется.

В случае угасающих со временем возмущений детонационного фронта будет наблюдаться стационарная детонация, описываемая теорией Зельдовича-Нейманна-Деринга (детонация с гладким фронтом).

В случае возникновения на поверхности зоны сжатия устойчивых возмущений (нейтральная устойчивость) формируется ячеистая структура детонационного фронта. Детонация при этом проходит в пересжатом режиме.

Предложен критерий, позволяющий определить момент перехода на низкоскоростной режим детонации (или обрыв).

Получены поправки к модели детонации, описанной в гл. 2, позволяющие рассчитывать пересжатые режимы детонации.

Показано, что положение линии, разграничивающей режимы нейтральной и абсолютной устойчивостей на координатной плоскости (радиус поры; плотность ЭВВ), определяется структурой, плотностью, химическим составом ЭВВ и степенью пересжатости детонации.

При проектировании и выполнении взрывных работ с применением ЭВВ для обеспечения прохождения детонационной волны по всей длине заряда необходимо учитывать структуру ЭВВ и рассчитывать плотность зарядов таким образом, чтобы в координатной плоскости (радиус поры; плотность ЭВВ) линия зависимости плотности ЭВВ от радиуса газовых пор не пересекала границу, разделяющую режимы детонации.

Режим детонации с нейтрально устойчивым фронтом является недостаточно устойчивым к изменениям в структуре и плотности ЭВВ вдоль вертикального (наклонного) заряда, поэтому при распространении детонационной волны в таком заряде ЭВВ возможен выход детонации из режима пересжатия,

что обуславливает переход детонации на низкоскоростные режимы или даже обрыв процесса.

При распространении детонации в обратном направлении (в направлении уменьшения радиуса газовых пор) гидродинамических ограничений на устойчивость детонационной волны не возникает. Детонация в этом случае будет распространяться до тех пор, пока плотность ЭВВ не превысит максимально допустимую.



## ГЛАВА 4. ИНИЦИИРОВАНИЕ ДЕТОНАЦИИ В ЭВВ ПРОМЕЖУТОЧНЫМИ ДЕТОНАТОРАМИ

В основе современных подходов к аналитическому решению проблемы инициирования детонации в ВВ ударными волнами лежит идея Ю.Б. Харитона о том, что требования к параметрам инициирующего воздействия определяются характеристиками и особенностями протекания детонационного процесса в возбуждаемом ВВ [194].

Согласно исследованиям [7-9, 174, 175] на параметры ударно-волнового воздействия для возбуждения детонации в гетерогенных ВВ влияет не только максимальная амплитуда импульса, но и спад давления за фронтом ударной волны, а также структура поверхности инициирующей ударной волны.

ЭВВ относятся к классу гетерогенных ВВ, поэтому при оценке возбуждающего действия ПД необходимо учитывать, помимо величины фронтального давления, также характер падения давления в ЭВВ в зафронтальной области и структуру фронта инициирующей ударной волны.

Последнее обстоятельство делает необходимым отдельное рассмотрение инициирующего воздействия на ЭВВ ПД, изготовленных из индивидуальных ВВ (смеси индивидуальных ВВ) и ПД из промышленных капсюлечувствительных смесевых аммиачно-селитренных ВВ (аммонита, эмульсионного ВВ).

Действительно, детонационные процессы в индивидуальных ВВ (смеси индивидуальных ВВ) при высокой плотности этих ВВ и достаточно большом диаметре проходят в режиме, близком к идеальному [17, 190]. Поэтому при взрыве ПД из данных ВВ в ЭВВ вводится ударная волна с гладкой поверхностью (плоской, цилиндрической, сферической и т.п. – в зависимости от геометрии ПД). Детонация же заряда аммонита или ЭВВ происходит преимущественно в режиме пульсирующего детонационного фронта [48, 53, 54, 68-70, 82, 128]. Следовательно, при взрыве ПД из данных ВВ в ЭВВ вводится ударная волна, осуществляющая его инициирование из многочисленных вершин пульсирующего фронта ударной волны [174]. В этом случае детонация устанавливается в результате взаимодействия ударных волн, испускаемых пульсирующей границей «продукты детонации ПД – ЭВВ».

Согласно [38] макроскопические критерии ударно-волновой чувствительности выполняются в случаях, когда химические превращения в ВВ обусловлены его однородным разогревом при ударном сжатии. Данные критерии не

могут применяться для оценки чувствительности ВВ в случаях, когда существенными являются локальности разогрева ВВ, размеры и распределения частиц ВВ и неоднородностей по объему ВВ [38]. Поэтому расчет параметров ПД для инициирования ЭВВ осуществлялся из выполнения условия, предложенного в работе [16] В.А. Баумом и А.С. Державцем, в котором априори учитывается природа вещества ВВ. Согласно данному условию при определении параметров ПД для инициирования ПВВ необходимо, чтобы ПД при воздействии на ПВВ создавал в достаточном объеме данного ВВ необходимое давление при необходимой продолжительности действия.

В случае инициирования заряда ЭВВ данное условие математически запишется следующим образом: для возбуждения детонации с величиной фронтального давления  $P_f$  необходимо в слое возбуждаемого ЭВВ размером не менее  $d_{\text{пред}}(P_f)$  в течение времени  $t(P_f)$  поддерживать давление с наименьшим значением на указанном временном промежутке  $P_f$  ( $d_{\text{пред}}(P_f)$ ,  $t(P_f)$  – предельный диаметр заряда и время химической реакции при фронтальном давлении  $P_f$ ).

В дальнейшем данное условие возбуждения детонации в ПВВ будем называть критерием Баума-Державца.

#### 4.1. Инициирование ЭВВ при фронтальном ударе продуктов взрыва ПД

*А). Инициирование ЭВВ при фронтальном ударе продуктов взрыва промежуточного детонатора (ПД), изготовленного из индивидуального ВВ (смеси индивидуальных ВВ)*

При освещении данного случая исходим из результатов работы [134].

При оценке иницирующего воздействия данного ПД полагаем, что при его взрыве в иницируемом ВВ возбуждается плоская ударная волна.

Рассмотрим боевик длиной  $L$ , диаметром  $d$ , помещенный в ЭВВ. Длину капсуля детонатора обозначим через  $l$ .

ВВ боевика характеризуется следующими параметрами:  $\rho_{\delta}$ ,  $D_{\delta}$ ,  $k_{\delta}$  - плотность, скорость детонации и коэффициент политропы ВВ боевика соответственно.

ЭВВ характеризуется:  $\rho_{oo}$  – плотностью,  $R_o$  – радиусом поры,  $\Delta$  – размером частицы эмульсии и ударной адиабатой  $D_y = A + BW_y$ , где  $A, B$  – парамет-

тры ударной адиабаты инициируемого ВВ,  $D_y$  – скорость ударной волны,  $W_y$  – массовая скорость.

Расстояние от точки инициирования ВВ боевика капсулем-детонатором до его торцов равно:  $L_o = L - l$  и  $l$  соответственно.

Обозначим  $L_s = \max \{L - l; l\}$ . Рассмотрим торцевую часть ПД, удаленную на расстояние  $L_s$  от места инициирования ПД капсулем-детонатором в момент выхода на нее детонационной волны при взрывчатом разложении ПД. Введем линейную систему координат «Оу» с осью у в направлении детонационной волны. Начало данной системы координат совместимо с границей «торец ПД-ЭВВ».

Так как сжимаемость продуктов детонации ПД ниже, чем сжимаемость пористого вещества ЭВВ, то происходит истечение продуктов детонации ПД в ЭВВ. Начальное давление  $P_{y_0}$  и скорость смещения границы «продукты взрыва ПД-ЭВВ»  $W_{y_0}$  можно найти из решения [17, 190]:

$$W_{y_0} = \frac{D_{\sigma}}{k_{\sigma} + 1} \left[ 1 + \frac{2k_{\sigma}}{k_{\sigma} - 1} \left[ 1 - \left( \frac{P_{y_0}}{\rho_{\sigma} D_{\sigma}^2} (k_{\sigma} + 1) \right)^{\frac{k_{\sigma} - 1}{2k_{\sigma}}} \right] \right]. \quad (4.1)$$

где  $P_{y_0}$  – давление во фронте ударной волны в ЭВВ:

$$P_{y_0} = \rho_{oo} W_{y_0} (A + B W_{y_0}), \quad (4.2)$$

Исходя из (4.1) и (4.2) можно определить начальное значение  $W_{y_0}$ :

$$\frac{3k_{\sigma} - 1}{k_{\sigma}^2 - 1} D_{\sigma} = \frac{2k_{\sigma} D_{\sigma}}{k_{\sigma}^2 - 1} \left[ \frac{(k_{\sigma} + 1) \rho_{oo} (A + B W_{y_0}) W_{y_0}}{\rho_{\sigma} D_{\sigma}^2} \right]^{\frac{k_{\sigma} - 1}{2k_{\sigma}}} + W_{y_0}. \quad (4.3)$$

Однако возбуждение процесса детонации в ЭВВ не является мгновенным. Для возбуждения данного процесса вещество ЭВВ необходимо сжать, обеспечить его возгорание и прогорание между «горячими точками» [72, 136, 148, 167]. Данный процесс происходит за определенное время  $\tau_*$ , которое определяется особенностями инициируемого ЭВВ. За данное время граница раздела «продукты детонации – ЭВВ» смещается на расстояние  $x_*$ , а в глубь продуктов детонации проникает возникающая в них волна разряжения на глубину  $y_*$ .

Предварительно оценим величину  $\tau_*$ :

$$\tau_* = \tau_o + t_o, \quad (4.4)$$

$t_o$  - время возгорания;  $\tau_o$  – время прогорания ЭВВ между сенсibiliзирующими порами.

Согласно (2.72)

$$t_o = \frac{4\pi(T_{AC}^* - T_{ip})^2 \lambda_c C_c}{\mu_{mp}^2 \rho_c \left( \frac{D}{k+1} + U + \sqrt{\frac{2P_f}{3\rho_s} \left( \frac{1}{z} - 1 \right)} \right)^6} \left( \frac{R_o}{\Delta} \right)^6. \quad (4.5)$$

Время прогорания межпорового пространства равно

$$\tau_o = \frac{R_o}{V_{zop}} \left( \left( \frac{\pi}{6\chi_s^o} \right)^{\frac{1}{3}} - 1 \right), \quad (4.6)$$

где  $V_{zop}$  – скорость прогорания межпорового пространства эмульсии.

Величина  $V_{zop}$  определяется на основании теории горения Зельдовича-Беляева [19, 98].

Принимая порядок реакции горения ЭВВ равным двум [71], имеем:

$$V_{zop} = \frac{1}{\rho_f} \sqrt{\frac{2K_m \left( \frac{RT_n^2}{E_A} \right)^3}{Q_z} \frac{3!}{(T_n - T_o)^2} \frac{M}{N_A} Z \exp\left(-\frac{E_A}{RT_n}\right)}, \quad (4.7)$$

где  $\rho_f$  – плотность ЭВВ в зоне сжатия в момент прогорания;

$E_A$  - энергия активации аммиачной селитры;  $N_A$  – число Авогадро;

$T_n$  – температура в зоне сжатия в момент прогорания;

$M$  - средний молекулярный вес продуктов детонации ЭВВ;  $K_m$  - коэффициент теплопроводности первичных продуктов детонации ЭВВ (определяется

для температуры  $T_n$  с учетом поправок Сезерланда);  $Q_z = \frac{P_f}{2} \left( \frac{1}{\rho_o} - \frac{1}{\rho_f} \right) + Q_v^o$ ,

где  $\rho_o$  – плотность ЭВВ в момент начала термического разложения;

$Q_v^o$  – теплота разложения ЭВВ до первичных продуктов (распад по схеме Баума [19] на  $H_2O$ ,  $CO$ ,  $NO$ ,  $N_2$ ,  $C$ );

$Z$  – предэкспоненциальный множитель (рассчитывается по методике работы [19]).

Расчеты по формулам (4.6) и (4.7) показывают, что при характерных значениях параметров структуры ЭВВ ( $R_o \approx 50$  мкм,  $\Delta \approx 5$  мкм),  $\rho_s \approx 1,4$  г/см<sup>3</sup>,  $P_f \approx 10$  ГПа,  $\chi_s^o \approx 0,2$ ,  $t_o \sim 10^{-8}$  с,  $\tau_o \sim 10^{-6}$  с. Следовательно,  $\tau_s \approx \tau_o$ .

Оценим величину давления в продуктах детонации ПД и скорость смещения границы «продукты детонации ПД-ЭВВ» в момент  $\tau$ . На основании [17] можно показать, что начальные распределения плотности  $\rho(y)$  и давления  $P(y)$  в продуктах взрыва ПД в момент  $\tau$  в области, не охваченной боковой волной разряжения, будут описываться следующими уравнениями:

$$\rho(y) = \rho_{\sigma} \frac{k_{\sigma} + 1}{k_{\sigma}} \left( 1 + \frac{k_{\sigma} + 1}{k_{\sigma}} \frac{y}{L_{\sigma}} \right)^{\frac{2}{k_{\sigma} - 1}}, \quad (4.8)$$

$$P(y) = P_u \frac{k_{\sigma} + 1}{k_{\sigma}} \left( 1 + \frac{k_{\sigma} - 1}{k_{\sigma}} \frac{y}{L_{\sigma}} \right)^{\frac{2k_{\sigma}}{k_{\sigma} - 1}}, \quad (4.9)$$

при  $-\left( \min \left\{ 2d; \frac{L_{\sigma}}{2} \right\} \right) \leq y \leq 0$ , где  $y$  – текущая координата рассматриваемого

сечения в продуктах взрыва ПД;  $P_u^{\sigma} = \frac{\rho_{\sigma} D_{\sigma}^2}{k_{\sigma} + 1}$  – давление в точке Чепмена-Жуге в продуктах взрыва ПД.

Величина проникновения волны разряжения в глубь продуктов детонации ПД равна:

$$y_{\sigma} \approx \int_0^{\tau} (c(y) - U(y)) dt, \quad (4.10)$$

где  $c(y) = D_{\sigma} \frac{k_{\sigma}}{k_{\sigma} + 1} \left( 1 + \frac{k_{\sigma} - 1}{k_{\sigma}} \frac{y}{L_{\sigma}} \right)$  – скорость звука в продуктах детонации

ПД в сечении  $y$ ,  $U(y)$  – массовая скорость продуктов взрыва ПД в момент  $\tau$  в сечении  $y$ .

Расчеты на основании (4.6) и (4.10) показали, что

$$y_{\sigma} \approx D_{\sigma} \left( \frac{k_{\sigma} - 1}{k_{\sigma} + 1} \right) \frac{R_0}{V_{zop}} \left( \left( \frac{\pi}{6\chi_3^{\sigma}} \right)^{\frac{1}{3}} - 1 \right). \quad (4.11)$$

Величину смещения  $x_*$  границы «продукты детонации ПД-ЭВВ» определим из уравнения

$$x_* \approx \frac{1}{2} (W_{y_0} + W_1) \tau_*, \quad (4.12)$$

где  $W_1$  – скорости смещения границы «продукты детонации ПД-ЭВВ» в момент времени  $\tau_*$ .

Оценим величину  $W_1$  из закона сохранения энергии. Рассмотрим трубку тока с единичным сечением. Тогда

$$E_T^{(0)} + E_k^{(0)} = E_T^{(1)} + E_k^{(1)} + E_k^{(2)} + A, \quad (4.13)$$

где  $E_T^{(0)}$ ,  $E_k^{(0)}$  – начальная тепловая и кинетическая энергии продуктов взрыва ПД в области  $(-y_*; 0)$  в момент времени  $\tau = 0$  соответственно;  $E_T^{(1)}$ ,  $E_k^{(1)}$  – тепловая и кинетическая энергии продуктов взрыва ПД в области  $(-y_*; x_*)$  в момент времени  $\tau = \tau_*$  соответственно;  $E_k^{(2)}$  – кинетическая энергия вещества ВВ, находящегося в зоне сжатия в момент  $\tau = \tau_*$ ;  $A$  – работа на ударное сжатие вещества ЭВВ.

При  $\frac{y_*}{L_*} \leq 0.25$  изменение плотности в продуктах взрыва ПД в сечении

$y > -y_*$  на момент прихода волны разряжения незначительно, поэтому имеем:

$$\begin{aligned} E_T^{(0)} &\approx \frac{1}{k_\sigma - 1} \int_0^{-y_*} P_H \left( 1 + \frac{k_\sigma - 1}{k_\sigma} \frac{y}{L_*} \right)^{\frac{2k_\sigma}{k_\sigma - 1}} dy = \\ &= \frac{k_\sigma}{(k_\sigma - 1)(3k_\sigma - 1)} P_H L_* \left( 1 - \left( 1 - \frac{k_\sigma - 1}{k_\sigma} \frac{y}{L_*} \right)^{\frac{3k_\sigma - 1}{k_\sigma - 1}} \right). \end{aligned} \quad (4.14)$$

$$E_k^{(0)} \approx \frac{1}{2} \int_0^{-y_*} \rho(y) U^2(y) dy \approx \frac{P_H}{2k_\sigma} y_* \left( 1 - \frac{2k_\sigma + 1}{k_\sigma} \frac{y_*}{L_*} \right). \quad (4.15)$$

Учитывая, что в области действия волн разряжения  $(-y_*; x_*)$  давление в продуктах взрыва ПД слабо зависит от координаты  $y$  [19], определяем:

$$E_T^{(1)} = \frac{P_H^{(1)}(y_* + x_*)}{k_\sigma - 1}, \quad (4.16)$$

где  $P_H^{(1)}$  – давление продуктов взрыва ПД в области  $(-y_*; x_*)$  в момент времени  $\tau = \tau_*$ .

$$P_H^{(1)} = P_H \left( \frac{\bar{\rho} k_{\sigma}}{(k_{\sigma} + 1) \rho_{\sigma}} \right)^{k_{\sigma}}. \quad (4.17)$$

где  $\bar{\rho}$  – плотность продуктов взрыва ПД в области  $(-y_*; x_*)$  в момент времени  $\tau = \tau_*$ . На основании (4.8):

$$\bar{\rho} = \frac{\int_{-y_*}^{y_*} \rho(y) dy}{x_* + y_*} = \frac{k_{\sigma} + 1}{k_{\sigma}} \rho_{\sigma} \frac{1 - 2 \left[ \left( \frac{k_{\sigma} + 1}{2k_{\sigma}} \right)^{\frac{2}{k_{\sigma}-1}} - \frac{k_{\sigma} - 1}{k_{\sigma} + 1} \right] \frac{y_*}{L_*}}{x_* + y_*}. \quad (4.18)$$

$$E_k^{(1)} = \frac{1}{2} \bar{\rho} W_1^2 y_* = \frac{k_{\sigma} + 1}{k_{\sigma}} \rho_{\sigma} y_* \frac{1 - 2 \left[ \left( \frac{k_{\sigma} + 1}{2k_{\sigma}} \right)^{\frac{2}{k_{\sigma}-1}} - \frac{k_{\sigma} - 1}{k_{\sigma} + 1} \right] \frac{y_*}{L_*}}{x_* + y_*} W_1^2. \quad (4.19)$$

Учитывая, что при ударном сжатии материала выполняется условие  $E_k^{(2)} = A$  [17, 190], имеем:

$$E_k^{(2)} + A = \rho_o W_1^2 \int_0^{\tau_*} D_y d\tau \approx \rho_o D'_y \tau_* W_1^2, \quad (4.20)$$

где  $D'_y = A + B W_1$ . (4.21)

На основании (4.11) – (4.21), получаем следующее уравнение для определения  $W_1$ :

$$\begin{aligned} & \frac{k_{\sigma}}{(k_{\sigma} - 1)(3k_{\sigma} - 1)} P_H L_* \left[ 1 - \left( \frac{k_{\sigma} - 1}{k_{\sigma}} \frac{y_*}{L_*} \right)^{\frac{3k_{\sigma}-1}{k_{\sigma}-1}} \right] - \\ & - \frac{1}{k_{\sigma}^2 - 1} \frac{y_*}{L_*} \frac{\left( 1 - 2 \left[ \left( \frac{k_{\sigma} + 1}{2k_{\sigma}} \right)^{\frac{2}{k_{\sigma}-1}} - \frac{k_{\sigma} - 1}{k_{\sigma} + 1} \right] \frac{y_*}{L_*} \right)^{k_{\sigma}}}{\left( 1 + \frac{k_{\sigma} + 1}{2(k_{\sigma} - 1)} \left( \frac{W_{y0}}{D_{\varepsilon}} + z \right) \right)^{k_{\sigma}-1}} + \\ & + \frac{1}{2k_{\sigma}(k_{\sigma} + 1)} \frac{y_*}{L_*} \left[ 1 - \frac{2k_{\sigma} + 1}{k_{\sigma}} \frac{y_*}{L_*} - \frac{k_{\sigma} + 1}{2k_{\sigma}} \left[ 1 - 2 \left[ \left( \frac{k_{\sigma} + 1}{2k_{\sigma}} \right)^{\frac{2}{k_{\sigma}-1}} - \frac{k_{\sigma} - 1}{k_{\sigma} + 1} \right] \frac{y_*}{L_*} \right] \frac{y_*}{L_*} z^2 = \right. \\ & \left. = \left( \frac{k_{\sigma} + 1}{k_{\sigma} - 1} \right) \frac{\rho_{oo}}{\rho_{\sigma}} \frac{y_*}{L_*} \left( \frac{A}{D_{\varepsilon}} + Bz \right) z^2 \right. \end{aligned} \quad (4.22)$$

$$\text{где } z = \frac{W_1}{D_{\bar{\sigma}}}.$$

На основании (4.11), (4.12), (4.17), (4.18) определяем статическую составляющую давления в продуктах детонации ПД в момент  $\tau$  :

$$P_H'' \approx P_H \left[ \frac{1 - 2 \left[ \left( \frac{k_{\bar{\sigma}} + 1}{2k_{\bar{\sigma}}} \right)^{\frac{2}{k_{\bar{\sigma}} - 1}} - \frac{k_{\bar{\sigma}} - 1}{k_{\bar{\sigma}} + 1} \right] \frac{D_{\bar{\sigma}}}{L_*} \left( \frac{k_{\bar{\sigma}} - 1}{k_{\bar{\sigma}} + 1} \right) \frac{R_o}{V_{зоп}} \left[ \left( \frac{\pi}{6\chi_{\bar{\sigma}}^o} \right)^{\frac{1}{3}} - 1 \right]}{1 + \frac{k_{\bar{\sigma}} + 1}{2(k_{\bar{\sigma}} - 1)} \left( \frac{W_{y0}}{D_{\bar{\sigma}}} + z \right)} \right]^{k_{\bar{\sigma}}}, \quad (4.23)$$

Кинетическая составляющая давления  $P_k'$  продуктов взрыва ПД в момент  $\tau$ . найдется из уравнения:

$$P_k'' \approx \frac{k_{\bar{\sigma}} + 1}{2k_{\bar{\sigma}}} \rho_o W_1^2 \left[ \frac{1 - 2 \left[ \left( \frac{k_{\bar{\sigma}} + 1}{2k_{\bar{\sigma}}} \right)^{\frac{2}{k_{\bar{\sigma}} - 1}} - \frac{k_{\bar{\sigma}} - 1}{k_{\bar{\sigma}} + 1} \right] \frac{D_{\bar{\sigma}}}{L_*} \left( \frac{k_{\bar{\sigma}} - 1}{k_{\bar{\sigma}} + 1} \right) \frac{R_o}{V_{зоп}} \left[ \left( \frac{\pi}{6\chi_{\bar{\sigma}}^o} \right)^{\frac{1}{3}} - 1 \right]}{1 + \frac{k_{\bar{\sigma}} + 1}{2(k_{\bar{\sigma}} - 1)} \left( \frac{W_{y0}}{D_{\bar{\sigma}}} + z \right)} \right] \quad (4.24)$$

При распаде зоны сжатия  $P_f > P_o = P_H'' + P_k''$ , где  $P_f = \rho_{oo} W_1 (A + B W_1)$  – давление в зоне сжатия.

Следовательно, при распаде зоны сжатия в ЭВВ возникнет торможение продуктов детонации ПД. Это приводит к возрастанию в них давления до величины  $P_x$ . Данная величина определяется из условия: скорости движения продуктов взрыва ПД и продуктов разложения ЭВВ на границе их раздела совпадают. На основании указанного условия имеем [17, 190]:

$$\sqrt{\frac{2P_o}{\rho}} \frac{z_1 \frac{P_f}{P_o} - 1}{\sqrt{\left( k_{\varepsilon} + 1 \right) z_1 \frac{P_f}{P_o} + k_{\varepsilon} - 1}} = \frac{2k_{\varepsilon,u}}{k_{\varepsilon,u}^2 - 1} \left( \frac{P_f}{P_o} \right)^{\frac{k_{\varepsilon,u} - 1}{2k_{\varepsilon,u}}} D_* \left[ 1 - z_1^{\frac{k_{\varepsilon,u} - 1}{2k_{\varepsilon,u}}} \right], \quad (4.25)$$



где  $z_1 = \frac{P_x}{P_f}$ ;  $P_x$ ,  $D_x$ ,  $k_{x,u}$  - давление в точке Чепмена-Жуге, скорость детонации,

коэффициент политропы ЭВВ соответственно.

Тогда получаем следующее требование к ПД – в момент  $\tau$ . ЭВВ давление в продуктах взрыва ПД на границе «продукты взрыва ПД – продукты взрыва ЭВВ»  $P_x$  должно быть не меньше, чем давление в продуктах взрыва ЭВВ:

$$P \leq P_x. \quad (4.26)$$

Значения  $P_x$ ,  $D_x$ ,  $k_{x,u}$  определяются на основании решений, изложенных в п. 2.5. Тогда из (4.26) можно определить минимальное  $L$  для данного химического состава ПД и рассматриваемого ЭВВ.

В случае невозможности подбора  $L$ , в качестве вещества ПД необходимо использовать ВВ с более высокими детонационными характеристиками.

Ограничения на диаметр ПД  $d$  находятся из условия

$$d > \max \{4V_p \tau_*; 2D_x \tau_*\}, \quad (4.27)$$

где  $V_p \approx \frac{D_x}{2}$  - скорость боковой волны разряжения в продуктах взрыва ПД [17,

190];  $2D_x \tau_*$  – минимальный диаметр зоны реакции в ЭВВ, исключаяющий влияние волн разряжения на характер взрывного разложения ЭВВ.

*Б). Иницирование ЭВВ при фронтальном ударе продуктов взрыва промежуточного детонатора (ПД), изготовленного из промышленных капсулочувствительных смесевых аммиачно-селитренных ВВ (аммонита, эмульсионного ВВ)*

Характерной особенностью рассматриваемого случая является то обстоятельство, что детонация ВВ, из которого изготовлен ПД (аммонит или ЭВВ), происходит в ячеечном режиме. В этом случае фронт детонационной волны в ПД представлен пульсирующей поверхностью [53, 69, 70, 82, 128, 174]. Это приводит к тому, что при втекании продуктов детонации ПД в ЭВВ в последнем формируется поверхность «продукты детонации ПД – ЭВВ», которая будет иметь не гладкую, а рельефную структуру («впадина-выступ /лидирующий участок/»). Указанная топология поверхности «продукты детонации ПД – ЭВВ» обуславливает возникновение в области «впадин» системы сходящихся ударных волн. Это вызывает возрастание давления и температуры в данных областях ЭВВ по сравнению со случаем, когда продукты детонации ПД имеют ту же массовую скорость, но грани-

ца «продукты детонации ПД – ЭВВ» плоская и гладкая [39]. Однако необходимо отметить, что сходящиеся ударные волны в области «впадин» будут воздействовать на ЭВВ, которое уже было подвержено воздействию расходящихся ударных волн, испущенных «выступами» /лидирующими участками/ границы «продукты детонации ПД – ЭВВ». Таким образом, ЭВВ в области соприкосновения с продуктами детонации ПД подвергается двойному ударному сжатию. Согласно [7, 8, 113, 174], опережающее действие слабых ударных волн (в нашем случае – расходящиеся волны, возбужденные «выступами») может как десенсибилизировать иницируемое ЭВВ, так и облегчить его иницирование последующим импульсом (в нашем случае – сходящимися волнами в области «впадин»).

Рассмотрим процесс втекания эмульсии под действием ударной волны в газовую пору. Как уже отмечалось в п. 1.2, высокоскоростная киносъемка процесса схлопывания газовой поры в жидкости под действием сильной ударной волны показала, что данный процесс происходит асимметрично [206]. Поток, втекающей в пору, заполняет ее примерно до половины объема (заполняется полусфера, обращенная выпуклостью к потоку). Далее, оставшаяся часть поры распадается на большое количество мельчайших пор. Таким образом, если ударная волна не инициирует возгорание эмульсии до момента разрушения поры на мельчайшие поры, то возгорание эмульсии под действием ударной волны не состоится. Это связано с тем, что схлопывание мелких пор будет происходить не в гидродинамическом режиме (вследствие малого размера пор), а в вязком режиме. Однако схлопывание в вязком режиме осуществляется с небольшой скоростью [93], поэтому возгорание возможно лишь при большой задержке времени загорания (порядка нескольких микросекунд – [195]). Однако это на один-два порядка превышает опытные данные [106].

Таким образом, возможны два варианта развития событий в ЭВВ при падении на него пульсирующего ударного фронта ПД:

1. Первичные ударные волны, испущенные лидирующими участками («выступами»), разбивают поры в ЭВВ на мельчайшие поры до загорания эмульсии.
2. Первичные волны возбуждают загорание эмульсии до момента распада поры в ЭВВ.

В первом случае, как показано выше, непосредственное воздействие ПД на ЭВВ не вызывает в нем детонации.

Во втором случае в поре после воспламенения поверхности эмульсии в областях наибольших сдвиговых напряжений (экваториальная область поры – ось

по направлению ударной волны) вспыхивает втекающий в пору поток эмульсии, диспергированный на мельчайшие частицы [87]. Иницируется горение эмульсии в направлении, нормальном к поверхности поры. Образующиеся при горении и ранее содержащиеся в поре газы препятствуют ее коллапсу [132, 192], обеспечивая наличие достаточно крупной поры к моменту попадания данной поры в область «впадин», где под действием сходящихся ударных волн разогретая при первом ударе эмульсия втекает в пору в гидродинамическом режиме. Эмульсия дополнительно сжимается и разогревается. Согласно [29] эффективность инициирования «определяется не средней, а локальной температурой в наиболее «горячей» точке. Такими точками в реальной волне являются области столкновения поперечных волн». Следовательно, эффективность инициирования ЭВВ при помощи ПД с пульсирующим детонационным фронтом может быть весьма высокой.

Многочисленные экспериментальные данные [76, 104, 145] показывают, что ЭВВ, сенсibilизированные газовыми порами, возбуждаются от промежуточного детонатора (ПД), изготовленного из промышленных капсул чувствительных смесевых аммиачно-селитренных ВВ (аммонита, эмульсионного ВВ). Это возможно в случае, если десенсибилизации ЭВВ первичными ударными волнами не происходит, т.е. инициирование ЭВВ проходит по второму варианту.

Сделаем некоторые численные оценки инициирующей способности рассматриваемого вида ПД. Начальное контактное давление на границе «выступа» с ЭВВ можно определить из уравнения (4.3), т.к. контактные напряжения в момент удара близки к напряжениям в плоской волне. Далее при проникновении лидирующих участков продуктов детонации ПД в ЭВВ образуются расходящиеся от «выступов» ударные волны, давление в которых падает по мере удаления от «выступов» вследствие геометрического расхождения. После столкновения данных волн по равноудаленной от смежных выступов линии отраженные волны образуют область разгрузки, которая подвергается воздействию сходящихся ударных волн в области «впадин».

Оценим величину возрастания давления в области столкновения сходящихся во «впадине» ударных волн /коэффициент отражения/, по сравнению с воздействием ударной волны с гладким плоским фронтом. Известно, если взаимодействуют одинаковые ударные волны, то в силу симметрии достаточно рассмотреть взаимодействие одной ударной волны с жесткой стенкой [73, 181, 182].

Оценим величину коэффициента отражения этой ударной волны от жесткой стенки. Нам априори неизвестна степень разложения ЭВВ в первичных ударных волнах, поэтому рассмотрим два крайних случая:

вторичные ударные волны распространяются в инертной пористой жидкости и отражаются от жесткой стенки (соответствует случаю, когда разложение ЭВВ в первичной волне незначительно);

отражение детонационной волны от жесткой стенки (случай значительного разложения ЭВВ в первичных волнах).

*В первом случае* – при значительных давлениях на фронте ударной волны, падающей на жесткую поверхность, определяющее влияние на давление в отраженной волне играют начальная пористость вещества ЭВВ и величина давления в падающей волне [21, 77, 181], а также сжимаемость ЭВВ и вещества преграды [17, 99, 186].

На рис. 4.1 и 4.2 приведены зависимости значений коэффициента отражения от жесткой стенки при различном давлении в падающей волне для ЭВВ с различной окислительной фазой. Рассматривались следующие типы ЭВВ по химическому составу:

Тип 1:  $NH_4NO_3$  – 46,4 %,  $Ca(NO_3)_2$  – 30 %,  $H_2O$  – 16 %, топливная фаза – 7,6 %. Плотность матричной эмульсии – 1,488 г/см<sup>3</sup>. Скорость звука в эмульсии – 2490 м/с.

Тип 2:  $NH_4NO_3$  – 78,5 %,  $H_2O$  – 15,5 %, топливная фаза – 6 %. Плотность матричной эмульсии – 1,33 г/см<sup>3</sup>. Скорость звука в эмульсии – 1920 м/с.

*Во втором случае* – согласно данным [73] при расчете столкновения детонационных волн в смесевом промышленном ВВ методика работы [181] позволяет получать корректные результаты. На рис. 4.3 приведены зависимости величины коэффициента отражения детонационной волны в ЭВВ от жесткой стенки от угла падения (при различных значениях коэффициента политропы). Графики построены на основании решений [181].

Анализ зависимостей, приведенных на рис. 4.1 – 4.3, показывает, что величина коэффициента отражения  $k_{отр}$  слабо зависит от степени разложения ЭВВ в первичных ударных волнах. Поэтому в оценочных расчетах будем полагать, что коэффициент отражения ударных волн в области «впадин» равен  $k_{отр} \approx 2,3$ .

В этой величине возрастания давления в области столкновения сходящихся во «впадине» ударных волн не учитывается увеличение давления вследствие

геометрического схождения ударных волн [95, 97, 132, 181, 187]. Однако ввиду вероятных колебаний смежных «выступов» по высоте и форме ограничимся данным значением, считая его нижней границей оценочных расчетов. Принятое значение  $k_{отр}$  согласуется с данными о повышении давления в областях детонационной волны в жидких ВВ, где происходит взаимодействие поперечных волн [79].

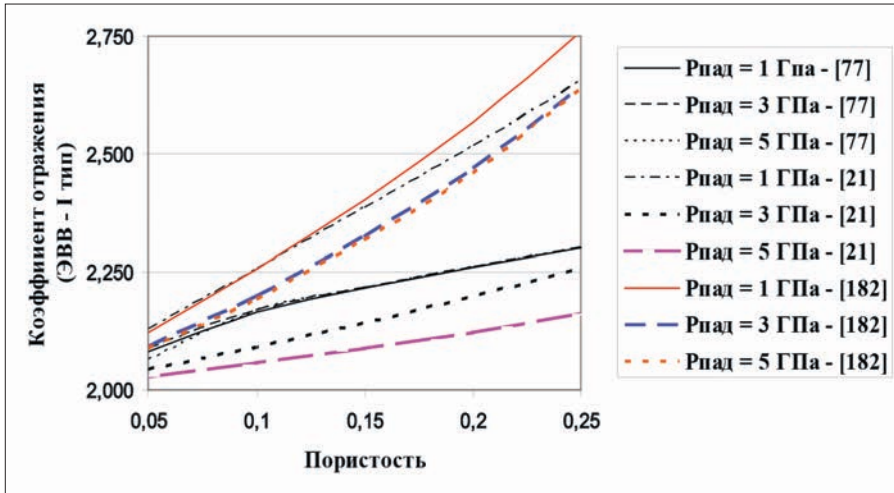


Рис.4.1. Зависимости значений коэффициента отражения от жесткой стенки при различном давлении в падающей волне для ЭВВ I типа.

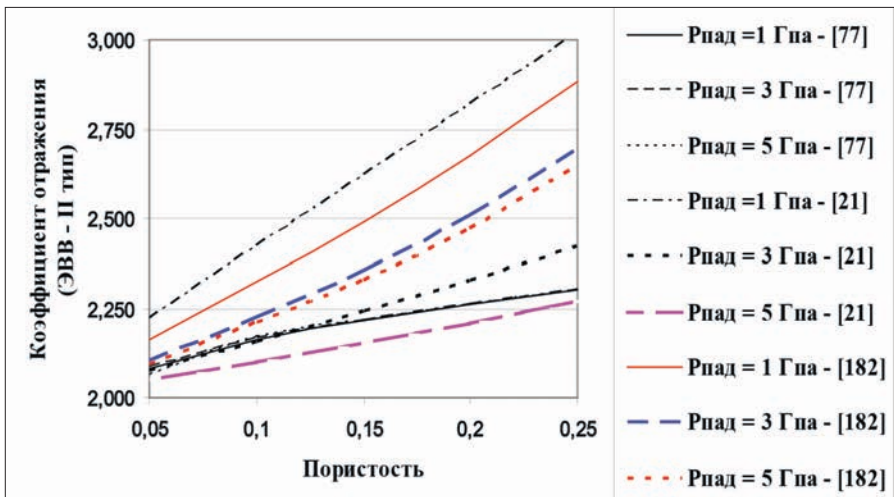


Рис.4.2. Зависимости значений коэффициента отражения от жесткой стенки при различном давлении в падающей волне для ЭВВ II типа.

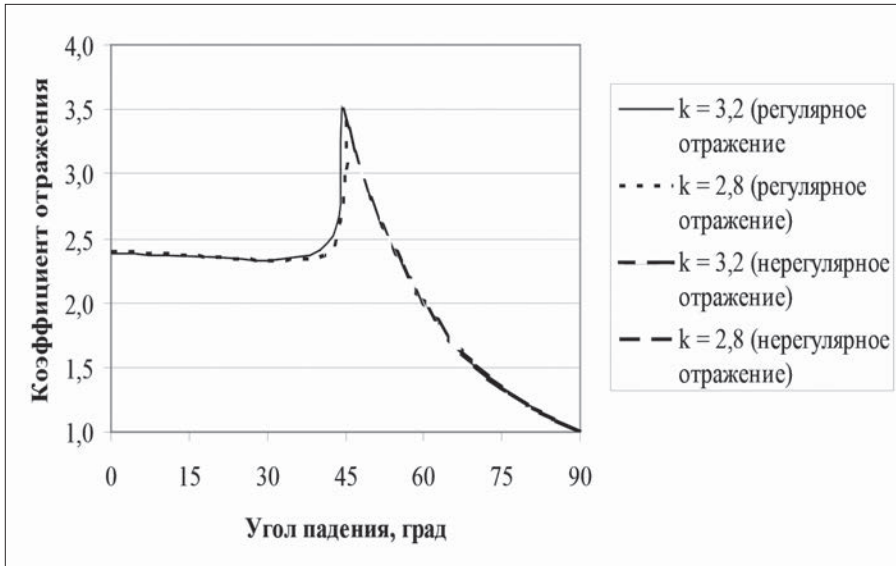


Рис.4.3. Зависимость величины коэффициента отражения детонационной волны в ЭВВ от жесткой стенки от угла падения при различных значениях коэффициента политропы (по [182]).

Легко видеть, что иницирование начинается на некоторой глубине от границы «продукты детонации ПД – ЭВВ», что согласуется с данными [174] по неидеальному иницированию.

Из (4.1) – (4.3) следует, что увеличение начального давления на плоской границе «продукты детонации ПД – ЭВВ» в  $k_{опр}$  достигается при формальном увеличении скорости детонации ПД примерно в  $\sqrt{k_{опр}}$  раз (при неизменных значениях  $\rho_o$ ,  $k_o$ ).

Следовательно, оценка геометрических параметров ПД из ЭВВ и аммонита бЖВ для иницирования ЭВВ может осуществляться по методике, приведенной в п.А настоящего параграфа, если расчетное значение скорости детонации ВВ ПД увеличить в  $\sqrt{2,3} \approx 1,5$  раза по сравнению с фактической. Интересно отметить, что данное значение согласуется с величиной возрастания скорости детонации в начале ячейки относительно средней скорости детонационного процесса в многофронтной газовой детонации [28].

В случае наличия в ЭВВ твердых включений размером 2-5 мм и их содержании до 30% (объем.) давление в ударной (детонационной) волне усиливается вследствие отражения на этих включениях [101].

## 4.2. Иницирование ЭВВ при взрыве удлиненного (линейного) ПД

В настоящем параграфе приводится оценка условий возбуждения детонации в ЭВВ, сенсibilизированных газовыми порами, под действием скользящей детонационной волны, вызываемой взрывом линейного (удлиненного) промежуточного детонатора.

В основу решения положены результаты, полученные в работах [44, 45, 51].

Рассмотрим линейный промежуточный детонатор радиусом  $r_0$ , помещенный в пространство, заполненное ЭВВ. Принимаем, что ПД характеризуется гладким детонационным фронтом.

Введем линейную систему координат «*Oy*» с осью *y* линейного ПД. Начало данной системы координат совместим точкой иницирования ПД.

Так как сжимаемость продуктов детонации ПД ниже, чем сжимаемость пористого вещества ЭВВ, то происходит истечение продуктов детонации ПД в ЭВВ. Начальную скорость смещения границы «продукты взрыва ПД-ЭВВ»  $W_{r0}$  в направлении перпендикулярном оси ПД можно найти на основании газодинамических решений для скользящей детонационной волны [17]:

$$W_{r0} = \frac{2k_{\sigma} D_{\sigma}}{k_{\sigma}^2 - 1} \left[ 1 - \left( \frac{(k_{\sigma} + 1) \rho_{00}}{\rho_{\sigma}} \frac{(A + BW_{r0}) W_{r0}}{D_{\sigma}^2} \right)^{\frac{k_{\sigma} - 1}{2k_{\sigma}}} \right]. \quad (4.28)$$

Как отмечено в п. 4.1, возбуждение процесса детонации в ЭВВ не является мгновенным. Для осуществления данного процесса вещество ЭВВ необходимо сжать, обеспечить его возгорание и прогорание между «горячими точками». Данный процесс происходит за определенное время  $\tau$ , которое определяется особенностями иницируемого ЭВВ. За данное время граница раздела «продукты детонации – ЭВВ» смещается в радиальном направлении на расстояние  $x$ , а вглубь продуктов детонации в радиальном направлении проникает возникающая в них волна разряжения на глубину  $\Delta x$ .

$$\text{Согласно п. 4.1 } \tau \approx \tau_0, \quad (4.29)$$

где  $\tau_0$  – время прогорания ЭВВ между сенсibilизирующими порами (4.6).

Оценим величину давления в продуктах детонации ПД и скорость смещения в радиальном направлении границы «продукты детонации ПД – ЭВВ» в момент  $\tau$  в сечении «*y*». Принимаем, что время прихода детонационной волны, распространяющейся в ПД, в сечение «*y*» соответствует моменту времени  $\tau = 0$ . На основании [17, 190] можно показать, что начальные распределения

плотности  $\rho(y)$  и давления  $P(y)$  в продуктах взрыва ПД в момент  $\tau_*$  в области, не охваченной радиальной волной разряжения, будут описываться следующими учитывающими действие аксиальной волны разряжения уравнениями:

$$\rho(y) = \rho \frac{k_{\bar{\sigma}} + 1}{k_{\bar{\sigma}}} \left( 1 - \frac{k_{\bar{\sigma}} - 1}{k_{\bar{\sigma}}} \frac{D_{\bar{\sigma}} \tau_*}{y + D_{\bar{\sigma}} \tau_*} \right)^{\frac{2}{k_{\bar{\sigma}} - 1}}, \quad (4.30)$$

$$P(y) = P_{II} \left( 1 - \frac{k_{\bar{\sigma}} - 1}{k_{\bar{\sigma}}} \frac{D_{\bar{\sigma}} \tau_*}{y + D_{\bar{\sigma}} \tau_*} \right)^{\frac{2k_{\bar{\sigma}}}{k_{\bar{\sigma}} - 1}}. \quad (4.31)$$

Величина проникновения радиальной волны разряжения вглубь продуктов детонации ПД равна

$$\Delta r = \int_0^{\tau_*} c(y) dt, \quad (4.32)$$

где  $c(y) = \frac{D_{\bar{\sigma}}}{k_{\bar{\sigma}} + 1} \left( 1 + \frac{(k_{\bar{\sigma}} - 1)y}{y + D_{\bar{\sigma}} \tau_*} \right)$  – скорость звука в продуктах детонации ПД

в области, не охваченной радиальной волной разряжения, в сечении «у».

$$\text{Уравнение (4.32) справедливо при } \tau_* \leq \min \left\{ \frac{2y}{D_{\bar{\sigma}}}; \tau_{oo} \right\} \quad (4.33)$$

где  $\tau_{oo} = z_{oo} \frac{y}{D_{\bar{\sigma}}}$ .  $z_{oo}$  – корень уравнения  $z + (k_{\bar{\sigma}} + 1) \ln(1 + z) = (k_{\bar{\sigma}} + 1) r_o y^{-1}$ .

При выполнении (4.33) величина  $\Delta r$  определяется из (4.32) и равна

$$\Delta r = D_{\bar{\sigma}} \tau_* (k_{\bar{\sigma}} + 1)^{-1} \left[ 1 + (k_{\bar{\sigma}} - 1) y (D_{\bar{\sigma}} \tau_* y^{-1}) \right]. \quad (4.34)$$

В случае  $\tau_* \geq \tau_{oo}$  радиальная волна разряжения доходит до оси ПД, поэтому в этом случае принимаем,  $\Delta r \equiv r_o$ .

Величину смещения  $x$  границы «продукты детонации ПД – ЭВВ» определим из уравнений:

$$x = W_* \tau_* \text{ и } W_* \approx 0,5(W_{r_o} + W_{r1}), \quad (4.35)$$

где  $W_{r1}$  – радиальная компонента скорости смещения границы «продукты детонации ПД – ЭВВ» в момент времени  $\tau_*$ .

Оценим величину  $W_{r1}$  из закона сохранения энергии. Рассмотрим объем вещества ПД и ЭВВ, ограниченный сечениями  $y$  и  $y+dy$ .



Тогда

$$d(\Delta E_T) = d(E_{к.ПД}) + d(E_{к.ЭВВ}) + d(A), \quad (4.36)$$

где  $d(\Delta E_T)$  - изменение тепловой энергии продуктов взрыва ПД в области  $(y; y + dy)$  за промежуток времени  $\tau$ . с учетом не только радиального расширения, но и потерь энергии вследствие аксиального движения продуктов детонации ПД;  $d(E_{к.ПД})$  - кинетическая энергия радиального движения продуктов взрыва ПД в области  $(y; y + dy)$  в момент времени  $\tau = \tau_*$ ;  $d(E_{к.ЭВВ})$  - кинетическая энергия радиального движения вещества ЭВВ, находящегося в области  $(y; y + dy)$  в момент  $\tau = \tau_*$ ;  $d(A)$  - работа на ударное сжатие вещества ЭВВ, находящегося в области  $(y; y + dy)$  к моменту  $\tau = \tau_*$ .

При оценке величины  $W_{r1}$  из уравнения (4.36) полагаем:

1.  $d(E_{к.ЭВВ}) = d(A)$ , т.к. вещество ЭВВ подвергается ударному сжатию [17];
2. Радиальная скорость движения материала ЭВВ в зоне сжатия изменяется по закону  $W_r = W_{r0} \left( \frac{r_0}{r} \right)^{0,5}$  [149];

3. Радиальная скорость разлетающихся взрывных газов ПД изменяется линейно с изменением текущего радиуса, а плотность продуктов взрыва ПД внутри области, охваченной радиальной волной разрядки и границей «продукты детонации ПД – ЭВВ», постоянна [125].

Решение задачи распадается на два случая: а)  $\tau \geq \tau_{00}$  - к моменту распада зоны сжатия в ЭВВ радиальная волна разгрузки доходит до оси ПД; б)  $\tau < \tau_{00}$  - к моменту распада зоны сжатия в ЭВВ радиальная волна разгрузки охватывает только часть сечения ПД.

Ввиду громоздкости получающихся выражений приведем уравнение, полученное из (4.36), для определения скорости  $W_{r1}$  в случае  $\tau_* \geq \tau_{00}$ .

Имеем:

$$\begin{aligned} & \frac{D_\sigma^2}{k_\sigma^2 - 1} \left( 1 - \frac{k_\sigma - 1}{k_\sigma} \frac{D_\sigma \tau_*}{y + D_\sigma \tau_*} \right)^{\frac{2k_\sigma}{k_\sigma - 1}} \left[ 1 - \frac{1}{(1 + x_*)^{2(k_\sigma - 1)}} \right] = \\ & = \frac{2\rho_0}{\rho_0} W_{r0}^2 \frac{(A + BW_*) \tau_*}{r_0} + \frac{k_\sigma + 1}{4k_\sigma} W_{r1}^2 \left( 1 - \frac{k_\sigma - 1}{k_\sigma} \frac{D_\sigma \tau_*}{y + D_\sigma \tau_*} \right)^{\frac{2}{k_\sigma - 1}} \end{aligned} \quad (4.37)$$

На основании (4.31), (4.35) определяем статическую составляющую давления в продуктах детонации ПД в момент  $\tau_*$ :

$$P(y, \tau_*) = \frac{P_H}{(1+x)^{2k_{\bar{\sigma}}}} \left( 1 - \frac{k_{\bar{\sigma}} - 1}{k_{\bar{\sigma}}} \frac{D_{\bar{\sigma}} \tau_*}{y + D_{\bar{\sigma}} \tau_*} \right)^{\frac{2k_{\bar{\sigma}}}{k_{\bar{\sigma}} - 1}}. \quad (4.38)$$

Кинетическая составляющая давления  $P'_k$  продуктов взрыва ПД в момент  $\tau_*$  найдется из уравнения

$$P'_k = \frac{k_{\bar{\sigma}} + 1}{k_{\bar{\sigma}}} \rho_{\bar{\sigma}} W_{r1}^2 \left( 1 - \frac{k_{\bar{\sigma}} - 1}{k_{\bar{\sigma}}} \frac{D_{\bar{\sigma}} \tau_*}{y + D_{\bar{\sigma}} \tau_*} \right)^{\frac{2k_{\bar{\sigma}}}{k_{\bar{\sigma}} - 1}} (1+x)^{-2}. \quad (4.39)$$

При распаде зоны сжатия  $P_f > P(y, \tau_*) + P'_k$ , где  $P_f = \rho_o (A + BW_{r1}) W_{r1}$  – давление в зоне сжатия [40].

Следовательно, при распаде зоны сжатия в ЭВВ возникнет торможение продуктов детонации ПД продуктами распада ЭВВ. Это приводит к возрастанию в продуктах ПД давления до величины  $P_x$ . Данная величина определяется из условия: скорости движения продуктов взрыва ПД и продуктов разложения ЭВВ на границе их раздела совпадают. На основании указанного условия в соответствии с (4.25) имеем:

$$\sqrt{\frac{2P_o}{\bar{\rho}_*}} \frac{z_1 \frac{P_f}{P_o} - 1}{\sqrt{(k_x + 1) z_1 \frac{P_f}{P_o} + k_x - 1}} = \frac{2k_{x,u}}{k_{x,u}^2 - 1} \left( \frac{P_f}{P_o} \right)^{\frac{k_{x,u} - 1}{2k_{x,u}}} D_* \left[ 1 - z_1^{\frac{k_{x,u} - 1}{2k_{x,u}}} \right], \quad (4.40)$$

где  $z_1 = \frac{P_x}{P_f}$ ;  $P_o$ ,  $D_*$ ,  $k_{x,u}$  – давление в точке Чепмена-Жуге, скорость дето-

нации, коэффициент политропы ЭВВ соответственно.

Здесь  $\bar{\rho}_*$  – плотность продуктов взрыва ПД в момент  $\tau = \tau_*$ :

$$\bar{\rho}_* = \frac{k_{\bar{\sigma}} + 1}{k_{\bar{\sigma}}} \rho_{\bar{\sigma}} \left( 1 - \frac{k_{\bar{\sigma}} - 1}{k_{\bar{\sigma}}} \frac{D_{\bar{\sigma}} \tau_*}{y + D_{\bar{\sigma}} \tau_*} \right)^{\frac{2}{k_{\bar{\sigma}} - 1}} (1+x)^{-2}. \quad (4.41)$$

Система уравнений (4.28) – (4.41) позволяет оценить возбуждение ЭВВ скользящей детонационной волной.

### 4.3. Иницирование ЭВВ системой сближенных сосредоточенных зарядов.

В основу решения положены результаты, полученные в работе [50].

Как уже отмечалось выше, практика ведения взрывных работ на карьерах с использованием наливных ЭВВ, сенсibilизированных газовыми порами, выявляет тенденцию к применению все более мощных промежуточных детонаторов, как линейных (удлиненных) ПД [102, 185, 192, 203], так и мощных сосредоточенных ПД [75, 76, 103, 120]. Это объясняется стремлением избежать возникновения режимов низкоскоростного взрывчатого разложения ЭВВ, при которых не только снижаются эффективность и безопасность взрывных работ, но и ухудшается экология вследствие повышенного выброса ядовитых газов в атмосферу.

Однако в настоящее время промышленностью освоен выпуск большой номенклатуры сосредоточенных промежуточных детонаторов небольшой и средней мощности, успешно зарекомендовавших себя при иницировании простейших и гранулированных ВВ. Многие горные предприятия уже давно используют две (и более) такие шашки для иницирования наливных ЭВВ, сенсibilизированных газовыми порами.

В данном параграфе представлена методика расчетов, изложенная в работе [50] и позволяющая определять размеры зарядов ПД, оптимальные расстояния между зарядами ПД в зависимости от детонационных параметров ВВ, из которого изготовлен ПД, а также химического состава, плотности и структуры возбуждаемых ЭВВ.

Эффективность иницирующего воздействия на ЭВВ сближенных сосредоточенных ПД вытекает из эффекта взаимодействия встречных ударных волн при взрыве сближенных зарядов. В этом случае (при равенстве данных сближенных зарядов) отражение ударных волн друг от друга происходит как от абсолютно жесткой стенки [181, 186]. Это способствует увеличению коэффициента отражения в

$$\left( 1 + \frac{\rho_{00} D_0}{\rho_c C_p} \right)$$
 раз по сравнению с отражением от сжимае-

мой стенки скважины ( $\rho_c$ ,  $C_p$  - плотность среды, окружающей заряд, и скорость продольных волн в этой среде). Данная система зарядов и будет ПД, который в дальнейшем будем называть когерентным ПД.

При взрыве сферического заряда (ПД) в ЭВВ возникает расширяющийся в радиальном направлении газовый пузырь, который при расширении испускает ударную волну, также распространяющуюся в радиальном направлении.

Введем обозначения:  $R_n$  – текущий радиус газового пузыря;  $R_y$  – текущий радиус фронта ударной волны.

Согласно [32] время расширения газового пузыря до размеров сферы радиуса  $R_n$  определяется по формуле

$$t_n = \sqrt{\frac{\rho_{00}}{2}} \int_{R_0}^{R_n} R_n \sqrt{\frac{R_n}{H}} dR_n, \quad (4.42)$$

$$\text{где } H = \int_{R_0}^{R_n} R_n^2 \Phi(R_n) dR_n. \quad (4.43)$$

При времени расширения полости  $t < \frac{3,5R_0}{D_0}$  усреднения давления в полости не происходит, поэтому давление взрывных газов на границе «продукты взрыва ПД – ЭВВ» описывается уравнением

$$\Phi(R_n) = P_H \left( \frac{R_0}{R_n} \right)^{3k_0}, \quad (4.44)$$

где  $P_H$  – начальное детонационное давление ПД.

На основании (4.42) – (4.44) имеем:

$$t_n = R_0 \sqrt{\frac{3(k_0 - 1)}{2}} \frac{\rho_{00}}{P_H} \int_1^{\frac{R_n}{R_0}} z_n \sqrt{\frac{z_n}{1 - \frac{1}{z_n^{3(k_0 - 1)}}}} dz_n, \quad (4.45)$$

где  $z_n = \frac{R_n}{R_0}$ .

Точного решения в элементарных функциях интеграл, входящий в (4.45), не имеет. Однако при  $\frac{R_n}{R_0} < 1,7$  уравнение (4.45) можно с точностью до 0,1 %

представить в виде (учитываем, что  $P_H = \frac{\rho_0 D_0^2}{k_0 + 1}$ )

$$t_u \approx \frac{R_{\sigma}}{D_{\sigma}} \sqrt{\frac{3(k_{\sigma}^2 - 1)}{2}} \frac{\rho_{oo}}{\rho_{\sigma}} \left( (0,1588z_u^2 - 0,5848z_u + 0,4066) \cdot k_{\sigma} + 2,2226z_u - 2,0937 \right). \quad (4.46)$$

Вследствие резкого падения во взрывных газах ПД при их расширении практический интерес представляет область  $\frac{R_u}{R_{\sigma}} < 1,7$ , т.к. при  $\frac{R_u}{R_{\sigma}} \geq 1,7$  дав-

ление во взрывных газах ПД упадет в  $> (1,7^9 \approx 120)$  раз. Согласно [129] давление во фронте детонационной волны в составе В (60 % гексогена и 40 % тротила) при плотности ВВ  $1,67 - 1,68$  г/см<sup>3</sup> (данный состав является одним из самых мощных при производстве промышленных ПД) составляет  $24,3 - 25,6$  ГПа.

При падении давления в 120 раз его остаточная величина составляет примерно 0,2 ГПа (при использовании тротила и пентолита – примерно 0,1 ГПа). Согласно [14] данная область давлений не представляет интереса при рассмотрении вопроса о возбуждении детонации при воздействии ПД на ЭВВ, т.к. значительно меньше детонационного давления в ЭВВ.

Так как сжимаемость продуктов детонации ПД ниже, чем сжимаемость пористого вещества ЭВВ, то происходит истечение продуктов детонации ПД в ЭВВ. Начальную скорость смещения границы «продукты взрыва ПД-ЭВВ»  $W_{ro}$  можно найти на основании равенства давлений в ЭВВ и взрывных газов ПД на границе «продукты взрыва ПД-ЭВВ» [157]:

$$\rho_{oo} (A + BW_{ro}) W_{ro} = P_H \left( 1 - \left( W_{ro} - \frac{D_{\sigma}}{k_{\sigma} + 1} \right) \frac{k_{\sigma}^2 - 1}{2k_{\sigma} D_{\sigma}} \right)^{\frac{2k_{\sigma}}{k_{\sigma} - 1}}. \quad (4.47)$$

Величину массовой скорости за фронтом ударной волны в ближней зоне определяем по уравнению [17]

$$W_r \approx W_{ro} \frac{R_{\sigma}}{R_y}. \quad (4.48)$$

Тогда скорость ударной волны на расстоянии  $R_y$  будет равна

$$D_{yr} \approx A + BW_{ro} \frac{R_{\sigma}}{R_y}. \quad (4.49)$$

Учитывая, что  $D_{yr} = \frac{dR_y}{dt}$ , интегрируя (4.49), получаем уравнение движе-

ния фронта ударной волны в ближней зоне заряда

$$R_y \approx R_{\sigma} + At + \frac{BW_{ro}}{A} R_{\sigma} \ln \left( \frac{R_y + \frac{BW_{ro}}{A}}{R_{\sigma}} \frac{1 + \frac{BW_{ro}}{A}}{A} \right). \quad (4.50)$$

На рис. 4.4 представлена схема взаимодействия двух сближенных зарядов. Принятые обозначения: сплошные линии – начальная граница зарядов; штрихпунктирные линии – граница «продукты взрыва ПД-ЭВВ»; штриховые линии – граница фронта ударной волны; O1 и O2 – центры зарядов; ABCD – область взаимодействия ударных волн (область повышенного давления).

Расчет параметров когерентного ПД осуществляется из требования выполнения критерия Баума-Державца.

Принимаем за момент  $t=0$  момент выхода детонационной волны ПД на внешнюю поверхность ПД.

Допустим, что иницирование ЭВВ вследствие взаимодействия ударных волн произошло в момент времени  $t_n$ , когда радиус газового пузыря достигнет размера  $R_n(t_n) = z_n R_{\sigma}$ . Радиус фронта ударной волны при этом определяется на основании (4.46) и (4.50). Величину этого радиуса можно представить в виде функции  $R_y = R_y(t_n)$ .

Из рис. 4.4 имеем следующие ограничения на  $R_n(t_n)$  и  $R_y(t_n)$ :

$$R_n(t_n) + R_y(t_n) \leq h, \quad R_y(t_n) \leq \frac{h}{2}. \quad (4.51)$$

На основании (4.50) и рис.4.4 имеем:

А) время встречи ударных волн  $t_y^{(1)}$

$$t_y^{(1)} = \left( \frac{h}{2R_{\sigma}} - 1 - \frac{BW_{ro}}{A} \ln \left( \frac{h + \frac{BW_{ro}}{A}}{2R_{\sigma}} \frac{1 + \frac{BW_{ro}}{A}}{A} \right) \right) \frac{R_{\sigma}}{A}; \quad (4.52)$$

Б) время выхода ударной волны на поверхность газового пузыря смежного заряда  $t_y^{(2)}$

$$t_y^{(1)} = \left( \frac{b - R_n}{2R_\sigma} - 1 - \frac{BW_{ro}}{A} \ln \left( \frac{b - R_n + \frac{BW_{ro}}{A}}{2R_\sigma + \frac{BW_{ro}}{A}} \right) \right) \frac{R_\sigma}{A}. \quad (4.53)$$

При времени  $t > t_y^{(2)}$  происходит инжекция эмульсии в газовые полости смежных зарядов, что сопровождается резким падением давления в эмульсии.

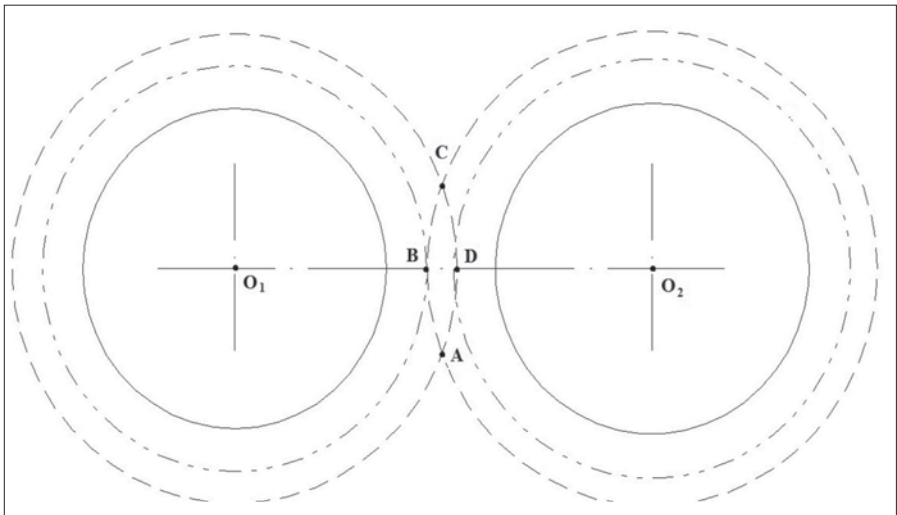


Рис. 4.4. Схема взаимодействия сближенных зарядов когерентного ПД.

В соответствии с (4.51) имеем следующее ограничение на характерные моменты времени для когерентного ПД

$$t_y^{(1)} < t_n < t_y^{(2)}. \quad (4.54)$$

Время существования области высокого давления ABCD (рис. 4.4) равно

$$t_* = t_n - t_y^{(1)}. \quad (4.55)$$

Наименьшее давление в области высокого давления соответствует времени  $t_n$ . В соответствии с закономерностью падения давления от времени при отражении ударной волны от жесткой стенки [17, 181] имеем

$$P(t_n) \approx 2,3W_{ro} \frac{R_\sigma}{R_y(t_n)} \left( A + AW_{ro} \frac{R_\sigma}{R_y(t_n)} \right) \left( \frac{b}{2R_y(t_n)} \right)^3. \quad (4.56)$$

Объем области высокого давления в момент  $t_n$  (сечение указанного объема представлено на рис. 4.4 фигурой ABCD) равен (необходимые сведения для определения объема указанной области заимствованы в руководстве [27])

$$V(t_n) = \frac{2\pi}{3} \left( R_y(t_n) - \frac{h}{2} \right)^2 \left( 2R_y(t_n) + \frac{h}{2} \right). \quad (4.57)$$

Диаметр сферы, имеющей объем (4.57), равен

$$d(t_n) = \left( 4 \left( R_y(t_n) - \frac{h}{2} \right)^2 \left( 2R_y(t_n) + \frac{h}{2} \right) \right)^{\frac{1}{3}}. \quad (4.58)$$

На основании уравнений (4.46) – (4.58) определяются все необходимые для дальнейшего анализа параметры  $t_n$ ,  $P(t_n)$ ,  $d(t_n)$ , характеризующие воздействие когерентного ПД из двух сближенных зарядов на ЭВВ.

Если заряды когерентного ПД прижаты к стенке скважины, то при условии

$$\sqrt{R_y^2(t_n) - \frac{h^2}{4}} > R_o \text{ необходимо учитывать повторное отражение эмульсии, на-}$$

ходящейся в области ABCD (рис. 4.4), от стенок скважины. В этом случае возможно возбуждение высокоскоростного режима детонации в результате 3-кратного ударного сжатия ЭВВ (сжатие в прямой ударной волне УВ – сжатие при взаимодействии УВ от сближенных зарядов ПД – сжатие в УВ, отраженной от стенки скважины). Это приведет к возрастанию давления  $P(t_n)$

$$\text{в } \frac{2\rho_c C_p}{\rho_c C_p + \rho_{oo} D} \text{ раз.}$$

Окончательное решение возможно после получения зависимостей  $P_f(t)$ ,  $d_{krit}(P_f)$ ,  $t(P_f)$  для иницируемого ЭВВ. Данные зависимости определяются для иницируемого ЭВВ с учетом его химического состава, плотности и структуры на основании методик, изложенных в 3 и 4 главе.

Необходимо отметить, что уравнения (4.47) – (4.58) позволяют оценить иницирующее воздействие одиночного сосредоточенного заряда в скважине на заряд ЭВВ. Однако в этом случае расчет осуществляется при рассмотрении 2-кратного ударного сжатия (сжатие в прямой ударной волне УВ – сжатие в УВ, отраженной от стенки скважины).



#### 4.4. Анализ экспериментальных данных по иницированию ЭВВ различными ПД

##### 1. Иницирование ЭВВ ПД из индивидуального ВВ

Результаты данного раздела параграфа основываются на результатах работы [148].

В качестве обсуждения приведенной методики расчета параметров ПД при фронтальном иницировании ЭВВ рассмотрим опыт, описанный в работе [100].

Электромагнитным методом измерялись детонационные параметры смеси эмульсии плотностью  $1,51 \text{ г/см}^3$  (табл. 4.1) с промпродуктом НМПМ-4 (ферросилиций) в соотношении 93/7 по массе. Смесь аэрировалась путем введения полых стеклянных микросфер диаметром 70 мкм, плотностью  $0,15 \text{ г/см}^3$  в количестве 2,4 % по весу. Плотность аэрированного ЭВВ –  $1,3 \text{ г/см}^3$ .

Коэффициенты ударной адиабаты эмульсии –  $A = 2600 \text{ м/с}$ ,  $B = 1,4$  [100].

Табл. 4.1. Состав эмульсии ЭВВ в опытах [100].

Вещество	Процентное содержание	ГОСТ
Селитра кальциевая ( $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ )	33 (в пересчете на безводную селитру)	ТУ 2181-028-32496445-01
Селитра аммиачная ( $\text{NH}_4\text{NO}_3$ )	43,5	ГОСТ 2-85 марка Б
Вода	14,8	Техническая
Дизельное топливо	6,7	ДСТУ 3868-99
Амолин	2	ТУ У 24.6-19436-11-003-2002

Заряд аэрированного ЭВВ помещался в пластиковой трубе внутренним диаметром  $d = 104 \text{ мм}$  с толщиной стенки 3 мм, длиной 300 мм.

Инициатором служила таблетка прессованного ТНТ плотностью  $1,59 \text{ г/см}^3$ , диаметром 80 мм, массой 340 г. При расчетах принимались следующие параметры ТНТ [85]:  $D_{\sigma} = 6900 \text{ м/с}$ ,  $\rho_{\sigma} = 1,59 \text{ г/см}^3$ ,  $k_{\sigma} = 3,3$ . Величина  $L = 0,05 \text{ м}$ .

Результаты измерений и расчетные значения детонационных параметров рассматриваемого ЭВВ при иницировании его таблеткой прессованного ТНТ представлены в таблице 4.2.

Табл. 4.2. Экспериментальные ([100]) и расчетные значения детонационных параметров

Показатели	Опытное значение, м/с	Точность метода, % [80]	Расчетное значение, м/с	Относит. отклонение %
Скорость детонации, м/с	5300	~ 4	5250	1,0
Массовая скорость, м/с	1730	~ 4	1660	4,0
Время химической реакции в детонационной волне, мкс	1,20	~ 15	1,07	10,8

Расчеты детонационных параметров ЭВВ осуществлялись по методике, изложенной в главе 2.

Характерные значения промежуточных параметров возбуждения детонационного процесса, определенные на основании настоящих исследований, следующие:  $W_{y0} = 1935$  м/с,  $W_1 = 1664$  м/с,  $P_f = 10,9$  ГПа,  $P_o = 6,26$  ГПа,  $P_x = 7,82$  ГПа,  $P = 7,65$  ГПа (условие  $P \leq P_x$  выполняется).

Пересжатие детонации практически отсутствует. Таким образом, в описанном опыте была возбуждена абсолютно устойчивая детонация, которая описывается теорией ЗНД. Это согласуется с выводами работы [100], сделанными на основании анализа эпюры изменения давления в продуктах взрыва за фронтом детонационной волны.

Наблюдается хорошее согласие экспериментальных и расчетных данных. Это позволяет осуществить аналитическое сравнение иницирующих способностей ПД из различных индивидуальных ВВ (смеси ВВ).

В табл. 4.3 представлены расчетные значения детонационных параметров, развиваемых различными ПД в ЭВВ следующего химического состава –

$NH_4NO_3$  – 76,7 %,  $H_2O$  – 18 %, топливная фаза – 5,3 %. Плотность ЭВВ -1,15 г/см<sup>3</sup>. Плотность эмульсии – 1,33 г/см<sup>3</sup>. Размеры частиц дисперсной фазы эмульсии для рассматриваемых ВВ – 3 мкм. Способ сенсibilизации эмульсии – пузырьки газа радиусом 40 мкм. Коэффициенты ударной адиабаты эмульсии – А=1920 м/с, В=1,98 [100].

Табл. 4.3. Детонационные параметры ЭВВ при применении различных ПД

Иницируемое ВВ	ПД I			ПД II			ПД III		
	$D_*$ , м/с	$P_*$ , ГПа	$k_u$	$D_*$ , м/с	$P_*$ , ГПа	$k_u$	$D_*$ , м/с	$P_*$ , ГПа	$k_u$
ЭВВ	4710	6,37	1,21	5090	7,16	1,49	5250	7,48	1,60

Рассматриваются следующие ПД:

I – состав: литой тротил 80 % + гранулолот 20 %. Плотность – 1,48 г/см<sup>3</sup>, скорость детонации – 6800 м/с, коэффициент политропы – 3,2. Геометрические параметры: высота – 200 мм, диаметр – 70 мм. Масса – 1000 г.

II – состав: 50 % тротил + 50 % ГЭН. Плотность -1,58 г/см<sup>3</sup>, скорость детонации – 7500 м/с, коэффициент политропы – 3,37. Геометрические параметры: высота – 188 мм, диаметр – 66 мм. Масса – 850 г.

III – состав: 40 % тротил + 60 % гексоген. Плотность – 1,62 г/см<sup>3</sup>, скорость детонации – 7700 м/с, коэффициент политропы – 3,11. Геометрические параметры: высота – 105 мм, диаметр – 85 мм. Масса – 850 г.

Анализ таблицы 4.3 показывает, что величина достижимых детонационных параметров ЭВВ зависит от величины иницирующего импульса. Таким образом, систему «ЭВВ-ПД» необходимо рассматривать как единое целое.

Рассмотрим экспериментальные данные, приведенные в работе [129], по детонации ЭВВ, сенсibilизированных стеклянными микросферами, полученные методами лазерной доплеровской интерференции и рентгеновской томографии плотности с применением синхротронного излучения.

В таблице 4.4 приведены экспериментальные данные [119] и расчетные значения, определенные по методикам, изложенным в главах 3, 4 настоящей работы. При выполнении расчетов полагали, что ЭВВ имеет следующий химический состав:  $NH_4NO_3$  – 63,0 %,  $NaNO_3$  – 14,0 %,  $H_2O$  – 16 %, топливная фаза – 7 %. Плотность ЭВВ и радиус микросфер принимались равными

1,07 г/см<sup>3</sup> и 40 мкм соответственно. Размеры частиц эмульсии считали равными 2,5 мкм. Иницирование детонации в ЭВВ осуществлялось зарядами тротила и тэна, поэтому на основании приведенных в таблице 4.3 данных величине коэффициента пересжатия детонации принимали равной 1,3.

Табл. 4.4. Экспериментальные [119] и расчетные значения детонационных параметров ЭВВ

Показатели	Скорость детонации, км/с	Ширина зоны хим. реакции, мм	Время реакции, мкс	Плотность во фронте детон. волны, г/см <sup>3</sup>
Эксперимент	4,6	4,0	0,94	1,89
Расчет	4,58	3,1	0,99	1,94

Также представляет интерес сравнение температуры «горячих точек», температуры взрыва эмульсии, определенных по эмпирическим графикам, приведенных в работе [170], времени формирования «горячей точки» [106], а также величины критического диаметра заряда [170] с расчетными значениями.

Указанные значения приведены в таблице 4.5. При определении температурных показателей исходили из расчетного значения фронтального детонационного давления – 7,7 ГПа.

Табл. 4.5. Экспериментальные и расчетные значения температуры «горячей точки», температуры взрыва и времени формирования «горячей точки»

Показатели	Температура «горячей точки», °K	Температура взрыва эмульсии, °K	Время формирования «горячей точки», 10 <sup>-8</sup> с	Критический диаметр, мм
Эксперимент	3100 ([171])	2100([171])	≈ 2([106])	5,0 ([170])
Расчет	2945	2014	1,11	4,1

Анализ таблиц 4.4 и 4.5 показывает достаточно хорошее совпадение расчетных и экспериментальных данных, что дополнительно свидетельствует

о корректности развиваемого в настоящей работе способа описания как инициирования ЭВВ, так и распространения в них детонации.

## 2. Инициирование ЭВВ ПД из аммонита

В работе [144] приведены результаты измерения скорости детонации эмульита «ВЭТ-700» (ВВ, полученные механическим смешением 70 % масс. ЭВВ, сенсibiliзировавшего газовыми порами, и 30 % масс. смеси «АС+ДТ») в открытых зарядах, плотностью 1,26 г/см<sup>3</sup>, диаметром 240 мм и длиной 1 м при инициировании их ПД из различных ВВ. При этом менялись размеры ПД при неизменной массе.

Данные по ПД и результаты измерений скорости детонации приведены в таблице 1.1.

Применялись следующие ПД:

- шашка ТГФ-850Э – состав: 40 % тротил + 60 % гексоген. Плотность – 1,62 г/см<sup>3</sup>, скорость детонации – 7700 м/с, коэффициент политропы – 3,11;

- шашка Т-1000 – состав: литой тротил 80 % + гранулолот 20 %. Плотность – 1,48 г/см<sup>3</sup>, скорость детонации – 6800 м/с, коэффициент политропы – 3,3;

- специально изготовленные для опытов патроны аммонита 6ЖВ – плотность – 1,0 г/см<sup>3</sup>, скорость детонации – 4800 м/с, коэффициент политропы – 2,53.

В таблице 4.6 приведены результаты расчета скорости детонации в эмульите в зависимости от применяемого ПД. Показатели детонации эмульита при длине ПД из аммонита 6ЖВ 25 мм не рассчитывались, т.к. в данном случае при возбуждении наблюдается очень выпуклый детонационный фронт. Это создает временную задержку для момента начала срабатывания измерительного кабеля, расположенного на внешней поверхности иницируемого заряда, по отношению к началу детонации в осевой линии части возбуждаемого заряда.

При расчетах принималось:  $R_0 = 40$  мкм,  $\Delta = 3$  мкм. Параметры в уравнении ударной адиабаты –  $A=1920$  м/с;  $B=1,98$  [100] (близки к данным [139]). Химический состав согласно ТУ 7276-016-17131060-2001. Расчет осуществлялся по методике, изложенной в п. 4.1. При этом в связи с наличием в ЭВВ гранул гладкой аммиачной селитры величину скорости детонации ПД, используемую при вычислении, увеличивали в  $\sqrt{k_{отр}^{эп}}$  раз, где  $k_{отр}^{эп} \approx \frac{2\rho_{АС}C_{АС}}{\rho_{АС}C_{АС} + \rho_{во}A}$ ,

где  $\rho_{АС}$ ,  $C_{АС}$  – плотность гранул аммиачной селитры и скорость продольных волн в этих гранулах соответственно.

В рассматриваемом случае

$$k_{\text{отр}}^{\text{р}} \approx \frac{2\rho_{\text{АС}}C_{\text{АС}}}{\rho_{\text{АС}}C_{\text{АС}} + \rho_{\text{оо}}A} = \frac{2 \cdot 1,5 \cdot 2800}{1,5 \cdot 2800 + 1,26 \cdot 1920} = 1,27,$$

(плотность гранул гладкой селитры – 1,5 г/см<sup>3</sup> [146], скорость продольных волн в гранулах при данной плотности – 2800 м/с /на основании линейной аппроксимации экспериментальных данных [197]/). Тогда  $\sqrt{k_{\text{отр}}^{\text{р}}} \approx 1,12$ .

Таким образом, при расчетах параметров детонационного процесса в эмулите, вызываемого взрывом ПД, принимали следующие значения эффективной скорости детонации ПД: шашка ТГФ-850Э – 8600 м/с (7700\*1,12); шашка Т-1000 – 7600 м/с (6800\*1,12); аммонит 6ЖВ – 8000 м/с (4800\*1,5\*1,12).

Табл. 4.6. Сравнение экспериментальных и расчетных значений скорости детонации в эмулите «ВЭТ-700» при различных ПД

Тип ПД	Параметры ПД: (длина (мм)/диаметр (мм)/масса(г))	Скорость детонации (эксперимент), м/с	Скорость детонации (расчет), м/с
ТГФ-850Э	115/79/850	4648	4677
Т-1000	185/68/1000	3824	4931
Аммонит 6ЖВ	25/240/1000	4830	-
«»	120/110/1000	5089	5007
«»	240/77/1000	5121	5143
«»	480/54/1000	5206	5205

Анализ таблицы 4.6 показывает хорошее согласие экспериментальных и расчетных данных при использовании шашки ТГФ-850 и ПД из аммонита 6ЖВ. Исключением является расхождение экспериментальных и расчетных данных по шашке Т-1000. Последнее можно объяснить или ошибкой при инструментальной записи процесса, или в случае, когда при применении шашки Т-1000 состав эмулита был недостаточно газифицирован, что повлекло увеличение плотности этого ВВ и возрастание предельного диаметра. Последнее привело к низким значениям скорости детонации при опытном взрыве.

Как уже было отмечено, таблица 4.6 показывает хорошее совпадение расчетных и экспериментальных данных при иницировании ЭВВ ПД, имеющи-

ми пульсирующий детонационный фронт, что свидетельствует о корректности предложенного способа оценки детонационных параметров в ЭВВ при инициировании их указанными видами ПД.

### **3. Иницирование ЭВВ удлиненным эмульсионным ПД**

В основу теоретических положений данного раздела параграфа положены результаты, полученные в работах [44, 45, 51, 57].

В работе [35] приведены результаты измерения скорости детонации по длине скважинных зарядов ЭВВ «Сибирит-1200» при их инициировании удлиненными эмульсионными ПД «Senatel Powerfrag».

Диаметр зарядов – 115 и 125 мм. Длина зарядов – 12 – 15 м. Иницирование – нижнее. Окружающий массив – гранит. Плотность ЭВВ – 1,05 и 1,1 г/см<sup>3</sup>. Размеры удлиненных ПД: диаметр – 50 мм, длина – 420 и 630 мм (соответственно, два и три патрона «Senatel Powerfrag» массой 0,5 кг).

На основании (4.28) – (4.41) осуществлен расчет скорости детонации, вызываемой в инициировании скважинных зарядов ЭВВ ПД (50\*420 мм) из патронов «Senatel Powerfrag».

При расчетах исходили из следующих данных:

химический состав ЭВВ –  $NH_4NO_3$  – 77 %,  $H_2O$  – 16 %, топливная фаза – 7 %. Плотность матричной эмульсии – 1,35 г/см<sup>3</sup>. Коэффициенты ударной адiabаты эмульсии –  $A=1920$  м/с,  $B=1,98$  [100]. Радиус газовых пор ЭВВ при атмосферном давлении – 40 мкм, размер частиц эмульсии – 3 мкм;

плотность ЭВВ ПД – 1,21 г/см<sup>3</sup>;

скорость детонации ЭВВ ПД – 5200 м/с, коэффициент политропы ЭВВ ПД – 2,8;

иницирование – нижнее, глубина заложения ПД – 12 м;

радиус газовых пор на глубине 12 м равен 27,1 мкм при начальной плотности 1,05 г/см<sup>3</sup>; 26,9 мкм при начальной плотности 1,1 г/см<sup>3</sup>.

На рис. 4.5 и 4.6 представлены зависимости необходимой толщины слоя ЭВВ, охваченного химической реакцией, от давления в зоне этой реакции для осуществления детонации с абсолютно устойчивым или нейтрально устойчивым фронтом (сплошные линии). Устойчивые детонационные процессы в ЭВВ возможны при нахождении параметров детонации выше сплошных линий на рис. 4.5 и 4.6.

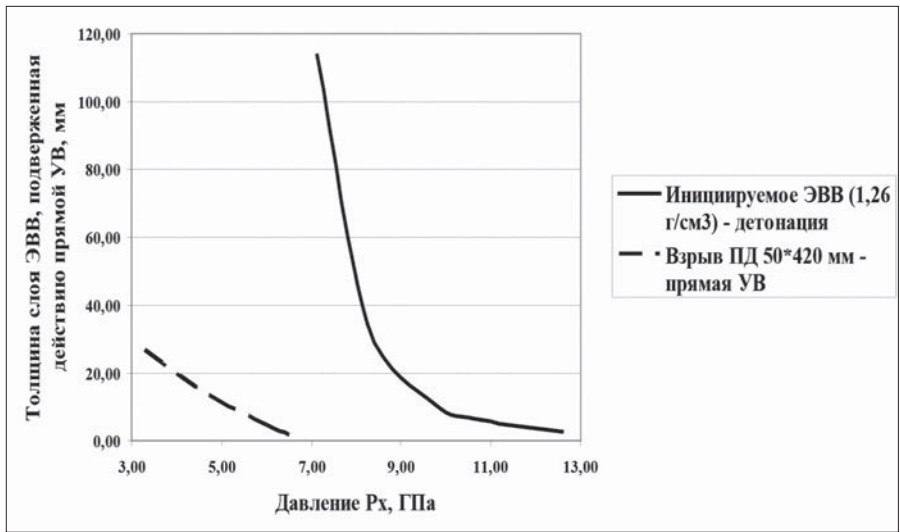


Рис. 4.5. Зависимости толщины слоя ЭВВ, охваченного химической реакцией, от давления в зоне этой реакции (плотность ЭВВ – 1,26 г/см<sup>3</sup>).

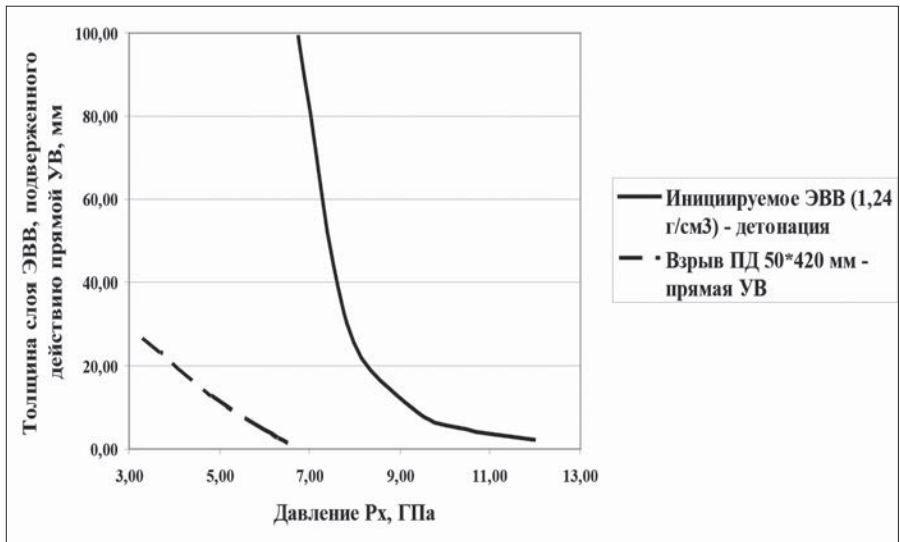


Рис. 4.6. Зависимости толщины слоя ЭВВ, охваченного химической реакцией, от давления в зоне этой реакции (плотность ЭВВ – 1,24 г/см<sup>3</sup>)

Рис. 4.5 соответствует плотности ЭВВ 1,26 г/см<sup>3</sup> (начальная плотность – 1,1 г/см<sup>3</sup>), а рис. 4.6 – плотности ЭВВ 1,24 г/см<sup>3</sup> (начальная плотность – 1,05 г/см<sup>3</sup>). Значения плотностей рассчитаны по методике работы [193]. Взрыв



ПД вызывает в области действия прямой УВ давления, показанные на рис. 4.5 и 4.6 штриховыми линиями.

Анализ рис. 4.5 и 4.6 показывает, что под действием расширяющихся продуктов детонации ПД в окружающем ПД ЭВВ может реализовываться только недосжатая детонация.

В этом случае фронт ударной волны удаляется от зоны распада ЭВВ, что обуславливает применение теории УВ при расчете величины давления в ЭВВ при различных отражениях.

Технология механического заряжения взрывных скважин ЭВВ не предполагает симметричного обтекания ПД эмульсией при вводе ЭВВ в скважину. Поэтому без применения особых приспособлений ПД всегда будет прижат к стенке скважины. Геометрический анализ распространения УВ при данном расположении ПД показывает, что УВ претерпевают три отражения: два – от стенок скважины и одно – от жесткой стенки. Последнее соответствует столкновению двух зеркально симметричных УВ (плоскость симметрии проходит через оси симметрии скважины и ПД). Углы отражения меньше критического, поэтому при оценочных расчетах значение коэффициента отражения УВ от стенок скважины принимаем равным  $k_{отраж} = \frac{2\rho_c C_p}{\rho_c C_p + \rho_{oo} D_s}$ .

Важным обстоятельством является то, что после первого отражения от стенки скважины отраженные потоки имеют незначительное геометрическое расхождение. Поэтому окончательное давление во фронте УВ в ЭВВ после 3 последовательных отражений будет равно

$$P_{\Sigma} \approx 2,3k_{отраж}^2 P_{ПД} \cdot f(\tau_s), \quad (4.59)$$

где  $P_{ПД}$  – давление во фронте падающей УВ перед первым отражением от стенки скважины.

Полагая, что радиальная скорость движения материала ЭВВ в зоне сжатия

изменяется по закону  $W_r = W_{r0} \left( \frac{r_0}{r} \right)^{0,5}$  – [149], определяем

$$P_{ПД} \approx \rho_{oo} W_{r0} \left( \frac{d_{ПД}}{d_{свб}} \right)^{0,5} \left( A + B W_{r0} \left( \frac{d_{ПД}}{d_{свб}} \right)^{0,5} \right), \quad (4.60)$$

где  $d_{ПД}$ ,  $d_{свб}$  – диаметры ПД и скважины (полагаем, что заряд занимает все сечение скважины) соответственно.

Давление в области столкновения УВ через время  $\tau_*$  после столкновения можно рассчитать по формуле [181]

$$P_f(\tau_*) \approx P_\Sigma \left( 1 + \frac{D_y \tau_*}{L \sin \varphi_n} \right)^{-3} = P_\Sigma \left( 1 + \frac{D_\delta \tau_*}{L} \right)^{-3}, \quad (4.61)$$

(при коэффициенте политропы ЭВВ  $\approx 3$ );  $\varphi_n$  - угол падения УВ на стенку скважины:  $\varphi_n = \arcsin \frac{D_y}{D_\delta}$  [20].

На основе геометрического анализа распространения УВ, вызванных в ЭВВ взрывом ПД, можно показать, что минимальная длина УПД, при которой на давление в области столкновения двух зеркально симметричных ветвей УВ на протяжении времени  $\tau_*$  не оказывает влияния аксиальная волна разряжения и его значение можно оценивать по уравнению (5.9), равна

$$(L_{ПД})_{\min} = (d_{свб} - d_{ПД}) \frac{D_\delta}{D_y \sqrt{1 - (D_y D_\delta^{-1})^2}} + D_\delta \tau_*. \quad (4.62)$$

Принимая в качестве критерия возбуждения детонации условие, предложенное в работе [16], на основании (4.59) – (4.61) имеем: для возбуждения детонации с величиной фронтального давления  $P_f(\tau_*)$  необходимо выполнение условия

$$P_f(\tau_*) \approx 2,3k_{отраж}^2 \rho_o W_{ro} \left( \frac{d_{ПД}}{d_{свб}} \right)^{0,5} \left( A + B W_{ro} \left( \frac{d_{ПД}}{d_{свб}} \right)^{0,5} \right) \left( 1 + \frac{D_\delta \tau_*}{L_{ПД}} \right). \quad (4.63)$$

На рис. 4.7 приведены зависимости давления в точке Чепмена-Жуге от времени межпорового прогорания для ЭВВ, а также зависимости давления в отраженной УВ от времени после отражения. Последние зависимости выполнены на основании работы [181].

В таблице 4.7 представлены результаты расчетов давления  $P_\Sigma$  в ЭВВ.

Анализ рис. 4.7 показывает, что при времени межпорового прогорания меньше 1 мкс давление в отраженной волне незначительно отличается от давления в момент отражения. Поэтому при оценочных расчетах используем данные табл. 4.7.

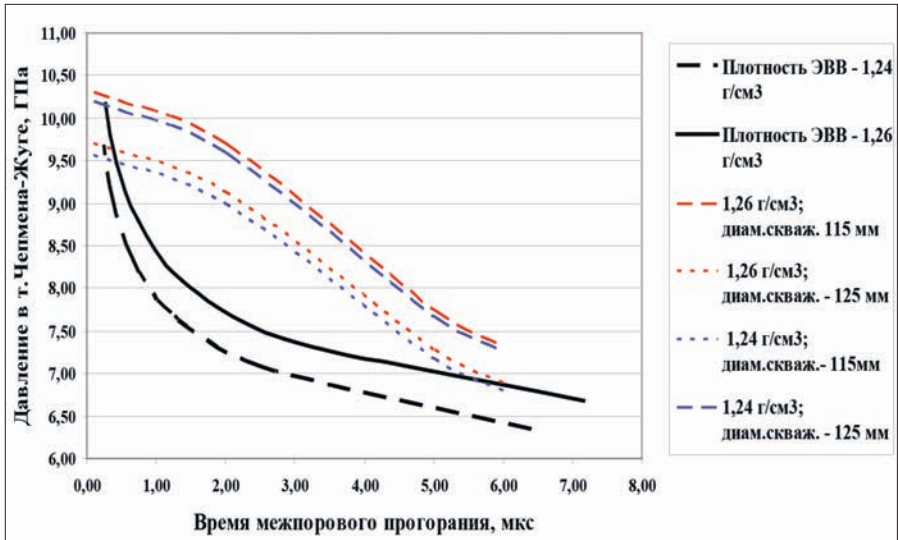


Рис. 4.7. Зависимости давления в точке Чепмена-Жуге от времени межпорового прогорания для ЭВВ и давления в отраженной УВ в зависимости от времени после отражения.

Табл. 4.7. Величина давления  $P_{\Sigma}$  при различной акустической плотности гранита и различных диаметрах взрывных скважин, вызываемая взрывом ПД (50\*420мм) из патронов «Senatel Powerfrag».

Плотность среды (г/см <sup>3</sup> ) / Скорость продольных волн (км/с)	Диаметр взрывной скважины, мм	Величина $P_{\Sigma}$ , ГПа ( $\rho_{oo} = 1,26$ г/см <sup>3</sup> )/( $\rho_{oo} = 1,24$ г/см <sup>3</sup> )
2,65 / 5,46	115	10,3/ 10,2
	125	9,72/ 9,66
2,84 / 6,3	115	11,1/11,0
	125	10,5/ 10,4

Примечание: данные о механических свойствах гранитов заимствованы из [165].

На рис. 4.8 и 4.9 представлены зависимости скорости детонации в ЭВВ плотности 1,26 г/см<sup>3</sup> и 1,24 г/см<sup>3</sup> от давления в т. Чепмена-Жуге.

Анализ рис. 4.8 и 4.9 показывает, что при инициировании ЭВВ (начальная плотность 1,05 – 1,1 г/см<sup>3</sup>) в скважинах диаметром 115 – 125 мм при помощи удлиненного ПД из двух патронов «Senatel Powerfrag» скорость детонации на

начальном участке должна иметь значение 6100 – 6420 м/с (если взрывание происходит в высокопрочных гранитах). На карьере ЗАО «Семиозерское КУ» добывают преимущественно высокопрочные граниты. Согласно экспериментальным данным [35] скорость детонации инициирующей ударной волны при использовании линейного промежуточного детонатора удлиненной формы в скважинном заряде диаметром 115 – 125 мм составляет 6144 – 6610 м/с.

Наблюдается согласие расчетных и экспериментальных данных.

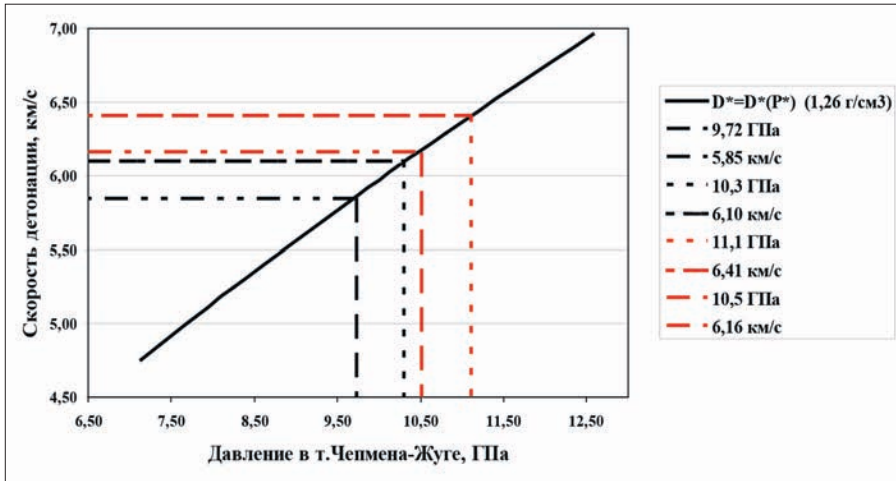


Рис. 4.8. Зависимость скорости детонации в ЭВВ плотности 1,26 г/см³ от давления в т. Чепмена-Жуге.

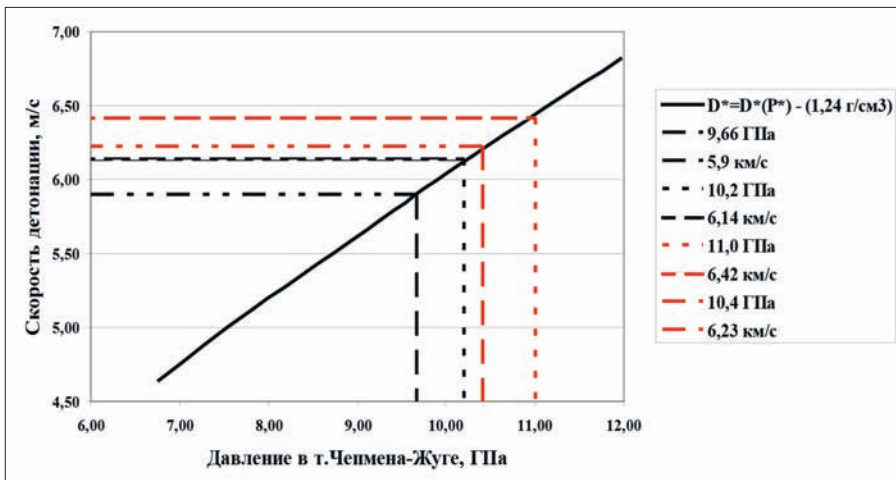


Рис. 4.9. Зависимость скорости детонации в ЭВВ плотности 1,24 г/см³ от давления в т. Чепмена-Жуге.

#### 4. Иницирование ЭВВ удлиненным ПД из конверсионного ВВ

Оценим иницирующие способности линейных инициаторов ТУ 7276-56466532-25-2007 [203] в ЭВВ типа «Сибирит-1200».

При расчетах исходим из следующих данных:

химический состав ЭВВ -  $NH_4NO_3$  – 77 %,  $H_2O$  - 16 %, топливная фаза – 7 %. Плотность матричной эмульсии – 1,35 г/см<sup>3</sup>. Коэффициенты ударной адiabаты эмульсии – А = 1920 м/с, В = 1,98. Радиус газовых пор ЭВВ при атмосферном давлении – 40 мкм, размер частиц эмульсии – 3 мкм;

плотность ПД – 1,6 г/см<sup>3</sup>; скорость детонации ПД – 7200 м/с [203];- коэффициент полнотры ЭВВ ПД – 3,4;

иницирование – нижнее, глубина заложения ПД – 10 м;

плотность ЭВВ – 1,24 г/см<sup>3</sup> (начальная плотность – 1,1 г/см<sup>3</sup>) и 1,22 г/см<sup>3</sup> (начальная плотность – 1,05 г/см<sup>3</sup>);

радиус газовых пор на глубине 10 м равен 29,1 мкм при начальной плотности 1,05 г/см<sup>3</sup>; 29,6 мкм при начальной плотности 1,1 г/см<sup>3</sup>.

На рис. 4.10 представлены зависимости необходимой толщины слоя ЭВВ, охваченного химической реакцией, от давления в зоне этой реакции для осуществления детонации с абсолютно устойчивым или нейтрально устойчивым фронтом (сплошные линии). Устойчивые детонационные процессы в ЭВВ возможны при нахождении параметров детонации выше штриховой линии, если плотность ЭВВ больше 1,22 г/см<sup>3</sup>, и сплошной – если плотность ЭВВ больше 1,24 г/см<sup>3</sup>.

Красная пунктирная линия соответствует зависимости толщины слоя ЭВВ, охваченного химической реакцией под действием прямой УВ, от давления в зоне этой реакции для ПД, имеющего размеры 40\*1000 мм и соответствующего ТУ 7276-56466532-25-2007.

Анализ рис. 4.10 показывает, что взрыв ПД 40\*1000 из конверсионного ВВ вызывает высокоскоростное детонационное разложение ЭВВ (при начальной плотности ЭВВ не более 1,1 г/см<sup>3</sup>) непосредственно в прямой волне, излучаемой при взрыве ПД. При этом среднее значение скорости детонации ЭВВ (начальная плотность 1,05 – 1,1 г/см<sup>3</sup>) составит 5400 м/с (рис. 4.11).

Авторы работы [185] экспериментально зафиксировали скорость детонации в эмулите «ВЭТ-700» (начальная плотность 0 1,11 г/см<sup>3</sup>) при иницировании его линейным ПД на участке вне зоны воздействия ПД – 5229,4 – 5234,8 м/с.

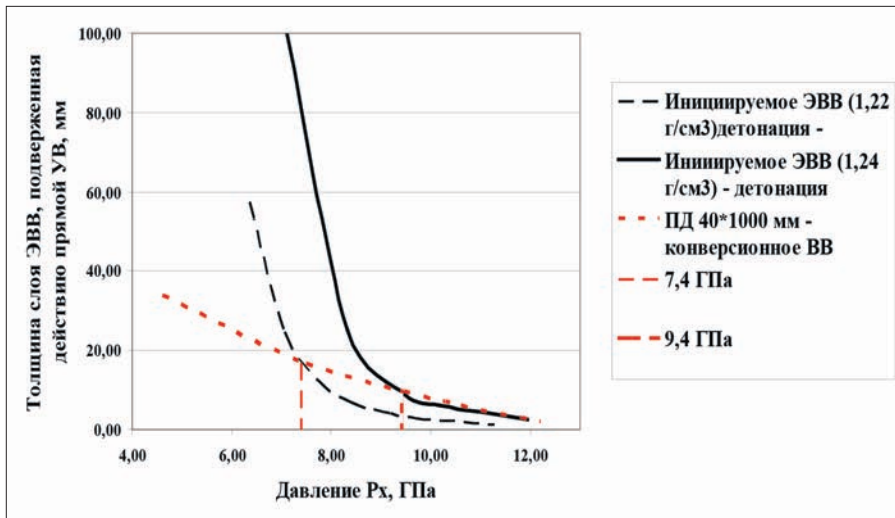


Рис. 4.10. Зависимости необходимой толщины слоя ЭВВ, охваченного химической реакцией, от давления в зоне этой реакции для осуществления детонации с абсолютно устойчивым или нейтрально устойчивым фронтом (сплошные линии). ЭВВ плотностью 1,22 г/см<sup>3</sup>, 1,24 г/см<sup>3</sup> и ПД 40\*1000 из конверсионного ВВ.

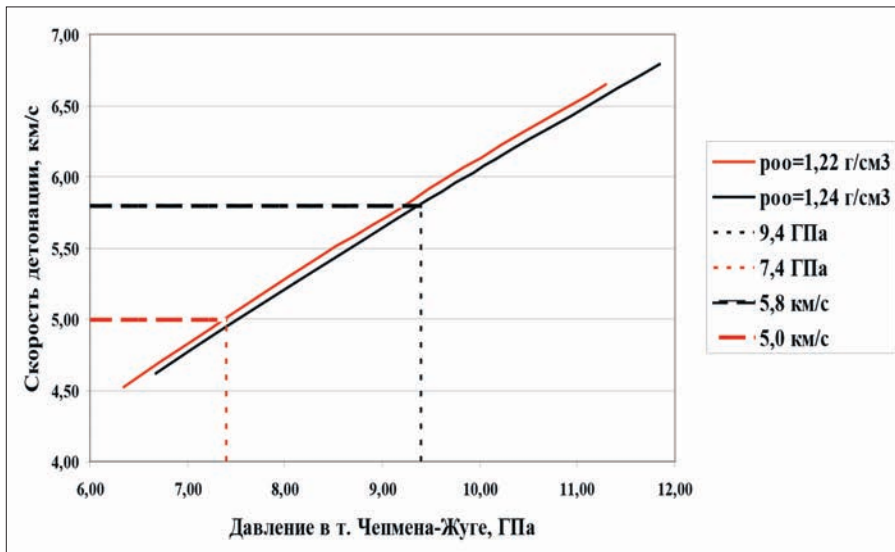


Рис. 4.11. Зависимость скорости детонации в ЭВВ от давления в т. Чепмена-Жуге (плотность ЭВВ = 1,237 г/см<sup>3</sup>).

Также наблюдается согласие расчетных и экспериментальных данных.

Следовательно, физико-математическая модель детонации ЭВВ, сенсibilизированных газовыми порами, представленная в главах 2 и 3, в сочетании

с условием инициирования промышленных ВВ, предложенного в работе [16], позволяет осуществлять аналитическую оценку инициирующей способности ПД при воздействии на ЭВВ как плоской, так и цилиндрической УВ.

Таким образом, при применении удлиненных (линейных) эмульсионных ПД возбуждение полноценной детонации в ЭВВ возможно лишь при усилении давления в отраженных волнах (от стенок скважин или от специально введенных твердых объектов). Данный вывод косвенно подтверждается результатами исследований, изложенных в работе [101].

При применении ПД из конверсионных ВВ в ЭВВ плотностью до  $1,24 \text{ г/см}^3$  (начальная плотность  $1,1 \text{ г/см}^3$  при глубине заложения ПД 10 м) сразу вблизи ПД под действием прямой УВ возникает радиальная детонация. Дополнительным подтверждением правильности данного вывода служит успешная практика применения линейных инициаторов ТУ 7276-56466532-25-2007 [203] на карьерах ОАО «Ковдорский ГОК» и ОАО «Карельский окатыш» при инициировании наливных ЭВВ, сенсibilизированных газовыми порами, начальной плотностью до  $1,11 \text{ г/см}^3$  [185].

### ***5. Иницирование ЭВВ когерентным ПД***

Для проверки выявленных закономерностей распространения детонационных волн в ЭВВ, сенсibilизированных газовыми порами, и эффективности их инициирования когерентным ПД на Асбестовском карьере были проведены опытные взрывы ЭВВ «Порэмит-1А», в которых измерялась скорость детонации по длине заряда при различных инициирующих импульсах [62] (инициирование одной или двумя шашками ПТ-П750).

ЭВВ имело следующий химический состав: аммиачная селитра – 73,8 %, вода – 18,5%, топливная фаза – 7,7 %. Плотность ЭВВ при атмосферном давлении –  $1,0 \text{ г/см}^3$ . Способ сенсibilизации – газовые поры. Размер частиц эмульсии – 10 мкм, размер газовых пор – 300 мкм [62, 184]. Скважины бурились в прочных горных породах (коэффициент крепости по М.М. Протодяконову  $f = 13$ ).

Глубина скважин – 17 м, длина заряда – 12 м, наклон скважин –  $75^\circ$ , диаметр – 250 мм. Заряды ЭВВ формировались при зарядке из одной зарядной машины. Измерения скорости детонации проводились реостатными приборами «Handitrap Vod Recorder» – датчиковый провод «VOD probecable-НТ» устанавливался по длине заряда.

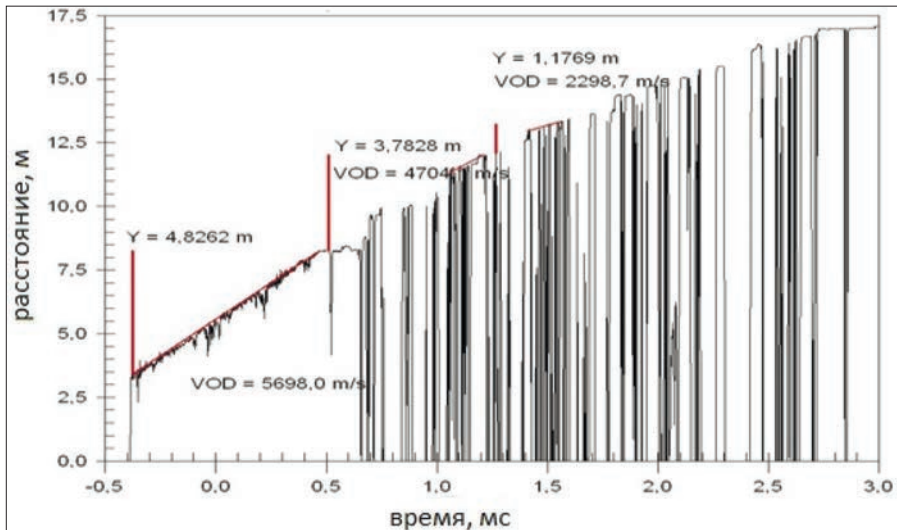


Рис. 4.12. Зависимость длины (м) заряда от времени детонации (мс) ЭВВ. Промежуточный детонатор, состоящий из 2 шашек ПТ-П750. Обозначения: VOD – скорость детонации, м/с; Y – длина участка заряда, м.

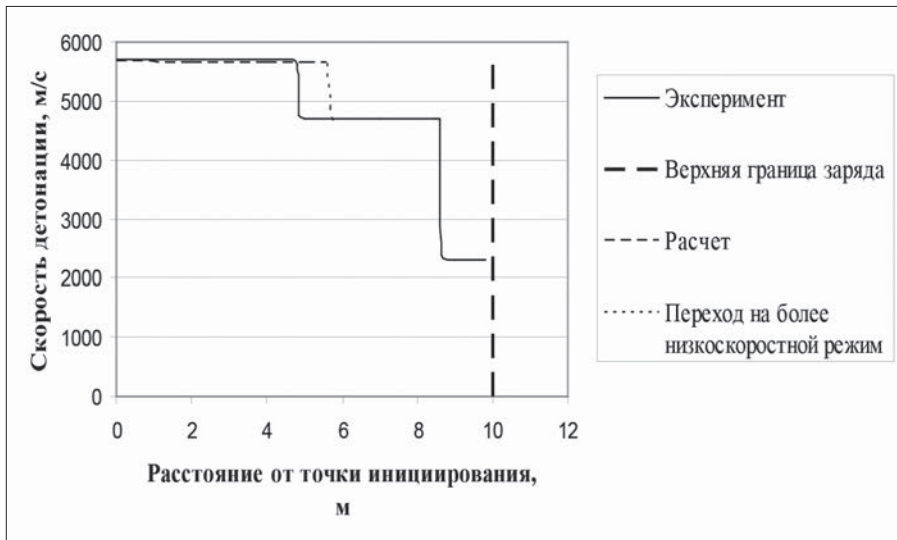


Рис.4.13. Зависимости скорости детонации ЭВВ от места иницирования (эксперимент и расчет).

Рассмотрим случай, когда иницирование зарядов (нижнее) производилось от промежуточных детонаторов, состоящих из шашек ПТ-П750, расположенных одна над другой на расстоянии 15 см, и внутрискважинных капсулей неэ-



лектрической системы Искра С-500-18. Результаты обрабатывались в программе «Handi TrapII-v2p0», поставляемой изготовителем с прибором, и представлены на рис. 4.12. Изменение плотности ЭВВ по длине заряда рассчитывали по методике [193].

На рис. 4.13 приведены графики экспериментально определенной и расчетной скоростей детонации по длине скважинного заряда. Расчет скоростей детонации осуществлялся по методике, изложенной в главе 2, а условий ликвидации нейтральной устойчивости – по методике, изложенной в главе 3. При выполнении расчетов исходили из приведенного выше химического состава ЭВВ, его плотности при атмосферном давлении и структурных характеристик эмульсии.

Расчеты показали, что возбуждение высокоскоростного режима детонации происходит в результате 3-кратного ударного сжатия ЭВВ (сжатие в прямой ударной волне УВ – сжатие при взаимодействии УВ от сближенных зарядов ПД – сжатие в УВ, отраженной от стенки скважины). Результаты расчетов приведены в табл. 4.8.

Табл. 4.8. Расчетные значения параметров детонации в ЭВВ при их инициировании когерентным ПД (по длине заряда)

Расстояние от ПД, м	Текущая плотн. ЭВВ, г/см <sup>3</sup>	Текущий коэфф. политропы ЭВВ	Скорость детонации, м/с	Давление в т. Чепмена-Жуге, ГПа	Время прогоран. между порами, мкс
0,0	1,198	3,21	5661,2	8,68	5,6
5,64 (момент перехода на НСР)	1,137	3,06	5657,0	8,26	3,6

Анализ рис. 4.13 и табл. 4.8 показывает, что разработанные методики расчета позволяют достаточно точно определять параметры детонации, вызванной воздействием когерентного ПД.

На рис. 4.14 приведена зависимость коэффициента гофрировки от удаления от места иницирования.

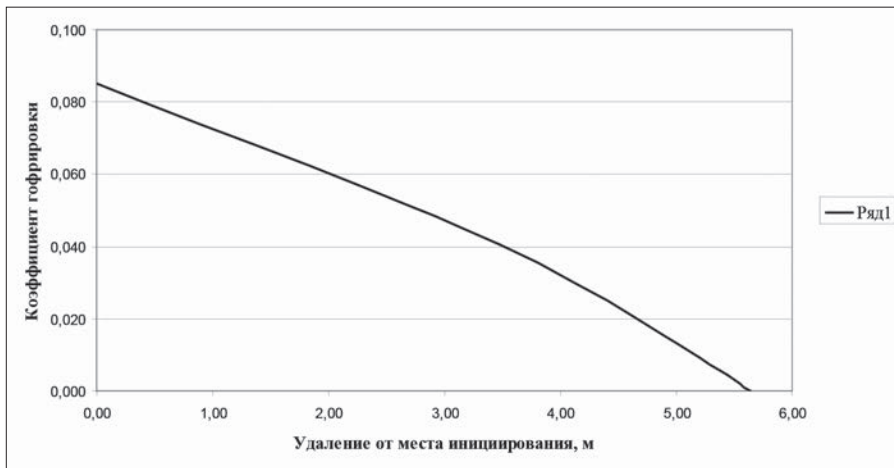


Рис.4.14. Зависимость коэффициента гофрировки от удаления от места иницирования.

На рис. 4.15 представлены экспериментальные и расчетные зависимости скорости детонации от удаления от места иницирования при нижнем иницировании одинаковых скважинных зарядов ПД из одной шашки ПТ-П750 и двух шашек ПТ-П750 соответственно [213]. Экспериментальные зависимости построены на основании выполненных нами опытов на карьере ОАО «Ураласбест». Характеристики ЭВВ и параметры скважинных зарядов указаны в начале настоящего параграфа.

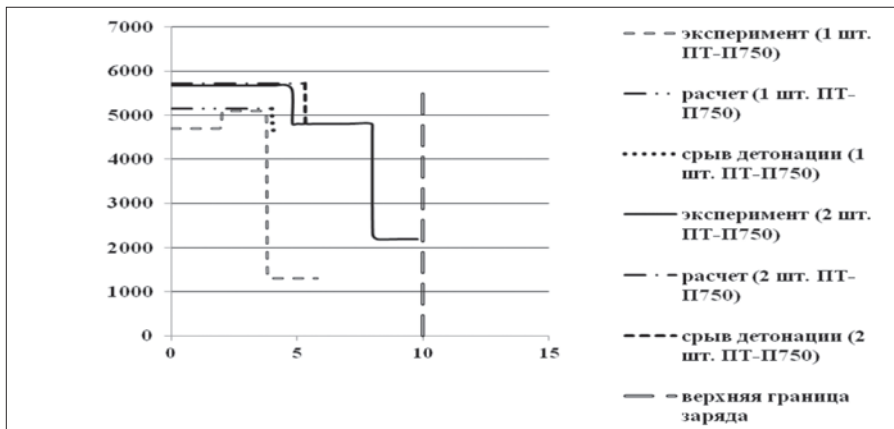


Рис.4.15. Зависимости скорости детонации ЭВВ от места иницирования при ПД различной массы (эксперимент и расчет).

Сравнение представленных на рис. 4.15 зависимостей наглядно показывает на влияние инициирующего воздействия на параметры детонации ЭВВ. Более сильное и продолжительное инициирующее воздействие обеспечивает более высокие значения детонационных показателей, а также большую длину участка высокоскоростной детонации.

#### **Выводы по главе 4**

Представлены методики расчета параметров ПД для инициирования детонации в ЭВВ, сенсibiliзирoванных газовыми порами:

при фронтальном ударе продуктов взрыва ПД (нагружение плоской ударной волной как с гладким, так и пульсирующим фронтом);

при скользящем ударе продуктами взрыва линейного (удлиненного) ПД;

при взрыве системы сближенных сосредоточенных зарядов.

В разработанных методиках учитываются размеры ПД, детонационные параметры ВВ, из которого изготовлен ПД, диаметр взрывных скважин и акустическая жесткость окружающих заряд пород, химический состав, плотность и структура возбуждаемых ЭВВ.

Показано, что химический состав, плотность и структура ЭВВ влияют на параметры инициирующих их импульсов. Поэтому, регулируя данные параметры, можно в известных пределах управлять эффективностью возбуждения детонации.

Показано, что при возбуждении детонации в ЭВВ важную роль может играть эффект скачкообразного возрастания давления во фронте ударной волны, возбуждаемой в ЭВВ при взрыве ПД, при отражении от стенок скважины и (или) специально введенных в ЭВВ твердых включений.

ПД из высокоплотных индивидуальных ВВ (смесей или плавов индивидуальных ВВ), а также из конверсионных ВВ обладают высокой инициирующей способностью при возбуждении детонации в ЭВВ. При этом при определенной плотности ЭВВ при взрыве линейного (удлиненного) ПД из высокоплотных индивидуальных ВВ (смесей или плавов индивидуальных ВВ) детонация может возникнуть под действием только прямой радиальной УВ, испускаемой при взрыве ПД.

При определении параметров ПД для инициирования ЭВВ необходимо исходить из выполнения следующего условия: ПД при воздействии на ЭВВ

должен создавать в достаточном объеме ЭВВ необходимое давление при необходимой продолжительности действия (критерий Баума-Державца).

Показано, что величина детонационных параметров ЭВВ при детонации в режиме нейтральной устойчивости детонационного фронта зависит от характеристик иницирующего воздействия.

Экспериментально подтверждено утверждение о переходе детонационного процесса на более низкоскоростной режим при ликвидации нейтральной устойчивости детонационного фронта.

Показано, что для обеспечения полноты детонации необходимо использовать технологические методы: изменение места установки ПД, установку дополнительных ПД /многоточечное иницирование/, изменение начальной плотности ЭВВ, изменение структуры и рецептуры ЭВВ.

## ГЛАВА 5. ОБЕСПЕЧЕНИЕ УСТОЙЧИВОЙ ДЕТОНАЦИИ ЭВВ В ТЕХНОЛОГИЯХ ВЗРЫВНОГО РАЗРУШЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД

Как показано в предыдущей главе, ЭВВ и ПД представляют систему, в которой детонационные параметры ЭВВ зависят как от параметров, характеризующих ЭВВ (химический состав, плотность, размеры сенсibiliзирующих пор и частиц эмульсии), так и от параметров, характеризующих ПД (создание ударным воздействием в достаточном объеме ЭВВ необходимого давления при необходимой продолжительности действия).

В случае участия в возбуждении детонации отраженных от стенки скважин ударных волн также играют роль такие факторы, как сжимаемость горных пород, окружающих заряд ЭВВ, и геометрические параметры, характеризующие форму, размеры ПД и отражающей поверхности.

Однако согласно исследованиям, приведенным в 3 главе, не всякая детонационная волна, возбужденная в ЭВВ, способна пройти по всей длине вертикального (наклонного) скважинного заряда при нижнем инициировании. Для выполнения данного требования необходимо соблюдение определенных условий.

Следовательно, при использовании ЭВВ первоначально необходимо оценить условия принципиальной возможности прохождения детонации по всей длине заряда ЭВВ, принятого при осуществлении взрывных работ.

Далее, исходя из полученных результатов, осуществляется расчет ПД, необходимого для инициирования заряда ЭВВ. Для определения параметров ПД используется критерий Баума-Державца.

В параграфах 5.2 – 5.3 на примере карьера ОАО «Ураласбест» приведено обоснование условий, обеспечивающих детонацию ЭВВ по всей длине скважинного заряда.

### 5.1. Оценка возможности прохождения детонации по всей длине скважинного заряда ЭВВ

На карьерах ОАО «Ураласбест» для массовой отбойки горных пород используется бестарное ЭВВ следующего химического состава:  $NH_4NO_3$  – 75,0 – 75,5 %,  $H_2O$  – 18 %, топливная фаза – 6,5 – 7,0 %.

Плотность матричной эмульсии – 1,33 г/см<sup>3</sup>. Размер частиц эмульсии – 5 – 7 мкм (средний размер – 6,5 мкм). Радиус газовых пор при атмосферном давлении – 50 – 120 мкм.

Микроскопические исследования дисперсности исследуемых образцов эмульсии выполнялись перед проведением опытных и промышленных взрывов с целью получения информации о микроструктуре ЭВВ, необходимой для последующего анализа.

Измерения осуществлялись с помощью оптического микроскопа Olympus VX-51 фирмы «Olympus», оборудованного мультипортами для видео- и фото-регистрации. Точность измерений геометрических размеров составляет 0,5 % отн. Методика проведения экспериментов на оптическом микроскопе Olympus VX-51 описана в работе [184].

ЭВВ размещается в скважинах длиной 14 – 17 м. Длина заряда – 8 – 12 м. Диаметр скважин – 160 – 250 мм.

Забойка в необводненных скважинах отсутствует, а в обводненных роль забойки выполняет вода, покрывающая заряд.

На основании сведений, приведенных в 3 главе настоящей работы, определены области устойчивого и нейтрально устойчивого режима распространения детонации по высоте скважинного заряда при размерах газовых пор, частиц эмульсии и разной степени возбуждения для ЭВВ, применяемых при взрывных работах на карьерах ОАО «Ураласбест».

Результаты расчетов для необводненной скважины представлены на рис. 5.1. Рассмотрено нижнее инициирование. Принято следующее обозначение:  $h$  – расстояние от верхнего сечения до текущего сечения заряда.

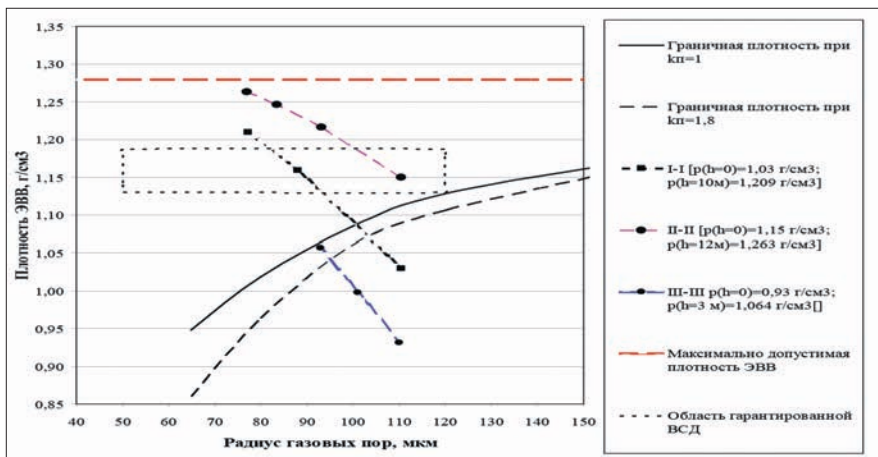


Рис.5.1. Зависимость граничной плотности ЭВВ от размера газовых пор (необводненная скважина). Размер частиц эмульсии – 6,5 мкм.

Детонация скважинного заряда II-II при нижнем инициировании проходит в высокоскоростном режиме без «срывов» процесса, т.к. параметры данных зарядов целиком расположены в области нейтральной устойчивости.

Детонация скважинного заряда III-III при нижнем инициировании проходит в режиме абсолютной устойчивости процесса, т.к. параметры данных зарядов целиком расположены в области абсолютной устойчивости.

Детонация скважинных зарядов I-I при нижнем инициировании начинает проходить в высокоскоростном режиме, но при пересечении линии граничной плотности состояние нейтральной устойчивости детонационного фронта пропадает. Происходит переход на другой режим детонации. Данный переход может приводить к обрыву процесса. Последнее крайне нежелательно ввиду ухудшения качества дробления горных пород, повышения вредного воздействия на экологию окружающей среды, снижения уровня безопасности горных работ.

Анализ рис. 5.1 показывает, что детонация 12-метрового скважинного заряда ЭВВ, применяемого на карьерах ОАО «Ураласбест», возможна только в высокоскоростном режиме (режиме нейтральной устойчивости).

Согласно микроскопическим исследованиям диапазон размеров сенсibiliзирующих газовых пор весьма широк (радиусы пор находятся в интервале от 50 до 120 мкм). Это обуславливает следующий диапазон плотностей ЭВВ в верхней части 12-метрового скважинного заряда:

минимальное значение равно  $1,13 \text{ г/см}^3$  (значение граничной плотности при  $k_n = 1$  и  $R_o = 120 = 120 \text{ мкм}$ );

максимальное значение –  $1,20 \text{ г/см}^3$  (в этом случае плотность ЭВВ на глубине 12 м будет равна  $1,28 \text{ г/см}^3$ ). Согласно [92],  $1,28 \text{ г/см}^3$  – максимально допустимое значение плотности ЭВВ, при которой сохраняются его детонационные способности.

Область, удовлетворяющая данным условиям, обозначена на рис. 5.1 как область гарантированной ВСД (высокоскоростной детонации).

Расчеты на основании методики работы [193] показывают, что для обводненной скважины при глубине заряда 12 м с учетом гидростатического давления 5-метрового водяного столба плотность ЭВВ в верхней части заряда сравняется с максимально допустимым значением при величине начальной плотности –  $1,17 \text{ г/см}^3$ .

Таким образом, область допустимых значений плотности ЭВВ при атмосферном давлении  $\rho_{oo}$  для 12-метровых колонковых зарядов как в обводнен-

ных, так и в необводненных скважинах на карьерах ОАО «Ураласбест» лежит в диапазоне  $1,13 \text{ г/см}^3 < \rho_{00} < 1,17 \text{ г/см}^3$ .

Полученный результат имеет важное в практике взрывных работ следствие: при необходимости ведения взрывных работ длинными вертикальными (наклонными) скважинными зарядами бестарных ЭВВ для обеспечения полного энерговыделения при взрыве этих зарядов целесообразно изменять конструкцию колонковых зарядов. Непрерывный по длине колонковый заряд следует разбивать специальными устройствами на отделенные участки, имеющие такую длину (высоту), при которой плотность ЭВВ не будет выходить из зоны допустимых значений. Такими специальными устройствами будут любые приспособления, препятствующие передаче гидростатического давления выше расположенного по высоте участка заряда на нижележащий заряд. При этом каждый участок инициируется собственным ПД.

## 5.2. Выбор и промышленное испытание ПД для инициирования скважинного заряда ЭВВ

В п. 5.1 получены необходимые, но недостаточные условия прохождения детонации по всей длине колонкового скважинного заряда ЭВВ, т.к. не рассмотрены вопросы инициирования ЭВВ. Определим требования к инициирующему импульсу, полагая, что ПД для инициирования скважинного заряда располагается в его центре по длине заряда. Выбор данного места для инициирования был обусловлен необходимостью экспериментальной проверки теоретического вывода, сделанного в п. 3.3, о том, что распространение детонации в направлении уменьшения размеров газовых пор (в направлении «ПД – забой нисходящей скважины») происходит без «срывов». Единственное ограничение – плотность ЭВВ в нижней части скважины не должна превышать максимально допустимого значения [92].

При расчетах используем следующие характерные для ОАО «Ураласбест» показатели используемых ЭВВ: химический состав –  $NH_4NO_3$  – 75,0 %,  $H_2O$  – 18 %, топливная фаза – 7,0 %. Плотность матричной эмульсии –  $1,33 \text{ г/см}^3$ . Размер частиц эмульсии – 6,5 мкм. Радиус газовой поры при атмосферном давлении равен 120 мкм. Плотность ЭВВ при атмосферном давлении –  $1,15 \text{ г/см}^3$ .

Горные породы на карьерах ОАО «Ураласбест» представлены серпентинитами (крепость по М.М. Протодяконову – 8 – 10), перидотитами (крепость – 12 – 14) и габбро (крепость – 16 – 18). Механические свойства данных пород приведены в табл. 5.1.



Табл. 5.1. Механические свойства типичных горных пород карьеров ОАО «Ураласбест»

Горные породы	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Скорость продольных волн, м/с	Акустическая жесткость (10 <sup>6</sup> ), кг/(м <sup>2</sup> *с)
Серпентинит [159]	2600	4550	11,83
Габбро [165]	2990	6410	19,17
Перидотит [165]	3050	6520	19,89

В качестве ПД предполагалось использовать ПД из сближенных шашек ПТ-П750 (ТУ 7288-036-07511608-2009).

Характеристики ВВ для изготовления шашек-детонаторов: пентолит 50:50, плотность – 1,58 г/см<sup>3</sup>, скорость детонации – 7500 м/с, коэффициент политропы – 3,37. При расчете коэффициента отражения ударной волны от стенок скважин использовались механические характеристики горных пород, представленные в табл. 5.1.

На координатной плоскости (фронтальное детонационное давление; параметры детонации) нанесены зависимости некоторых детонационных параметров ЭВВ от величины фронтального детонационного давления, а также значения аналогичных параметров, возникающих в ЭВВ при взрыве когерентного ПД из двух шашек-детонаторов ПТП-750. Рис. 5.2 относится к необводненной, а рис. 5.3 – к обводненной скважине. Рассматривается центральная часть заряда по его длине.

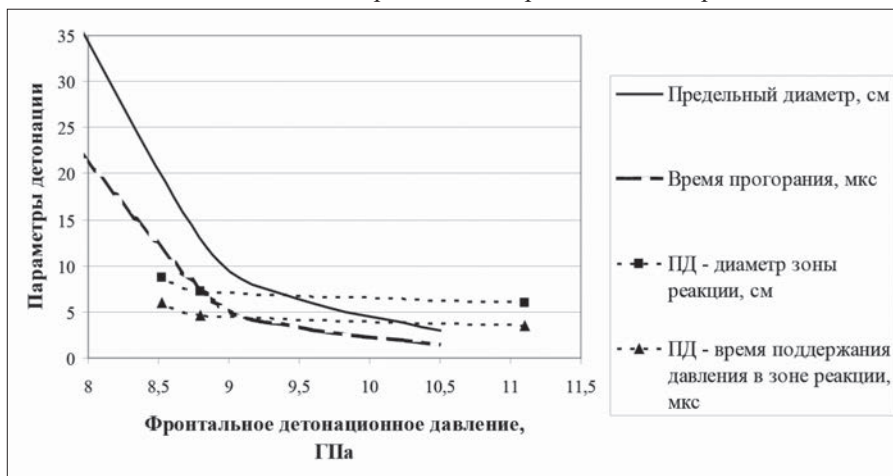


Рис. 5.2. Зависимости детонационных параметров от фронтального давления и параметры зоны реакции, вызываемой в ЭВВ при взрыве когерентного ПД (центр по длине необводненного 10-метрового скважинного заряда).

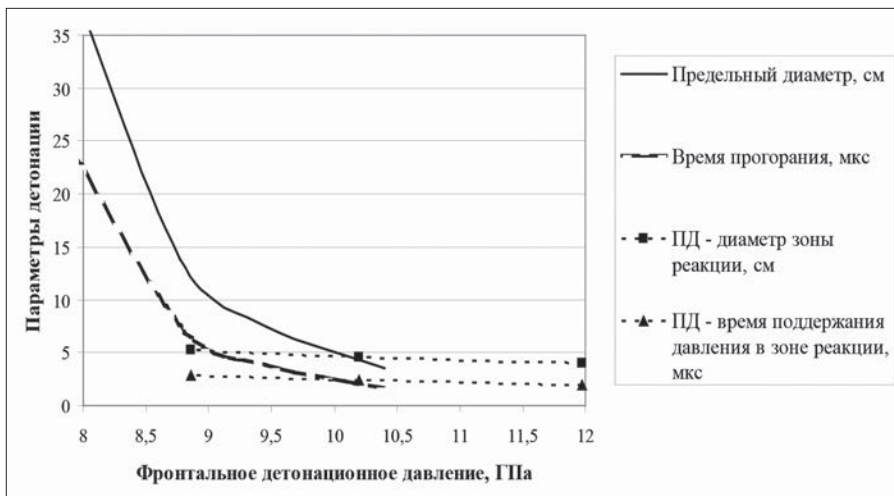


Рис. 5.3. Зависимости детонационных параметров от фронтального давления и параметры зоны реакции, вызываемой в ЭВВ при взрыве когерентного ПД (центр по длине обводненного 10-метрового скважинного заряда при высоте столба воды 5 м)

Анализ результатов, представленных на рис. 5.2 и 5.3, показывает, что когерентный ПД, представленный двумя сближенными шашками-детонаторами ПТП-750, должен обеспечивать надежное инициирование высокоскоростной детонации в ЭВВ требуемой плотности как в обводненных, так и в необводненных скважинах.

Для проверки расчетов на карьере «Центральный» ОАО «Ураласбест» в период с 02.08.2012 по 27.12.2012 был произведен 21 массовый взрыв. Инициирование зарядов осуществлялось ПД из двух сближенных на расстояние 10-30 см шашек-детонаторов ПТП-750 в центральной (по длине) части 250-миллиметрового скважинного заряда.

Плотность применяемого ЭВВ при атмосферном давлении колебалась в рекомендованном диапазоне:  $1,13 \text{ г/см}^3 < \rho_{00} < 1,17 \text{ г/см}^3$ .

Всего за указанный период было взорвано 1502 скважинных заряда, расположенных как в обводненных, так и в необводненных горных породах, и отбито около 1000 тыс. кубометров горной массы.

Контрольные измерения скорости детонации показали, что детонация в верхних частях скважинных зарядов (участок «ПД – верхнее сечение скважинного заряда») происходит по всему замеряемому участку заряда с высокой скоростью (5600 м/с) без скачкообразных снижений скорости или «срывов» процесса (рис. 5.4).

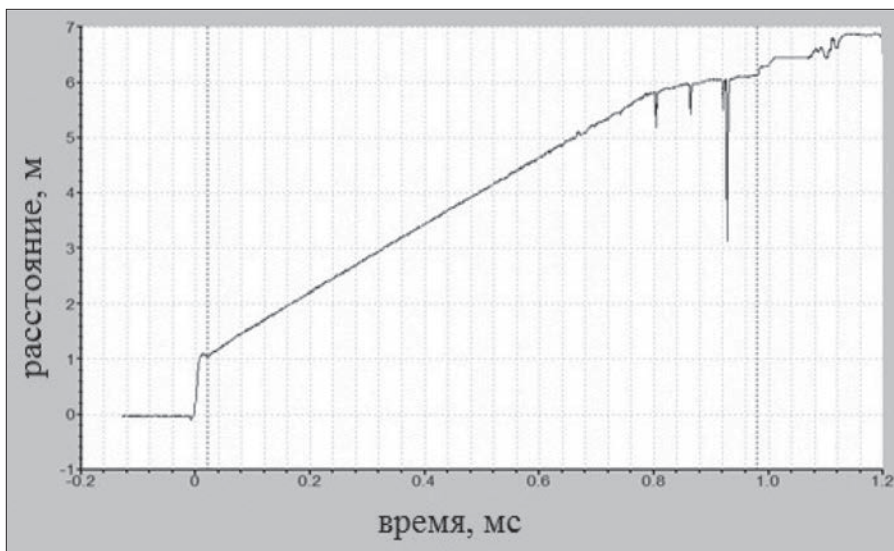


Рис. 5.4. Зависимость длины, пройденной детонационной волной, от времени (участок «ПД – верхнее сечение скважинного заряда»).

Так как инициирование скважинных зарядов осуществлялось ПД, расположенным в центральной (по длине) части заряда, осуществить инструментальные замеры скорости детонации в нижней (ниже ПД) части заряда не представлялось возможным.

Полноценность детонации ЭВВ в нижней части заряда оценивалась опосредованно – посредством оценки качества проработки почвы уступа после взрывных работ. Данное обстоятельство объясняет значительное число выполненных опытно-промышленных взрывов. Наблюдения показали, что во всех опытно-промышленных взрывах была хорошая проработка почвы, что свидетельствовало о том, что ЭВВ, размещенное в нижних частях скважинных зарядов (участок «ПД – забой скважины»), полноценно детонировали при производстве взрывов. Таким образом, вывод, сделанный в п. 3.3, о надежности распространения детонации в направлении уменьшения размеров газовых пор (направление – «ПД – забой нисходящей скважины»), пока плотность ЭВВ будет меньше критической, нашел экспериментальное подтверждение. Данное обстоятельство позволяет рассматривать многоточечное и встречное инициирования как один из методов обеспечения полноты взрывчатого разложения при применении нисходящих скважинных зарядов ЭВВ.

Кроме этого, нашло экспериментальное подтверждение эффективности использования когерентных ПД для инициирования скважинных зарядов бестарных ЭВВ при открытых горных работах.

Способ инициирования зарядов ЭВВ когерентным ПД нашел широкое распространение при ведении взрывных работ на карьере АО «Ураласбест», т.к. он обеспечивает прохождение детонации по всей длине скважинного заряда. Это способствует полному выделению энергии при взрыве заряда ЭВВ, что обуславливает улучшение дробления и снижение экологически вредного воздействия на окружающую среду за счет уменьшения выброса окислов азота и отсутствия остатков невзорвавшегося ЭВВ, которые при разложении под действием внешних факторов (погодные условия, карьерные воды) насыщают карьерные воды вредными нитратами и нитритами.

### 5.3. Обоснование параметров эмульсионного УПД

В настоящее время ряд горнодобывающих предприятий обладает оборудованием для изготовления как бестарных, так и патронированных ЭВВ. В этих условиях возникает целесообразность изготавливать эмульсионные ПД.

Вопрос геометрических параметров ПД приобретает очень важное технологическое и экономическое значение.

Исследования, представленные в п. 4.4, показывают высокую эффективность эмульсионных УПД. Поэтому рассмотрим вопрос о геометрических параметрах УПД подробнее, следуя работам [51, 57] и данным п. 4.4.

Рассмотрим ЭВВ следующего химического состава:

$NH_4NO_3$  – 75,0 %,  $H_2O$  – 18,0 %, топливная фаза – 7 %. Плотность матричной эмульсии – 1,33 г/см<sup>3</sup>.

При расчете параметров ПД исходим из необходимости выполнения критерия Баума-Державца.

На рис. 5.5 приведены зависимости фронтального детонационного давления от времени прогорания межпорового пространства при различных плотностях и структурных особенностях ЭВВ в случае устойчивой детонации.

При построении зависимостей, представленных на рис. 5.5, принимали:

1. Коэффициенты ударной адиабаты эмульсии (ударная адиабата –  $D_y = A + BW_y$ , где  $A, B$  – параметры ударной адиабаты,  $D_y$  – скорость ударной волны,  $W_y$  – массовая скорость) равны:  $A=1920$  м/с,  $B=1,98$  [100].

2. ПД размещается на глубине 9,1 м от верхнего уровня заряда.

Обозначения, принятые на рис. 5.5 :  $R_{00}$ ,  $\rho_{00}$ ,  $d^* \equiv \Delta$  ( $2\text{мкм} \leq d^* \leq 5\text{мкм}$ ) - радиус газовых пор, плотность ЭВВ при атмосферном давлении, размер частиц дисперсной фазы эмульсии соответственно.

ЭВВ, из которого изготавливается ПД, характеризуем следующими параметрами:  $\rho_{\delta} = 1,17 \text{ г/см}^3$ ,  $D_{\delta} = 5100 \text{ м/с}$ ,  $k_{\delta} = 2,8$ .

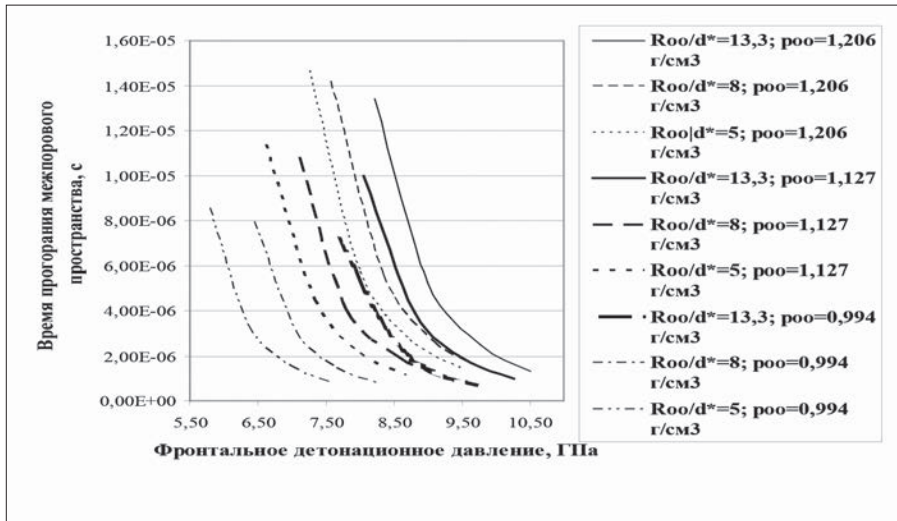


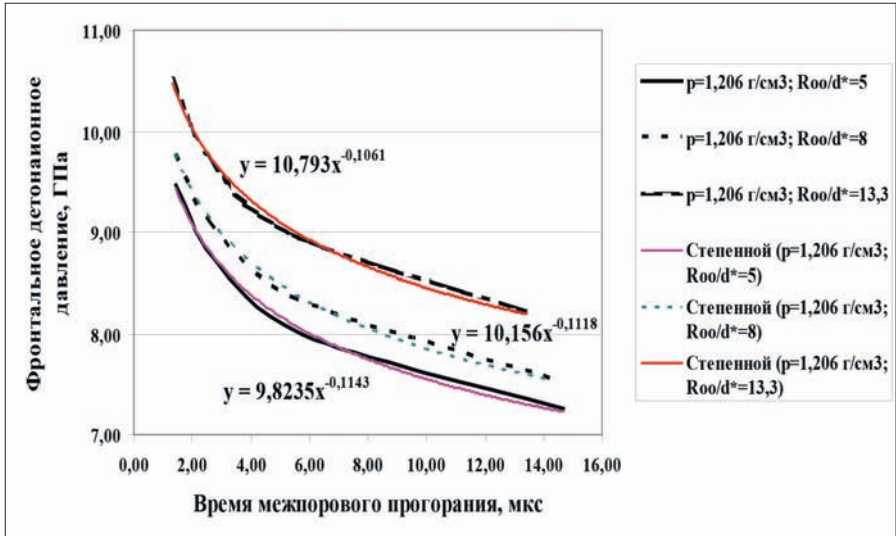
Рис. 5.5. Зависимость фронтального детонационного давления от времени прогорания межпорового пространства при различных плотностях и структурных особенностях ЭВВ.

На рис. 5.6 представлены полученные на основании (4.59) – (4.63) зависимости фронтального детонационного давления в ЭВВ от времени межпорового прогорания при различных плотностях и структурных особенностях ЭВВ для устойчивых режимов детонации. Значения плотности ЭВВ и отношения радиуса пор к размеру частицы окислительной фазы даны при атмосферном давлении.

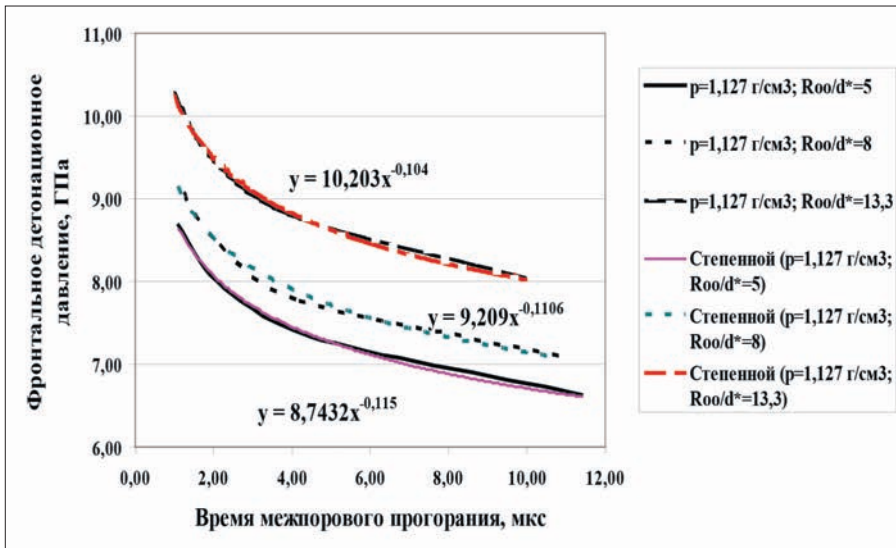
При построении зависимостей, представленных на рис. 5.6, полагали, что ПД расположен на глубине 9,1 м от верхнего уровня заряда.

На основании (4.62), (4.63) и уравнений  $P_f(\tau)$ , приведенных на рис. 5.6, получены зависимости между длиной и диаметром УПД, имеющим минимальную массу при данной длине УПД, при различной плотности и структурных особенностях инициируемого ЭВВ. При расчетах принимали, что УПД изготовлен из ЭВВ, имеющего следующие характеристики:  $\rho_{\delta} = 1,17 \text{ г/см}^3$ ,

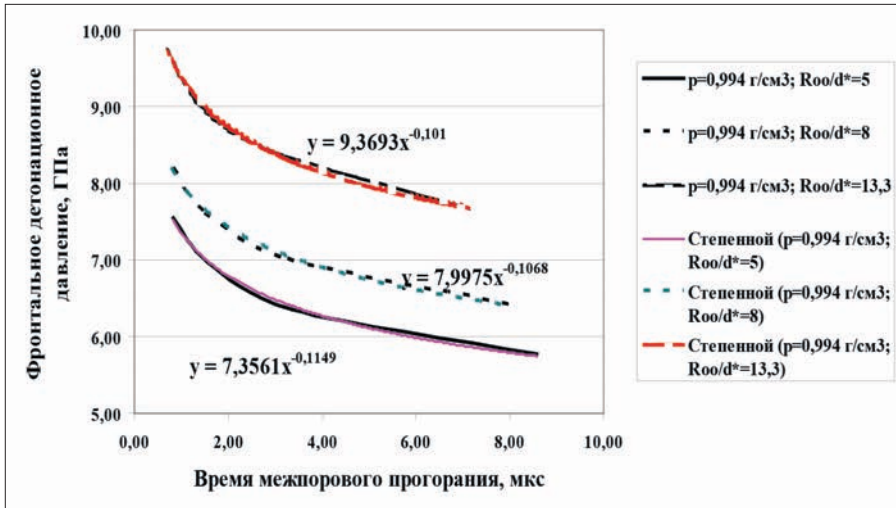
$D_{\sigma} = 5100$  м/с,  $k_{\sigma} = 2,8$ . Диаметр взрывной скважины – 250 мм. Коэффициент отражения УВ от стенок скважины – 1,5.



а)



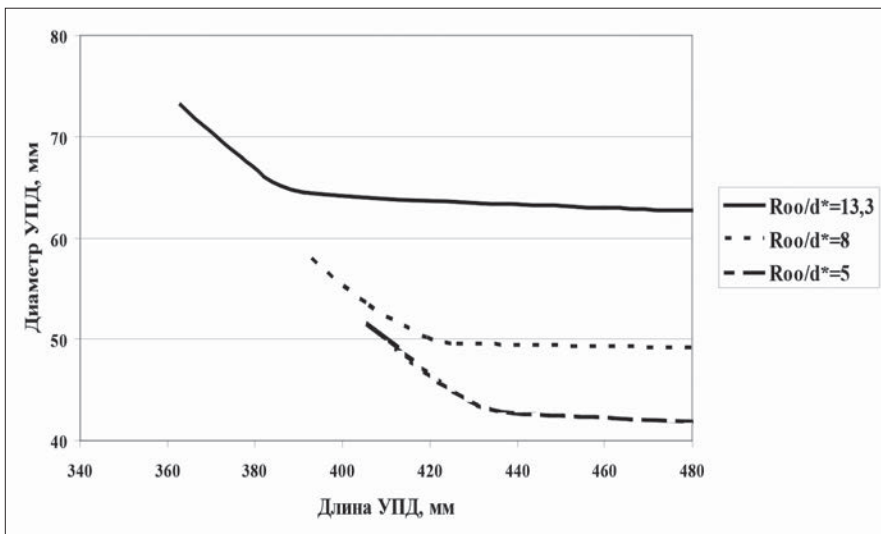
б)



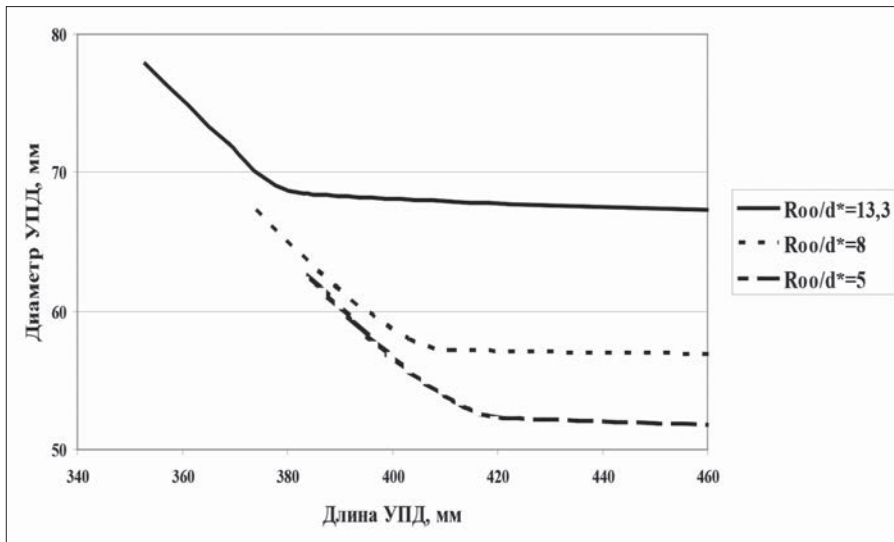
в)

Рис. 5.6. Зависимости фронтального детонационного давления от времени межпорового прогорания при различных плотностях и структурных особенностях ЭВВ для устойчивых режимов детонации.

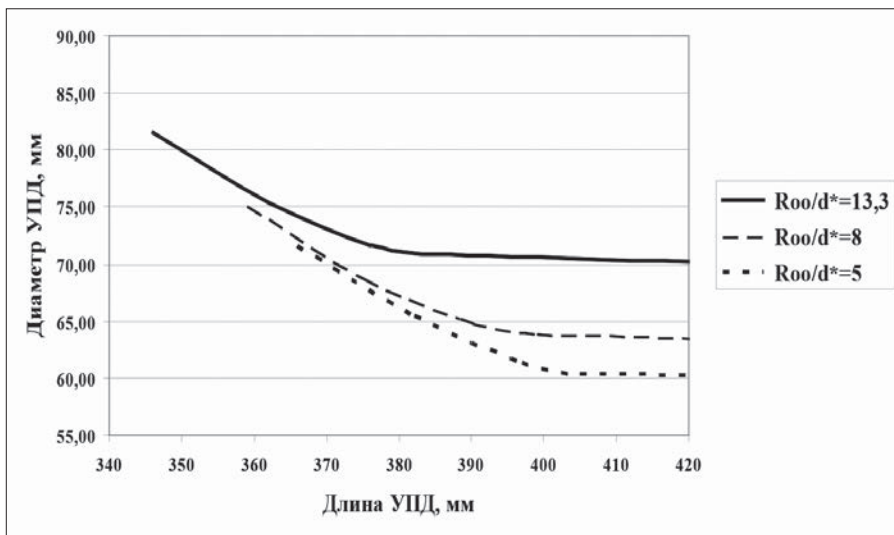
Результаты расчетов для ЭВВ с различной начальной плотностью при атмосферном давлении, но при различных структурных особенностях представлены на рис. 5.7.



А) Начальная плотность ЭВВ –  $0,994 \text{ г/см}^3$ .



Б) Начальная плотность ЭВВ – 1,127 г/см³



В). Начальная плотность ЭВВ – 1,206 г/см³

Рис. 5.7. Взаимосвязь между длиной и диаметром УПД, имеющим минимальную массу при его данной длине, при различных структурных особенностях и начальной плотности инициируемого ЭВВ.

Анализ зависимостей, приведенных на рис. 5.7, рис. 5.8, а также уравнения (4.62) показывает:



1. Существуют оптимальные по массе УПД для инициирования устойчивой детонации ЭВВ;

2. Оптимальные диаметр, длина и масса УПД зависят от плотности, структурных особенностей инициируемого ЭВВ, отношения диаметра УПД к диаметру взрывной скважины и сжимаемости разрушаемой горной породы.

Анализ зависимостей, приведенных на рис. 5.7, показывает, что УПД, имеющие диаметр 70 мм и длину 415 мм (масса – 1860 г), при размещении на глубине 9,1 м инициирует ЭВВ плотностью при атмосферном давлении до  $1,21 \text{ г/см}^3$  при сенсбилизации ЭВВ как мелкими, так и крупными порами.

Уменьшение плотности инициируемого ЭВВ (до  $0,994 \text{ г/см}^3$  при атмосферном давлении) позволяет уменьшить массу УПД при сенсбилизации ЭВВ крупными порами до 1200 г (диаметр 60 мм, длина 370 мм), а при сенсбилизации мелкими порами – до 725 г (диаметр 43 мм, длина 440 мм).

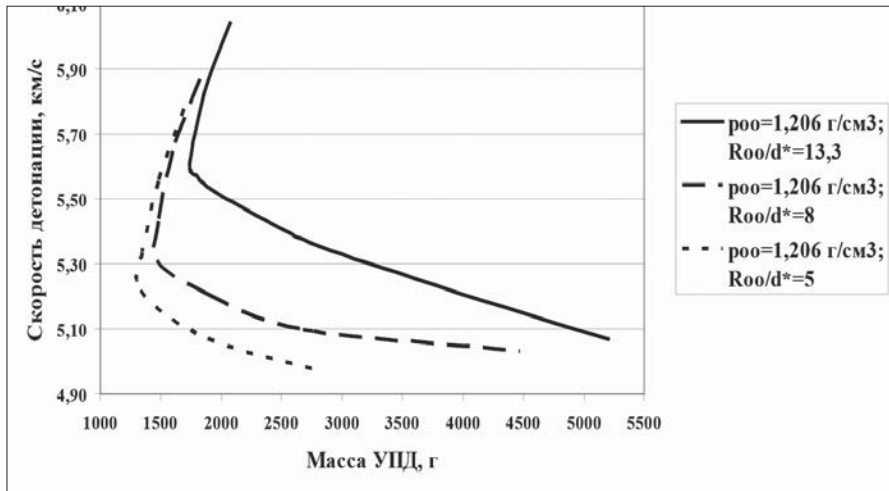


Рис. 5.8. Влияние массы и размеров УПД на скорость детонации в инициируемом ЭВВ.

На рис. 5.8 приведены результаты расчетов скорости детонации ЭВВ при различных геометрических размерах УПД. Верхняя часть приведенных кривых до точки поворота соответствует УПД с диаметром больше оптимального; нижняя ветвь кривых – диаметр УПД меньше оптимального.

Нижняя ветвь отражает, на первый взгляд, парадоксальную ситуацию: наблюдается снижение скорости детонации при увеличении массы УПД. Данное обстоятельство связано с тем, что эта ветвь относится к случаю уменьшающегося диаметра УПД.

Согласно (4.59) – (4.61) по мере уменьшения диаметра УПД снижается давление в отраженных от стенок скважины ударных волн, что обуславливает необходимость увеличения продолжительности импульса взрыва УПД для обеспечения возможности инициирования ЭВВ. Из (4.61) следует, что увеличение продолжительности импульса достижимо при увеличении длины УПД. Однако необходимая длина УПД при уменьшении диаметра УПД возрастает весьма быстро (рис. 5.7). Таким образом, падение давления в отраженных ударных волн (при уменьшении диаметра УПД) не перекрывается эффектом увеличения продолжительности импульса взрыва УПД, поэтому наблюдается снижение скорости детонации при увеличении массы УПД, что и отражается нижней ветвью на рис. 5.8.

Дополнительный анализ рис. 5.8 показывает, что оптимальные по массе и размерам УПД обеспечивают устойчивую детонацию ЭВВ (плотность при атмосферном давлении –  $1,206 \text{ г/см}^3$ ) со скоростью  $5,3 - 5,5 \text{ км/с}$ , что удовлетворяет требованиям, предъявляемым к промышленным ЭВВ. Поэтому увеличение массы УПД сверх оптимальных значений нерационально.

Очень эффективным способом снижения массы УПД является сенсibiliзация, осуществляемая мелкими порами (при этом размеры пор должны быть таковы, чтобы их схлопывание осуществлялось в динамическом режиме [62]). Данное обстоятельство отражено на рис. 5.9.

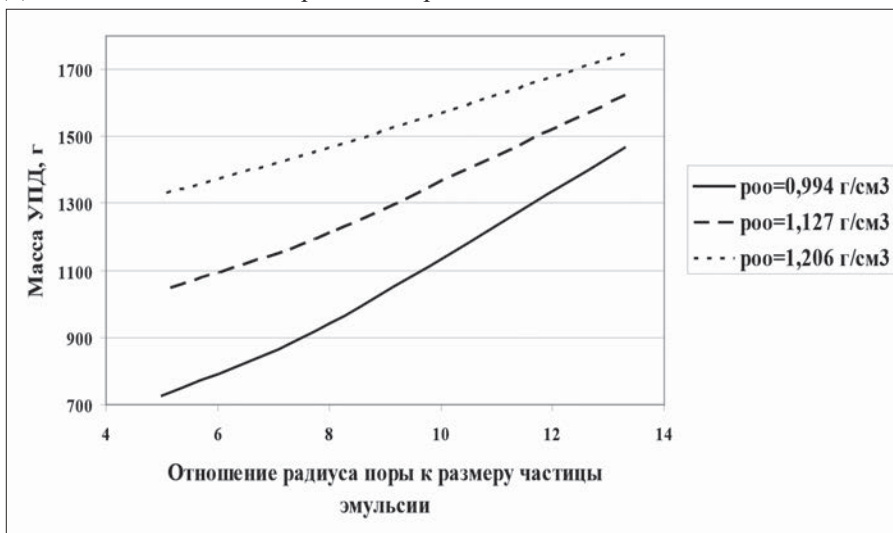


Рис.5.9. Зависимость минимальной массы УПД от структурных особенностей инициируемого ЭВВ при его различной начальной плотности.

В табл. 5.2 представлены параметры эмульсионных ПД, выпускаемых ЗАО «ПВВ» (г. Междуреченск), а в табл. 5.3 – соответствующие параметры оптимальных ПД, рассчитанных на основе представленной выше методики.

Табл. 5.2. Патроны ЭВВ «Патронит-М» (ЗАО «ПВВ», г. Междуреченск)

Диаметр, мм	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Масса, г	Длина, мм
26 ± 1	1,08 ± 0,01	260 ± 20	460±20
32 ± 2	1,08 ± 0,01	400 ± 30	460±20
36 ± 2	1,08 ± 0,01	500 ± 40	460±20
50 ± 4	1,13 ± 0,02	1000 ± 50	460±20
90 ± 4	1,15 ± 0,03	3350 ± 60	460±20

А) ТУ 7288-034-17131060-2006

Диаметр, мм	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Масса, г	Длина, мм
60 ± 1	1,15 ± 0,03	970 ± 20	300 ± 10
60 ± 2	1,15 ± 0,03	1300 ± 30	400 ± 10
60 ± 2	1,15 ± 0,03	1620 ± 40	500 ± 10
60 ± 4	1,15 ± 0,03	1950 ± 50	600 ± 10
60 ± 4	1,15 ± 0,03	2270 ± 60	700 ± 10

Б) ТУ 7288-043-77353418-2015

При расчете параметров ПД исходим из выполнения следующих условий:

1. Иницируется ЭВВ следующего химического состава:  $NH_4NO_3$  – 75,0 %,  $H_2O$  – 18,0 %, топливная фаза – 7 %. Плотность матричной эмульсии – 1,33 г/см<sup>3</sup>. Плотность ЭВВ и радиус газовых пор при атмосферном давлении – 1,13 г/см<sup>3</sup> и 20 – 50 мкм соответственно. Размер частиц дисперсной фазы эмульсии –  $\Delta = 3$  мкм.

2. ЭВВ, из которого изготавливается ПД, характеризуем следующими параметрами:  $\rho_g = 1,15$  г/см<sup>3</sup>,  $D_g = 5100$  м/с,  $k_g = 2,8$ .

3. ПД размещается на глубине 8 – 10 м от верхнего уровня заряда.

4. Коэффициент отражения ударных волн от стенок скважины – 1,4 (осадочные породы прочностью по М.М. Протодяконову  $f = 4-6$ ); 1,6 (осадочные породы прочностью  $f = 8 - 12$ ). Расчет коэффициентов отражения осуществ-

влялся на основе экспериментальных данных о свойствах горных пород, приведенных в работе [165].

5. Диаметр взрывных скважин – 160, 200 и 250 мм.

Табл. 5.3. Патроны оптимального размера (расчет)

Горные породы	Диаметр скважин, мм	Диаметр ПД, мм	Длина ПД, мм	Масса ПД, г
f = 4-6	160	70	440	1950 *
	200	70	440	1950 *
	250	70	440	1950 *
f = 8-12	160	50	330	750 **
	200	70	440	1950 *
	250	70	440	1950 *

Примечания к табл. 5.3: \* – инициирование ЭВВ происходит вследствие торцевого ударного воздействия ПД (п. 4.1); \*\* – инициирование ЭВВ происходит в отраженных от стенок скважины цилиндрических ударных волнах (п. 4.2, 5.4).

Сравнительный анализ табл. 5.2 и табл. 5.3 показывает, что результаты расчета геометрических размеров эмульсионных ПД (п. 4.1, 4.2, 5.4) находятся в согласии с типоразмерами эмульсионных ПД, используемых для инициирования ЭВВ на разрезах Кузбасса на протяжении нескольких лет.

С учетом данного обстоятельства для АО «НИПИГОРМАШ» были рассчитаны представленные в табл. 5.4 размеры эмульсионных ПД для инициирования ЭВВ для расширенного круга горных пород и диаметров взрывных скважин. На основании данных расчетов были приняты типоразмеры эмульсионных ПД, которые были внедрены в промышленное производство.

При расчете параметров эмульсионных ПД исходили из выполнения следующих условий:

1. Иницируется ЭВВ следующего химического состава:  $NH_4NO_3$  – 75,0 %,  $H_2O$  – 18,0 %, топливная фаза – 7 %. Плотность матричной эмульсии – 1,33 г/см<sup>3</sup>.

Плотность ЭВВ и радиус газовых пор при атмосферном давлении – 1,13 г/см<sup>3</sup> и 20 – 40 мкм соответственно. Размер частиц дисперсной фазы эмульсии –  $\Delta = 2$  мкм.

2. ЭВВ, из которого изготавливается ПД, характеризуем следующими параметрами:  $\rho_{\delta} = 1,15$  г/см<sup>3</sup>,  $D_{\delta} = 5100$  м/с,  $k_{\delta} = 2,8$ .

3. ПД размещается на глубине 10 м от верхнего уровня заряда.
4. Коэффициент отражения ударных волн от стенок скважины – 1,4 ( $f = 4 - 6$ ); 1,6 ( $f = 8 - 12$ ); 1,7 ( $f = 14 - 16$ ); 1,8 ( $f = 18 - 20$ ).
5. Диаметр взрывных скважин – 100 мм, 160 мм, 200 мм, 250 мм и 320 мм.

Табл. 5.4. Рекомендованные для АО «НИПИГОРМАШ» параметры ПД

Горные породы	Диаметр скважин, мм	Диаметр ПД, мм	Длина ПД, мм	Масса ПД, г
$f = 4-6$	100	45	280	510
	160	70	440	1950
	200	70	440	1950
	250	70	440	1950
	320	70	440	1950
$f = 8-12$	100	36	200	230
	160	45	360	660
	200	55	400	1100
	250	70	370	1650
	320	70	440	1950
$f = 14-16$	100	32	200	180
	160	36	440	520
	200	45	440	800
	250	60	330	1070
	320	70	440	1950
$f = 18-20$	100	32	200	180
	160	36	250	290
	200	45	280	510
	250	50	340	770
	320	60	440	1430

#### 5.4. Влияние рецептурного состава и структуры инициируемых ЭВВ на параметры эмульсионных ПД

Анализ зависимостей, представленных на рис. 5.5 – 5.9, показывает, что отношение размера сенсibiliзирующих газовых пор к размеру частицы дисперсной фазы инициируемой эмульсии оказывает существенное влияние на параметры инициирующего импульса. Поэтому управление данным отношением наряду с управлением плотностью играет важную роль как в выборе ПД (геометрические размеры и вещество ПД), так и в назначении условий прохождения детонации вдоль всей длины скважинного заряда (рис. 3.14 и 3.15). Это достигается или управлением размерами газовых пор, или размерами частиц дисперсной фазы эмульсии, или тем и другим одновременно. Размеры газовых пор в наиболее широко распространенном методе сенсibiliзации наливных ЭВВ – методе химической газогенерации – определяются степенью дробления жидкости, содержащей газогенерирующие добавки, при ее впрыске в поток закачиваемой в скважину эмульсии. Поэтому разработка методов управления размерами газовых пор заключается в совершенствовании технологических принципов впрыска и (или) конструкции узла ввода жидкости, содержащей газогенерирующие добавки, в поток эмульсии. Это отдельная самостоятельная задача, имеющая множество различных важных практических приложений (изготовление лекарств, отдельных видов красок и др.), которая выходит за рамки настоящего исследования. Однако управление отношением размера сенсibiliзирующих газовых пор к размеру частицы дисперсной фазы инициируемой эмульсии возможно путем регулирования размера частиц дисперсной фазы. Воспользуемся решениями, изложенными в работе [49].

Согласно [117, 183, 228] при создании эмульсии методом механического перемешивания (при неизменных технологических характеристиках: количестве диспергируемого вещества, эмульгаторе и аппарате эмульгирования) дисперсностью эмульсии можно управлять изменением скорости и времени перемешивания. Однако управлять дисперсностью эмульсии можно без внесения конструктивных изменений и без изменения производительности аппарата эмульгирования путем изменения количества применяемого эмульгатора.

В работе [183] отмечено, что качество эмульсии улучшается при увеличении количества используемого эмульгатора, но при этом не рекомендуется применять эмульгатора более 2 % масс. В работе [117] указано, что при использовании

эмульгатора ПГТ качество (определялось по величине электрической емкости) и водостойкость эмульсии Порэмита-1 возрастают по мере увеличения массовой доли эмульгатора (до 2 %, далее показатели снижаются). В [117] также приведены результаты микроскопических исследований структуры эмульсии Порэмита-1, полученного с использованием эмульгатора ПГТ, при различной массовой доле эмульгатора. Однако точность этих исследований не позволяет выявить какие-либо закономерности изменения размеров частиц дисперсной фазы при изменении содержания эмульгатора от 1,0 до 2,5 % масс.

Необходимо отметить, что эмульгаторы являются дорогостоящими компонентами при получении эмульсий для производства ЭВВ [117, 164, 183], что обусловило проведение исследований для определения минимального расхода различных марок эмульгаторов при производстве ЭВВ в зависимости от срока хранения эмульсии (или ЭВВ) [164].

В работе [52] представлены результаты исследований влияния содержания эмульгатора «РЭМ-5» в топливной смеси эмульсии на крупность частиц дисперсной фазы эмульсии в диапазоне содержания эмульгатора 0,5...1,5 % масс (в составе эмульсии на основе раствора аммиачной селитры). Результаты исследований показали, что в диапазоне содержания эмульгатора 0,5...1,5 % масс. по мере увеличения содержания эмульгатора дисперсность эмульсии увеличивается. Однако диапазон содержания эмульгатора более 1,5 % масс. в указанных исследованиях не отражен.

Для получения количественной зависимости размеров частиц дисперсной фазы эмульсии от расхода эмульгатора «РЭМ-5» нами были проведены лабораторные исследования. Изучалось влияние содержания эмульгатора в топливной фазе эмульсии (на основе монораствора аммиачной селитры) на крупность частиц дисперсной фазы эмульсии в диапазоне содержания эмульгатора 0,6...3,5 % масс. При этом общее количество топливной фазы составляло 7 % масс.

Измерения, как и в работах [52, 184], осуществлялись с помощью оптического микроскопа Olympus VX-51 фирмы «Olympus», оборудованного мультипортами для видео- и фоторегистрации. Точность измерений геометрических размеров составляет 0,5 % отн.

Исследования проводили как в отраженном свете, так и в проходящем в поляризованном и неполяризованном свете на оптическом микроскопе Olympus VX-51, получая фотографии на различных участках покрывных стекол.

Среднее значение диаметра частиц дисперсной фазы эмульсии рассчитывали по формуле:

$$\bar{D} = \sqrt[3]{\frac{\sum_{i=1}^n d_i^2}{\sum_{i=1}^n d_i}}, \text{ где } d_i - \text{ диаметр } i\text{-й частицы, вычисленный из программного}$$

обеспечения, исходя из ее площади, предполагаю, что она сферической формы.

Результаты исследований представлены в табл. 5.5.

Табл. 5.5. Химический состав эмульсии и средний размер частиц дисперсной фазы эмульсии при различном содержании эмульгатора.

Аммиачная селитра, (% масс.)	H <sub>2</sub> O, (% масс.)	Нефтепродукт (% масс.)	Эмульгатор (% масс.)	D, мкм
74,4	18,6	6,4	0,6	3,5
74,4	18,6	6,2	0,8	3,4
74,4	18,6	4,8	1,2	2,0
74,4	18,6	5,25	1,75	1,1
74,4	18,6	4,55	2,45	1,5
74,4	18,6	3,5	3,5	5,8

На основании данных табл. 5.5 построена зависимость среднего размера частицы дисперсной фазы эмульсии от содержания эмульгатора «РЭМ-5» (в диапазоне 0,6...3,5 % масс), представленная на рис. 5.10.

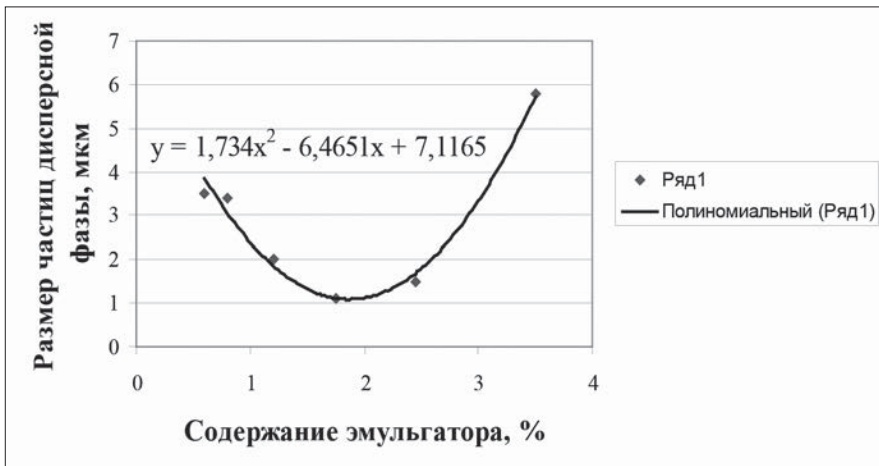


Рис. 5.10. Зависимость размера частиц дисперсной фазы ЭНА от массовой доли эмульгатора «РЭМ-5».



Анализ рис. 5.10 показывает, что наибольшая дисперсность эмульсии достигается при использовании эмульгатора «РЭМ-5» в количестве 1,86 % масс. При этом размер частицы дисперсной фазы можно рассчитывать на основании степенного уравнения (при  $0,6 < X < 3,5$ ):

$$\bar{D} = 1,734X^2 - 6,4651X + 7,1165 \text{ (мкм)}, \quad (5.1)$$

где  $X$  – масс. доля эмульгатора в составе ЭВВ в процентах.

При возрастании массовой доли эмульгатора «РЭМ-5» в составе ЭНА от 0 до 1,86 % дисперсность увеличивается, но при дальнейшем увеличении массовой доли эмульгатора дисперсность уменьшается. Вероятно, это связано как с недостатком молекул масла для создания непрерывных масляных пленок, разделяющих частицы дисперсной фазы эмульсии, так и с образованием объемно ориентированных структур из молекул эмульгатора в этих пленках.

Зависимость (5.1) позволила методически просто осуществить экспериментальную проверку расчетных значений скорости детонации ЭВВ при различной дисперсности эмульсии и размерах сенсibiliзирующих пор. Измерялась скорость детонации ЭВВ, имеющего следующий химический состав:  $NH_4NO_3$  – 75,0 %,  $H_2O$  – 18 %, топливная фаза – 7 %. Плотность матричной эмульсии – 1,33 г/см<sup>3</sup>.

Регулирование размеров частиц эмульсии осуществлялось изменением количества применяемого при создании эмульсии эмульгатора «РЭМ-5», а размеров пор – изменением концентрацией газообразующего реагента.

Были проведены опытно-полигонные взрывы, в которых осуществлялся подрыв 200-миллиметровых зарядов плотностью 1,15 г/см<sup>3</sup>, имеющих длину 1000 мм. Радиус сенсibiliзирующих газовых пор при выполненных сериях взрывов – 30 и 40 мкм. Оболочка заряда – картон. Иницирование зарядов производилось патронами ЭВВ, имеющими диаметр 50 мм, длину 440 мм и массу 950 г. Патроны иницировались капсюлями неэлектрической системы ИскраС-500-18. Используемая аппаратура для измерения скорости детонации: прибор VOD Mate, непрерывно измеряющий величину сопротивления электрической цепи проводника-датчика. Результаты обрабатывались в программе, поставляемой изготовителем вместе с прибором.

На рис. 5.11 представлены расчетные зависимости скорости детонации и экспериментальные данные. Анализ данных, представленных на рис. 5.11, показывает, что предложенная в настоящей работе методика определения детонационных параметров ЭВВ, сенсibiliзированных газовыми порами, позволяет получать расчетные значения, хорошо согласующиеся с экспериментальными данными.

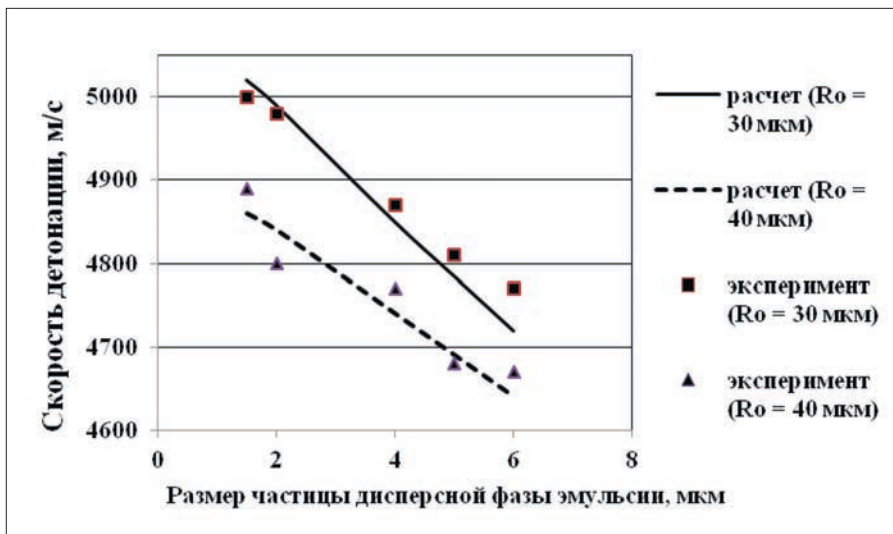


Рис. 5.11. Зависимость скорости детонации от размера частиц дисперсной фазы эмульсии при различных размерах пор (расчетные и экспериментальные данные).

Известный экспериментальный факт ухудшения качества эмульсии при использовании эмульгатора в количестве более 2 % масс. [117, 183] объясняется наблюдающимся в этом случае укрупнением частиц дисперсной фазы эмульсии.

Анализ (5.1) и зависимостей, показанных на рис. 5.9, показывает, что уменьшение размеров частиц дисперсной фазы эмульсии без одновременного уменьшения размеров газовых пор нецелесообразно, т.к. в этом случае будет наблюдаться возрастание значения отношения радиуса газовой поры к размеру частицы дисперсной фазы эмульсии. При этом для инициирования потребуется ПД большей массы (рис. 5.9). Кроме этого, из зависимостей, изображенных на рис. 3.14, рис. 3.15, следует, что в этом случае осложнится выбор условий для обеспечения прохождения детонации вдоль всей длины скважинного заряда при нижнем инициировании. Поэтому если не предусматривается уменьшение размеров газовых пор, то при производстве эмульсии для создания бестарных ЭВВ целесообразно использовать лишь такое количество эмульгатора, которое будет обеспечивать физико-химическую стабильность эмульсии на технологически требуемый промежуток времени. Данный вывод согласуется со сведениями, приведенными в работе [117], согласно которым при применении ЭВВ на открытой поверхности с механизированной закачкой в скважины от эмульсии ввиду относительно короткого срока хранения не требуется высокого качества.

Необходимо также отметить, что существенное влияние на параметры ПД, инициирующего детонацию в ЭВВ, оказывает химический состав данного ЭВВ.

На рис. 5.12 представлены расчетные зависимости времени межпорового прогорания от фронтального детонационного давления для ЭВВ одинаковой внутренней структуры, но различного химического состава.

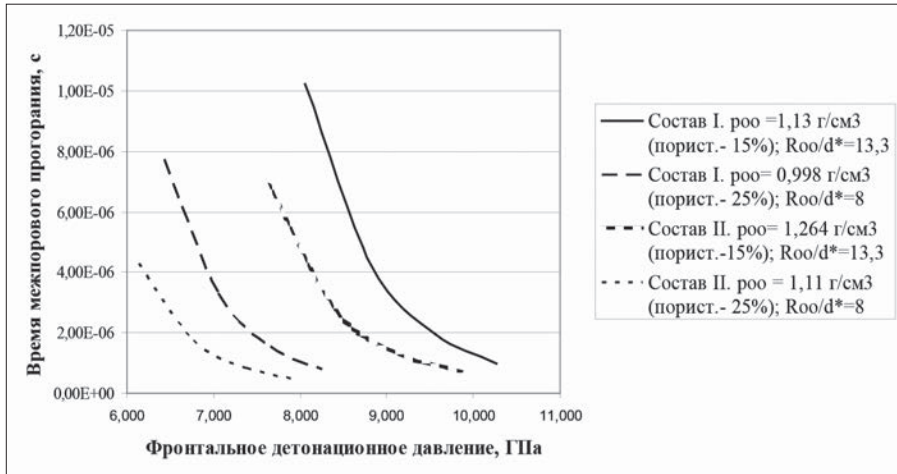


Рис. 5.12. Зависимости времени межпорового прогорания от фронтального детонационного давления для ЭВВ одинаковой внутренней структуры, но различного химического состава.

Состав I:  $NH_4NO_3$  – 75,0 %,  $H_2O$  – 18 %, топливная фаза – 7 %. Размер частиц эмульсии – 3 мкм, плотность матричной эмульсии – 1,33 г/см<sup>3</sup>.

Состав II:  $NH_4NO_3$  – 43,0 %,  $CaNO_3$  - 30,0 %,  $H_2O$  – 18 %, топливная фаза – 9 %. Размер частиц эмульсии – 3 мкм, плотность матричной эмульсии – 1,48 г/см<sup>3</sup>.

Анализ зависимостей, представленных на рис. 5.12, показывает, что время межпорового прогорания для одного и того же значения фронтального давления для состава II 2 - 3 раза меньше, чем для состава I. Таким образом, время поддержания необходимого давления в зоне химических реакций детонационной волны в случае применения ЭВВ состава II меньше, чем в случае состава I.

Согласно исследованиям, представленным в 4 главе, для возбуждения детонации в ЭВВ состава II потребуется ПД меньшего диаметра, чем для ЭВВ состава I (при прочих равных условиях), т.к. критический и предельный диа-

метры для ЭВВ состава II также будут существенно ниже, чем для ЭВВ состава I [46].

Для проверки данного утверждения были проведены опытно-полигонные взрывы, в которых осуществлялся подрыв 90-миллиметровых зарядов состава I (плотность – 1,06 г/см<sup>3</sup> (пористость – 20%),  $\Delta = 3$  мкм) и состава II (плотность – 1,18 г/см<sup>3</sup> (пористость – 20%),  $\Delta = 3$  мкм). Длина зарядов – 1000 мм. Оболочка – картон. Инициирование зарядов ЭВВ осуществлялось ПД из аммонита № 6 ЖВ (плотность – 1 г/см<sup>3</sup>). В ходе проведения опытов изменялся диаметр ПД.

Таблица 5.6. Результаты инициирования ЭВВ различного рецептурного состава

Характеристики ПД			Результаты опытных взрывов	
Диаметр, мм	Длина, мм	Масса, г	Состав I	Состав II
32	250	200	взрыв	Взрыв
18	250	65	отказ	Взрыв

Осуществлялась визуальная фиксация результатов подрыва зарядов ЭВВ по принципу «взрыв», «отказ». Количество опытов – 3 для каждого ПД и каждого рецептурного состава. Результаты взрывов представлены в таблице 5.6.

Полученные результаты подтверждают, что критический и предельный диаметры для ЭВВ состава II также будут существенно ниже, чем для ЭВВ состава I.

Данные обстоятельства могут иметь решающее значение при выборе направлений развития рецептур и технологий производства ЭВВ и их дальнейшего применения в подземных условиях и (или) использовании скважин уменьшенного диаметра на карьерах [46]. Это подтверждается успешным внедрением ЭВВ на основе бинарного раствора аммиачной и кальциевой селитры на подземных горных работах на руднике «Удачный» им. Ф.Б. Андреева АО «АЛРОСА» (ПАО).

## Выводы по главе 5

Опытно-промышленные взрывы, проведенные на карьере ОАО «Ураласбест», показали корректность методики расчета условий прохождения детонации по всей длине скважинного заряда ЭВВ.

Промышленные эксперименты подтвердили теоретическое утверждение о том, что при распространении в ЭВВ детонационной волны в направлении

уменьшения размеров газовых пор и увеличения плотности заряда происходит детонационное разложение ЭВВ (конечно, до тех пор, пока плотность ЭВВ не превысит максимально допустимую). Таким образом, теоретические выводы главы 4 о целесообразности использования методов многоточечного и встречного инициирования как методов, способствующих полному детонационному разложению ЭВВ, получили экспериментальное подтверждение.

При необходимости ведения взрывных работ длинными вертикальными (наклонными) скважинными зарядами ЭВВ для обеспечения полной детонации этих зарядов целесообразно заряд разделять специальными устройствами на отдельные участки, имеющие такую длину (высоту), при которой плотность ЭВВ не будет выходить из зоны допустимых значений. Такими специальными устройствами будут любые приспособления, препятствующие передаче гидростатического давления выше расположенного по высоте участка заряда на нижележащий заряд. При этом каждый участок инициируется собственным ПД.

Численное моделирование процесса инициирования ЭВВ УПД показало, что: существуют оптимальные по массе УПД для инициирования устойчивой детонации в ЭВВ;

оптимальные параметры (длина, диаметр, масса) УПД зависят от плотности, внутренней структуры, химического состава ЭВВ, детонационных характеристик вещества УПД, а также от отношения диаметра УПД к диаметру взрывной скважины и сжимаемости пород, окружающих заряд ЭВВ;

снижение плотности инициируемого ЭВВ позволяет уменьшить массу необходимого УПД;

уменьшение радиуса газовых пор позволяет уменьшить массу необходимого УПД (радиус пор должен быть таковым, чтобы их схлопывание осуществлялось в динамическом режиме).

Показано, что:

детонационные параметры ЭВВ зависят от размера частиц дисперсной фазы эмульсии и радиуса газовых пор, при этом с увеличением дисперсности эмульсии наблюдается возрастание скорости детонации;

ЭВВ с окислительной фазой из бинарного раствора аммиачной и кальциевой селитры инициируются ПД меньшей массы, чем ЭВВ с окислительной фазой из раствора аммиачной селитры (монораствор), т.к. ЭВВ на основе бинарного раствора имеют меньшие критический и предельный диаметры, чем ЭВВ на основе монораствора.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной монографии представлены установленные закономерности возникновения и распространения детонации в ЭВВ с учетом рецептурно-технологических, энергетических и микроструктурных характеристик ЭВВ и параметров возбуждающего импульса.

Приведена физико-математическая модель детонации ЭВВ и методика расчета детонационных параметров, в которых впервые учитываются как рецептурный состав, плотность эмульсии, плотность ЭВВ, радиус сенсibiliзирующих пор, так и размер частиц дисперсной фазы эмульсии, а также характеристики инициирующего воздействия.

Показано, что в ЭВВ реализуются следующие режимы детонации:

нейтрально устойчивый режим (на поверхности детонационной волны возникают устойчивые возмущения);

абсолютно устойчивый режим (однородный стационарный фронт; возмущения на поверхности детонационной волны экспоненциально угасают во времени).

Режим детонации с разрывом детонационной волны на струи не реализуется.

В случае угасающих со временем возмущений детонационного фронта будет наблюдаться стационарная детонация, описываемая теорией Зельдовича-Нейманна-Деринга (детонация с гладким фронтом).

В случае возникновения на поверхности зоны сжатия устойчивых возмущений (нейтральная устойчивость) формируется ячеистая структура детонационного фронта. Детонация при этом проходит в пересжатом режиме.

Выяснено, что при распространении детонации по ненарушенному скважинному заряду ЭВВ обрыв детонации или ее переход на низкоскоростной режим обусловлен разрушением ячеистой структуры детонационного фронта (ликвидацией нейтральной устойчивости детонационного фронта). При этом величина детонационных параметров ЭВВ при детонации в режиме нейтральной устойчивости детонационного фронта зависит от величины инициирующего импульса.

Предложен критерий оценки устойчивости распространения детонации по скважинному заряду ЭВВ, позволяющий с помощью разработанной методики расчета детонационных параметров ЭВВ определять момент разрушения ячеистой структуры детонационного фронта.

Режим детонации с нейтрально устойчивым фронтом является недостаточно устойчивым к изменениям в структуре и плотности ЭВВ вдоль вертикального (наклонного) заряда при распространении детонационной волны в направлении укрупнения пор и снижения плотности ЭВВ (направление «вверх» при нижнем инициировании). В этом случае возможен выход детонации из данного режима, что обуславливает переход детонации на низкоскоростные режимы или даже обрыв детонационного процесса.

При распространении детонации в обратном направлении (в направлении уменьшения радиуса газовых пор) гидродинамических ограничений на устойчивость детонационной волны не возникает. Детонация в этом случае будет распространяться до тех пор, пока плотность ЭВВ не превысит максимально допустимую.

Приведены методики расчета параметров ПД для инициирования детонации в ЭВВ, сенсibilизированных газовыми порами:

- при фронтальном ударе продуктов взрыва ПД (плоское нагружение);
- при скользящем ударе продуктами взрыва линейного (удлиненного) ПД;
- при взрыве системы сближенных сосредоточенных зарядов.

Показано, что:

рецептурный состав, плотность и структура ЭВВ влияют на параметры инициирующих их импульсов. Поэтому, регулируя данные параметры, можно в известных пределах управлять эффективностью возбуждения детонации;

при возбуждении детонации в ЭВВ важную роль может играть эффект скачкообразного возрастания давления во фронте ударной волны, возбуждаемой в ЭВВ при взрыве ПД, при отражении от стенок скважины и (или) специально введенных в ЭВВ твердых включений;

ПД из высокоплотных индивидуальных ВВ (смесей или плавов индивидуальных ВВ), а также из конверсионных ВВ обладают высокой инициирующей способностью при возбуждении детонации в ЭВВ. При этом при взрыве линейного (удлиненного) ПД из данного вида ВВ детонация в ЭВВ может возникнуть под действием прямой радиальной УВ, испускаемой при взрыве ПД;

при определении параметров ПД для инициирования ЭВВ необходимо исходить из выполнения критерия Баума-Державца: ПД при воздействии на ЭВВ должен создавать в достаточном объеме ЭВВ необходимое давление при необходимой продолжительности действия.

Численное моделирование процесса инициирования ЭВВ УПД показало, что:

существуют оптимальные по массе УПД для инициирования устойчивой детонации в ЭВВ;

необходимые значения характерных параметров УПД (длины, диаметра, массы) зависят от плотности, внутренней структуры, химического состава ЭВВ, детонационных характеристик вещества УПД, а также от отношения диаметра УПД к диаметру взрывной скважины и сжимаемости пород, окружающих заряд ЭВВ;

снижение плотности инициируемого ЭВВ позволяет уменьшить массу необходимого УПД;

уменьшение радиуса газовых пор позволяет уменьшить массу необходимого УПД, но при этом размер пор должен быть таковым, чтобы их схлопывание осуществлялось в динамическом режиме.

При проектировании взрывных работ для обеспечения прохождения детонационной волны по всей длине заряда необходимо учитывать структуру ЭВВ и рассчитывать плотность зарядов таким образом, чтобы на координатной плоскости (радиус поры; плотность ЭВВ) линия зависимости плотности ЭВВ от радиуса газовых пор не пересекала линии, разграничивающей режимы нейтральной и абсолютной устойчивостей детонационного фронта.

При необходимости ведения взрывных работ длинными вертикальными (наклонными) скважинными зарядами ЭВВ для обеспечения полноты детонации целесообразно заряд разделять специальными устройствами на отделенные участки, имеющие такую длину (высоту), на которой плотность ЭВВ не будет выходить из зоны допустимых значений. Такими специальными устройствами будут любые приспособления, препятствующие передачи гидростатического давления выше расположенного по высоте участка заряда на нижележащий заряд.

Для обеспечения полноты детонации скважинного заряда ЭВВ целесообразно применять многоточечное и встречное инициирование.

Показано, что ЭВВ с окислительной фазой из бинарного раствора аммиачной и кальциевой селитры инициируются ПД меньшей массы, чем ЭВВ с окислительной фазой из раствора аммиачной селитры (монораствор). Это объясняется тем, что ЭВВ на основе бинарного раствора имеют меньшие критический и предельный диаметры, чем ЭВВ на основе монораствора. Данные



---

обстоятельства могут иметь решающее значение при выборе направлений развития рецептур и технологий производства ЭВВ и их дальнейшего применения в подземных условиях и (или) использовании скважин уменьшенного диаметра на карьерах.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абрамзон А.А. Поверхностно-активные вещества. Синтез, анализ свойств, применение: Учебное пособие для вузов / Под ред. А.А. Абрамзона. – Л.: Химия, 1988. – 200 с.
2. Айвазов Б.В. Образование пересжатой детонационной волны в сужающейся трубке / Б.В. Айвазов, Я.Б. Зельдович // Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 1947. – Т.17. – С. 888-900.
3. Алымова Л.В. Детонационные характеристики эмульсионного взрывчатого состава / Л.В. Алымова [и др.] // Физика горения и взрыва. – 1994. – Т. 30. – № 3. – С. 86-91.
4. Ананьин А.В. К исследованию детонационной способности матрицы эмульсионных ВВ / А.В. Ананьин, С.А. Колдунов // IX Харитоновские тематические научные чтения: тр. междунар. конф. – Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2007. – С. 93-96.
5. Андреев К.К. Теория взрывчатых веществ / К.К. Андреев, А.Ф. Беляев – М.: Оборонгиз, 1960. – 595 с.
6. Андреев В.В. Инициирование порошкового гексогена слабой ударной волной / В.В. Андреев // Физика горения и взрыва. – 1979. – Т. 14. – № 1. – С. 126-128.
7. Андреев С.Г. Влияние реологических свойств на избирательную чувствительность ВВ к форме импульса ударно-волнового воздействия / С.Г. Андреев [и др.] // Физика горения и взрыва. – 1985. – Т. 21. – № 3. – С. 80-87.
8. Андреев С.Г. Инициирование ВВ при ступенчатом нагружении / С.Г. Андреев, М.М. Бойко, В.С. Соловьев // Физика горения и взрыва. – 1976. – Т. 12. – № 1. – С. 117-120.
9. Андреев С.Г. Продольно-поперечная неустойчивость ускоряющихся иницирующих ударных волн / С.Г. Андреев [и др.] // Физика горения и взрыва. – 1991. – Т. 27. – № 1. – С.130-131.
10. Анников В.Э. О механизме детонации газонаполненных водных гелей / В.Э. Анников [и др.] // Физика горения и взрыва. – 1983. – Т. 19. – № 4. – С. 139-143.
11. Архипов В.А. Экспериментальное исследование взаимодействия капель при столкновениях / В.А. Архипов, Г.С. Ратанов, В.Ф. Трофимов // Журнал прикладной механики и технической физики. – 1978. – № 2. – С. 73-77.

12. Асланов С.К. Устойчивость детонации конденсированных взрывчатых веществ / С.К. Асланов, В.Э. Волков В.Э. // Детонация. Материалы IX Всесоюзного симпозиума по горению и взрыву 19-24 ноября 1989 года. – Суздаль. – 1989. – С. 3-5.
13. Аттенков А.В. О возможности разложения гетерогенных ВВ во фронте слабой ударной волны / А.В. Аттенков, В.С. Соловьев // Физика горения и взрыва. – 1987. – Т. 23. – № 4. – С. 113-125.
14. Афанасенков А.Н. Критические давления инициирования взрывчатых веществ / А.Н. Афанасенков, В.М. Богомолов, И.М. Воскобойников // Взрывное дело. Сборник № 68/25. – М.: Недра, 1970. – С. 68-92.
15. Афанасьев Г.Т. Образование локальных разогревов в процессе разрушения тонких слоев при ударе / Афанасьев Г.Т. [и др.] // Физика горения и взрыва. – 1972- Т. 8. – № 2. – С. 299-306.
16. Баум Ф.А. Об инициировании детонации ударными волнами / Ф.А. Баум, А.С. Державец // Взрывное дело. Сборник № 60/17. – М.: Недра, 1966. – С. 68-83.
17. Баум Ф.А. Физика взрыва / Ф.А. Баум, К.П. Станюкович, Б.И. Шехтер. – М.: Физматгиз, 1959. – 800 с.
18. Беляев А.Ф. Горение, детонация и работа взрыва конденсированных систем / А.Ф. Беляев. – М.: Наука, 1968. – 255 с.
19. Беляев А.Ф. О горении нитрогликоля / А.Ф. Беляев // Теория горения порохов и взрывчатых веществ. – М.: Наука, 1982. – С. 10-34.
20. Беришвили Г.А. Об эффективности низкочувствительных ВВ при инициировании их боевиками различной конструкции / Г.А. Беришвили, Т.Ш. Элизбарашвили // Взрывное дело. – М.: Недра, 1976. – № 76/33. – С. 164-176.
21. Болотова Р.Х. Моделирование процессов взаимодействия сильных ударных волн в газожидкостных смесях / Р.Х. Болотова, М.Н. Галимзянов, У.О. Агишева // Изв. Вузов. Физико-математические науки. Поволжский регион. – 2011. – № 2 (8). – С. 3-14.
22. Бондаренко И.В. Особенности применения эмульсионных ВВ в условиях кимберлитовых карьеров АК «АЛРОСА» / И.В. Бондаренко, В.И. Хон В., Р.Я. Никитин // Технология и безопасность взрывных работ: материалы научно-технической конференции «Развитие ресурсосберегающих технологий во

взрывном деле», 12-14 октября 2011 г. – Екатеринбург: ИГД УрОРАН. – 2012. – С.155-162.

23. Бордзиловский С.А. Влияние скорости нагружения на длину преддетонационного участка в ТГ-50/50 / С.А. Бордзиловский, С.М. Караханов // Физика горения и взрыва. – 1985. – Т. 21. – № 6- С. 109-113.

24. Бордзиловский С.А. Моделирование ударного инициирования детонации гетерогенных ВВ / С.А. Бордзиловский, С.М. Караханов, В.Ф. Лобанов // Физика горения и взрыва. – 1987. – Т. 23. – № 5. – С. 132-147.

25. Бордзиловский С.А. Оптическое излучение ударно-сжатой эпоксидной смолы со стеклянными микросферами / С.А. Бордзиловский, С.М. Караханов, В.В. Сильвестров // Физика горения и взрыва. – 2014. – Т. 50. – № 3. – С. 105-112.

26. Боуден Ф. Возбуждение и развитие взрыва в твердых и жидких веществах / Ф. Боуден, А. Иоффе – М.: ИЛ, 1955. – 119 с.

27. Бронштейн И.Н. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов / И.Н. Бронштейн, К.А. Семендяев – М.: Глав. ред. физматлит, 1980. – 976 с.

28. Васильев А.А. Модель ячейки многофронтной газовой детонации / А.А. Васильев, Ю.А. Николаев // Физика горения и взрыва. – 1976. – Т. 12. – № 5. – С. 744-754.

29. Васильев А.А. Ячеистые структуры многофронтной детонационной волны и инициирование (обзор) / А.А. Васильев // Физика горения и взрыва. – 2015. – Т. 51. – № 1. – С. 9-30.

30. Васильев В.А. О чувствительности вторичных ВВ к инициированию детонации / В.А. Васильев, Л.И. Альбов // Взрывное дело. – М.: Недра, 1976. – № 76/33. – С. 128-137.

31. Вилюнов В.Н. Теория зажигания конденсированных веществ / В.Н. Вилюнов. -Новосибирск: Наука, 1984. – 189 с.

32. Власов О.Е. Основы теории действия взрыва / О.Е. Власов. – М.: изд. ВИА, 1957. – 408 с.

33. Власова Е.А. Оценка взрывчатых характеристик и газовой вредности промышленных ВВ / Е.А. Власова Е.А. [и др.] // Взрывное дело. Выпуск № 99/56. – М.: ЗАО «МВК по взрывному делу», 2008. – С. 119-136.

34. Влодарчик Э. Роль газовых пузырьков в инициировании детонации водонаполненных взрывчатых веществ / Э. Влодарчик // Успехи механики. – 1985. – Т. 8. – № 2. – С. 57-88.
35. Возгрин Р.А. Повышение качества дробления горной массы при применении скважинных зарядов эмульсионных взрывчатых веществ уменьшенного диаметра: дисс. ... канд. техн. наук: 25.00.20 / Возгрин Роман Александрович. – С.-П., 2015. – 134 с.
36. Воскобойников И.М. Расчет параметров детонации смесевых взрывчатых веществ с инертными добавками / И.М. Воскобойников, А.А. Котомин // Физика горения и взрыва. – 1985. – Т. 21. – № 5. – С. 83-97.
37. Генералов М.Б. Основные процессы и аппараты технологии промышленных взрывчатых веществ: Учебное пособие для вузов / М.Б. Генералов. – М.: ИКЦ «Академкнига», 2004. – 397 с.
38. Глушак Б.Л. Инициирование твердых гетерогенных ВВ ударными волнами / Б.Л. Глушак, С.А. Новиков, А.П. Погорелов // Физика горения и взрыва. – 1984. – Т. 20. – № 4. – С. 77-85.
39. Гоголя М.Ф. Взаимодействие сходящихся ударных волн в конденсированных средах / М.Ф. Гоголя, Н.Г. Демченко, И.П. Воскобойников // Физика горения и взрыва. – 1985. – Т. 21. – № 2. – С. 126-130.
40. Голубев В.К. О механическом нагружении преград скользящей детонацией тонкого слоя ВВ / В.К. Голубев [и др.] // Физика горения и взрыва. – 1991. – Т. 27. – № 4. – С. 94-99.
41. Горинов С.А. Анализ устойчивости детонационной волны при ее распространении в ЭВВ, сенсibilизированном газовыми порами / С.А. Горинов, И.Ю. Маслов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2017. – № 5. – С. 241-254.
42. Горинов С.А. Аппроксимационный метод расчета детонационных параметров низкоплотных аммиачно-селитренных ВВ / С.А. Горинов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2010. – № 10. – С. 244-256.
43. Горинов С.А. Влияние химической природы окислителя на детонационные характеристики ЭВВ / С.А. Горинов [и др.] // Развитие ресурсосберегающих технологий во взрывном деле. – Екатеринбург: ИГД УрО РАН. – 2009. – С. 191-201.

44. Горинов С.А. Возбуждение детонации в эмульсионных взрывчатых веществах, сенсibilизированных газовыми порами, скользящей детонационной волной / С.А. Горинов, И.Ю. Маслов, В.П. Куприн // Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського. – 2013. – Вип. 5(82). – С. 116-123.
45. Горинов С.А. Возбуждение детонации в эмульсионных взрывчатых веществах, сенсibilизированных газовыми порами, скользящей детонационной волной / С.А. Горинов, И.Ю. Маслов, В.П. Куприн // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2013. – № 4(1). – С. 615-632.
46. Горинов С.А. Выбор химического состава окислительной фазы эмульсионных взрывчатых веществ для отбойки крепких горных пород скважинами уменьшенного диаметра / С.А. Горинов, В.П. Куприн, Н.В. Савченко // Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського. – 2012. – Вип. 5(76). – С. 56-60.
47. Горинов С.А. Высококонцентрированные суспензии наночастиц аммиачной селитры – основа эмульсионных взрывчатых веществ / С.А. Горинов, И.Ю. Маслов, Е.П. Собина // Безопасность труда в промышленности. – 2013. – № 10. – С. 44-47.
48. Горинов С.А. Гофрировочная неустойчивость детонационных волн в эмульсионном взрывчатом веществе, сенсibilизированном газовыми порами / С.А. Горинов // Технология и безопасность взрывных работ: материалы научно-технической конференции «Развитие ресурсосберегающих технологий во взрывном деле», 12-14 октября 2011 г. – Екатеринбург: ИГД УрО РАН. – 2012. – С. 163-171.
49. Горинов С.А. Зависимость размеров частиц дисперсной фазы эмульсии «ЭНА» от массовой доли эмульгатора «РЭМ-5» / С.А. Горинов, И.Ю. Маслов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2018. – № 2 (специальный выпуск 6). – С. 3-13.
50. Горинов С.А. Инициирование ЭВВ когерентным промежуточным детонатором / С.А. Горинов, И.Ю. Маслов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2017. – № 4. – С. 293-304.
51. Горинов С.А. Инициирование эмульсионных взрывчатых веществ, сенсibilизированных газовыми порами, линейным эмульсионным промежуточным детонатором / С.А. Горинов, И.Ю. Маслов, П.А. Брагин // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2016. – № 5 (специальный выпуск 16). – С. 3-21.

52. Горинов С.А. Исследование структуры эмульпоров / С.А. Горинов, И.Ю. Маслов, Е.П. Собина // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал) – 2011. – № 3-4. – С. 3-14.
53. Горинов С.А. Неустойчивость детонационного фронта в эмульсионном взрывчатом веществе, сенсibilизированном газовыми порами / С.А. Горинов // Материалы XIII международной научно-технической конференции «Современные технологии ведения буровзрывных работ, их экономическая эффективность и техногенная безопасность», Кременчуг – Бурigas, 23-27 июня 2014 года. – С. 47-55.
54. Горинов С.А. О неустойчивости детонационных волн в эмульсионном взрывчатом веществе, сенсibilизированном газовыми порами / С.А. Горинов, Б.Н. Кутузов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2012. – № 4. – С. 302-307.
55. Горинов С.А. Особенности распространения детонационной волны в ЭВВ / С.А. Горинов, И.Ю. Маслов // Взрывное дело. – 2017. – № 117/74. – С. 146-156.
56. Горинов С.А. Оценка детонационной способности эмульсионных взрывчатых веществ / С.А. Горинов, В.П. Куприн, И.Л. Коваленко // Высокоэнергетическая обработка материалов. – Днепропетровск: Арт-пресс, 2009. – С. 18-26.
57. Горинов С.А. Расчет параметров эмульсионного промежуточного детонатора для инициирования ЭВВ / С.А. Горинов, И.Ю. Маслов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2018. – № 2 (специальный выпуск 6). – С. 14-29.
58. Горинов С.А. Режимы распространения детонационной волны в ЭВВ / Горинов С.А., Маслов И.Ю., Брагин П.А. // Технология и безопасность взрывных работ. Материалы научно-производственных семинара и конференции по взрывным работам, 2017 г. – Екатеринбург: Издательство АМБ. – 2018. – С. 68-75.
59. Горинов С.А. Структура окислительной фазы эмульсионных взрывчатых веществ / С.А. Горинов, Б.Н. Кутузов, Е.П. Собина // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2011. – № 3-1. – С. 20-33.

- 
60. Горинов С.А. Теоретическая оценка детонационных параметров гранэмитов / С.А. Горинов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2010. – № 8. – С. 121-130.
61. Горинов С.А. Теплофизические свойства несенсибилизированной эмульсионной матрицы – компонента эмульсионных взрывчатых веществ / С.А. Горинов, И.Ю. Маслов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2011. – № 4-5. – С. 17-20.
62. Горинов С.А. Устойчивость детонации скважинного заряда эмульсионного взрывчатого вещества, сенсибилизированного газовыми порами / С.А. Горинов // Горный журнал Казахстана. – 2014. – № 1. – С. 24-27.
63. Горинов С.А. Физико-математическая модель детонации эмульсионных взрывчатых веществ, сенсибилизированных газовыми порами. Стационарный режим / С.А. Горинов // Труды XV Международной научно-практической конференции по взрывному делу. 6-12 сентября 2015 г. Ялта, Республика Крым, Россия. – С. 33-45.
64. ГОСТ 19433-88. Грузы опасные. Классификация и маркировка. – Взам. ГОСТ 19433-81. – Дата введ. 01.01.1990. – С Изменением № 1, утвержденным в сентябре 1992 г. (ИУС 12-92). – М.: ИПК Изд. Станд., 2004. – 53 с.
65. Григорьев Н.А. Действие импульса давления на полость в вязкой жидкости / Н.А. Григорьев, Доронин Г.С., Одинокый В.Л. // Журнал прикладной механики и технической физики. – 1978. – № 2. – С. 86-88.
66. Гришин С.В. Измерение скорости детонации скважинных зарядов в производственных условиях с использованием различных патронов боевиков / С. В. Гришин, С. В. Кокин, А. В. Новиков // Взрывное дело. Выпуск № 100/57. – М.: ЗАО «МВК по взрывному делу», 2008. – С. 226-229.
67. Гришин С.В. Выбор оптимальных промежуточных детонаторов для инициирования скважинных зарядов ВВ / С.В. Гришин, С.В. Кокин, А.В. Новиков // Взрывное дело. Выпуск № 100/57. – М.: ЗАО «МВК по взрывному делу», 2008. – С. 229-232.
68. Даниленко В.А. О спиновой детонации гетерогенных твердых взрывчатых веществ / В.А. Даниленко, А.Н. Афанасенков // Письма в Журнал технической физики. – 1978. – Т.4. – вып. 1. – С. 35-38.
69. Даниленко В.А. Особенности детонации крупногабаритных зарядов смесевых ВВ / В.А. Даниленко, В.М. Кудинов // Физика горения и взрыва. – 1980. – Т. 16. – № 5. – С. 56-63.



70. Даниленко В.А. Особенности потери устойчивости детонации в удлиненных зарядах / В.А. Даниленко, В.М. Кудинов // Физика горения и взрыва. – 1983. – Т. 19. – № 2. – С. 101-105.
71. Державец А.С. О возможности отнесения эмульсий, применяемых для приготовления промышленных ВВ, в подкласс 5.1 «эмульсия, суспензия или гель нитрата аммония, используемые при производстве бризантных веществ / Державец А.С. [и др.] // Взрывное дело. Выпуск № 101/58. – М.: ЗАО «МВК по взрывному делу», 2009. – С. 175-193.
72. Дерибас А.А. Детонация эмульсионных взрывчатых веществ с полыми микросферами / Дерибас А.А. [и др.] // Доклады РАН. – 2003. – Т. 389. – № 6. – С. 747-748.
73. Дерибас А.А. Столкновение плоских детонационных волн в аммоните 6ЖВ / А.А. Дерибас, Н.А. Костюков, А.М. Ставер // Физика горения и взрыва. – 1975. – Т. 11. – № 3. – С. 456-462.
74. Детонация и взрывчатые вещества/ Сборник статей под ред. А.А. Борисова. – М.: Мир, 1981.
75. Добрынин А.А. Взрывчатые вещества. Химия, составы. Безопасность / А.А. Добрынин. – М.: изд. ИД Академии Жуковского, 2014. – 527 с.
76. Добрынин И.А. Обоснование параметров промежуточных детонаторов в скважинных зарядах для повышения эффективности дробления горных пород: Автореф. дисс. ... канд. техн. наук: 25.00.20 / Добрынин Иван Александрович. – М., 2010. – 20 с.
77. Донцов В.Е. Отражение ударной волны от твердой стенки в суспензии жидкости с твердыми частицами и газовыми пузырьками / В.Е. Донцов, Б.Г. Покусаев // Акустический журнал. – 1999. – Т. 45. – № 2. – С. 215-222.
78. Дремин А.Н. Детонационные волны в конденсированных средах / А.Н. Дремин [и др.]. – М.: Наука, 1970. – 164 с.
79. Дремин А.Н. О двумерной ячеистой структуре кинетически неустойчивого детонационного фронта / А.Н. Дремин // Физика горения и взрыва. – 2008. – Т. 44. – № 4. – С. 80-86.
80. Дремин А.Н. Определение давления Чепмена-Жуге и времени реакции в детонационной волне мощных ВВ / А.Н. Дремин, К.К. Шведов // Журнал прикладной механики и технической физики. – 1964. – № 2. – С. 154-159.

81. Дремин А.Н. Открытия в исследовании детонации молекулярных конденсированных взрывчатых веществ в XX веке / А.Н. Дремин // Физика горения и взрыва. – 2000. – Т. 36. – № 6. – С. 31-44.
82. Дремин А.Н. Пульсирующий детонационный фронт / А.Н. Дремин // Физика горения и взрыва. – 1983. – Т. 19. – № 4. – С. 159-169.
83. Друкованый М.Ф. Исследование детонации гранулированных ВВ при инициировании их боевиками различной мощности / Друкованый М.Ф. [и др.] // Взрывное дело. Сборник № 70/27. – М.: Недра, 1971. – С. 12-17.
84. Друкованый М.Ф. Методы управления взрывом на карьерах. / М.Ф. Друкованый. – М.: Недра, 1973. – 416 с.
85. Дубнов Л.В. Промышленные взрывчатые вещества / Л.В. Дубнов, Н.С. Бахаревич, А.И. Романов. – М.: Недра, 1988. – 358 с.
86. Дубовик А.В. Расчет критических параметров инициирования твердых ВВ ударом на копре / Дубовик А.В., Лисанов М.В. // Физика горения и взрыва, 1985, т. 21, № 4, с. 87-93.
87. Дубовик А.В. Чувствительность жидких взрывчатых систем к удару / А.В. Дубовик, В.К. Боболев – М.: Наука, 1978. – 232 с.
88. Дунин С.З. Динамика закрытия пор во фронте ударной волны / С.З. Дунин, В.В. Сурков // Прикладная математика и механика. – 1979. – Т. 43. – С. 511-518.
89. Дунин С.З. О распространении пластических волн в пористых телах / С.З. Дунин, В.К. Сироткин, В.В. Сурков // Механика твердого тела. – 1978. – № 3. – С. 92-98.
90. Дьяков С.П. Об устойчивости ударных волн / С.П. Дьяков // Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 1957. – Т. 27. – С. 288-295.
91. Жученко Е.И. О детонации скважинных зарядов эмульсионных взрывчатых веществ, сенсibilизированных газовыми включениями / Е.И. Жученко, В.Б. Иоффе, Б.Н. Кукиб // Взрывное дело. Выпуск № 110/67. – М.: ЗАО «МВК по взрывному делу», 2013. – С. 88-99.
92. Жученко Е.И. Применение ЭВВ, сенсibilизированных методом газогенерации, в глубоких скважинах / Жученко Е.И. [и др.] // Безопасность труда в промышленности. – 2002. – № 11. – С. 30-32.
93. Забабахин Е.И. Заполнение пузырьков в вязкой жидкости / Е.И. Забабахин // Прикладная математика и механика. – Т. XXIV. – вып. 6. – С. 1129-1131.

94. Забабахин Е.И. Некоторые вопросы газодинамики взрыва / Е.И. Забабахин. – Снежинск: РФЯЦ: ВНИИТФ, 1997. – 208 с.
95. Забабахин Е.И. Явление неограниченной кумуляции / Сб. науч. статей «Кумуляция и неустойчивость» // Снежинск: Изд-во РФЯЦ-ВНИИТФ, 1998. – С. 69-106.
96. Зельдович Я.Б. К теории распространения детонации в газообразных системах / Я.Б. Зельдович // Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 1940. – Т. 10. – вып. 5. – С. 542-568.
97. Зельдович Я.Б. Сходящаяся цилиндрическая детонационная волна / Я.Б. Зельдович // Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 1959. – Т. 36. – С. 782-792.
98. Зельдович Я.Б. Теория горения порохов и взрывчатых веществ. / Я.Б. Зельдович // Теория горения порохов и взрывчатых веществ. – М.: Наука, 1982. – С. 49-86.
99. Зельдович Я.Б. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений / Я.Б. Зельдович, Ю.П. Райзер. – М.: Наука, 1966. – 688 с.
100. Изучение разложения эмульсии под действием ударных волн: отчет по НИР (заключительный) / Шведов К.К. – Черногловка: Институт проблем химической физики, 2004. – 17 с.
101. Калякин С.А. Исследование влияния крупности инертных частиц в составе взрывчатого вещества на его скорость детонации и работоспособность / Калякин С.А. [и др.] // Материалы XIII международной научно-технической конференции «Современные технологии ведения буровзрывных работ, их экономическая эффективность и техногенная безопасность», 3-8 февраля 2014 года, г. Кременчуг – Кошице, Украина – Словакия. – С. 75-78.
102. Калякин С.А. О линейном инициировании зарядов взрывчатых веществ / С.А. Калякин, В.С. Прокопенко // Сучасні ресурсоенергозберігаючі технології гірничого виробництва. – 1/2013 (11). – С. 41-47.
103. Калякин С.А. Обоснование параметров промежуточных детонаторов для инициирования скважинных зарядов ВВ / С.А. Калякин // Сучасні ресурсоенергозберігаючі технології гірничого виробництва. – 1/2012 (9). – С. 50-57.
104. Калякин С.А. Обоснование числа промежуточных детонаторов для инициирования простейших взрывчатых веществ / С.А. Калякин, В.С. Про-

копенко // Сучасні ресурсоенергозберігаючі технології гірничного виробництва. – 2/2012 (10). – с. 40-47.

105. Калякин С.А. Совершенствование простейших ВВ и способов их инициирования в скважинах / С. А. Калякин. – Информационный бюллетень УСИВ. – 2011. – № 2. – С. 7 – 12.

106. Караханов С.М. Время формирования горячих точек при ударном сжатии микробаллонов в конденсированной среде / С.М. Караханов [и др.] // Физика горения и взрыва. – 2016. – Т. 52. – № 3. – С. 105-113.

107. Карякин А.В. Состояние воды в органических и неорганических соединениях / А.В. Карякин, Г.А. Кривцова. – М.: Наука, 1972. – 176 с.

108. Кедринский В.К. Гидродинамика взрыва / В.К. Кедринский // Журнал прикладной механики и технической физики. – 1987. – № 4. – С. 23-48.

109. Кедринский В.К. Особенности динамики сферического газового пузырька в жидкости / В.К. Кедринский // Журнал прикладной механики и технической физики. – 1967. – № 3. – С. 120-125.

110. Кедринский В.К. Ударные волны в жидкости с пузырьками газа / В.К. Кедринский // Физика горения и взрыва. – 1980. – Т. 16. – № 5. – С. 14-25.

111. Клейтон В. Эмульсии. Их теории и технологические применения / В. Клейтон; под. ред. П.А. Ребиндера. – М.: Иностран. лит., 1950. – 680 с.

112. Клименко А.П. Жидкие углеводородные газы: хранение, транспорт, регазификация и использование жидких газов – М.: Гостоптехиздат, 1959. – 295 с.

113. Кобылкин И.Ф. Экспериментальное исследование изменения ударно-волновой чувствительности зарядов ВВ при предварительном нагружении их слабыми ударными волнами / И.Ф. Кобылкин, Н.И. Носенко, В.С. Соловьев // Физика горения и взрыва. – 1992. – Т. 28. – № 6. – С. 70-73.

114. Коваленко И.Л. Разработка и исследование гетерогенных систем на основе нитратов кальция и аммония: Автореф. дис.... канд. техн. наук: 05.17.01 / Коваленко Игорь Леонидович. – Днепропетровск, 2002. – 20 с.

115. Козак Г.Д. Спиновая детонация в твердых веществах / Г.Д. Козак, Б.Н. Кондриков, В.Б. Обломский // Физика горения и взрыва. – 1989. – Т. 25. – № 4. – С. 86-93.

116. Козырев С.А. Оценка влияния массы и типа боевика на характер распространения детонации в скважинных зарядах гранулированных ВВ / Козы-

- рев С.А. [и др.] // Взрывное дело. Выпуск № 100/57. – М.: ЗАО «МВК по взрывному делу», 2008. – С. 152-161.
117. Колганов Е.В. Эмульсионные промышленные взрывчатые вещества. 1-я книга (Составы и свойства) / Е.В. Колганов, В.А. Соснин – Дзержинск Нижегородской области, издательство ГосНИИ «Кристалл», 2009. – 592 с.
118. Колганов, Е.В. Эмульсионные промышленные взрывчатые вещества / Е.В. Колганов, В.А. Соснин – 2-я книга (Технология и безопасность). – Дзержинск Нижегородской обл.: изд. ГосНИИ «Кристалл», 2009. – 336 с.
119. Колесников С.А. Экспериментальное исследование структуры детонационных волн в эмульсионных ВВ / Колесников С.А. [и др.] // Тезисы докладов международной конференции «Лаврентьевские чтения по математике, механике и физике», Новосибирск: ИГиЛ СО РАН, 2010. – С. 216-217.
120. Комащенко В.И. Перспективы развития промышленных взрывчатых веществ и применение современных технологий взрывных работ с учетом экологической безопасности / В.И. Комащенко, Е.Д. Воробьев, В.А. Белин // Известия ТулГУ. Науки о земле. – 2017. – Вып. 3. – С. 157-167.
121. Конторович В.М. Отражение и преломление звука на ударных волнах / В.М. Конторович // Акустический Журнал. – 1959. – Т. 5. – Вып. 3. – С. 314-323.
122. Конюхов А.В. Нейтрально устойчивые ударные волны в термодинамически неидеальных средах: теория и вычислительный эксперимент / А.В.Конюхов [и др.] // Тезисы международной конференции по физике высоких плотностей энергии – IX Забабахинские научные чтения, г. Снежинск, Россия, 10-14 сентября 2007 г. – С. 153.
123. Конюхов А.В. Устойчивость и неоднозначное представление ударно-волнового разрыва в термодинамически неидеальных средах / А. В. Конюхов [и др.] // Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 2009. – Т. 90. – Вып. 1. – С. 28-34.
124. Конюхов А.В. Численное исследование неустойчивости ударных волн в термодинамически неидеальных средах / А.В. Конюхов [и др.] // Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 2004. – Т. 125. – Вып. 4. – С. 927-941.
125. Корявов В.П. Расчет движения в ближней зоне взрыва в твердой среде / В.П. Корявов, Г.Г. Виленская // Журнал прикладной механики и технической физики. – 1968. – № 6. – С. 76-85.

126. Котяшев А.А. Определение характеристик эмульсионных взрывчатых веществ методом производственного эксперимента / А.А. Котяшев, А.С. Маторин, П.В. Меньшиков // Сборник докладов VII Международной научно-технической конференции. Чтения памяти В.Р. Кубачека. Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности. Г. Екатеринбург. 2009. – С. 58-63.
127. Кудзило С. Рабочие характеристики эмульсионных взрывчатых веществ / С. Кудзило [и др.] // Физика горения и взрыва. – 2002. – Т. 38. – № 4. – С. 95-102.
128. Кудинов В.М. О результатах исследования устойчивости и структуры фронта детонационных волн в гетерогенных средах / В.М. Кудинов, В.А. Даниленко // Всесоюзная конференция «Лаврентьевские чтения по математике, механике и физике» 6-10 сентября 1982 г. – Новосибирск: ИГиЛ СО АН СССР, 1982. – С. 67-68.
129. Кук М.А. Наука о промышленных ВВ. Пер. с англ. под ред. Г.П. Демидюка и Н.С. Бахаревич. – М.: Недра, 1980. – 453 с.
130. Кукиб Б.Н. Детонационная способность современных промышленных взрывчатых веществ / Кукиб Б.Н. [и др.] // 4-я международная конференция. Физические проблемы разрушения горных пород. 18-22 октября 2004 года, Москва. – М.: ИПКОН РАН. – С. 293-296.
131. Кукин П.П. Теория горения и взрыва / Кукин П.П. [и др.] – М.: «Юрайт», 2014. – 435 с.
132. Куропатенко В.Ф. Коллапс сферических полостей и кумуляция энергии в идеальной сжимаемой жидкости / В.Ф. Куропатенко // Физика горения и взрыва. – 2015. – Т. 51. – № 1. – С. 57-65.
133. Кутузов Б.Н. Безопасность взрывных работ в горном деле и промышленности / Б.Н. Кутузов. – М.: МГГУ «Горная книга», 2009. – 669 с.
134. Кутузов Б.Н. Инициирование эмульсионных ВВ и гранэмитов промежуточными детонаторами / Б.Н. Кутузов, С.А. Горинов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2011. – № 3-1. – С. 5-19.
135. Кутузов Б.Н. Расчет детонационных параметров аммиачно-селитренных ВВ / Б.Н. Кутузов, С.А. Горинов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2010. – № 6. – С. 40-49.

136. Кутузов Б.Н. Физико-технические основы создания эмульсионных и гранулированных ВВ и средств их инициирования / Кутузов Б.Н., Горинов С.А. // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2011. – № 3-1. – С. 34-52.
137. Кучерявый Ф.И. Короткозамедленное взрывание на карьерах / Ф.И. Кучерявый, М.Ф. Друкованый, Ю.В. Гаек. – М.: Гос. науч.-техн. изд-во лит. по горн. делу. – 1962. – 227 с.
138. Лавров В.В. Исследование затухающих взрывных процессов в гетерогенных пористых системах. Разработка стандартных методов оценки безопасности: Дисс. ... канд. физ.-мат. наук: 01.04.17 / Лавров Владимир Васильевич. – Черноголовка, 2008. – 131 с.
139. Лавров В.В. Экспериментальное исследование ударной сжимаемости и структуры детонационных волн / В.В. Лавров [и др.] // XI Международная конференция. Забобахинские научные чтения. ЗНЧ – 2012. Снежинск, 2012.
140. Ландау Л.Д. Теоретическая физика: Учебное пособие. В 10 т. Т. VI. Гидродинамика. – 4-е изд., стер. /Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1988. – 736 с.
141. Лойценский Л.Г. Механика жидкостей и газа. – Учеб. для студ. вузов. – 6-е изд. перераб. и доп. / Л.Г. Лойценский. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1987. – 840 с.
142. Лыков А.В. Теплообмен / А.В. Лыков. – М.: Энергия, 1978. – 479 с.
143. Маслов И.Ю. Влияние размеров глобул эмульсии на детонационные характеристики ЭВВ при их сенсibilизации пластиковыми полимикросферами / И.Ю. Маслов // Отдельные статьи Горного информационно-аналитического бюллетеня (научно-технического журнала). – 2011. – № 12. – С. 3-9.
144. Маслов И.Ю. Определение фактической скорости детонации и работоспособности новых эмульсионных ВВ с целью выбора рациональной плотности заряжания при взрывоподготовке железных руд / И.Ю. Маслов [и др.] // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2003. – № 5. – С. 56-60.
145. Маслов И.Ю. Улучшение качества взрывной подготовки горной массы за счет применения промежуточных детонаторов с оптимальными габаритными размерами при инициировании скважинных зарядов эмульсионных ВВ / И.Ю. Маслов [и др.] // Взрывное дело. Выпуск № 94/51. – М.: ЗАО «МВК по взрывному делу», 2004. – С. 125-130.

- 
146. Маторин А.С. Водосодержащие взрывчатые вещества местного приготовления / А.С. Маторин, В.М. Павлютенков – Екатеринбург: УрО РАН, 2004. – 194 с.
147. Машуков В.И. Влияние промежуточного детонатора на эффективность взрывных работ при использовании гранулитов / В.И. Машуков, А.К. Новиков // Колыма. – 1968. – № 2. – С. 27-29.
148. Медведев А.Е. Приближенно-аналитические решения задач механики реагирующих, многофазных сред: Дисс. ... докт. физ.-мат. наук: 01.02.05 / Медведев Алексей Елизарович. – Новосибирск, 2015. – 208 с.
149. Медведева Н.С. Волны нагрузки при подземном взрыве в горных породах / Н.С. Медведева, Е.И. Шемякин // Журнал прикладной механики и технической физики. – 1961. – № 6. – С. 78-87.
150. Мейдер Ч. Численное моделирование детонации / Ч. Мейдер. – М.: Мир, 1985. – 384 с.
151. Мищенко К.П. Термодинамика и строение водных и неводных растворов электролитов / К.П. Мищенко, Г.М. Полторацкий. – Л.: Химия, 1976. – 328 с.
152. Ни А.Л. Квазиодномерный анализ и численное моделирование устойчивости стационарных ударных волн в средах с произвольным уравнением состояния / А. Л. Ни, С. Г. Сугак, В. Е. Фортов // Теплофизика высоких температур. – 1986. – Т.24. – № 3. – С. 564-569.
153. Низомов З. Молекулярные механизмы акустической релаксации в водных растворах солей одно- и двухзарядных катионов: Автореф. дисс. ... докт. физ.-мат. наук: 01.04.07 / Низомов Зуевуддин. – Душанбе, 2009. – 34 с.
154. Ноздрев В.Ф. Молекулярная акустика. Учеб. пособие для пед. ин-тов / В.Ф. Ноздрев, Н.В. Федорищенко. – М.: Высшая школа, 1974. – 288 с.
155. Организация и проведение работ по испытанию промышленного взрывчатого вещества «Фортис»: отчет по НИР / Шеменев В.Г. – Екатеринбург: ИГДУрО РАН, 2010. – 70 с.
156. Организация и проведение работ по испытанию промышленного эмульсионного ВВ «Фортис», изготавливаемого в смесительно-зарядной машине «ММУ(s)-12»: отчет по НИР / Шеменев В.Г. – Екатеринбург: ИГД УрО РАН, 2011. – 60 с.
157. Орленко Л.П. Физика взрыва и удара. – 2-е изд., испр. / Л.П. Орленко – М.: Физматлит, 2008. – 304 с.



158. Павлов В.А. Гофрировочная неустойчивость детонационного фронта / В.А. Павлов // Вестник СПбГУ. – 1998. – Сер. 4. – Вып. 4 (№25). – С. 87-91.
159. Панасьян Л.Л. Минералогические, петрографические и акустические характеристики серпентинитов – индикаторы палеодинамических условий их образования (на примере Главного Уральского разлома) / Л.Л. Панасьян [и др.] // Геология и геофизика. – 2014. – Т. 55. – № 12. – С. 1828-1840.
160. Перечень взрывчатых материалов, оборудования и приборов взрывного дела, допущенных к применению в Российской Федерации. Сер. В. Вып. 2. – М.: ГУП «Научно-технич. центр по безопасности в пром-сти Ростехнадзора России», 2002. – 80 с.
161. Полезная модель № 93963 (Ru). Промежуточный детонатор из эмульсионного взрывчатого состава / Страхов А.Г. [и др.].
162. Полезная модель № 122164 (Ru). Эмульсионный патрон-детонатор / Осторожный В.Н. [и др.].
163. Приказ Минтранса РФ от 8 августа 1995 г. № 73 «Об утверждении Правил перевозки опасных грузов автомобильным транспортом».
164. Пупков В.В. Снижение себестоимости изготовления на местах применения эмульсионных ВВ за счет подбора эмульгаторов и определения их оптимального расхода / В.В. Пупков [и др.] // Взрывное дело. Выпуск № 107/64. – М.: ЗАО «МВК по взрывному делу при АГН», 2004. – С. 119-124.
165. Распределение и корреляция показателей физических свойств горных пород: Справочное пособие / под ред. М.М. Протождяконова. – М.: Недра, 1981. – 192 с.
166. Рафейчик С.И. Экспериментальное и численное исследование параметров детонации эмульсионных взрывчатых веществ с микробаллонами из стекла: автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук: 01.04.17 / Рафейчик Сергей Игоревич. – Новосибирск, 2014. – 19 с.
167. Решетняк А.Ю. Детонация эмульсии на основе аммиачной селитры с ценосферами: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 01.02.05 / Решетняк Александр Юрьевич. – Новосибирск, 2007. – 20 с.
168. Седов Л.И. Механика сплошной среды, т. II / Л.И. Седов. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1984. – 560 с.
169. Сивенков В.И. Эмульсионные взрывчатые вещества и неэлектрические системы инициирования / В.И. Сивенков, С.В. Иляхин, И.Ю. Маслов. – М.: Щит-М, 2013. – 320 с.

170. Сильвестров В.В. Критический диаметр и толщина эмульсионного взрывчатого вещества / В.В. Сильвестров [и др.] // Физика горения и взрыва. – 2008. – Т. 44. – № 3. – С. 121-127.
171. Сильвестров В.В. Температура детонационного фронта эмульсионного взрывчатого вещества / В.В. Сильвестров [и др.] // Физика горения и взрыва. – 2015. – Т. 51. – № 1. – С. 105-112.
172. Сильвестров В.В. Ударная адиабата эмульсионной матрицы на основе водного раствора аммиачной селитры / В.В. Сильвестров, А.С. Юношев, А.В. Пластинин // Физика горения и взрыва. – 2014. – Т. 50. – № 6. – С. 105-108.
173. Сильвестров В.В. Ударная сжимаемость эмульсионной матрицы при давлении до 37 ГПа / В.В. Сильвестров [и др.] // Физика горения и взрыва. – 2014. – Т. 50. – № 4. – С. 110-116.
174. Соловьев В.С. Некоторые особенности ударно-волнового инициирования взрывчатых веществ / В.С. Соловьев // Физика горения и взрыва. – 2000. – Т. 36. – № 6. – С. 65-76.
175. Соловьев В.С. Разложение ВВ в условиях газодинамического течения / В.С. Соловьев, А.Н. Исаев, И.Ф. Кобылкин // Физика горения и взрыва. – 1984. – Т. 20. – № 3. – С. 98-101.
176. Соснин А.В. Влияние размеров и параметров микросфер на скорость детонации в эмульсионных взрывчатых веществах / А.В. Соснин // Взрывное дело. Выпуск № 105/62. – М.: ЗАО «МВК по взрывному делу», 2011. – С. 199-209.
177. Соснин В.А. Особенности механизма детонации эмульсионных взрывчатых веществ / В.А. Соснин [и др.] // Вестник Казанского технологического университета. – 2016. – Т. 19. – № 19. – С. 28-33.
178. Соснин В.А. Состояние и перспективы развития промышленных взрывчатых веществ в России и за рубежом / В.А. Соснин, С.Э. Межеричкий // Вестник Казанского технологического университета. – 2016. – Т. 19. – № 19. – С. 84-89.
179. Справочник по горнорудному делу. Открытые работы. Том I. / Под ред. Е.Ф. Шешко и В.В. Ржевского. – М.: Гос. науч.-техн. изд-во лит. по горн. делу, 1960. – 926 с.
180. Справочник по горнорудному делу. Подземные работы. Том II. / Под ред. А.М. Терпигорева и Р.П. Каплунова. – М.: Гос. науч.-техн. изд-во лит. по горн. делу, 1960.- 855 с.

181. Станюкович К.П. Неустановившиеся движения сплошной среды / К.П. Станюкович. – М.: Гостехиздат, 1955. – 840 с.
182. Сычев А.И. Сильные ударные волны в пузырьковых средах / А.И. Сычев // Журнал технической физики. – 2010. – Т. 8. – Вып. 6. – С.31-35.
183. Сюйгуан В. Эмульсионные взрывчатые вещества. Пер. монографии проф. Ван Сюйгуан издания Metallurgical Industry Press, Beijing, 1994г. / Ван Сюйгуан. – Красноярск: Metallurgical Industry Press, 2012. – 380 с.
184. Теоретическая оценка детонационной способности эмульсионных ВВ, предназначенных для разрушения сульфидных пород: отчет по НИР / Горинов С.А., Коваленко И.Л. – Екатеринбург: ИГД УрО РАН, 2010. – 115 с.
185. Тогунов М.Б. Повышение эффективности взрывания горных пород эмульсионными ВВ / М.Б. Тогунов [и др.] // Технология и безопасность взрывных работ. Материалы научно-технической конференции «Развитие ресурсосберегающих технологий во взрывном деле» – Екатеринбург: ИГД УрО РАН, 2012. – С. 123-133.
186. Торунов С.И. Экспериментальное исследование неустойчивости детонационного фронта жидких взрывчатых веществ: дисс. ... канд. физ-мат. наук: 01.04.17 / Торунов Сергей Иванович. – Черноголовка, 2016. – 95 с.
187. Топчиян М.Е. Сходящаяся цилиндрическая детонационная волна в газе / М.Е. Топчиян, В.А. Ясаков // Физика горения и взрыва. – 1967. – Т. 3. – № 1. – С. 23-31.
188. Трофимов В.С. Обобщение гидродинамической теории детонации на случай турбулентного движения среды / В.С. Трофимов // Взрывное дело. Выпуск № 103/60. – М.: ЗАО «МВК по взрывному делу», 2010, с. 3-15.
189. Фейман Р. Феймановские лекции по физике. Т. 7. Физика сплошных сред / Р. Фейман, Р. Лейтон, М. Сэндс. – М.: Мир, 1977. – 288 с.
190. Физика взрыва / под ред. Л.П. Орленко. – Изд. 3-е, перераб. – В 2-х т. Т. 1. – М.: Физматлит, 2002. – 832 с.
191. Физическая акустика. Т. VI. Принципы и методы / под ред. У. Мэзона, Р. Терстона. - М.: Мир, 1973. - 432 с.
192. Фокин В.А. Обоснование геометрических параметров удлиненной шашки-детонатора для обратного инициирования скважинных зарядов, газифицированных эмульсионных взрывчатых веществ / В.А. Фокин // Изв. вузов. Горный журнал. – 2008. – № 3. – С. 49-54.

193. Фокин В.А. Распределение плотности эмульсионных взрывчатых веществ по высоте колонки скважинного заряда / В.А. Фокин // Изв. вузов. Горный журнал. – 2007. – № 3. – С. 89-94.
194. Харитон Ю.Б. О детонационной способности взрывчатых веществ / Ю.Б. Харитон // Вопросы теории взрывчатых веществ, вып. 1. – М.-Л.: изд-во АН СССР, 1947. – С. 7-42.
195. Хасаинов Б.А. Возбуждение химической реакции при ударноволновом сжатии жидких ВВ, содержащих стеклянные микросферы / Б.А. Хасаинов, Б.С. Ермолаев // Химическая физика. – 1992. – Т. 11. – № 11. – С. 1588-1600.
196. Хасаинов Б.А. Развитие очага реакции в пористых энергетических материалах / Б.А. Хасаинов, А.А. Борисов, Б.С. Ермолаев // Химическая физика. – 1988. – Т. 7. – № 7. – С. 989-998.
197. Хотин В.Г. Об особенностях динамического сжатия веществ, способных к разложению в ударных волнах / В.Г. Хотин, С.П. Бачурин // Вопросы теории конденсированных взрывчатых систем. Труды Московского хим.-техн. института им. Д.И. Менделеева. – М.: МХТИ, 1980. – Вып. 112. – С. 113-119.
198. Чедвик П. Механика глубинных подземных взрывов / Чедвик П., Кокс А., Гопкинсон Г. – М.: Мир, 1966. – 126 с.
199. Черепанов Г.П. Механика хрупкого разрушения / Г.П. Черепанов. – М.: Наука, 1974. – 640 с.
200. Шведов К.К. О параметрах детонации промышленных ВВ и их сравнительной оценке / К.К. Шведов, А.Н. Дремин // Взрывное дело. Сборник № 76/33. – М.: Недра, 1976. – С. 137-150.
201. Швыдько П.В. К вопросу снижения выхода мелких фракций при взрывной отбойке минерального сырья, а также бурения, расхода ВВ и сейсмического эффекта на открытых горных работах / П.В. Швыдько [и др.] // Вісник КДПУ імені Михайла Остроградського. -Випуск 5/2007 (46). – Частина 1. – С. 94-97.
202. Шемякин Е.И. Некоторые модели деформирования горных пород и грунтов / Е.И. Шемякин, А.Ф. Ревуженко, С.Б. Стажевский // Взрывное дело. Сборник № 78/33. – М.: Недра, 1976. – С. 204-208.
203. Щукин Ю.Г. Перспективные взрывчатые материалы для горной промышленности / Щукин Ю.Г. [и др.] // Развитие ресурсосберегающих технологий во взрывном деле. – Екатеринбург: УрО РАН, 2009. – С. 108-118.

204. Юношев А.С. Исследование влияния плотности эмульсионного взрывчатого вещества на ширину зоны реакции / А.С. Юношев, А.В. Пластинин, В.В. Сильвестров // Физика горения и взрыва. – 2012. – Т. 48. – № 3. – С. 79-88.
205. Юханссон К. Детонация взрывчатых веществ / К. Юханссон, П. Персон – М: Мир, 1973. -352 с.
206. Avdeev K.A. Experimental and computational investigation of shock wave-to-bubble water momentum transfer / K.A. Avdeev and etc// Progress in Detonation Physics / Edited by S.M. Frolov and G.D. Roy/ – Moscow: TORUS PRESS, 2016. – pp. 199-219.
207. Campell A.W. Shock initiation of detonation in liquid explosives / A.W. Campell, W.E. Davis, J.R. Travis // Phys. Fluids. – 1961. – V.4. – № 4. – pp.498-506.
208. Caroll M.M. Static and dynamic pore-collapse relation for ductile porous materials / M.M. Caroll, A.C. Holt // J. Appl. Phys. – 1972. – V.43. – №4. – pp.1626-1636.
209. Chaudhrii M.M. The role of rapidly compressed gas pockets in the initiation of condensed explosives / M.M. Chaudhrii, J.E. Field // Lond., Proc. Royal Soc.- 1974.- A340.- № 974.- P.113-120.
210. Cooper J. Molecular and microscopic structural effects in the detonation of fluid explosives / Cooper J., Leiper A.G., Neilson W.G. // Proc. 12th Intern. Detonation Symp. – 2002. – pp. 733-741.
211. Doring W. Uber der Detonation verging in Gasen / W. Doring // Ann. Phys. – 1943.- Bd. 43.- N 5.- S. 421-436.
212. Erpenbeck J.J. Stability of step shocks / J.J. Erpenbeck// Phys. Fluids. – 1962. – V. 5. – No. 10. – pp. 1181-1191.
213. Gorinov S. Peculiarities of detonation of gas sensitized emulsion explosion/ S. Gorinov and etc. // Combustion and Explosion (COMBEX-2013), Ramsau, Austria, March 4-8, 2013.-
214. Gorinov S.A. Physical and technical evaluation of possibility using low-density explosives in smooth blasting / S.A. Gorinov, I.Y. Maslov // 11th International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting. 24-26 August 2015. Sydney, Australia: Published by AIMM, 2015. – pp. 555-564.
215. Gorinov S.A. Results of the study of structure oxidizer phase emulsion explosives / S.A. Gorinov, I.Y. Maslov // Progress in Detonation Physics / Edited by S.M. Frolov and G.D. Roy / – Moscow: TORUS PRESS, 2016. – pp. 335-342.

- 
216. Hirosaki Y. Detonation characteristics of emulsion explosives as function of void size and volume / Y. Hirosaki and etc.// 12th International Detonation Symposium, 2002, USA, San Diego, California.
217. Kamsuhide H. Influence of the size of hollow spheres on the critical diameter and sensitivity of emulsion explosives / H. Kamsuhide and etc.// J. Ind. Explos. Soc. Jap. – 1984. – V. 45.- № 3.- pp. 143-148.
218. Keirstead K.F. Effect of bubble dimensions on shock sensitivity in gelled slurry explosives / K.F. Keirstead, D. De Kee //Ind. Eng. Chem. Prod. Res. Dev. – 1985.- V.24.- №1.- pp.134-140.
219. Kobayashi J. The particle size and sensitivity of emulsion explosives to initiation / J. Kobayashi, K. Itoh, K. Yamamoto // J. Ind. Explos. Soc. Jap. – 1984. – V.45. – №3. – pp.135-142.
220. Lee J. Detonation and shock initiation properties of emulsion explosive / J. Lee J. and etc.// Proc. 9th Intern. Detonation Symp., Portland, Origen, 1989.- pp.263-271.
221. Lee J. Detonation behaviour of emulsion explosives / J. Lee J., P.A. Persson // Propellants, Explosives, Pyrotechnics. – 1990.- V.15.- №5.- pp.208-216.
222. Mader C. Initiation of detonation by the interaction of shocks with density discontinuous / C. Mader// Phys. Fluids. -1965. – V.8.- №10.- pp.215-219.
223. Mader C. Shock and hot initiation of homogeneous explosives / C. Mader // Phys. Fluids. – 1963.- V.6.- №3.- pp.375-383.
224. Patent US No 3161551. Water resistant sensitizers for blasting agents/ R.S. Egly, A.E. Neckar. – Publ. 15.12.1964.
225. Patent US No 3164503. Aqueous emulsified ammonium nitrate blasting compositions containing nitric acid /N.E. Gehrig. – Publ. 05.01. 1965.
226. Patent US No 3447978. Ammonium nitrate emulsion blasting agent and method of preparing same / H.F. Bluhm. – Publ. 03.06.1969.
227. Patent US No 3642547. Method of controlling density in gas-sensitized aqueous explosives / K.L. Conrad. -Publ. 15.02.1972.
228. Patent US No 3765964. Water-in-oil emulsion type explosive compositions having strontium-ion detonation catalysts / C.G. Wade. – Publ. 16.10.1973.
229. Patent US No 4110134. Water-in-oil emulsion explosive composition/ C.G. Wade. – Publ. 29.08.1978.
230. Patent US No 4110134. Production of explosive emulsions / R.S. Olney, C.G. Wade. – Publ. 06.02.1979.

- 
231. Patent US No 4938143. Booster shaped for high-efficiency detonating/ R. Thomas, R. Levan. – Publ. 07.03.1990.
  232. Turcotte R. Hot-wire ignition of AN-based emulsions / Turcotte R. and etc. // Propellants, Explos., Pyrotech. – 2008.- V. 33.- pp. 472-481.
  233. Von Neumann J. Theory of detonation waves (OD-02) / J. Von Neumann// Technical Report, National Defense Research Committee of Scientific Research and Development, 1942. – Division B. Section B-1. Serial N 238

## ПРИЛОЖЕНИЯ

### Приложение 1. Результаты синхронного термического анализа аммиачной селитры

Температура, при которой начинается интенсивное экзотермическое разложение аммиачной селитры, определялась при исследовании термических свойств селитры на ТГ/ДСК анализаторе синхронного термического анализа СТА 409 PC Luxx. На рис. П1 представлены совмещенные термогравиметрическая зависимость изменения массы образца селитры и зависимость изменения разности теплового потока между образцом селитры и эталоном.

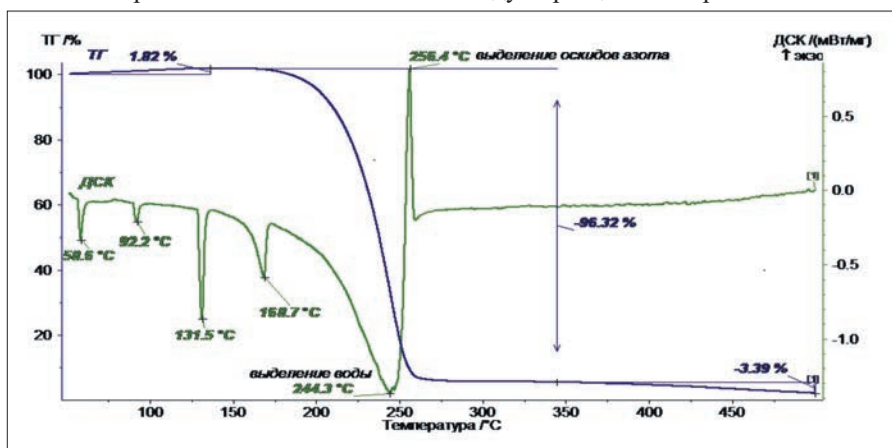


Рис. П1. Совмещенные термогравиметрическая зависимость изменения массы образца селитры и зависимость изменения разности теплового потока между образцом селитры и эталоном.

Анализ рис. П1 показывает, что температура, при которой начинается интенсивное экзотермическое разложение аммиачной селитры, примерно равна 250 °С.

### Приложение 2. Расчет коэффициентов теплопроводности и теплоемкости матричной эмульсии

Согласно представленным в п. 2.4 исследованиям окислительная фаза эмульсии является высококонцентрированной суспензией мельчайших частиц аммиачной селитры в воде. Данное обстоятельство позволяет сделать теоретическую оценку коэффициентов теплопроводности и теплоемкости матричной эмульсии на основе следующей расчетной модели [61].



Среда является смесью равномерно распределенных компонентов.

Введем обозначения:

$\alpha_1, \rho_1, c_1, k_1$  – массовая доля, плотность, теплоемкость и коэффициент теплопроводности аммиачной селитры, соответственно;

$\alpha_2, \rho_2, c_2, k_2$  – массовая доля, плотность, теплоемкость и коэффициент теплопроводности воды, соответственно;

$\alpha_3, \rho_3, c_3, k_3$  – массовая доля, плотность, теплоемкость и коэффициент теплопроводности эмульгатора, соответственно;

$\alpha_4, \rho_4, c_4, k_4$  – массовая доля, плотность, теплоемкость и коэффициент теплопроводности дизельного топлива (масла), соответственно;

В соответствии с принятой моделью теплоемкость системы (эмульсии)  $C$  равна:

$$C = \sum_{i=1}^{i=4} \alpha_i c_i \quad (\text{п. 2.1})$$

Ввиду однородности и изотропности рассматриваемой модели коэффициент теплопроводности будет скалярной, а не тензорной величиной. Для определения его величины мысленно вырежем в эмульсии кубик со стороной  $\alpha$ . Величину  $\alpha$  назначим такой, что объем аммиачной селитры, содержащейся внутри кубика, будет равен единице.

Тогда толщина водяной пленки, обтягивающей единичный куб аммиачной селитры, равна

$$\delta_2 = \frac{1}{6} \frac{\alpha_2 \rho_1}{\alpha_1 \rho_2}. \quad (\text{п. 2.2})$$

Толщина пленки эмульгатора, обтягивающей указанную водяную пленку, равна

$$\delta_3 = \frac{1}{6} \frac{\alpha_3 \rho_1}{\alpha_1 \rho_3} \frac{1}{\left(1 + \frac{1}{6} \frac{\alpha_2 \rho_1}{\alpha_1 \rho_2}\right)^2}. \quad (\text{п. 2.3})$$

Толщина пленки дизельного топлива (масла), обтягивающей указанную эмульсионную пленку, равна

$$\delta_4 = \frac{1}{6} \frac{\alpha_4 \rho_1}{\alpha_1 \rho_4} \frac{1}{\left(1 + \frac{1}{6} \frac{\alpha_2 \rho_1}{\alpha_1 \rho_2} + \frac{1}{6} \frac{\alpha_3 \rho_1}{\alpha_1 \rho_3} \left(\frac{1}{1 + \frac{1}{6} \frac{\alpha_2 \rho_1}{\alpha_1 \rho_2}}\right)^2\right)^2}. \quad (\text{п.2.4})$$

На основании [142] определяем коэффициент теплопроводности эмульсии

$$\lambda = \frac{1}{\left(1 + \sum_{i=1}^{i=4} \delta_i\right)} \cdot \left( \frac{1 + 2 \sum_{i=2}^{i=4} \delta_i}{\frac{1}{k_i} + 2 \sum_{i=2}^{i=4} \delta_i} + 4(k_2 \delta_2 + k_3 \delta_3 (1 + \delta_2) + k_4 \delta_4 (1 + \delta_2 + \delta_3)) \right). \quad (\text{п. 2.5})$$

Пример:

$$\alpha_1 = 0,75, \quad \rho_1 = 1,52 \text{ г/см}^3, \quad c_1 = 1745 \text{ Дж/кг} \cdot \text{К}, \quad k_1 = 0,4 \text{ Вт/м} \cdot \text{К};$$

$$\alpha_2 = 0,20, \quad \rho_2 = 1 \text{ г/см}^3, \quad c_2 = 4186 \text{ Дж/кг} \cdot \text{К}, \quad k_2 = 0,64 \text{ Вт/м} \cdot \text{К};$$

$$\alpha_3 = 0,015, \quad \rho_3 = 0,98 \text{ г/см}^3, \quad c_3 = 2930 \text{ Дж/кг} \cdot \text{К}, \quad k_3 = 0,28 \text{ Вт/м} \cdot \text{К};$$

$$\alpha_4 = 0,035, \quad \rho_4 = 0,83 \text{ г/см}^3, \quad c_4 = 3160 \text{ Дж/кг} \cdot \text{К}, \quad k_4 = 0,2 \text{ Вт/м} \cdot \text{К}.$$

На основании (п. 2.1) – (п. 2.5) определяем:

$$C = \sum_{i=1}^{i=4} \alpha_i c_i = 2297,95 \text{ Дж/кг} \cdot \text{К}.$$

$$\lambda = 0,507 \text{ Вт/м} \cdot \text{К}$$

Результаты расчетов находятся в согласии с экспериментальными данными работ [117, 210, 232].

### Приложение 3. Зависимость вязкости эмульсии от размера частиц дисперсной фазы

В п. 2.3 предложены две модели деформирования вещества эмульсии при втекании в пору под действием ударной волны: модель непрерывного деформирования и модель деформирования по плоскостям сдвига, формирующимся во втекающем в пору веществе. В первом случае происходит объемное нагревание втекающего в пору вещества, а во втором – разогрев концентрируется на поверхностях плоскостей сдвига. Для верификации предложенных моделей деформирования необходимо знание зависимости вязкости эмульсии от размера частиц дисперсной фазы.

#### *П3.1. Микроскопические исследования*

Микроскопические исследования дисперсности исследуемых образцов эмульсии выполнялись перед проведением опытных и промышленных взрывов с целью получения информации о микроструктуре ЭВВ, необходимой для

последующего анализа. Составы образцов и их обозначения представлены в табл. П.3.1.

Исследования проводили как в отраженном свете, так и в проходящем в поляризованном и неполяризованном свете на оптическом микроскопе Olympus VX-51, получая фотографии на различных участках покрывных стекол. Точность измерений геометрических размеров составляет 0,5 % отн.

Методика проведения экспериментов на оптическом микроскопе Olympus VX-51 заключалась в следующем [184]:

на покрывное стекло с помощью стеклянной палочки помещалась исходная эмульсия и сверху накрывалась покрывным стеклом;

между предметными стеклами помещали прокладки толщиной 100 мкм;

стекла между собой прижимали и удаляли избытки эмульсии для того, чтобы создать однородный по толщине и полностью заполненный слой эмульсии между покрывными стеклами. Данная процедура контролировалась визуально.

Таблица П.3.1. Составы образцов и их обозначения

№	Серия образцов	Индекс образца	Массовая доля кальциевой селитры, %	Массовая доля аммиачной селитры, %	Массовая доля воды, %	Массовая доля эмульгатора, %	Массовая доля ДТ, %
1	Серия 1.1 – 1.5	1.1	25	51	16	3	5
2		1.2	25	51	16	2,5	5,5
3		1.3	25	51	16	2	6
4		1.4	25	51	16	1,5	6,5
5		1.5	25	51	16	1	7
6	Серия 1.6 – 1.10	1.6	25	47	20	3	5
7		1.7	25	47	20	2,5	5,5
8		1.8	25	47	20	2	6
9		1.9	25	47	20	1,5	6,5
10		1.10	25	47	20	1	7
11	Серия 2.1 – 2.5	2.1	32	44	16	3	5
12		2.2	32	44	16	2,5	5,5
13		2.3	32	44	16	2	6
14		2.4	32	44	16	1,5	6,5
15		2.5	32	44	16	1	7

16	Серия 2.6 – 2.10	2.6	32	40	20	3	5
17		2.7	32	40	20	2,5	5,5
18		2.8	32	40	20	2	6
19		2.9	32	40	20	1,5	6,5
20		2.10	32	40	20	1	7

При выполнении микроскопического исследования образцы предварительно изучались на однородность. Визуально изучалось поле предметного стекла. Затем получали не менее 4 фотографий характерных различных участков (несколько фотографий в центре и по краям покрывного стекла на двух различных объективах микроскопа). На основе полученных фотографий строили распределение частиц по размерам с помощью специализированного программного обеспечения «SIAMS». В результате автоматической обработки цифровых фотографий в специализированном программном обеспечении «SIAMS» получали ряд, состоящий из размера частиц эмульсий. На одной фотографии количество частиц могло превышать 1500.

Полученный ряд чисел сортировали в порядке увеличения и затем вычисляли среднее значение диаметра частиц в объеме эмульсии по формуле

$$\bar{D} = \sqrt[3]{\frac{\sum_{i=1}^n d_i^2}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{d_i}}} \quad (\text{п. 3.1})$$

где  $d_i$  – диаметр  $i$ -й частицы, вычисленный из программного обеспечения, исходя из ее площади.

Также вычисляли средний размер частиц на плоскости по формуле

$$\bar{d} = \frac{\sum_{i=1}^n d_i}{n}. \quad (\text{п. 3.2})$$

Полученные результаты приведены в табл. П.3.2.

Табл. П.3.2. Результаты микроскопических исследований

Серия образцов	Индекс образца	$\bar{d}$ , мкм	$\bar{D}$ , мкм
Серия 1.1-1.5	1.1	5,2	5,0
	1.2	8,3	7,7
	1.3	6,8	6,4
	1.4	8,0	7,2
	1.5	8,1	7,3

Серия 1.6-1.10	1.6	4,8	4,7
	1.7	5,5	5,2
	1.8	7,2	6,8
	1.9	8,0	7,4
	1.10	11,0	10,8
Серия 2.1-2.5	2.1	4,7	4,6
	2.2	6,4	6,1
	2.3	6,9	6,4
	2.4	7,9	7,3
	2.5	11,3	10,3
Серия 2.6-2.10	2.6	7,8	7,3
	2.7	7,6	7,3
	2.8	6,5	6,5
	2.9	6,6	6,2
	2.10	7,9	7,1

Регрессионный анализ различных моделей для прогнозирования среднего диаметра частиц эмульсии показал, что в данном случае значимыми факторами, влияющими на данную величину, является содержание эмульгатора.

Содержание аммиачной селитры, кальциевой селитры, воды не оказывает статически значимого влияния на средний размер частиц эмульсии в рассмотренном диапазоне их содержаний.

Для расчета среднего размера частиц построена регрессионная модель вида:

$$\bar{D} = 11,322 - 2,077 \cdot X_{\text{ПАВ}}, \text{ (мкм)} \quad (\text{п. 3.3})$$

где  $X_{\text{ПАВ}}$  – массовая доля эмульгатора («Украинит») в процентах.

### ***П.3.2. Исследование реологических свойств эмульсий***

Исследование реологических характеристик эмульсии заключалось в получении зависимостей изменения вязкости от скорости сдвига.

Эксперименты проведены с помощью реометра ротационного модели НААКЕ MARS фирмы «Thermo Electron» (Германия), который оборудован рабочим узлом цилиндр-цилиндр, жидкостным термостатом и воздушным безмасляным компрессором. Точность измерений по данным производителя составляет 2 % отн.

Порядок работы:

Включали компрессор для подачи сжатого воздуха. Проверяли показания на манометре компрессора: 3,5 – 4 атм. на выходе в систему, связанную с рабочим узлом реометра HAAKE MARS. Проверяли показания на манометре, непосредственно связанном с реометром: 2,5 атм.

Включали водяной термостат, устанавливали требуемую для опыта температуру (15-80 °С).

Включали компьютер и блок управления реометром.

Устанавливали программу: «снятие кривой течения в координатах вязкость (ось ординат) – скорость сдвига (ось абсцисс)».

Ввиду достаточно высокой вязкости эмульсий для получения надежных результатов использовали рабочий узел реометра «конус – плита».

Помещали 1 мл эмульсии на плиту. После установки в рабочее положение проводили термостатирование эмульсии, находящейся на плите, в течение 15 минут. Затем запускали выполнение измерений для получения реологической кривой.

Характерные реологические кривые при различных температурах приведены на рис. ПЗ.1, рис. ПЗ.2. Видно, что, достигая некоторого предельного значения  $\eta_{\min}$ , вязкость и напряжение сдвига мало меняются в зависимости от скорости сдвига.

Вязкость эмульсии уменьшается с ростом температуры и увеличивается с ростом ПАВ. Для прогнозирования вязкости системы  $\eta$  от химического состава эмульсионной смеси строили регрессионные зависимости:

$$\eta = b_0 + \sum_{i=1}^5 b_i X_i + b_j T_j, \quad (\text{п. 3.4})$$

где  $b_0$ ,  $b_i$ ,  $b_j$  – неопределенные коэффициенты модели,  $X_i$  – массовые доли компонентов в составе эмульсии,  $T_j$  – температура эмульсии.

Регрессионный анализ полученных моделей показал, что в данном случае значимыми факторами, влияющими на вязкость и напряжение сдвига, являются содержание эмульгатора и температура системы. Зависимость вязкости и напряжения сдвига от содержания эмульгатора и температуры могут быть заданы следующими моделями (при 20°C < T < 80°C):

$$\eta = 1,728 + 1,255 X_{\text{ПАВ}} - 0,026 T \quad (\text{Па}\cdot\text{с}) \quad (\text{п. 3.5})$$

где  $X_{\text{ПАВ}}$  – массовая доля эмульгатора в процентах,  $T$  – температура эмульсии, °С.

Содержание аммиачной селитры, кальциевой селитры, воды не оказывает статически значимого влияния на вязкость в рассмотренном диапазоне их содержаний.

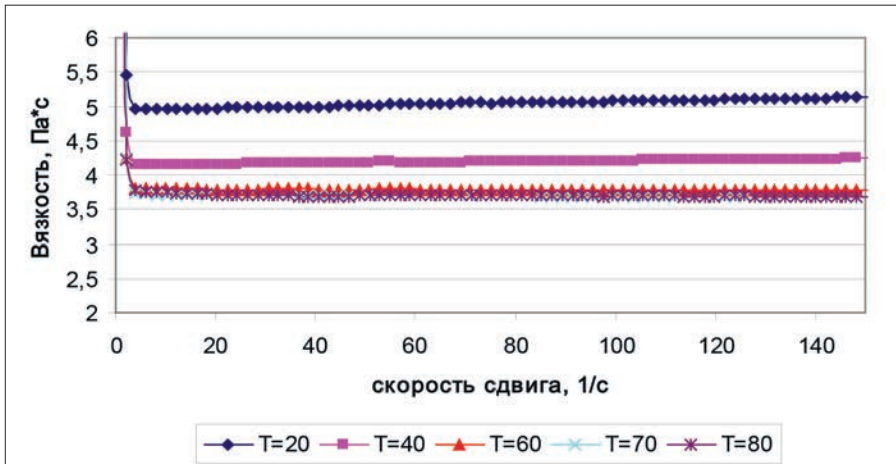


Рис. П.3.1 Зависимость вязкости от скорости сдвига при различных температурах образца (Образец 1.1).

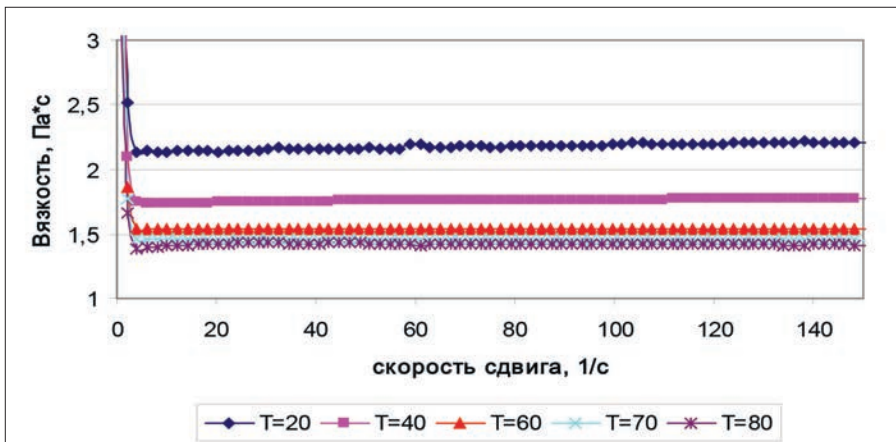


Рис. П.3.2 Зависимость вязкости от скорости сдвига при различных температурах образца (Образец 2.5).

Анализ рис. П.3.1 и рис. П.3.2 показывает, что с повышением температуры эмульсии происходит сближение графиков зависимости вязкости эмульсии от скорости сдвига друг к другу. Поэтому в иллюстрационных расчетах можно взять зависимость вязкости от размера частиц дисперсной фазы эмульсии при  $T=80^{\circ}\text{C}$ . На основании (п. 3.3) и (п. 3.5) определяем  $\eta = 6,5 - 0,6\Delta$  (Па\*с).

Научное издание

**Горинов С.А.**

**Инициирование и детонация  
эмульсионных взрывчатых веществ**

*Под ред. академика РАН Адушкина В.В.*

ISBN 978-5-91716-635-3



9 785917 166353

Издательство «СТРИНГ»

string\_25@mail.ru

Подписано в печать 20.06.2020, формат 60x90/16.

Гарнитура «Таймс». Печать цифровая.

Тираж 100 экз. Усл. печ. л. 14,0. Заказ № 849.

Отпечатано:

ООО «СТРИНГ»

424006, Йошкар-Ола, Строителей ул. д.95, к.101а

Тел: +7 (8352) 55-13-77