

Станислав Калякин

Безопасность взрывных работ в газоносных массивах угольных шахт

Взрывозащита горных выработок при взрывных работах в угольных шахтах



Palmarium
academic publishing

Станислав Калякин

**Безопасность взрывных работ в
газоносных массивах угольных
шахт**

**Взрывозащита горных выработок при
взрывных работах в угольных шахтах**

Palmarium Academic Publishing

Imprint (only for USA, GB)

Bibliographic information published by the Deutsche Nationalbibliothek: The Deutsche Nationalbibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliografie; detailed bibliographic data are available in the internet at <http://dnb.d-nb.de>.

Any brand names and product names mentioned in this book are subject to trademark, brand or patent protection and are trademarks or registered trademarks of their perspective holders. The use of brand names, product names, common names, trade names, product descriptions etc. even without a particular marking in this works is no way to be construed to mean that such names may be regarded as unrestricted in respect of trademark and brand protection legislation and could thus be used by anyone.

Cover image: www.ingimage.com

Publisher: Palmarium Academic Publishing is a trademark of:
LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. KG
Heinrich-Böcking-Str. 6-8, 66121 Saarbrücken, Germany
Phone +49 681 3720-310, Fax+49 681 3720-3109
Email:info@lap-publishing.com

Printed in the U.S.A.

Printed in the U.K. by (see last page)

ISBN: 978-3-9473-9111-1

Copyright © 2012 by the author and LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co.KG and licensors

All rights reserved. Saarbrücken 2012

Только для России и стран СНГ

Библиографическая информация, изданная Немецкой Национальной Библиотекой. Немецкая Национальная Библиотека включает данную публикацию в Немецкий Книжный Каталог; с подробными библиографическими данными можно ознакомиться в интернете по адресу <http://dnb.d-nb.de>.

Любые названия марок и брендов, упомянутые в этой книге, принадлежат торговой марке, бренду или запатентованы и являются брендами соответствующих правообладателей. Использование названий брендов, названий товаров, торговых марок, описаний товаров, общих имен, и т.д. даже без точного упоминания в этой работе не является основанием для того, что данные названия можно считать незарегистрированными под каким-либо брендом и не защищены законом о брендах и их можно использовать всем без ограничений.

Изображение на обложке предоставлено: www.ingimage.com

Издатель: Palmarium Academic Publishing is a trademark of:
LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. KG
Heinrich-Böcking-Str. 6-8, 66121 Saarbrücken, Germany
Телефон +49 681 3720-310, Факс+49 681 3720-3109
Email:info@lap-publishing.com

Напечатано в России

ISBN: 978-3-9473-9111-1

Авторское право ©2012 принадлежат автору и LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co.KG и лицензиарам.

Все права защищены. Saarbrücken 2012

СОДЕРЖАНИЕ

ПЕРЕЧЕНЬ УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ	7
ВВЕДЕНИЕ	9
РАЗДЕЛ 1. СОСТОЯНИЕ ТЕХНИКИ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ВЗРЫВНЫХ РАБОТ В УГОЛЬНЫХ ШАХТАХ, ОПАСНЫХ ПО ГАЗУ И ВЗРЫВАМ УГОЛЬНОЙ ПЫЛИ.....	17
1.1. Основные причины травматизма при взрывных работах в угольных шахтах.....	17
1.2. Анализ современной концепции безопасного производства взрывных работ в шахтах	18
1.3. Анализ причин воспламенения МВС при взрывных работах в угольных шахтах	26
1.4. Анализ развития предохранительных ВВ и безопасных способов их применения.....	34
1.5. Анализ агрессивных факторов взрыва ВВ, оказывающих влияние на безопасность производства взрывных работ.....	59
1.6. Анализ условий воспламенения горючих газов и взрывозащиты при взрывных работах.....	67
1.7. Постановка задач исследований и выбор направлений для их решения.....	72
РАЗДЕЛ 2. ИССЛЕДОВАНИЕ УСЛОВИЙ ПРИМЕНЕНИЯ ПВВ ПРИ ВЗРЫВНЫХ РАБОТАХ И ФАКТОРОВ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИХ АНТИГРИЗУТНОСТЬ ИХ ЗАРЯДОВ	76
2.1. Исследование параметров паспортов БВР, применяемых при взрывных работах в шахтах, опасных по газу и пыли	76
2.2. Исследование и выбор критериев антигризутности зарядов ВВ	95
2.3. Исследование безопасности взрывания в МВС равных по работе взрыва зарядов ПВВ	113
2.4. Исследование факторов, определяющих безопасные и эффективные	

параметры шпурового заряда ПВВ	120
2.5. Исследование взаимодействия продуктов взрыва ПВВ с внутренней забойкой шпуров	132
2.6. Исследование условий выгорания шпурового заряда ПВВ, ограниченного забойкой	145
2.7. Обоснование комплексного критерия антигрязности зарядов ПВВ при взрывных работах	162
РАЗДЕЛ 3. ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕЙСТВИЯ НА МВС РАЗЛИЧНЫХ ФАКТОРОВ ВЗРЫВА ЗАРЯДА ПВВ.....	169
3.1. Исследование воспламеняющего действия ударных волн на МВС	169
3.2. Исследование критических параметров ударных волн, вызывающих воспламенение МВС при детонации заряда ПВВ	176
3.3. Исследование влияния состава продуктов взрыва ПВВ на воспламенение МВС	185
3.4. Исследование горящих частиц ПВВ как источника воспламенения взрывоопасной среды	204
3.5. Исследование влияния инертных солей в составе ПВВ на его предохранительные свойства в МВС	215
3.6. Критические параметры воспламенения МВС при взрыве открытого заряда ПВВ	221
РАЗДЕЛ 4. ИССЛЕДОВАНИЕ ИНГИБИРУЮЩЕГО ДЕЙСТВИЯ НА МВС СОЛЕЙ, ВХОДЯЩИХ В СОСТАВ ПРЕДОХРАНИТЕЛЬНЫХ ВВ	232
4.1. Исследование принципов построения ПВВ и способов ввода в их состав солей-ингибиторов	232
4.2. Исследование ингибирующего действия солей на МВС при взрыве заряда ПВВ в канале мортиры	235
4.3. Исследование ингибирующего действия солей на МВС при взрыве открытых зарядов ПВВ	246
4.4. Исследование взаимодействия кристаллов соли-ингибитора с про-	

дуктами детонации ПВВ	261
4.5. Исследование электромагнитного излучения продуктов детонации ПВВ	266
4.6. Исследование физической сущности дезрекомбинационного эффекта у соли-ингибитора при детонации ПВВ	276
РАЗДЕЛ 5. РАЗВИТИЕ КОНЦЕПЦИИ БЕЗОПАСНОГО ПРОИЗВОДСТВА ВЗРЫВНЫХ РАБОТ ПРИ РАЗРУШЕНИИ ГАЗОНОСНЫХ ГОРНЫХ МАС- СИВОВ	287
5.1. Определение стратегии достижения безопасного производства взрывных работ при разрушении газоносного горного массива	287
5.2. Исследования путей модернизации ПВВ и их шпуровых зарядов ...	291
5.3. Выбор солей ингибиторов для ПВВ, обоснование конструкции шпу- рового заряда ПВВ и способа его взрывания	295
5.4. Исследование создания предохранительной среды взрывом заряда ПВВ	305
5.5. Обоснование параметров взрывозащиты при взрывных работах	320
5.6. Разработка концепции обеспечения безопасности взрывных работ в угольных шахтах	336
РАЗДЕЛ 6. МОДЕРНИЗАЦИЯ ПВВ И РАЗРАБОТКА БЕЗОПАСНЫХ СПО- СОБОВ ПРОИЗВОДСТВА ВЗРЫВНЫХ РАБОТ	341
6.1. Модернизация предохранительных ВВ IV класса	341
6.2. Модернизация предохранительных ВВ V класса	351
6.3. Модернизация предохранительных ВВ VI класса	358
6.4. Модернизация конструкции шпурового заряда ПВВ	368
6.5. Обоснование параметров шпурового заряда ПВВ при гидровзрыва- нии	374
РАЗДЕЛ 7. ПРОМЫШЛЕННЫЕ ИСПЫТАНИЯ МОДЕРНИЗИРОВАННЫХ СРЕДСТВ И СПОСОБОВ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОГО ПРОИЗВОД- СТВА ВЗРЫВНЫХ РАБОТ В УГОЛЬНЫХ ШАХТАХ	382

7.1. Промышленные испытания ПВВ IV класса	382
7.2. Промышленные испытания ПВВ V класса	384
7.3. Промышленные испытания ПВВ VI класса	386
7.4. Испытания способа обратного инициирования шпуровых зарядов при взрывных работах в угольных шахтах	389
7.5. Промышленные испытания шпуровых зарядов ПВВ V и VI классов с донной ингибиторной забойкой при сотрясательном взрывании	390
7.6. Лабораторно-полигонные испытания герметичных стыкующихся па- тронов ПВВ	392
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	396
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	400

ПЕРЕЧЕНЬ УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ И СОКРАЩЕНИЙ

- МакНИИ – государственный Макеевский научно-исследовательский институт по безопасности работ в горной промышленности
- ВостНИИ – Восточный научно-исследовательский институт по безопасности работ в горной промышленности
- ИГТМ НАН Украины – институт геотехнической механики национальной академии наук Украины
- ИПКОН РАН – институт проблем комплексного освоения недр Российской академии наук
- ИФГП НАН Украины – институт физики горных процессов национальной академии наук Украины
- НИИГП АИН Украины – научно-исследовательский институт физики горных процессов национальной академии наук Украины
- ГП «ДУЭК» – государственное предприятие «Донецкая угольная энергетическая компания»
- ДКЗХИ – Донецкий казенный завод химических изделий
- МХТИ – московский химико-технологический институт
- ИГД – институт горного дела
- НГУ – национальный горный университет
- ГОО – государственное открытое акционерное общество
- ГХК – государственная холдинговая компания
- ПО – производственное объединение
- АП – арендное предприятие
- ХКО – химическое казенное объединение
- ш/у – шахтоуправление
- ИТР – инженерно-технические работники
- НТД – нормативно-техническая документация
- «ЕПБ при ВР» – «Единые правила безопасности при взрывных работах»
- ТУ – технические условия

НИР – научно-исследовательская работа

БВР – буровзрывные работы

ВР – взрывные работы

ПВВ – предохранительные взрывчатые вещества

МВС – метано-воздушная смесь

ПВС – пылевоздушная смесь

ЭДКЗ-ПМ – электродетонаторы короткозамедленного действия

ДБУ – двухмятниковая баллистическая установка

ч/п – чистопородный забой

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы обусловлена тем, что добыча угля в шахтах Донбасса сопряжена с опасностью ведения горных работ, обусловленной большой глубиной разработки пластов, газоносностью горного массива и наличием выбросов угля, породы и газа. Средняя глубина разработки угольных пластов превышает 725 м, а тринадцать шахт Донбасса добывают уголь на глубине 1000...1400 м. С увеличением глубины разработки возрастают газоносность горного массива и его выбросоопасность. В настоящее время около 90% шахтопластов отнесены к газовым, 60% – к опасным по взрывам угольной пыли, 45% – к опасным по внезапным выбросам угля, породы и газа и 25% – к опасным по самовозгоранию угля. Согласно анализу МакНИИ, основными «травмирующими» факторами являются: транспорт и подъем (21%), взрывы газа и пыли (20%), внезапная смерть работников (15%), обвалы и обрушения (14%), падение людей в выработках (8%), поражение электротоком (6%), газодинамические явления (1%) и другие (15%). С 2001 по 2008 г. в шахтах произошли 14 взрывов газа и угольной пыли, 139 экзогенных и 46 эндогенных пожаров, 564 газодинамических явления (ГДЯ), 157 завалов и 7 затоплений действующих горных выработок. При этом погибли более 500 человек и намного больше были травмированы. Общий травматизм со смертельным исходом в угольных шахтах составил в среднем около 2,5 человека на 1 млн. т добычи угля. Наиболее высокий социальный резонанс в обществе вызывают групповые несчастные случаи в угольных шахтах при авариях, связанных со взрывами, пожарами и выбросами газа. Групповой травматизм со смертельным исходом при взрывах газа и пыли, ГДЯ и пожарах составляет 28,2 % общего числа погибших в угольных шахтах. Экономический ущерб от последствий взрыва может составлять десятки миллионов долларов, а в отдельных случаях взрывы и пожары приводят к полному разрушению выработок шахт и их закрытию. Анализ последних исследований показал, что взрывобезопасность производственных процессов на технологических выемочных и подготовительных участках угольных шахт не соответствует стандартам по технике безопасности. Взрывобезопасность в угольных шахтах, опасных по газу и взрывам угольной пыли, обеспечивается взрывопреупреждением, взрывозащитой и организационно-

техническими мероприятиями. Вместе с тем возникновение аварий на угольных шахтах, как правило, связано с нарушением комплекса мероприятий по обеспечению взрывобезопасности, в результате чего образуется взрывоопасная среда, возникает источник ее воспламенения, а система взрывозащиты не способна локализовать и ликвидировать взрыв. Во многом это связано с производственной деятельностью человека вследствие его ошибочных действий, происходящих при высоком ритме работы в сложных условиях на большой глубине шахт и ненадежностью средств взрывозащиты, отсутствием эффективного контроля за состоянием горного массива и газового состава воздуха в выработках.

Установлено, что при авариях с групповыми несчастными случаями удельный вес ошибочных действий людей, приводящих к катастрофам, составлял более 90 % по сравнению с другими факторами. Поэтому человеческий фактор играет ключевую роль в системе обеспечения безопасности работ в угольных шахтах. Принятая сегодня идеология безопасности труда в угольных шахтах, опасных по газу и пыли, базируется на администрировании и ужесточении мер воздействия на работающих, вместо того чтобы создавать технологии, позволяющие предотвращать ошибочные действия людей и возникновение аварийных ситуаций.

В шахтах при разрушении газоносных горных массивов широко применяются взрывные работы и сотрясательное взрывание. С их помощью добывают около 10% угля и проводят 60% подготовительных горных выработок. Проблеме обеспечения безопасности взрывных работ в угольных шахтах и развития предохранительных ВВ посвящены работы многих ученых и целых коллективов научно-исследовательских институтов. Наибольший вклад в ее решение в бывшем СССР и России внесли В.Е. Александров, К.К. Андреев, В.В. Азатян, А.А. Борисов, Г.А. Басс, В.В. Воеводский, А.И. Гольбиндер, А.П. Глазкова, Ф.М. Гельфанд, Л.В. Дубнов, Я.Б. Зельдович, С.М. Когарко, Б.Н. Кукиб, П.И. Кушнеров, Э.О. Миндели, А.И. Розловский, Н.Н. Семенов, А.С. Соколик, О.М. Тодес, Д.А. Франк-Каменецкий, Л.Н. Хитрин, К.И. Щелкин, в Украине – Б.И. Вайнштейн, Ф.М. Галаджий, В.И. Зенин, Ю.В. Кудинов, М.Е. Краснянский, Ю.В. Манжос, М.К. Песоцкий, Н.Л. Росинский, В.М. Расторгуев, А.И. Селезнев, В.И. Стикачев, Н.Р. Шевцов.

Благодаря усилиям этих ученых были развиты теории детонации и горения горючих газов, исследованы условия детонации шпуровых зарядов ВВ при короткозамедленном взрывании и условия воспламенения МВС детонирующими и выгорающими зарядами ПВВ. Это позволило обосновать принципы построения предохранительных ВВ, разработать безопасные способы их применения в угольных шахтах. Для ведения взрывных работ в угольных шахтах, опасных по газу и взрывам угольной пыли разрешено применение предохранительных взрывчатых веществ (ПВВ) III...VII классов. Однако при их применении происходят взрывы метана. За последние 20 лет наиболее взрывоопасными являются технологические участки шахт, включающие очистные забои, подготовительные выработки и т. д. На таких участках произошло 72% взрывов и 80% вспышек метана. При взрывных работах в шпурах часто происходят неконтролируемые обнажения зарядов и выгорания ПВВ. Основными источниками воспламенения МВС являются детонирующие (54%) и выгорающие (46%) заряды ПВВ. 20% воспламенений МВС произошло на выемочных участках, 50% – в тупиковых подготовительных выработках в газоносном горном массиве. Это связано с тем, что шпуровые заряды ПВВ могут выгорать, а в случае их обнажения по боковой поверхности – контактировать с взрывоопасной газовой средой. Неконтролируемое обнажение шпуровых зарядов происходит при взрыве смежных шпуров или в результате пересечения шпуров трещинами природного характера или образовавшимися в забое выработки. Исследования показали, что в забоях выработок образуются трещины, пересекающие шпуры до начала взрывных работ. Особенно часто они возникают при подрывке боковых пород и в нарушенных клеважом угольных пластах. Ширина трещин – от 0,5 до 30 мм, их длина до открытой поверхности забоя – от 0,2 до 1,8 м. Они заполнены МВС, концентрация метана в смеси – 2,5 % и выше. Таким образом, шпуровые заряды ПВВ контактируют боковой поверхностью заряда с взрывоопасной средой, находящейся в трещинах. При взрывании ПВВ IV класса (ПЖВ-20) МВС воспламеняется в трещине шириной около 2,5 мм, при взрывании ПВВ V класса (угленит Э-6) – шириной более 14 мм. При этом пламя горения МВС распространяется по трещине на расстояние 1,4...2,5 м, в зависимости от её ширины. Следовательно, при короткозамедленном взрывании

шпуровых зарядов ПВВ МВС может воспламеняться в трещинах массива, а пламя может распространяться по трещинам на большие расстояния в выработанное пространство и забой выработки.

Пространственно-временные характеристики распространения пламени горения МВС в трещинах не известны. Поэтому выход горящего потока МВС из трещины в выработанное пространство или забой выработки не предсказуем. В настоящее время для борьбы с подобным явлением при производстве взрывных работ предложено создавать в забое выработки предохранительную среду, которая создает взрывозащиту в случае выхода пламени в полость выработки. Предохранительная среда в выработке создается до начала взрывных работ за 15...25 мс до взрыва шпурового заряда и формируется на участке 2...4 м перед забоем. Кроме того взрывание зарядов ПВВ приводит к выделению большого количества метана. На больших глубинах дополнительно выделяются и другие горючие газы (водород, ацетилен, оксид углерода), которые переводят МВС в более взрывоопасное состояние. Это значит, что при взрывных работах необходима надежная взрывозащита, которая определяется уровнем предохранительности ВВ, профессионализмом и уровнем качества выполнения взрывных работ («человеческий фактор»). Однако при их ведении очень часто имеют место технические нарушения при производстве забойки шпуров, установке водораспылительных завес и расположении средств предотвращения взрывов МВС в выработке. Предохранительные ВВ имеют специфические особенности, отличающие их от обычных промышленных ВВ, такие как пониженная способность воспламенять взрывоопасную среду и устойчивость зарядов против выгорания. Эти свойства ВВ достигаются за счет ввода в их состав соответствующих ингибиторов. Таким образом, получается, что при взрыве ПВВ в МВС ингибитор распыляется взрывом и оказывает взрывоподавляющее действие на МВС. Поэтому при взрывных работах должны быть такие условия, при которых взрывозащита в выработке создается автоматически самими ПВВ. Развитие новой концепции безопасности взрывных работ и применения ПВВ в угольных шахтах требует выбора для ПВВ эффективных ингибиторов и разработки научно обоснованного способа взрывозащиты в забое их зарядами.

Следовательно, проблема обеспечения безопасности взрывных работ в газоносных горных массивах глубоких угольных шахт является весьма актуальной. Решение ее направлено на предотвращение взрывов горючих газов и катастроф, то есть на повышение безопасности труда в угольных шахтах.

Целью работы является развитие идеологии и научных основ безопасного производства взрывных работ в газоносных горных массивах глубоких угольных шахт, заключающихся в модернизации зарядов, повышении предохранительных свойств ВВ, предотвращении их выгорания в шпурах и создании взрывозащиты ингибиторами МВС в забоях горных выработок.

Идея работы – применение высоко предохранительных ВВ при взрыве шпуровых зарядов, образующих двухфазный газодинамический ингибиторный поток в газовой взрывоопасной среде и подавления им воспламенения горючих газов ингибиторами, доставляемыми газообразными продуктами взрыва ВВ во взрывоопасную среду.

В монографии приведены новые научные результаты:

впервые экспериментально установлены закономерности изменения воспламеняющей способности одинаковых по работе взрыва шпуровых зарядов ПВВ в зависимости от уровня предохранительных свойств ВВ и массы зарядов;

впервые установлена вероятность воспламенения взрывоопасной среды на границе раздела «массив – полость», зависящая от критических параметров ударных волн и дальности полета горящих частиц ВВ. При этом критическое давление во фронте ударной волны зависит от кислородного коэффициента и состава продуктов взрыва ВВ, а дальность полета горящих частиц – от их размера и скорости горения ВВ;

впервые экспериментально установлен механизм влияния соли-ингибитора, содержащейся в ВВ, на воспламеняющую способность заряда. При этом выявлена особенность разлета частиц соли-ингибитора: дальность их полета больше радиуса расширения газообразных продуктов взрыва ВВ;

впервые экспериментально установлено явление дезрекомбинационного эффекта у ингибитора – отсутствие рекомбинации радикалов на поверхности его кристаллов при детонации заряда ПВВ. Этот эффект обусловлен возникновением напряжения сдвига в кристаллах и образованием в них волн Релея или Лява и откольных явлений. Напряжение сдвига и откольные явления вызывают колебания кристаллической решетки в течение 0,3...1,4 мс, то есть времени потери солью рекомбинационной способности;

впервые для предельных зарядов ПВВ определены концентрация солей-ингибиторов в продуктах взрыва, период времени создания ими предохранительной среды и объем этой среды, обеспечивающие предотвращение взрыва горючих газов при короткозамедленном взрывании шпуровых зарядов.

Научное значение работы заключается в развитии идеологии и научных основ безопасного производства взрывных работ в газоносных горных массивах угольных шахт. Установлены закономерности изменения воспламеняющей способности шпуровых зарядов ПВВ с равной работой взрыва, выявлены новые факторы, определяющие вероятность воспламенения взрывоопасной среды на границе раздела массива и полости выработки. Экспериментально установлены механизм влияния соли-ингибитора, содержащейся в ПВВ, на воспламеняющую способность заряда в МВС и явление дезрекомбинационного эффекта у соли-ингибитора, заключающееся в отсутствии рекомбинации радикалов на поверхности кристаллов соли при детонации ВВ.

Практическое значение полученных в монографии результатов состоит в:

- разработке монозарядов и конструкции шпурового заряда из предохранительных ВВ IV, V и VI классов, устойчивых к выгоранию;
- модернизации ПВВ IV, V и VI классов на основании выявленных свойств солей-ингибиторов и их совокупного влияния на предохранительные свойства ВВ и в разработке на эти ПВВ технических условий;

- обосновании параметров способа создания предохранительной среды при взрывных работах с помощью зарядов устойчивых к выгоранию ПВВ, содержащих соли-ингибиторы реакции окисления метана, доставляемые продуктами взрыва ВВ во взрывоопасную среду;
- разработке взрывозащиты в забое выработки путем создания при взрыве шпуровых зарядов ПВВ двухфазной ингибиторной системы с концентрацией соли-ингибитора, обеспечивающей взрывоподавляющее действие на взрывоопасную среду, образующуюся при разрушении массива;
- разработке безопасных параметров гидро- и сотрясательного взрывания и способа обратного инициирования шпурового заряда для ПВВ V и VI классов;
- развитии концепции безопасного производства взрывных работ в угольных шахтах при разрушении газоносных горных массивов.

Автор надеется, что данная монография послужит полезным и ценным пособием для работников угольных шахт, которые применяют взрывные работы и сотрясательное взрывание на выбросоопасных угольных пластах. Несомненно, в настоящее время предохранительные ВВ достигли такого технического уровня, что их применение возможно и в других отраслях промышленности, где существует опасность взрывов горючих газов или возникновения пожаров. Наночастицы солей ингибиторов, образованные в процессе взрывов предохранительных ВВ, позволяют эффективно бороться со взрывами и пожарами на нефтяных и газовых скважинах морских месторождений или в районах крайнего Севера. Особый интерес вызывает применение высокопредохранительных ВВ для тушения лесных пожаров и локализации пожаров в местах, где нет необходимого объема воды.

Автор искренне признателен д.т.н., проф. Н. Р. Шевцову за постоянное внимание к работе, выражает благодарность д.т.н., проф. М. П. Зборщику за оказанную научно-методическую помощь на стадии завершения работы, сотрудникам МакНИИ за оказанную помощь при проведении экспериментальных исследований и промышленных испытаний, а также сотрудникам кафедры «Строительство шахт и под-

земных сооружений» Донецкого национального технического университета за благожелательное отношение в период выполнения работы. Особую благодарность автор выражает своей жене Грицюк Ирине Сергеевне за ее трудоспособность и настойчивость, с которыми она тщательно отредактировала рукопись данной работы.

РАЗДЕЛ 1

СОСТОЯНИЕ ТЕХНИКИ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ВЗРЫВНЫХ РАБОТ В УГОЛЬНЫХ ШАХТАХ, ОПАСНЫХ ПО ГАЗУ И ВЗРЫВАМ УГОЛЬНОЙ ПЫЛИ

1.1. Основные причины травматизма при взрывных работах в угольных шахтах

Современный уровень технологии подземной добычи угля связан с повышенной опасностью проведения горных работ в связи с большой глубиной разработки угольных пластов, их газоносностью и выбросоопасностью. Средняя глубина разработки пластов превышает 720 м, а тринадцать шахт Донбасса добывают уголь на глубине 1000...1400 м. Примерно 90% шахт в Украине являются газовыми, а 60% опасными по взрывам угольной пыли. По данным Госнадзорохрантруда Украины в 2004 – 2009г.г. на угольных шахтах уровень производственного травматизма со смертельным исходом составил на 1млн. т добычи угля – 2... 2,3 чел./млн. т [1], что более, чем на порядок превышает величину аналогичного показателя в передовых угледобывающих странах мира (США, Германия, Австралия, ЮАР) и более чем в три раза – в России (0,75 чел./млн. т) [2]. Анализ причин травматизма на шахтах, выполненный МакНИИ [3] показал, что за последние 5 лет основными травмирующими факторами являются: транспорт и подъем (21%), взрывы газа и пыли (20%), внезапная смерть работников (15%), обвалы и обрушения (14%), падение людей в выработках (8%), поражение электротоком (6%), газодинамические явления (1%). В связи с этим постановлением Кабинета Министров Украины от 01.02.2004 г. №186 поставлена задача профильным организациям по разработке основных направлений и мер безопасности, обеспечивающих повышение охраны труда, предотвращение аварий и травматизма на угольных шахтах Украины.

В настоящее время одним из главных направлений в повышении охраны труда является создание способов и средств безопасности ведения взрывных работ в угольных шахтах [4]. Это связано с тем, что взрывные работы в горных выработках

создают как опасные, так и вредные производственные факторы. По своему действию на людей они подразделяются на два вида: физические – повышение запыленности и загазованности воздуха в горных выработках, разрушение и повреждение крепи, резкое повышение давления в результате действия ударных волн, взрывы МВС и ПВС, и химические – токсическое действие на людей самих ВВ и образованных в продуктах взрыва ядовитых газов. Кроме того, взрывные работы представляют собой технологический процесс, связанный с разрушением газоносных горных пород в угольных шахтах, при котором возможно образование взрывоопасной среды в забоях горных выработок. В угольных шахтах, опасных по газу и угольной пыли взрывы взрывоопасной среды в горных выработках происходят достаточно часто.

Анализ причин взрывов и аварий, выполненный в МакНИИ [5] показал, что за последние 20 лет наиболее взрывоопасными технологическими участками шахт, на которые приходится более 72% взрывов и 80% вспышек газа метана, являются выемочные участки и тупиковые подготовительные выработки. Установлено, что на выемочных участках более чем в 20 % случаев от их общего числа источником воспламенения метана являлись заряды предохранительных ВВ, а в тупиковых подготовительных выработках – примерно в половине. Учитывая, что взрывные работы достаточно широко используются в угольной промышленности для разрушения горных пород и добычи угля (с их помощью добывается около 10% угля и проводится 60% подготовительных горных выработок), необходимо повышать их безопасность и предотвращать аварии в шахтах.

1.2. Анализ современной концепции безопасного производства взрывных работ в шахтах

Взрывные работы в угольных шахтах являются самым эффективным способом разрушения горных пород, в котором с эффективностью удачно сочетаются простота, технологичность, малые затраты, низкий расход энергии на разрушение единицы объема горного массива. Главной особенностью проведения взрывных работ в условиях угольных шахт является то, что рудничная атмосфера горных выработок может

быть взрывоопасной. Взрывоопасность атмосферы в горной выработке обусловлена тем, что она содержит горючие газы или угольную пыль, которые легко вступают в реакцию окисления с кислородом воздуха. Протекание реакций окисления горючих газов или угольной пыли с воздухом является взрывным детонационным процессом. Главной составляющей частью горючих газов, выделяющихся в атмосферу горных выработок, является метан. Он находится в призабойном пространстве выработки в свободном виде, заполняет поры и трещины в угольном пласте и боковых породах, кроме того, большая его часть находится в угле в адсорбированном состоянии. При разрушении угля метан выделяется из открытой поверхности угольных пластов и боковых пород. Различают три вида выделения газа из угольного массива. Постоянное – относительно равномерное выделение из невидимых на глаз пор и трещин в угле и боковых породах; суфлярное – выделение из трещин и пустот в угольном массиве в течение определенного ограниченного отрезка времени; внезапное – неуправляемая дегазация угольного пласта, сопровождающаяся выбросом большого объема газа, угля и породы.

При взрывном разрушении угля интенсивность газовыделения из отбитого угля очень велика вследствие скоротечности взрыва. За короткий период времени разрушается и отделяется от массива пласта несколько десятков тонн угля, который начинает быстро дегазироваться. За счет образованной практически мгновенно большой открытой поверхности отбитого взрывом угля в первый момент времени газовыделение превышает приток в выработку воздуха, который обеспечивается вентиляцией. Поэтому концентрация метана в призабойной зоне выработки, где происходит смешение, растет и достигает такого значения, при котором МВС может взрываться. Таким образом, каждый цикл при взрывном разрушении угольного массива потенциально связан с вероятностью образования в выработке взрывоопасных концентраций МВС. Необходимо также отметить, что взрывоопасная МВС может быть в забое выработки и до момента проведения взрывных работ в результате нарушения ее вентиляции и образования в ее куполах слоевых и местных скоплений метана, обусловленных наличием трещин в горных породах и законтурном пространстве выработки. Все это требует выполнения ряда мероприятий по взрывопре-

дупреждению и взрывозащите при проведении взрывных работ в подземных выработках угольных шахт, опасных по газу и взрывам угольной пыли. Эти требования сформулированы в «Единых правилах безопасности при взрывных работах» [6] в виде современной концепции безопасности проведения взрывных работ в угольных шахтах. Она сводится к следующему: безопасность взрывных работ в шахтах, опасных по газу или разрабатывающих пласты, опасные по взрывам пыли, должна обеспечиваться путем соблюдения пылегазового режима, применения предохранительных ВВ, внутренней забойки, безопасных средств взрывания и отключения электроэнергии в опасной зоне. Кроме того, для предупреждения травматизма при сотрясательном взрывании и в других случаях необходимо соблюдение специального режима, предусматривающего вывод людей в безопасное место. Учитывая возможность воспламенения взрывоопасной среды в горных выработках при взрывных работах, для предотвращения и локализации ее взрыва применяют различные способы взрывозащиты, в основе которых лежит принцип создания в выработке предохранительной среды: водораспылительные и форсуночные завесы, воздушно-механическая пена, распыление порошкообразных ингибиторов окисления метана и пламегасящих солей [7]. Действующая концепция обеспечения безопасности при взрывных работах в системе безопасности труда «человек – техника – среда» показана на рис.1. Смысл ее осуществления – отделить источники воспламенения от взрывоопасной среды. Это достигается проводимыми человеком в выработке мероприятиями и применением средств взрывозащиты.

Для оценки опасности взрывных работ в угольных шахтах и правильности выбранной концепции обеспечения их взрывобезопасности были рассмотрены причины и обстоятельства аварий, которые приведены в табл. 1.1. Рассмотрение причин аварий, а также взрывов и вспышек взрывоопасной среды в горных выработках угольных шахт СССР и Украины за последние 20 лет позволило дать оценку опасности применения ПВВ при взрывных работах. Большинство вспышек и взрывов МВС и ПВС, как показал анализ, произошло в подготовительных выработках, проводимых по углю или с подрывкой боковых пород. При этом призабойное пространство ряда выработок уже было загазировано еще до начала взрывных работ или

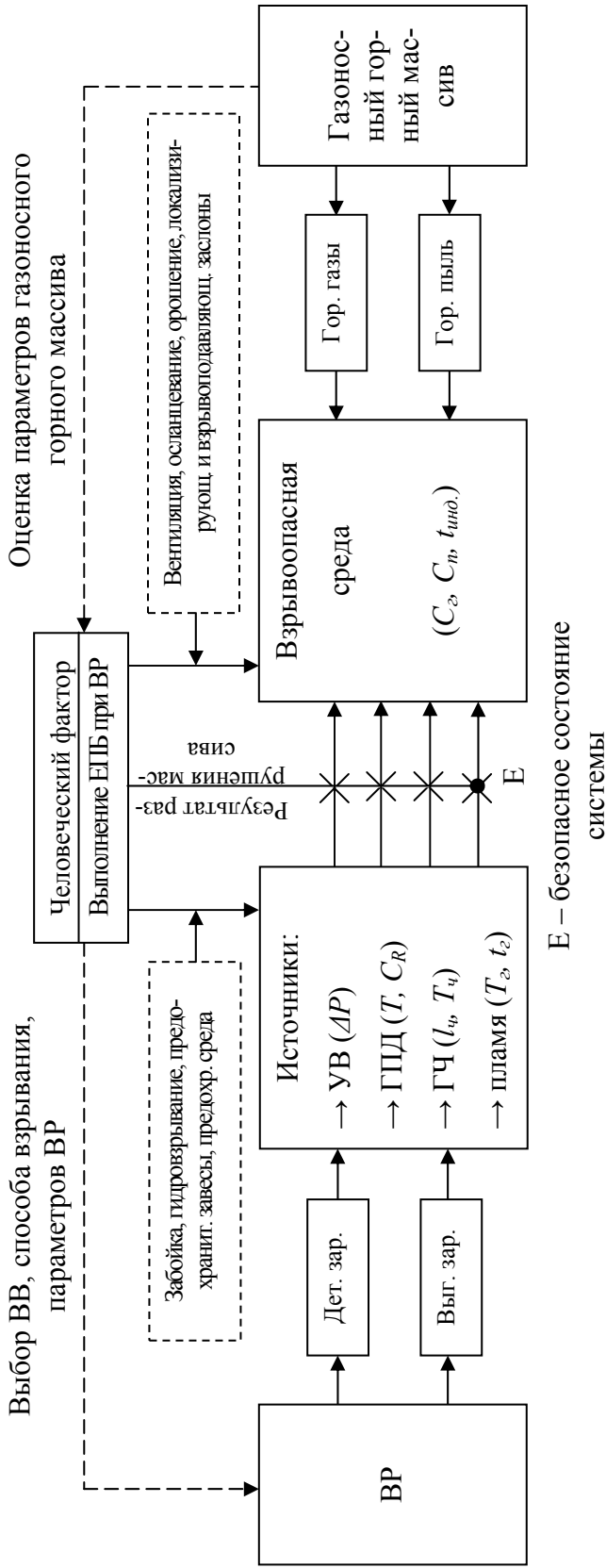


Рис. 1.1. Действующая концепция обеспечения безопасности взрывных работ в системе безопасности труда «человек – техника – среда»

УВ – ударная волна; ΔP – давление во фронте УВ; ГПД – газообразные продукты детонации; T – температура; C_R – концентрация радикалов; ГЧ – горящие частицы; T_u – температура горения частицы; l_{ch} – дальность полета частицы; t_2 – время горения; T_s – температура пламени горящего ВВ; C_s, C_n – концентрационные пределы взрываемости для горючего газа и угольной пыли соответственно; t_{ind} – время индукции самовоспламенения взрывоопасной среды.

Таблица 1.1

Анализ причин и обстоятельств аварий, происшедших при взрывных работах на угольных шахтах СССР и Украины за 1985 – 2005 гг.

№	Место аварии	Год	Характер аварии	Источник воспламенения взрывоопасной среды	Тип ПВВ	Класс ПВВ	Обстоятельства аварии
1	2	3	4	5	6	7	8
1	Шахта им. Димитрова ПО «Красноармейскуголь»	1985	Взрыв МВС с участием угольной пыли	Выгорающий заряд	Аммонит Т-19	IV	Выгорание шпурового заряда ПВВ, вследствие нарушения детонации и высокой поджигаемости ВВ
2	Шахта №1 ш/у «Новогородское» ПО «Селидовуголь»	1985	Воспламенение и взрыв с участием угольной пыли	Выгорающий заряд	Аммонит Т-19	IV	—//—
3	Шахта «Куйбышева» ПО «Донецкуголь»	1985	Воспламенение и взрыв слоевого скопления	Детонирующий заряд	Угленит Э-6	V	Воспламенение метана в трещинах при взрывании в два приема. Низкие предохранительные свойства.
4	Шахта «Углерогская» ПО «Ордженикидзеуголь»	1988	Воспламенение метана в куполах при его слоевом скоплении	Детонирующий заряд	Аммонит Т-19	IV	Взрывание шпуров без забойки, низкие предохранительные свойства
5	Шахта «Горская» ПО «Первомайскуголь»	1989	Вспышка метана в нише лавы	Выгорающий заряд	Угленит П12ЦБ-2	VI	Переуплотнение ВВ и его высокая поджигаемость
6	Шахта им. Лютикова ПО «Краснодонуголь»	1989	Взрыв МВС	Выгорающий заряд	Аммонит Т-19	IV	Переуплотнение ВВ и его высокая поджигаемость
7	Шахта им. Поченкова ПО «Максееуголь»	1990	Взрыв МВС в выработанном пространстве	Детонирующий заряд воспламенил МВС в трещинах и вызвал пожар, приведший к взрыву	Аммонит Т-19	IV	Применение ПВВ IV класса с низкими предохранительными свойствами вместо ПВВ VI класса
8	Шахта им. Ленина ПО «Грузуголь»	1990	Взрыв МВС	Выгорающий заряд	Угленит 12ЦБ	VI	Сближение шпуровых зарядов, переуплотнение ВВ, высокая поджигаемость ПВВ
9	Шахта «Воркутинская» ПО «Воркутауголь»	1990	Взрыв МВС	Выгорающий заряд	Угленит П12ЦБ-2	VI	Нарушение детонации шпурового заряда и выгорание вследствие высокой поджигаемости ВВ
10	Шахта им. Ленина ПО «Грузуголь»	1990	Взрыв МВС	Детонирующий заряд	Угленит 12ЦБ	VI	Уничтожение открытого заряда ВВ в выработанном пространстве
11	Шахта «Карагайлинская» ПО «Киселевуголь»	1991	Взрыв МВС	Выгорающий заряд	Угленит П12ЦБ-2	VI	Нарушение детонации шпурового заряда, высокая поджигаемость ПВВ
12	Шахта им. Меньшинского ПО «Первомайскуголь»	1992	Взрыв МВС	Детонирующий заряд	Угленит Э-6	V	Уничтожение электродетонаторов и открытых зарядов углянита

Продолжение табл. 1.1

1	2	3	4	5	6	7	8
13	Шахта им. Скочинского ПО «Донецкуголь»	1993	Взрыв МВС	Детонирующий заряд	Аммонит Т-19	IV	Воспламенение в трещинах, низкие предохранительные свойства ВВ
14	Шахта «Глубокая» ПО «Донецкуголь»	1993	Пожар и взрыв МВС	Выгорающий заряд	Аммонит Т-19	IV	Нарушение детонации шпурового заряда, высокая поджигаемость ПВВ
15	Шахта им. Кирова ПО «Стахановуголь»	1994	Вспышка МВС	Детонирующий заряд	Детонит ТМ	II	Применение предохранительных ВВ
16	Шахта «Славяно-Сербская» ПО «Луганскуголь»	1994	Взрыв МВС с участием угольной пыли	Детонирующий заряд	Аммонит Т-19	IV	Взрывание открытых зарядов (перебивание стоек)
17	Шахта «Перевальская» ПО «Луганск уголь»	1995	Взрыв МВС	Выгорающий заряд	Аммонит Т-19	IV	Неполная детонация шпурового заряда и выгорание ВВ
18	Шахта «Суходольская-Восточная» ПО «Краснодонуголь»	1995	Взрыв МВС	Выгорающий заряд	Аммонит Т-19	IV	— // —
19	Шахта им. Косиора По «Луганск уголь»	1996	Взрыв МВС	Выгорающий заряд	Аммонит Т-19	IV	— // —
20	Шахта им. XVII Партсъезда «Шахтерскуголь»	1997	Взрыв МВС	Детонирующий заряд	Аммонит Т-19	IV	Воспламенение МВС в трещинах
21	Шахта им. петровского ПО «Донецкуголь»	1998	Взрыв МВС	Детонирующий заряд	Аммонит Т-19	IV	Взрывание открытого накладного заряда
22	Шахта «Ждановская» ПО «Шахтереуголь»	1998	Вспышка МВС	Выгорающий заряд	Аммонит Т-19	IV	Выгорание шпурового заряда
23	Шахта им. Кирова ПО «Луганскуголь»	1999	Взрыв МВС	Детонирующий заряд	Аммонит Т-19	IV	Воспламенение МВС в трещинах массива
24	Шахта «Комсомолец Донбасса» ПО Шахтерскантрацит»	2000	Взрыв МВС	Детонирующий заряд	Аммонит Т-19	IV	Взрывание открытого заряда
25	Шахта им. Скочинского ПО «Донецкуголь»	2001	Вспышка МВС и пожар	Выгорающий заряд	Аммонит Т-19	IV	Нарушение детонации и выгорание ВВ
26	Шахта им. Засядько	2002	Взрыв МВС	Детонирующий заряд	Аммонит Т-19	IV	Воспламенение МВС в трещинах (взрыв открытого заряда)
27	Шахта «Галовская» По «Краснодонуголь»	2003	Вспышка МВС	Детонирующий заряд	Угленит 13П	V	Уничтожение ВМ открытым зарядом
28	Шахта им. Кирова ПО «Максееуголь»	2005	Вспышка МВС	Детонирующий заряд	Угленит 13П	V	Воспламенение МВС в трещинах массива

МВС находилась в «куполах», трещинах массива и в виде слоевых скоплений метана. Основными источниками воспламенения взрывоопасной среды являлись детонирующие заряды (15 случаев – 54 %) и выгорающие заряды (13 случаев – 46 %). Было установлено, что взрывов пылевоздушной смеси без участия метана при взрывных работах не было. Воспламенение МВС происходило, как правило, при взрывных работах по нарушенному массиву, при взрывании открытых (накладных) зарядов ВВ в выработанном пространстве и в забоях с двумя открытыми поверхностями. Воспламенение метана от выгорающих зарядов ПВВ чаще имело место при взрывании по углю в забоях выработок с одной поверхностью обнажения.

Подавляющее число аварий, связанных с воспламенением МВС, произошло при применении ПВВ: IV класса – 67,9% (9 воспламенений выгорающим зарядом и 10 детонирующим), V класса – 14,3% (4 воспламенения детонирующим зарядом), VI класса – 17,8% (4 воспламенения выгорающим зарядом, 1 – открытым детонирующим зарядом при уничтожении ВВ в выработанном пространстве). Большое число воспламенений взрывоопасной среды от ПВВ происходит по двум причинам. Первая – ПВВ IV класса имеют не достаточно высокую устойчивость шпуровых зарядов против выгорания и низкий уровень предохранительных свойств по газу метану, то есть неприемлемую антигризутность. Вторая – необоснованное расширение области применения ПВВ IV класса в разрез §223 «ЕПБ при ВР» при переходе на режим сотрясательного взрывания, ошибочно считая, что он становится более безопасным в результате выполнения дополнительных мероприятий по охране труда шахтеров и создания взрывозащиты в горных выработках. Неблагоприятная обстановка сложилась также и при сотрясательном взрывании на пластах, опасных и угрожаемых по внезапным выбросам угля, породы, газа. На указанных пластах действующими нормативными документами предусмотрено применение при сотрясательном взрывании ВВ II – IV классов [8]. Применение этих мало предохранительных с низкой антигризутностью зарядов ВВ значительно повышает риск и вероятность воспламенения метана и, следовательно, аварийность при сотрясательном взрывании. Сведения об авариях при сотрясательном взрывании приведены в табл. 1.2.

Таблица 1.2

Сведения об авариях, происшедших при сотрясательном взрывании с использованием ПВВ IV класса

Год	Шахта, на которой произошла авария	Причина аварии	Источник воспламенения МВС
1993	Шахта им. Скочинского ПО «Донецкуголь»	Воспламенение метана, пожар	Выгорающий заряд
1993	Шахта «Глубокая» ПО «Донецкуголь»	Взрыв МВС	Выгорающий заряд
1995	Шахта «Перевальская» ПО «Луганскуголь»	Воспламенение метана, вспышка МВС	Выгорающий заряд
1995	Шахта «Суходольская» ПО «Краснодонуголь»	Воспламенение метана, пожар	Выгорающий заряд
1996	Шахта им. Косиора ПО «Луганскуголь»	Вспышка МВС	Выгорающий заряд
1997	Шахта им. XVII партсъезда ПО «Шахтерскуголь»	Взрыв МВС	Детонирующий заряд
1998	Шахта «Ждановская» ПО «Шахтерскуголь»	Вспышка МВС	Выгорающий заряд
2000	Шахта «Комсомолец Донбасса»	Взрыв МВС	Детонирующий заряд
2002	Шахта им. А.Ф. Засядько	Вспышка МВС, пожар	Выгорающий заряд

Данные, приведенные в табл. 1.2 показывают, что за период с 1993 по 2002 гг. на угольных шахтах Украины при сотрясательном взрывании произошло 9 аварий при применении ПВВ IV класса, 7 из которых – от выгорающих зарядов.

В результате системного анализа состояния техники безопасности при взрывных работах в опасных условиях установлено, что существующая концепция обеспечения безопасности взрывных работ не надежная. При ее реализации не может

быть достигнуто взрывопреупреждение и взрывозащита в горных выработках при проведении взрывных работ. Это привело в период с 1985 по 2005 г.г. к гибели 78 шахтеров и тяжелому травматизму 32 человек. Основными причинами неудовлетворительного состояния техники безопасности при взрывных работах являются:

- низкая устойчивость против выгорания шпуровых зарядов ПВВ IV – VI классов и недостаточный уровень их предохранительных свойств по газу (антигризутность), в результате чего не удастся обеспечить предупреждение взрыва МВС;

- низкая эффективность взрывозащиты при взрывных работах в горных выработках, которая зависит от профессионализма и уровня исполнительского мастерства человека («человеческий фактор») при забойке шпуров, установке водораспылительных завес и средств создания предохранительной среды.

1.3. Анализ причин воспламенения МВС при взрывных работах в угольных шахтах

Условия воспламенения взрывоопасной среды зарядами ПВВ при взрывных работах прямо или косвенно связаны с проявлением «опасной ситуации». Опасная ситуация в забое горной выработки характеризуется наличием в призабойной части выработки взрывоопасной среды и источника, способного вызывать ее воспламенение. Воспламенение взрывоопасной среды в результате действия на нее поджигающих факторов взрыва зарядов ПВВ, приводит к аварийной ситуации, развитие которой может привести к тяжелому и смертельному травматизму людей.

Аварийные ситуации возникают при выгорании шпуровых зарядов и в результате взаимодействия продуктов взрыва детонирующих зарядов ПВВ с взрывоопасной средой. К выгоранию шпуровых зарядов могут привести следующие опасные ситуации [9]:

- образование разрывов между патронами ВВ в шпуровом заряде вследствие неправильного их заряжания или раздвижки патронов при групповом замедленном взрывании;

- попадание буровой мелочи в промежутки между патронами ВВ шпурового заряда;
- переуплотнение ВВ в шпуровом заряде при групповом взрывании;
- наличие зазора между боковой поверхностью заряда ВВ и стенками шпура;
- увлажнение ВВ в заряде под действием воды, находящейся в шпуре;
- слеживание ВВ, снижение его детонационной способности;
- высокая поджигаемость ВВ и способность заряда устойчиво гореть в зарядной камере шпура;
- низкая иницирующая способность средств взрывания или неправильное зарядание патронов - боевиков.

При детонации заряда ВВ к опасным ситуациям приводят [10]:

- торцевое обнажение заряда ВВ в шпуре вследствие отсутствия внутренней забойки;
- обнажение боковой поверхности шпурового заряда ВВ при групповом замедленном или неправильном многоприемном взрывании;
- пересечение шпура трещинами, соединяющимися с выработанным пространством и контактирующими с боковой поверхностью заряда ВВ.

Анализ случаев возникновения опасных ситуаций, которые могут привести к воспламенению взрывоопасной среды при взрывных работах, показывает, что исключить их в полной мере не возможно по нескольким причинам. Они таковы: установившаяся технология зарядания ВВ и взрывания шпуров, применение способа замедленного взрывания шпуровых зарядов, наличие имеющихся горно-геологических нарушений в массиве и их зависимость от проявления горного давления и напряженного состояния пород. Ограниченность во влиянии на возникновение опасных ситуаций при взрывных работах заставляет делать основной упор на совершенствование взрывозащиты горных выработок. Однако при этом необходимо четко увязать процессы, происходящие при взрывных работах (разрушение и отброс пород, динамика расширения продуктов взрыва ВВ, действие ударной волны) с параметрами предохранительной среды, которая образуется в горной выработке. Так как скорость взрывов зарядов ВВ высокая, параметры взрывозащиты должны обес-

печивать быстрое создание и поддержание необходимой флегматизирующей концентрации ингибитора в предохранительной буферной среде и ее живучесть в течение всего цикла БВР. Опыт применения взрывных работ на угольных шахтах, опасных по газу и разрабатывающих угольные пласты, опасные по взрывам пыли показал, что в этих условиях взрывозащита не может быть достаточно мобильной и технически совершенной, чтобы исключить воспламенения взрывоопасной среды. Это связано как с несовершенством применяемых средств взрывозащиты, так и с зависимостью их установки в забое выработки от проявления человеческого фактора.

В качестве примера рассмотрим более подробно аварию на шахте имени XVII партсъезда ПО «Макеевуголь». Авария произошла при сотрясательном взрывании в забое обходной печи, которая проводилась по трещиноватому массиву вприсечку к лаве. При взрывных работах использовали ПВВ IV класса аммонит Т-19. Вследствие низкой антигризутности зарядов этого ВВ произошло воспламенение метана в трещинах массива, которое распространилось через систему трещин в выработанное пространство лавы, минуя предохранительную среду, созданную в забое обходной печи. В результате в лаве произошло воспламенение МВС и возник пожар, который нанес большой материальный ущерб.

Еще более трагическая авария произошла в феврале 1990 г. на шахте имени К.И. Поченкова ПО «Макеевуголь». На этой шахте в декабре 1989 г. при проведении в отработанной лаве взрывных работ с использованием аммонита Т-19 произошло воспламенение МВС в пустотах и трещинах массива, возник пожар в выработанном пространстве, который тушили в течение двух месяцев. Однако по трещинам горение МВС распространилось в выработанное пространство действующей 1^й западной лавы пласта L₄. В этом пространстве в феврале 1990 года (через два месяца) произошел взрыв МВС, в результате которого погибли 13 шахтеров и были тяжело травмированы 20 человек. В этом случае взрывозащита так же оказалась не эффективной.

Не менее опасно действие выгорающих зарядов ВВ на взрывчатую МВС. В качестве примера рассмотрим аварию на шахте «Глубокая» ш/у «Донбасс» ПО «Донецкуголь». При сотрясательном взрывании в западном конвейерном штреке пл. Н₁₀

произошел внезапный выброс угля и газа, а затем через 59 сек. были зафиксированы три последовательных взрыва МВС, которые произошли в результате ее воспламенения от выгорающего заряда аммонита Т-19. Как видно, режим сотрясательного взрывания и дополнительные меры взрывозащиты горных выработок при нем не эффективны.

Рассмотрим аварию, происшедшую в марте 2005 г. на шахте имени С.М. Кирова ГП «Макеевуголь». Этот пример показателен тем, что авария произошла при взрывных работах, когда применялись самые современные средства ведения взрывных работ: устойчивое против выгорания ПВВ V класса – угленит 13П, пластичная ингибиторная забойка ИПЗ-1 и водораспылительные завесы для создания предохранительной среды в забое горной выработки. Воспламенение МВС произошло в трещинах пород массива, которые пересекали шпур и контактировали с боковой поверхностью заряда ПВВ. Причина этой аварии оказалась в том, что в результате низкого профессионализма ИТР шахты («человеческий фактор») в этих условиях ведения взрывных работ применяли ПВВ V класса с недостаточным уровнем предохранительных свойств по газу (низкая антигризутность обнаженного заряда) вместо ПВВ VI класса согласно требованиям «ЕПБ при ВР». В этом случае компенсировать уровень предохранительных свойств ПВВ не удалось даже применением специальной ингибиторной забойки и созданием в забое выработки предохранительной среды для взрывозащиты.

Учитывая вышеизложенное, необходимо сделать вывод, что опасные ситуации, которые возникли по причинам неблагоприятных горно-геологических условий в забоях горных выработок и непрофессионального подхода при соблюдении требований безопасности и выполнении технологии ведения взрывных работ по вине людей, то есть «человеческого фактора», будут существовать всегда, и это нужно признать, как неоспоримый факт.

Далее обратим внимание на особенности способа короткозамедленного взрывания шпуровых зарядов ПВВ и опасные условия при производстве взрывных работ.

В угольных шахтах применяют способ короткозамедленного взрывания шпуровых зарядов ПВВ [11]. Этот способ ведения взрывных работ имеет ряд преиму-

ществ перед способами мгновенного и многоприемного взрываний как по эффективности, так и по безопасности.

Вместе с тем, способ короткозамедленного взрывания обладает рядом особенностей, которые в некоторых случаях могут привести к возникновению опасных ситуаций. Во-первых, при взрыве зарядов ПВВ, расположенных во врубовых шпурах, взрывание которых происходит в первую очередь, в призабойное пространство выбрасывается разрушенный уголь, из которого интенсивно выделяется метан. Исследователями установлено, что увеличение концентрации метана, которое происходит в период от 200 до 400 мс незначительное. Однако в последующие периоды времени, особенно на пластах, опасных по внезапным выбросам, концентрация метана растет быстро и образовавшаяся газо-пылевоздушная смесь становится взрывчатой. Тогда продукты детонации взрывающихся в шпурах зарядов ПВВ последующих ступеней замедления будут выбрасываться в призабойное пространство, заполненное взрывчатой метано-пылевоздушной смесью, и могут ее воспламенить [12]. Во-вторых, в самом способе заложено неодновременное взрывание шпуровых зарядов ПВВ. Это создает условия, когда действие взрыва зарядов ПВВ, взорванных в первую очередь, передается на заряды, расположенные в шпурах, взрывааемых в последующих ступенях замедления. При этом может происходить деформация стенок шпуров и передача давления не взорвавшимся еще зарядам ВВ, что приводит к их динамическому уплотнению и нарушению сплошности [13]. В целом, суммарное действие ударной волны, штыба, отколовшегося от стенок шпура, давления продуктов взрыва и деформированных пород массива на заряды ПВВ, расположенные в смежных шпурах, приводит к их динамическому уплотнению. В результате плотность ВВ в заряде значительно увеличивается и превышает первоначальную ($1,6 - 1,7 \text{ кг/дм}^3$ по сравнению с $1,05 - 1,1 \text{ кг/дм}^3$). Под влиянием этих факторов и нарушения сплошности шпурового заряда происходит снижение устойчивости детонации ВВ до полной ее потери, вследствие чего происходит неполная детонация шпурового заряда и появляется опасность выгорания его отказавшей части. В-третьих, неодновременное взрывание создает условия для частичного или полного обнажения шпуровых зарядов ПВВ, взрывааемых в группах с замедлением. Вероятность обна-

жения заряда ПВВ намного повышается в трещиноватом горном массиве и при ведении взрывных работ в верхних и нижних подрывках горных выработок. Как показали исследования [14, 15], при замедленном взрывании вероятность отрыва устьевой части шпура у смежных с врубом шпуров очень значительна. В одних случаях такие подсечки имеют длину, равную длине забойки шпуров, в других подсечки настолько велики, что происходит обнажение части еще не взорвавшегося шпурового заряда ПВВ. Взрыв обнаженного заряда во взрывоопасной среде, как правило, приводит к ее воспламенению. Поэтому ситуации, возникающие в результате таких подсечек шпуров, представляют наибольшую опасность при взрывных работах с применением короткозамедленного способа взрывания шпуровых зарядов ПВВ. Кроме того, считают [16], что существует еще, по крайней мере, три обстоятельства, характерных для короткозамедленного взрывания, при которых могут возникнуть опасные ситуации:

- в результате взрыва первоочередных шпуровых зарядов скалываются устья у смежных с ними шпуров и происходит торцевое обнажение зарядов ПВВ, которые взрываются без забойки;

- взрывание в открытом виде заряда ПВВ, находящегося в полости, заполненной взрывоопасной средой, образованной отходом при взрывных работах;

- взрывание шпуровых зарядов ПВВ при наличии пересекающих шпуры трещин, образованных взрывом зарядов предыдущей серии замедления.

На основании вышеизложенного можно сделать заключение, что условия воспламенения МВС или ПВС в результате действия на нее детонирующих и выгорающих зарядов ПВВ характеризуются:

- наличием в угольных шахтах газа метана и взрывчатой пыли, которые при проведении взрывных работ образуют взрывоопасные смеси, способные при сложившейся опасной ситуации под действием неблагоприятных факторов взрыва воспламениться. Анализ аварийности при взрывных работах показал, что наиболее опасными являются взрывчатые МВС, которые воспламеняются и взрываются от действия как детонирующих, так и выгорающих зарядов ПВВ, а также было установлено, что без воспламенений МВС взрывов ПВС не происходило;

– наличием и проявлением сложных горно-геологических факторов горного массива, таких как геологические нарушения, горное давление, напряженное состояние угля на выбросоопасных пластах, трещины, появление которых на момент проведения взрывных работ трудно прогнозировать и влияние которых на возникновение опасных ситуаций невозможно полностью исключить;

– технологией взрывных работ с применением патронированных ВВ, в том числе использованием способа короткозамедленного взрывания шпуровых зарядов ПВВ. Нарушение технологии приводит к возникновению опасных ситуаций, которые связаны с одновременным взрыванием шпуровых зарядов ВВ, многопатронным заряданием шпуров, применением забойки и дополнительных средств взрывозащиты (взрывное распыление воды и ингибиторов для создания предохранительной среды) горных выработок;

– зависимостью взрывоопасности от проявления человеческого фактора, так как влияние профессионализма людей, занятых в проведении взрывных работ в угольных шахтах, на соблюдение требований безопасности и технологии применения средств и способов взрывозащиты очень велико.

Учитывая многообразие факторов, влияющих на возникновение опасных ситуаций при взрывных работах, трудности их учета и управления условиями, которые влияют на взрывобезопасность в горных выработках при проведении взрывных работ, необходимо разработать новую научно обоснованную концепцию обеспечения безопасности взрывных работ и применения ПВВ в опасных условиях угольных шахт. Эта концепция должна быть сформулирована на базе имеющегося положительного опыта повышения безопасности взрывных работ в угольных шахтах путем предотвращения воспламенения метана от выгорающего заряда за счет увеличения устойчивости ПВВ против выгорания [17]. В работе [17] автор показал, что вероятность выгорания заряда ПВВ в шпуре зависит от его поджигаемости, то есть способности к горению. Исследования показали, что чем ниже поджигаемость ВВ, тем хуже его горючесть. На практике поджигаемость ВВ исследуют по специальной методике [18], с помощью которой определяют массу навески воспламенительного состава – P_{50} , при которой в испытаниях наблюдается 50% воспламенений ВВ чем

больше масса навески воспламенителя, тем ВВ хуже поджигается и, следовательно, более устойчиво против выгорания. Используя такой подход, было разработано ПВВ с высокой устойчивостью против выгорания. Показатель поджигаемости его составил не менее 1,2 г. Опыт применения этого ПВВ при взрывных работах в угольных шахтах показал, что при значении показателя $P_{50} \geq 1,2$ г выгораний шпуровых зарядов не происходило, что привело к предотвращению воспламенения МВС от выгорающих зарядов.

На основании письма Госгортехнадзора УССР № 8-9а/618 от 26.06.1992 г. к постоянному применению в угольных шахтах были допущены устойчивые против выгорания ПВВ V класса – углениты 13П и 13П/1 (ТУ 1270174086-002-92 «Вещества взрывчатые промышленные. Предохранительные патронированные углениты 13П и 13П/1»). За период с 1992 по 2006 г.г. при применении этих ВВ при взрывных работах не произошло ни одной аварии и не было ни одного случая травматизма людей по причине выгорающего заряда ПВВ. В то же время детонирующие заряды угленита 13П в двух случаях вызвали вспышки МВС в выработках через трещины массива вследствие того, что уровень предохранительных свойств этого ВВ по газу (антигризутность заряда) оказался не достаточным. Таким образом, внедрение ПВВ, устойчивых к выгоранию, привело к повышению безопасности взрывных работ в опасных условиях угольных шахт, однако недостаточный уровень их антигризутности может быть причиной воспламенения МВС и привести к авариям со смертельным травматизмом. Поэтому необходимо обоснование критериев антигризутности зарядов ПВВ при производстве взрывных работ в опасных условиях угольных шахт.

С их помощью осуществить модернизацию ПВВ и их зарядов, которая позволит решить вопросы по предупреждению воспламенения взрывоопасной среды от детонирующего заряда ПВВ при взрывных работах и выполнению взрывозащиты горных выработок. При взрывных работах с применением модернизированных зарядов ПВВ в забое будет создаваться ингибиторная газодисперсная предохранительная среда. В этом случае проявление опасных ситуаций не приведет к аварии, поскольку продукты взрыва ПВВ тормозят реакцию окисления метана и, следовательно, нейтрализуют действующие на МВС поджигающие факторы взрыва. Поэто-

му основополагающим базисом новой концепции безопасности взрывных работ в опасных условиях угольных шахт является модернизация ПВВ и установление безопасных способов их применения.

1.4. Анализ развития предохранительных ВВ и безопасных способов их применения

При взрывных работах в угольных шахтах, опасных по газу и взрывам угольной пыли, применяются только предохранительные ВВ. Принципиальным отличием ПВВ от не предохранительного ВВ является его пониженная способность воспламенить взрывоопасную среду при взрыве зарядов ВВ в забоях горных выработок. Количественная оценка этой способности ПВВ связана с определением массы его предельного заряда. Предельный заряд – это заряд ПВВ максимальной массы, которая не воспламеняет взрывоопасную среду при его испытании в специальной взрывной камере опытного штрека.

Все ВВ, допущенные для ведения взрывных работ в угольных шахтах, разделены на классы по условиям применения (§ 11 «ЕПБ при ВР»). Выбор соответствующего класса, согласно требованиям § 223 «ЕПБ при ВР», должен быть определен в зависимости от степени опасности работ в забое горной выработки, условий взрывания зарядов и необходимости создания предохранительной среды. В соответствии с этим параграфом ЕПБ в угольных шахтах применяют ПВВ III – VII классов. В 2005 – 2006 г.г. расход ПВВ составил в среднем 2000 т в год: III класс – не применялся, IV класс – 1100...1200 т, V класс – 650...700 т, VI класс – 120...150 т, VII класс – около 3 т. Ассортимент ПВВ представлен порошкообразными патронированными тротилосодержащими аммонитами IV класса и патронированными нитроэфиросодержащими угленитами V, VI и VII классов. Расход предохранительных аммонитов IV класса составляет примерно 59,6%, а угленитов – 40,4%, из которых 33,5% – углениты V класса, 6,75% – VI класса и 0,15% – VII класса. Приведенные данные показывают, что в настоящее время в угольных шахтах объем применения ПВВ IV и V классов, которые имеют недостаточную антигризутность зарядов по

газу метану, составляет 93,1 %. Объем же применения наиболее безопасных ПВВ VI класса составляет всего 6,75%. Таким образом, сложившаяся практика ведения взрывных работ в угольных шахтах базируется на использовании большого объема (более 90%) не безопасных в отношении метана зарядов ПВВ IV и V классов. С чем это связано? Это связано с тем, что ПВВ имеют гораздо более низкую работоспособность по сравнению с предохранительными ВВ. Чем выше уровень предохранительных свойств ПВВ по газу и пыли, тем ниже его работоспособность, а, следовательно, и эффективность результатов проведения взрывных работ. Такая тенденция сложилась исторически в результате опыта развития предохранительных ВВ для угольных шахт.

В настоящее время разработаны технические требования к предохранительным ВВ всех классов, представленные в табл. 1.3, которые регламентируют основные взрыво-технические показатели ВВ, гарантирующие безопасность их применения в угольных шахтах [19]. В требованиях дано соотношение уровня предохранительных свойств ВВ и его работоспособности. Основная задача требований – не дать возможности применять при взрывных работах ПВВ, показатели которых ставят под сомнение, как их безопасность, так и эффективность. Это положительная сторона требований. Однако они не дают ответа на вопрос, какие показатели ПВВ достаточны для безопасности и эффективности его применения при проведении взрывных работ. Поэтому на шахтах вопрос решают, как правило, в пользу ПВВ, имеющих более высокую работоспособность. Существуют также проблемы, связанные с выбором способов безопасного применения ПВВ (способ и система взрывания зарядов) и конструкции шпурового заряда. Они не решаются с помощью технических требований к ПВВ и делением их на классы. Нет комплексного обоснования безопасных параметров взрывных работ, позволяющего увязать технические показатели ПВВ различных классов с условиями и способами их применения, взрывания, конструкцией заряда в шпурах. В то же время постановка и решение такой задачи позволят не только решить проблемы антигризутности и работоспособности зарядов ПВВ, но и существенно повысить эффективность и безопасность взрывных работ.

Технические требования к ПВВ для угольных шахт

Показатели	Значение показателей для класса ВВ			
	III	IV	V	VI
Предохранительные свойства по газу: предельный (50%-ный) заряд в канальной мортире без забойки при инициировании, г: -прямом -обратном предельный (50%-ный) заряд в угловой мортире с отражательной стенкой на расстоянии 0,6 м, г	— (175)	— (300)	1000 600	1000 1000
	—	—	100 ¹ (140*)	600 (850)*
	—	—	—	—
Предохранительные свойства по пыли: предельный заряд в канальной мортире без забойки при инициировании, г: -прямом -обратном предельный заряд в угловой мортире с отражательной стенкой на расстоянии 0,6 м, г	—	700	1000 600	1000 1000
	—	—	400	600
	—	—	—	—
Устойчивость детонации при уплотнении: критическое относительное расстояние в углецементных блоках критическое расстояние между шпурами в шахтных условиях, см	Устойчивая детонация при относительных расстояниях	—	6,9	6,4
	Устойчивая детонация при любых расстояниях между шпурами	—	16	12
Работоспособность: по Трауцлю, не менее, см ³ относительный показатель практической эффективности (эталон угленит Э-6), не менее	320	265	Не нормируется	—
	—	—	1,3	0,8
Предельное (50%-ное) расстояние передачи детонации сухих патронов, см: через воздушный промежуток через угольную таблетку	5	5	5 (7*) 1,5 (2,1)*	4 (5,5*) 2 (2,8)
	—	—	—	—
Предельное (50%-ное) расстояние передачи детонации через воздушный промежуток после замочки патронов в воде, см Поджигаемость	3	3	3 (4,2*)	2 (2,8*)
	1,2	1,2	1,2	1,2

¹ Норма временно факультативна

Почему именно так ставится вопрос? Да потому, что создание безопасных высоко-предохранительных и эффективных ВВ возможно только на основании комплексного решения проблем антигризутности и эффективности зарядов ПВВ. Рассмотрим более, чем 120-летний мировой опыт развития ПВВ.

До конца 80-х годов XIX века единственными ВВ, которые применялись в угольных шахтах, были черный порох и гурдинамит, но их использование при взрывных работах сопровождалось многочисленными взрывами смесей воздуха с рудничным газом или угольной пылью. Количество взрывов стало настолько большим, что для изучения этого вопроса 25 марта 1877 года во Франции была создана специальная государственная комиссия по изучению вопросов безопасности применения ВВ в угольных шахтах. В дальнейшем аналогичные комиссии были созданы и в других развитых угледобывающих странах: Германии (1880 г.), Англии и Бельгии (1879 г.). В 1888 г. французская комиссия, возглавленная известными учеными Малляром и Ле-Шателье, приняла отчет по применению ВВ в угольных шахтах [20, 21]. Из материалов отчета был сделан вывод, что до 1888 г. не существовало никаких правил или теорий, которыми можно было руководствоваться при подборе ВВ для ведения взрывных работ в угольных шахтах, а почти все применяемые ВВ оказались опасными по отношению к рудничному газу. Также было установлено, что температура воспламенения рудничного газа в смесях с воздухом лежит в пределах 600 – 700 °С и что не существует ВВ, температура взрыва которых лежит ниже этих пределов, вследствие чего все ВВ с более высокой температурой продуктов взрыва могут воспламенять газ. Поэтому изыскивались средства и способы повышения безопасности взрывных работ, которые воспрепятствовали бы соприкосновению продуктов взрыва ВВ с рудничным газом, а также способствовали бы снижению температуры пламени продуктов в такой степени, чтобы сделать его безопасным. Для гашения пламени взрыва ВВ было предложено применение воды в виде патронов для забойки шпуров (Макнаб, Руджери), мха, смоченного водой и студенистых патронов (Хист, Фост, Шалон). Однако с помощью применения этих средств безопасность взрывных работ не достигалась, так как пламя при взрыве ВВ проникало по трещинам в выработку. Тогда Сеттль предложил окружать патроны ВВ водой со всех сто-

рон. Осуществление такого способа также не привело к положительным результатам. Поэтому комиссия сделала вывод о необходимости создания специальных ВВ, которые были бы безопасны по отношению к взрывоопасной среде угольных шахт. Специальные ВВ для угольных шахт получили название антигризутные взрывчатые вещества – термин, принятый Конгрессом прикладной химии в 1906 г. В настоящее время такие ВВ называются предохранительными ВВ (ПВВ).

За десять лет работы французской комиссии был проведен большой объем исследований взрывчатости смесей метана и угольной пыли с воздухом. Исследовалась антигризутность зарядов ВВ. На основании полученных результатов циркуляром министерства общественных работ от 01.03.1890 г. во Франции впервые в мире была установлена следующая регламентация допуска ВВ для шахт, опасных по газу и взрывам угольной пыли:

- 1) запрещается применять черный порох в шахтах, опасных по газу и угольной пыли;
- 2) запрещается применять не полностью детонирующие ВВ в угольных шахтах;
- 3) при полноте детонации зарядов ВВ должны быть соблюдены следующие условия:

– в составе продуктов детонации не должно содержаться никаких горючих компонентов, таких как водород, оксид углерода, твердый углерод и т.д.;

– температура детонации, вычисленная согласно предписаниям настоящего циркуляра, не должна превышать 1900°C для ВВ, применяемых для взрывания твердых пород, и 1500°C – для ВВ, применяемых в угле и мягком грунте.

Комиссией по антигризутным ВВ, согласно приведенному циркуляру, для угольных шахт были допущены к применению главным образом аммиачно-селитренные ВВ, содержащие около 80% аммиачной селитры – экстрадинамит Нобеля и составы Фавье. Однако практика показала, что ВВ, рассматриваемые как безопасные по отношению к рудничному газу, все же воспламеняли его при взрывных работах в угольных шахтах. Таким образом, выводы Малляра и Ле-Шателье оказались недостаточными и не были приняты в других угледобывающих странах.

Так, в Германии и Англии комиссии по ВВ для угольных шахт рассматривали возможность допуска ВВ на основании результатов испытаний зарядов в условиях, мало отличающихся от существующих в шахтах. В результате были рекомендованы прямые методы испытаний и исследований ВВ для угольных шахт в опытных штреках с атмосферой, содержащей рудничный газ. В 1885 г. Ломан в Нейкирхене (Германия) построил первый опытный штрек для испытаний ВВ в атмосфере рудничного газа [22]. В дальнейшем такие штреки были построены во всех странах мира, имеющих развитую угольную промышленность и производящих предохранительные ВВ для шахт, опасных по газу и взрывам угольной пыли. Создание опытных штреков позволило проводить испытания зарядов ВВ непосредственно во взрывоопасной среде. Поэтому результаты этих испытаний приобрели определяющее значение для решения вопроса допуска ВВ в угольные шахты, а также при отработке основных принципов их построения при исследованиях и разработке новых составов ПВВ.

Именно с помощью опытного штрека были получены результаты, позволяющие дать определение антигризутным ВВ. Сначала оно сводилось к тому, что при любых условиях взрывания в атмосфере рудничного газа независимо от величины, способа зарядания и инициирования заряд ВВ должен оставаться безопасным и не вызывать воспламенение газа. Вместе с тем, накопленный опыт и результаты исследований антигризутных ВВ показали, что таких ВВ не существует, понятие безопасности ВВ по отношению к рудничному газу относительное, и антигризутными можно называть только те ВВ, заряды которых не вызывают воспламенения взрывоопасной среды в опытном штреке. Строгого ограничения в понятии антигризутные (предохранительные) ВВ долго не существовало, так как не были установлены предельные заряды и характерные условия их испытаний на безопасность по отношению к взрывоопасной среде. Исторически сложилось так, что в разных странах величина предельного заряда для предохранительных ВВ различна. Поэтому иногда ВВ, отнесенное к предохранительным в одной стране, в другой относилось к не-предохранительным. В качестве примера можно привести случай с испытанием аммонита Т-19 (ПВВ IV класса) в Германии в связи с аварией, происшедшей

11.08.1989 г. при проведении взрывных работ в центральном конвейерном уклоне пласта «Нижний» шахты № 1-5 рудника «Баренцбург» ПО «Арктикуголь» на архипелаге Шпицберген (Норвегия). Причиной аварии было воспламенение МВС от высокотемпературных продуктов взрыва ВВ и электродетонаторов, которые были взорваны в выработанном пространстве с целью уничтожения. Образцы взрывчатых материалов, применяемых при взрывных работах, Норвежская горнотехническая инспекция направила на контрольные испытания в Германию. По результатам испытаний было дано заключение на аммонит Т-19, в котором было указано, что данное ПВВ является непредохранительным и в угольных шахтах использоваться не может.

В Германии впервые были установлены величины предельных зарядов ВВ при испытании на безопасность, которые позволяли судить об антигризутности ВВ. В начале XX века распоряжением правительства Пруссии от 21.10.1910 г. было дано разрешение на применение в шахтах в качестве антигризутных таких ВВ, заряды которых не воспламеняли МВС и ПВС в опытном штреке. При этом предельная масса заряда ВВ при испытании его в канале мортиры без забойки должна быть не менее 250 г. В дальнейшем антигризутными считались только те ВВ, которые в опытном штреке не вызывали воспламенения метана при взрыве заряда массой 450 г, а угольной пыли – при взрыве заряда массой 600 г. Современные требования разных стран еще более дифференцированы и содержат целый ряд показателей, характеризующих безопасность применения ВВ при взрывных работах в угольных шахтах [23, 24].

Введение испытаний ВВ в опытном штреке с целью их допуска к применению в угольных шахтах позволило решить два принципиальных вопроса, которые необходимы для определения уровня предохранительных свойств ПВВ и взрывопреждения, регламентирующего безопасность применения ВВ при наличии взрывоопасной среды в забое. Первый – возможность создания в опытном штреке наиболее взрывоопасных МВС и ПВС и контроля параметров их взрывчатости в процессе испытаний ПВВ. Второй – смоделировать и воспроизвести наиболее опасные условия при испытаниях, когда взрывание зарядов ПВВ может привести к воспламене-

нию МВС или ПВС.

В результате испытаний в опытном штреке определяют (или подтверждают нормируемую величину) массу предельного заряда ПВВ, который не воспламеняет взрывоопасную среду. Это, в свою очередь, позволяет дифференцировать ВВ по уровню предохранительных свойств и сделать заключение о их антигризутности. Появление столь необходимого инструмента для определения антигризутности зарядов ВВ и послужило быстрому развитию ПВВ. Оно базировалось на двух основополагающих направлениях.

Первое направление – это точка зрения Малляра и Ле-Шателье на условия воспламенения МВС, которые определяются температурой и временем индукции (задержка реакции окисления метана при воспламенении рудничного газа). Поэтому, по мнению французской комиссии, достаточно было снизить температуру продуктов взрыва ВВ до $1500\text{ }^{\circ}\text{C}$, чтобы время задержки воспламенения МВС всегда было больше времени протекания взрыва заряда ВВ в шпуре.

Второе направление – это учет результатов непосредственного испытания ВВ на антигризутность во взрывоопасной среде, которая искусственно создавалась в горных выработках или в опытном штреке.

Опыты инженера Симона на руднике Лиевина (Франция) позволили установить влияние забойки на безопасность ВВ во взрывоопасной среде. Он установил, что забойка из инертного материала длиной 5 см на 100 г гремучего студня надежно предотвращает воспламенение МВС при взрыве опасного ВВ в канале стальной мортиры. Опыты в Менлюсоне и Фрамени (Бельгия) показали, что каменная соль, введенная в канал мортиры так, что она окружает заряд ВВ или располагается впереди у устья в виде забойки, значительно понижает температуру продуктов взрыва и делает безопасным взрывание заряда. Особенно сильно охлаждали продукты взрыва ВВ соли-кристаллогидраты: квасцы, сода, серноокислый магний или натрий. В Германии Мюллер и Ауфшлегер, исследуя в опытном штреке применение солей-кристаллогидратов, пришли к выводу, что с помощью этих солей можно создать безопасные в отношении рудничного газа динамиты, которые назвали веттердинамиты (Wetterdynamite) (см. табл. 1.4).

Таблица 1.4

Безопасные ВВ для угольных шахт, допущенные в разных странах мира согласно выводам антигризутных комиссий

Состав ВВ	Франция										Англия	Бельгия	Франция		Германия	Австрия			
	Гризутин				Состав Фавье								Веттердина- намит	Гризунит			Марка Д	Марка Е	Веттердина- мит
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2									
1. Аммиачная се- литра	80,0	88,0	60,0	70,0	90,5	95,5	85,0	91,5	—	—	—	—	—	—	—	—	—		
2. Нитроглицерин	15,0	11,5	30,0	29,1	—	—	—	—	—	—	—	44,0	42,0	42,0	31-34,0	52	—		
3. Кизельгур	5,0	—	10,0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	12,0	11-14,0	14	—		
4. Октонитроклет- чатка	—	—	—	—	9,5	—	15,0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
5. Тринитронафта- лин	—	—	—	—	—	4,5	—	8,5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
6. Пироксиллин	—	0,5	—	0,9	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
7. Сульфат магния	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	44,0	46,0	46,0	47-51,0	—	—	—	
8. Сода	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	34,0	—	
9. Оксалаг аммо- ния гидрат	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
10. Нитраг натрия	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
11. Нитраг калия	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	4-6	—	—	
12. Древесная мука	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	12,0	12,0	—	—	—	—	—	

Таким образом, первое направление привело к созданию ПВВ на основе аммиачной селитры, которая при взрыве дает низкую температуру (1051 °С по Бюрло). Второе направление было реализовано для динамитов, в состав которых были введены инертные соли, на нагрев и эндотермическое разложение которых расходовалась часть теплоты взрыва. В 1887 г. Мюллером был предложен веттердинамит, содержащий 42 – 52 % нитроглицерина, 11 – 13 % кизельгура, 35 – 47 % кристаллической соды или сульфата магния.

Предохранительные аммиачно-селитренные ВВ для угольных шахт были введены А. Нобелем в 1879 г. Экстрадинамит Нобеля состоял из 85 – 88 % аммиачной селитры и 12 – 15 % слабо желатинизированного нитроглицерина. В 1884 г. начали применять составы Фавье, состоящие из 90 % аммиачной селитры и 10 % смеси нитро- и динитронафталина. В СССР оба этих ВВ применялись вплоть до 1941 г. За рубежом они широко применялись до конца XIX века. Затем развитие антигризутных ВВ пошло по пути соединения обоих направлений в одно более универсальное, получившее название классическое. Оно предполагает, что безопасность ПВВ во взрывоопасной среде достигается применением в составах значительного количества аммиачной селитры, инертных солей, совместимых с ней (хлориды натрия и калия), небольшого количества сенсibilизатора в виде нитроглицерина или тротила, а также горючего материала. Однако опыт применения этих ПВВ в угольных шахтах по-прежнему показывал, что в ряде случаев наблюдаются условия, при которых эти ВВ воспламеняли взрывоопасные МВС. Это требовало разработки новых ПВВ, более предохранительных по газу метану. Научного объяснения причин таких аварий не было, так как они происходили при взрывных работах с допущенными антигризутными ВВ (ВВ, которые успешно прошли испытания в опытном штреке). Поэтому считали, что предельный заряд, характеризующий уровень предохранительных свойств ВВ, просто не достаточен для безопасности, и его необходимо увеличить. Правда, в этот период времени исследованиями Дотриша [25], Одибера и Дельма [26] было установлено, что большинство ПВВ имеют низкую детонационную способность в шпурах и в случае нарушения детонации заряда способны выгорать (дефлагрировать). Кроме того, отмечалось [27], что шпуры часто пересекаются

трещинами, образованными в результате ранее взорванных зарядов при многоприемном способе взрывания. В этом случае заряд контактирует через трещины с взрывоопасной средой и может ее воспламенить, минуя пламегасящее действие забойки. Поэтому в 1912 г. Э. Лемер (Бельгия) предложил помещать патроны ВВ в защитные предохранительные оболочки [28]. По его мнению, это увеличит детонационную способность ВВ за счет сокращения бокового разлета продуктов детонации и более направленного их действия, а также исключит непосредственный контакт боковой поверхности заряда с МВС. Толщина цилиндрической оболочки вокруг патрона ВВ составляла 3 – 5 мм. В качестве материала оболочки, как правило, применяли инертные соли-пламегасители, которые при взрыве поглощали тепло и охлаждали газообразные продукты взрыва. Вместе с тем, окружение предохранительной оболочкой боковой поверхности патрона ВВ, по мнению Наума [29], приводило лишь к незначительному повышению уровня безопасности ВВ, тогда как затруднения при их производстве вызывали столь значительное удорожание ВВ, что эффективность взрывных работ в шахтах становилась крайне низкой. Лемеровская оболочка не решала одну из главных задач обеспечения безопасности взрыва патрона ВВ во взрывоопасной среде только потому, что не могла покрывать патроны ВВ с торцов. Торцы оставались открытыми для того, чтобы обеспечить надежную передачу детонации от патрона к патрону. В противном случае обеспечить надежную детонацию шпурового заряда не возможно. Поэтому Лемеровские оболочки применялись в шахтах только во Франции, Бельгии и Англии. В дальнейшем в этих странах вновь возобновился процесс совершенствования ПВВ по классическому принципу, который начал развиваться в сторону увеличения в составах ПВВ количества солей-пламегасителей. Этому способствовали исследования, проведенные Британским национальным научно-исследовательским институтом техники безопасности в горной промышленности. В 1944 г. этим институтом было сделано заключение [30], что ПВВ в предохранительных оболочках не являются более безопасными, чем используемые ранее классические антигризутные ВВ. Кроме того, работы по короткозамедленному взрыванию показали, что условия, в которых происходят воспламенения метана в угольных шахтах, еще не достаточно изучены и в точности не ясны.

Было сделано заключение, что одним методом определения безопасности ПВВ в опытном штреке нельзя оценить их реальную опасность. На это указывали результаты работ Тейлора и Ханкула [31], продолживших опыты Е. Одибера [32] по изучению условий воспламенения метана взрывом заряда ПВВ. В 1946 г. они установили, что основными факторами, определяющими, выдержит ли заряд ПВВ официальные испытания на допуск в опытном штреке при взрывании в канале мортиры, являются удельная теплота взрыва и плотность ВВ. Был также сделан вывод, что скорость детонации ВВ не оказывает значительного влияния на такие испытания.

Однако с вводом нового вида испытаний для ПВВ в оболочках, который заключается во взрывании открытых зарядов в МВС в опытном штреке, оказалось, что необходимо учитывать изменение скорости детонации ВВ. Было установлено, что предельная масса свободно подвешенного заряда ПВВ с увеличением скорости детонации ВВ уменьшается, а с уменьшением увеличивается. Наиболее эффективным способом уменьшения скорости детонации ВВ является балластировка (разбавление) его состава инертным веществом. Поэтому Тейлором были предложены предохранительные ВВ повышенной степени безопасности без использования предохранительных оболочек, но с дополнительным вводом в их состав инертного пламегасителя. Содержание пламегасителя в составах ПВВ, которые Тейлор назвал «эквивалентные» (по отношению к уровню безопасности патронов в предохранительных оболочках), достигло 40 – 50 %. С 1955 г. эквивалентные ПВВ начали применять в угольных шахтах практически во всех странах Европы. Во Франции Центр научных и технических исследований для шахт признал перспективность разработки ПВВ такого типа и рекомендовал их применение в особо опасных условиях угольных шахт [33]. Однако в Германии эквивалентные ПВВ не применялись, потому что высокий уровень предохранительных свойств ПВВ был достигнут путем покрытия патронов классических ПВВ активной оболочкой из бикарбита. Бикарбит представляет собой сверхпредохранительное ВВ, разработанное К. Бейлингом в Германии [34]. Практическая эффективность самого этого ПВВ была крайне низкой вследствие невысокой его работоспособности. Поэтому его использовали в качестве предохранительной оболочки, которая покрывала весь патрон достаточно мощного классиче-

ского ПВВ, включая торцы. Вследствие этого достигалась высокая детонационная способность заряда и безопасность взрывания в МВС патронов с активной оболочкой из бикарбита, а также эффективность взрывных работ, так как работоспособность таких патронов была существенно выше, чем работоспособность бикарбита. Вместе с тем, начатые в Германии системные исследования по безопасности взрывных работ в угольных шахтах, в которых использовался способ короткозамедленного взрывания зарядов, показали следующее. При короткозамедленном способе взрывания шпуровых зарядов могут сложиться условия, приводящие к опасности взрывания в МВС. К таким условиям относится взрыв частично или полностью обнаженного заряда ПВВ, который возникает в процессе одновременного взрывания групп шпуровых зарядов. Анализ причин аварий в угольных шахтах Англии и Германии, проведенный ведущими немецкими специалистами во главе с Г. Аренсом, показал, что с начала внедрения способа короткозамедленного взрывания в 1946 – 1948 г.г. аварийность в шахтах при взрывных работах возросла [35]. Так, в Англии в период с 1949 по 1953 г.г. при взрывных работах с использованием классических ПВВ было зафиксировано в среднем одно воспламенение МВС на 5200 т израсходованных ВВ. В Германии за аналогичный период было зафиксировано 4 воспламенения МВС. В Англии с 1934 по 1952 г.г. при применении патронов в предохранительных оболочках было зафиксировано 41 воспламенение МВС, а в Германии с 1938 по 1955 г.г. – 21 воспламенение. При переходе в Англии на применение эквивалентных ПВВ с 1949 по 1955 г.г. произошло 4 взрыва МВС. Учитывая, что в этот период в Англии и Германии условия проведения взрывных работ, их технология и объем были примерно одинаковы, был сделан вывод, что фактической разницы в безопасности применения классических патронов ПВВ, патронов в предохранительных оболочках и эквивалентных ПВВ при короткозамедленном взрывании зарядов нет. Это указывало на то, что действительно существуют условия взрывания зарядов ПВВ, которые при короткозамедленном способе крайне опасны во взрывоопасной среде. В результате исследований [36, 37], проведенных в опытном штреке, было установлено, что крайне опасными условиями взрывания зарядов вышеперечисленных ПВВ в МВС являлись такие условия, когда заряды находились в открытом виде

в специальной угловой мортире, оборудованной отражательной стенкой. В этих условиях взрывоопасную МВС воспламеняли заряды ПВВ массой 0,1 – 0,3 кг. Поэтому в Германии была поставлена задача разработки высокопредохранительных ВВ для условий короткозамедленного взрывания, допуск которых в угольные шахты должен был регламентироваться испытаниями в угловой мортире, проводимыми в опытном штреке.

В тот же период времени интенсивно разрабатывались ПВВ и для угольных шахт СССР. В тех целенаправленных научных и испытательных работах принимали участие специалисты МакНИИ. Применение антигризутных ВВ в царской России было впервые регламентировано в 1892 г. В результате для взрывных работ в угольных шахтах России были допущены французские 12-ти и 29-ти процентные гризутины и состав Фавье. В горной промышленности СССР эти три вида ПВВ применялись до 1941 г. Однако работами, проведенными в 1932 – 1934 г.г. в МакНИИ А.И. Селезевым и А.Г. Суворовым [38, 39], было установлено, что эти ПВВ далеко не безопасны при их применении во взрывоопасной среде угольных шахт. Поэтому в предвоенные годы А.И. Селезевым велись работы по созданию предохранительных оболочек для патронов из этих ПВВ [40] и А.И. Гольбиндером разрабатывались новые составы предохранительных ВВ для угольных шахт [41]. Начало войны прервало эти работы. Однако в послевоенные годы они были снова возобновлены с большим размахом, так как требовалось быстро и эффективно поднять угольную промышленность Донбасса, которая существенно пострадала за годы оккупации. В 1946 – 1947 г.г. была начата разработка антигризутных ВВ – аммонитов, сенсibilизированных тротилом и победитов, содержащих в качестве сенсibilизатора небольшое количество нитроглицерина. К концу 40-х годов XX века в угольной промышленности СССР широко применялись антигризутные аммониты – угольный III/1, породный АП-1, №1, №8 и победиты №1, №3, №4, №5. Принцип построения этих предохранительных ВВ немногим отличался от классического, принятого за рубежом. Эти ПВВ представляли собой составы на основе аммиачной селитры (50 – 78%), солей-пламегасителей – хлористого натрия или калия (10 – 34%), сенсibilизаторов – тротила или нитроглицерина (4 – 14%) и горючего – древесной или сосновой муки (2 –

3%). С начала 50-х годов начинает широко использоваться короткозамедленное взрывание шпуровых зарядов в отечественных угольных шахтах. Особенно плодотворным оказалось применение способа короткозамедленного взрывания на угольных шахтах, опасных по газу и взрывам угольной пыли. Замена многоприемного взрывания взрыванием за один прием привело к резкому сокращению затрат времени на взрывные работы и повышению их эффективности и безопасности. Вместе с тем, как и за рубежом, было отмечено возросшее число выгораний ВВ в шпурах при взрывании по углю и авариях, связанных с воспламенением взрывоопасной среды. Это привело к тому, что был пересмотрен ассортимент ПВВ, применяемых в угольных шахтах при короткозамедленном способе взрывания шпуровых зарядов и начаты разработки новых более безопасных ПВВ для этих условий. В результате проведенных работ было установлено, что при способе короткозамедленного взрывания ВВ в патронах, расположенных в смежных шпурах уплотняется до такой степени, при которой не может устойчиво детонировать в шпурах. Поэтому происходит неполная детонация зарядов ВВ и создаются благоприятные условия для его выгорания. В связи с этим, были разработаны малоуплотняемые ВВ, содержащие в своем составе эффективный разрыхлитель мипору. ПВВ такого типа были названы мипориты. Одним из перспективных направлений повышения устойчивости детонации ВВ в шпурах при короткозамедленном взрывании было также создание специальных патронов с прочными защитными оболочками, которые были активны, то есть представляли собой слабые ВВ, но обладали высоким уровнем предохранительных свойств по отношению к газу метану. Эти ПВВ в оболочках получили название метаниты. В полной мере создание малоуплотняемых ПВВ и патронов с защитными активными оболочками для ведения взрывных работ короткозамедленным способом взрывания себя не оправдало. В результате, как и за рубежом, актуальность создания высоко предохранительных ВВ для такого способа взрывания была очевидной.

Фундаментальное развитие академиком Н.Н. Семеновым [42] теории цепных реакций и теплового воспламенения в приложении к газовым взрывам расширило представление о процессах, происходящих при взрыве заряда ВВ во взрывоопасной МВС. Экспериментально было установлено, что, как правило, эффективный пламе-

гаситель, применявшийся в составе антигризутного ВВ, является ингибитором (отрицательным катализатором) реакции окисления метана кислородом воздуха. В своих работах Л.В. Дубнов [43], А.П. Глазкова и К.К. Андреев [44] рассматривают вопросы создания предохранительных ВВ с учетом ингибирующего действия солей, вводимых в состав ПВВ. Однако реальный прогресс в вопросах создания высоко предохранительных ВВ был достигнут благодаря работам Г. Аренса (Германия), который выдвинул идею селективной детонации ПВВ или избирательного энерговыделения при взрыве заряда. Сущность предложенного подхода в получении высоко предохранительных ВВ заключалась в придании им свойств, обеспечивающих зависимость энергии взрыва от условий взрывания заряда. При взрыве открытого заряда ПВВ с избирательным энерговыделением реакция взрывного разложения его компонентов затрагивает только сенсibilизатор, а остальные, менее активные компоненты разбрасываются продуктами детонации сенсibilизатора без заметного разложения. Когда же заряд ПВВ взрывается в условиях замкнутости (в шпуре с надежной и качественной забойкой), то выделяется вся потенциальная энергия этого ПВВ, включая и энергию малоактивных по сравнению с сенсibilизатором компонентов. Уже первые опыты, проведенные Аренсом в 1952 – 1953 г.г., показали возможность создания подобного типа ПВВ, которые получили название селективно-детонирующие [45]. Первоначально за основу этих ПВВ был взят бикарбит, в составе которого часть пламегасителей – хлористый натрий и карбонат натрия заменили на активную смесь нитрата натрия с древесной мукой. Полученное ПВВ имело уровень предохранительных свойств, аналогичный уровню бикарбита, но его работоспособность была несколько выше, что позволяло надеяться на получение ПВВ, у которых высокий уровень предохранительных свойств будет сочетаться с высокой работоспособностью. В результате этих работ наметилась новая тенденция в создании ПВВ, которая заключалась в том, что инертные балластные соли-пламегасители в составе ПВВ заменяли активными солями, способными к экзотермической химической реакции, в результате которой в продуктах взрыва ВВ образовывалась соль активного ингибитора реакции окисления метана кислородом воздуха. В качестве активной пары солей для ПВВ нового поколения были предложены смеси нитратов

натрия или калия с хлористым аммонием. Каждая из этих солей является ингибитором реакции окисления метана и оказывает охлаждающее действие на продукты детонации сенсбилизатора. При тесном их перемешивании при взрыве сенсбилизатора они реагировали между собой с выделением энергии и соли-ингибитора реакции окисления метана:



Учитывая специфику новых ПВВ, они были названы ионообменными, основываясь на том, что ингибитор реакции окисления метана образуется в результате обмена ионов натрия Na^+ и хлора Cl^- при реакции между солями нитрата натрия и хлористого аммония. У этих ПВВ работоспособность в бомбе Трауцля достигла величины 100 см^3 , что в 3,3 раза больше, чем у бикарбита.

Таким образом, ионообменные ПВВ позволили достичь более высокую работоспособность у ВВ, при которой их предельный заряд при испытании в угловой мортире опытного штрека был достаточно большой и позволял надеяться на безопасность взрывания короткозамедленным способом. В связи с этим, начиная с 1955 г., во всех угледобывающих странах мира предпочтение было отдано развитию такого типа ПВВ. Это было связано с тем, что предельный заряд таких ПВВ в уголко-вой мортире опытного штрека достигал величины, равной 1,4 – 1,8 кг, то есть был равен натуральной величине заряда ВВ на шпур при проведении взрывных работ в шахтах. В этом случае выполнение условий безопасности при проведении взрывных работ при наличии МВС в забое способом короткозамедленного взрывания гарантировалось большой величиной предельного заряда и достаточной практической работой взрыва ПВВ в крепких и вязких углях. Вместе с тем, на практике ожидаемый результат по безопасности ведения взрывных работ ионообменными ПВВ в угольных шахтах оказался другим. В период 1954 – 1955 г.г. при применении ионообменных ПВВ в шахтах произошло 11 несчастных случаев и было зафиксировано 12 случаев дефлаграции шпуровых зарядов. В двух случаях выгорание ВВ перешло в детонацию остатков ВВ, в результате чего были травмированы два взрывника. За этот период было взорвано 4,5 млн. штук шпуровых зарядов. Анализ причин аварий при взрывных работах этими ПВВ показал, что вероятность воспламенения метана в

процессе дефлаграции шпурового заряда ионообменными ВВ составляет примерно 1:400000 и намного ниже вероятности воспламенения метана патронами ПВВ в предохранительных оболочках. Тем не менее, горная инспекция Германии запретила дальнейшее применение ионообменных ВВ на основании того, что при взрывании шпуровых зарядов очень часто происходят выгорания ВВ, которые могут быть причиной воспламенения МВС, и «запоздалые» детонации, приводящие к травматизму взрывников. Таким образом, первый опыт применения высокопредохранительных ионообменных ВВ оказался неудачным. Однако он послужил толчком к новому их развитию и совершенствованию, целью которых была борьба с горючестью ПВВ и предотвращением дефлаграций шпуровых зарядов при взрывных работах. При проведении этих работ оказалось, что высокий уровень предохранительных свойств ПВВ еще не гарантирует им безопасность применения при наличии взрывоопасной атмосферы в забое во время взрывных работ. В этом случае выгорающий заряд ПВВ способен вызвать воспламенение взрывоопасной среды вне зависимости от антигризутности самого ВВ. В результате был получен очень важный вывод: для обеспечения безопасности взрывных работ нужно, чтобы ПВВ наряду с высоким уровнем предохранительных свойств и антигризутностью заряда обладало и достаточной устойчивостью против выгорания шпуровых зарядов. Иначе достигнуть безопасности взрывных работ в угольных шахтах не удастся.

Такой важнейшей проблеме, как борьба с выгораниями шпуровых зарядов ПВВ в угольных шахтах посвятили свои работы многие известные во всем мире ученые: Сарториус (1954 г.), Селеман (1955 г.), Галаджий (1961 г.), Андреев и Хотин (1963 г.), Аренс (1963 г.), Гартон и Дик (1965 г.), Эйтц (1965 г.) [46, 47, 48, 49]. Авторы этих работ пришли к выводу, что при короткозамедленном взрывании особое значение имеют уплотнение ВВ в патронах и их раздвижка, в результате чего нарушается передача детонации между патронами в шпурах и ухудшается детонационная способность ВВ. Это способствует затуханию детонации в шпуровом заряде и увеличивает вероятность выгорания ВВ, что приводит к возникновению опасности воспламенения МВС. Поэтому требовались эффективные способы борьбы с выгоранием ВВ в шпурах. Выбор в развитых странах тех или иных способов борьбы с вы-

горанием ВВ в шпуровых зарядах определил дальнейшее развитие предохранительных ВВ. В СССР, а в дальнейшем, и в Украине, как самостоятельном государстве, разработка предохранительных ВВ несколько отличалась от зарубежной. Дело в том, что развитые страны Западной Европы к концу 50-х годов XX века разработали и применяли в угольных шахтах высокопредохранительные ионообменные ВВ, которые имели высокий уровень антигризутности. Однако вследствие отсутствия у этих ВВ устойчивости против выгорания уровень взрывобезопасности при взрывных работах оказался невысоким и был связан исключительно с возникновением дефлаграции шпуровых зарядов. Так, в Германии с 1956 по 1969 г. г. в угольных шахтах произошло 9 аварий, связанных с воспламенением МВС при взрывных работах высокопредохранительными ионообменными ВВ III класса (сверхпредохранительные ВВ по классификации, принятой в Германии) по причине выгорания шпуровых зарядов. В СССР применяемые в угольных шахтах ПВВ имели крайне низкий уровень предохранительных свойств и не достаточную устойчивость против выгорания. Поэтому количество воспламенений МВС при взрывных работах в угольных шахтах СССР в тот период времени было очень большим. По данным работы В.И. Зенина [50], аммонит ПЖВ-20 (IV класс) при расходе около 20000 т в год давал одно воспламенение метана на каждые 2500 т, а угленит Э-6 (V класс) при расходе 12000...13000 т в год – на каждые 6250 т. Следовательно, стояла задача совершенствования ПВВ в отношении как их устойчивости против выгорания, так и предохранительных свойств по газу и угольной пыли. Эти различия в постановке и способах решения задач по развитию безопасных средств и способов ведения взрывных работ в угольных шахтах СССР и за рубежом привели к созданию предохранительных ВВ, принципиально отличающихся друг от друга. Вместе с тем, в Англии Уинстейлей и Шепард в 1952 – 1953 гг. предложили способ взрывания зарядов ВВ в шпурах, заполненных водой под избыточным давлением [51]. Этот способ взрывания прекрасно себя зарекомендовал, так как позволял достичь высокой эффективности взрывания при абсолютной его безопасности, поскольку исключал дефлаграцию ВВ за счет наличия в шпурах воды, которая отделяла заряд от взрывоопасной среды водяной оболочкой. Данный способ получил название гидровзрывание ВВ. С 1957 г.

он начинает применяться в Германии, с 1960 г. – во Франции, с 1961 г. – в Японии, с 1962 г. – в Бельгии, с 1965 г. – в Венгрии и Чехословакии [52, 53].

В конце 50-х годов в СССР были начаты исследования по осуществлению комплексного применения воды для повышения безопасности взрывных работ [54]. Основным направлением этой работы была разработка способов применения воды и гидровзрывания зарядов ВВ для повышения безопасности взрывных работ в угольных шахтах.

В МакНИИ Ф.М. Галаджий с сотрудниками проводит исследования по трем направлениям:

- изыскание возможности применения воды и водных растворов соли в качестве предохранительных оболочек для зарядов ВВ;
- изучение эффективности водораспылительных средств и водяных завес для предупреждения взрывов МВС и ПВС в горных выработках при взрывных работах;
- усовершенствование способов применения водяной забойки шпуров с целью повышения безопасности взрывания и борьбы с выгоранием ВВ в шпурах.

Исследование предохранительного действия водяных оболочек при взрыве ВВ проводилось с целью выяснения возможности создания таких оболочек вокруг патронов и определения минимального защитного слоя воды или водного раствора соли, который предотвращал бы воспламенение взрывоопасной среды и дефлаграцию ВВ в случае нарушения детонации. По результатам этих работ были созданы и начали применяться при взрывных работах на угольных шахтах патроны с водонаполненными оболочками – ПВП-1, ПВП-1у, СП-1 [55, 56]. Распыление воды при взрывных работах в призабойном пространстве и создание водяных завес в горной выработке, где возможно образование взрывоопасной среды, обеспечивает их взрывозащиту вследствие ее флегматизации водой даже от взрыва детонирующего заряда ВВ [57].

Работами МакНИИ [58] было также установлено, что водяная забойка может исключать выгорания зарядов ВВ, повышать безопасность их взрывания во взрывоопасной среде, быть эффективным средством снижения пылеобразования и ядовитых газов в продуктах взрыва ВВ [59]. Было предложено два способа применения

внутренней забойки из воды: заполнение шпуров водой с применением гидрозатворов и помещение в шпуры ампул, заполненных водой или раствором соли. Первый способ является более надежным, однако требует специальных гидрозатворов и водоустойчивых патронов ВВ и совершенно не приемлем в случае пересечения шпуров трещинами. Второй способ с применением водяной забойки в виде ампул гидрозабойки практически легко осуществить, но он не является надежным без применения внутренней запирающей забойки и совершенно не гарантирует безопасность взрывания в трещиноватом массиве. Поэтому в СССР сложилась достаточно сложная доктрина применения ПВВ при взрывных работах, которая включала, с одной стороны, применение специальных заполненных водой двустенных оболочек, гидрозабойки и запирающей забойки шпуров и, с другой стороны, водораспылительных завес для взрывозащиты в горных выработках.

За рубежом в особо опасных условиях ведения взрывных работ практиковалось гидровзрывание зарядов ВВ, которое базировалось на применении водоустойчивых ВВ и средств инициирования (СИ), использовании надежных гидрозатворов, обеспечивающих заданное давление и расход воды в шпурах, контроле наличия воды в шпурах в момент взрыва.

Вполне понятно, что гидровзрывание также не отличалось простотой, требовало дорогого и громоздкого оборудования – насосов, шланг. Поэтому решение проблемы устойчивости ПВВ против выгорания за счет удачно выбранного состава ВВ и осуществление нового подхода в создании малогорючих ВВ выглядели весьма заманчиво и привлекательно, однако требовали новых технических решений в создании подобного типа предохранительных ВВ.

Новый подход при создании устойчивых против выгорания ПВВ был основан на способе, предполагающем снижение горючести ВВ путем ввода в его состав специальных солей, подавляющих горючесть (антидефлаграторы). В Бельгии, Англии и Франции устойчивости зарядов ПВВ против выгорания добивались путем использования в составе ВВ легкоразлагающихся при его нагревании химических соединений, в Германии – способом, основанным на выборе в тройной смеси соотношения между солями $\text{NaNO}_3(\text{KNO}_3) - \text{NH}_4\text{Cl} - \text{CaCO}_3$, обеспечивающего подавление горе-

ния ПВВ.

В известных патентах Англии [60], Бельгии [61], Германии [62] и Франции [63] предлагалось использовать в качестве добавок, обеспечивающих низкую горючесть составов ПВВ, легкоразлагающиеся соединения: оксалат аммония, гидрокарбонат натрия или аммония, калий (натрий) муравьинокислый, фосфат аммония. При этом их количество должно варьироваться в составе от 4 до 13 %. В Германии для изготовления ПВВ с высокой устойчивостью против выгорания предлагалось также использовать тройную смесь со следующим соотношением солей:

$$\frac{NH_4Cl}{KNO_3(NaNO_3)} = 1,67, \quad \frac{NH_4Cl}{CaCO_3} = 5, \quad \frac{KNO_3(NaNO_3)}{CaCO_3} = 3.$$

Реализация указанных технических решений привела к созданию ПВВ, устойчивых против выгорания: в Англии – дайнаджекс и пенобел, в Бельгии – шарбрит 4/50 и кэмпоксит, в Германии – веттерэнергит В и веттеркарбонит С, в Чехии – остривит С (см. табл. 1.5). С появлением устойчивых против выгорания ПВВ в зарубежной практике ведения взрывных работ в шахтах, опасных по газу и взрывам угольной пыли, происходит качественный скачок, связанный с обеспечением этими ПВВ безопасности взрывных работ. Этот скачок обусловлен, с одной стороны, высоким уровнем предохранительных свойств ВВ по газу метану и, с другой, низкой горючестью ПВВ, исключающей его дефлаграцию в шпурах. В результате заряды ПВВ при взрывных работах оказались безопасными во взрывоопасной среде при условии соблюдения величины детонирующих масс шпуровых зарядов.

Необходимо отметить, что, начиная с 1972 г., то есть когда во всех странах Западной Европы были допущены такого типа ПВВ, в угольных шахтах этих стран при взрывных работах не было зафиксировано аварий и травматизма, связанных с взрывами взрывоопасной среды в горных выработках. Эти результаты позволяли использовать взрывные работы мобильно и эффективно практически в любых самых неблагоприятных условиях шахт, даже в тех, где ранее они были запрещены, применялось беспламенное взрывание с помощью гидрокса или кардокса [64] или гид-

Таблица 1.5

Составы и свойства ионообменных ПВВ для угольных шахт, опасных по газу и пыли

ПВВ	Страна	Химический состав в вес, %			Взрывчатые свойства				Предохранительные свойства		
		НЭ	NaNO ₃ (KNO ₃)	NH ₄ Cl	Прочие компоненты ВВ	Работоспособность, ΔV, см ³	Скорость детонации, D, км/с	Предел детонации I, см*	Канальная мортира, M _{пр} , кг	Угловая мортира M _{пр} , кг	Устойчивость против выгорания
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Кемпоксит	Бельгия	12,0	48,0	30,3	Коллоидный хлопок – 0,1-0,3; стеарат кальция – 0,35; оксалат аммония – 6,5; гуаргам – 0,7; кизельгур – 2,0	130	1,7-1,8	5/3	>1,4	1,4	Устойчив
Шарбриг 4/50	Бельгия	9,5	55,25	28,0	Оксалат аммония – 5,0; кремнезем – 0,65; древесная мука – 1,6	95	1,6-1,65	3	2,2	2,0	Устойчив
Веттерэнергит В	Германия	11,0	46,86	34,84	Карбонат кальция – 0,05; коллоидный хлопок – 0,15; древесная мука – 1,0; органическое мыло – 0,05	125	1,75	3-4	>1,2	0,75	Устойчив
Веттерсекьюрит С	Германия	9,0	15,0 (35,3)	33,9	Стеарат кальция – 0,05; древесная мука – 1,45; карбонат кальция – 5,0; каолин – 0,2	100	1,5	3	2,2	2,0	Устойчив
Остравит С	Чехия	11,0	47,1	34,3	Формиат кальция – 2,9; карбонат кальция – 5,0; карбоксименат кальция – 1,0; кремнезем – 0,65; коллоксиллин – 0,15; стеарат цинка – 0,6	110	1,9	4/2	>1,0	0,6	Устойчив
Дайнаджекс	Англия	16,0	15,1	7,0	Нитрат аммония – 27,0; нитрокетчатка – 0,3; натрий КМЦ – 1,0; хлористый натрий – 5,6; формиат натрия – 25,0; кизельгур – 3,0	140	2,3	25/10	1,0	-	Устойчив
Минурекс	Франция	20,0	34,0	22,0	Нитрат аммония – 17,0; мочевины – 7,0 (пена)	180	-	10/5	1,0	-	Устойчив
Угленит 12ЦБ	СССР	12,0	46,0	-	Карбамид – 23,0; коллоксиллин – 0,3; карбонат кальция – 10,0; хлористый натрий – 6,0; натрий КМЦ – 3,0	120	1,9	8/4	1,0	0,6	Неустойчив
Ионит	СССР	10,0	54,0	33,7	Аэросил – 0,8; Натрий КМЦ – 1,0; коллоидный хлопок – 0,2-0,3	110	1,6-1,7	5/1	>1,0	1,0	Неустойчив

Продолжение табл. 1.5

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Специальный метанит У1	Польша	10,0	53,8	34,0	Тальк – 2,2	100	1,7-1,8	5-11	>1,0	0,5	Не устойчив
Угленит М	Россия	11,0	41,1	13,0	Нитрат аммония – 18,2; карбамид – 12,04 коллоидный хлопок – 0,2 – 0,4; NaKMЦ – 2,0; древесная мука – 2,5	200	1,8-1,9	11/9	-	0,3**	Устойчив
Угленит 13П	Украина	13,0	36,4	25,0	Карбонат кальция – 5,0; NaKMЦ – 2,0; нитрат аммония (ЖВ) – 15,0; полистирол – 2,5; стеарат кальция – 0,8; коллоидный хлопок – 0,3	180	2,3-2,4	10/5	1,0	0,1	Устойчив
Угленит 13П/1	Украина	13,0	47,7	30,0	Карбонат кальция – 5,0; NaKMЦ – 2,0; Полистирол – 1,5; стеарат кальция – 0,5; коллоидный хлопок – 0,3	155	2,0-2,1	8/5	1,2	0,25	Устойчив

* - Передача дегонации между сухими патронами в числителе, в знаменателе между мокрыми патронами

** -Свободноводвешенный заряд в опытном штреке
NaKMЦ – натриевая соль карбоксиметилцеллюлозы.

ровзрывание зарядов ВВ в шпурах, заполненных водой под давлением. Произошло упрощение технологии взрывных работ, что положительно сказалось на их эффективности. К сожалению, в СССР дальнейший ход развития ПВВ шел в ином направлении, чем в развитых угледобывающих странах Западной Европы. В силу сложившихся обстоятельств, среди советских специалистов преобладало мнение, что проблему выгорания шпуровых зарядов можно решить, создав мощные ПВВ, детонирующие в самых неблагоприятных условиях короткозамедленного взрывания. Такой вывод был сделан во многом благодаря не совсем удачному опыту применения патронов в водонаполненных оболочках, так как не удалось создать надежную конструкцию патрона, которая обеспечила бы устойчивую детонацию 3 – 4 патронов в шпурах. Кроме того, оказался неправильным сам подход к решению вопроса о создании таких патронов. Он заключался в том, что ядро патрона, окруженное жидкостью, представляло собой ПВВ с невысоким уровнем предохранительных свойств (IV или V класс). При нарушении целостности жидкостной оболочки патроны становились опасными при взрывных работах, так как в этом случае практически их безопасность определялась свойствами самого ПВВ.

Применение мощных ПВВ с низкой антигризутностью при короткозамедленном взрывании позволяло значительно увеличить устойчивость детонации шпуровых зарядов. При этом безопасность взрывных работ такими ПВВ в части их антигризутности можно было бы решить применением качественной забойки (сочетание гидрозабойки и запирающей песчаноглиняной забойки, ингибиторной забойки), осуществлением гидровзрывания, созданием предохранительных водяных завес в выработках и мобильными быстродействующими заслонами, локализирующими взрывы МВС и ПВС в начальной стадии их развития [65]. Однако такой подход в обеспечении безопасности взрывных работ в угольных шахтах себя не оправдал. Поэтому в 80-е годы в СССР начались фундаментальные работы, связанные с разработкой и созданием ПВВ, устойчивых против выгорания, путем снижения горючести ВВ по аналогии с решением этой проблемы в Западной Европе. Окончание этих работ совпало с образованием независимой Украины, в которой они были успешно завершены, хотя и в неполной мере. Тем не менее, в начале 90-х годов в угольных

шахтах стран СНГ начинают применяться углениты 13П и 13П/1, устойчивость против выгорания у которых достигнута применением в составе тройной смеси солей $\text{NaNO}_3 - \text{NH}_4\text{Cl} - \text{CaCO}_3$ [66]. Наряду с этим, в середине 90-х годов происходит замена опасного аммонита Т-19 на аммонит Ф-5, обладающий устойчивостью против выгорания благодаря вводу в состав ВВ ингибитора поджигаемости фосфогипса [67]. Таким образом, к концу XX века на Украине была решена проблема создания ПВВ, обладающих необходимой устойчивостью против выгорания, что исключало выгорание ПВВ в шпурах при взрывных работах. Однако в наследство от СССР Украине достались ПВВ с низким уровнем предохранительных свойств, так как данная проблема в Советском Союзе не была решена в полной мере, как это было сделано в развитых угледобывающих странах мира. Поэтому вполне логично сделать вывод, что в настоящее время актуальность решения вопросов повышения предохранительных свойств ПВВ, особенно антигризутности их зарядов в отношении газа метана, стоит наиболее остро. И, как показал мировой опыт развития ПВВ для угольных шахт, только достижение у ПВВ высокого уровня предохранительных свойств по газу и устойчивости шпуровых зарядов против выгорания может обеспечить необходимый уровень взрывобезопасности взрывных работ в угольных шахтах. Поэтому решение проблемы антигризутности зарядов ПВВ рассматривается как основная задача в новой концепции, обоснование и внедрение которой позволит обеспечить безопасное производство взрывных работах в угольных шахтах Украины.

1.5. Анализ агрессивных факторов взрыва ВВ, оказывающих влияние на безопасность производства взрывных работ

Взрыв ВВ и последующее расширение продуктов детонации происходят в тесном взаимодействии с окружающей средой. Если среда не очень плотная, представляющая собой газообразную смесь, например, воздух или его смесь с метаном, то граница раздела между продуктами детонации ВВ и средой будет перемещаться очень быстро, со скоростью немного большей, чем скорость детонации ВВ. С самого начала процесса расширения давление в продуктах взрыва ВВ будет падать. В

этом случае по продуктам взрыва пойдет волна разряжения, а по газообразной среде, вовлеченной в движение расширяющимися продуктами взрыва, пойдет ударная волна. Вслед за ударной волной движутся расширяющиеся газообразные продукты взрыва ВВ, имеющие высокую температуру и давление. За фронтом ударной волны они постепенно смешиваются с окружающей ВВ газообразной средой и нагревают ее. Проходя по газообразной среде, ударная волна в результате сильного ее сжатия во фронте также нагревает эту среду и вызывает ее свечение. Светятся и продукты взрыва ВВ из-за их высокой температуры. Эти свечения в своей совокупности составляют видимое пламя взрыва. Оно может усиливаться в процессе расширения продуктов взрыва ВВ в результате их смешения с воздухом. В том случае, если продукты взрыва содержат в своем составе промежуточные продукты не полного окисления горючих элементов ВВ, которые способны вступать во вторичные реакции до окисления их кислородом воздуха, то пламя взрыва в сильной степени увеличивается, и время его существования возрастает. В этом случае процесс вторичных реакций до окисления продуктов взрыва ВВ воздухом называют вторичным пламенем взрыва. Очень часто в газообразных продуктах взрыва ВВ могут присутствовать частицы компонентов ВВ, не успевшие до конца прореагировать во фронте детонационной волны и продолжающие процесс реакции при расширении и смешении с газообразной средой, окружающей заряд ВВ, что также усиливает пламя.

Все перечисленные явления, происходящие при взрыве заряда ВВ, могут в той или иной степени способствовать воспламенению взрывоопасной среды. Необходимо отметить, что возникновение воспламенения взрывоопасной среды при взрыве ВВ представляет собой достаточно сложный процесс. Он характеризуется совокупностью действия на взрывоопасную среду нескольких факторов взрыва, что вызывает затруднения в описании механизма воспламенения МВС. В последнее время при создании ПВВ для угольных шахт учитывают три основных фактора, сопровождающих взрыв заряда ВВ. Они считаются наиболее возможными источниками воспламенения метана. Рассмотрим их.

Первый фактор – ударная волна, образованная взрывом заряда ВВ. Распространяясь по газообразной среде, ударная волна сжимает ее. При сжатии газа проис-

ходит его разогрев, который зависит от величины давления во фронте ударной волны: чем оно выше, тем выше температура газа. Было проведено несколько работ, в которых исследовали процесс воспламенения МВС при взрыве в ней зарядов ВВ с целью установления воспламеняющей способности ударных волн [68,69]. В результате критической оценки результатов этих работ был сделан вывод, что прямые и отраженные ударные волны способны вызвать воспламенение метана в том случае, когда время задержки (индукции) реакции окисления МВС при воспламенении будет меньше времени ее сжатия в ударной волне. Поэтому известные ученые – Дж. Тейлор, У. Мюррей, А.А. Борисов, С.М. Когарко, А.В. Любимов, Б.Н. Кукиб и Э.О. Миндели с сотрудниками называют ударную волну наиболее вероятным источником воспламенения МВС при взрыве в ней заряда ВВ.

Второй фактор – нагретые до высокой температуры газообразные продукты взрыва ВВ. После того, как Малляр и Ле-Шателье экспериментально установили, что самовоспламенение МВС происходит со значительной задержкой, они начали обосновывать условия безопасности взрыва ВВ в МВС. При наименьшей температуре, равной $650\text{ }^{\circ}\text{C}$, при которой еще происходило самовоспламенение МВС, задержка составляла 10 сек. С повышением температуры задержка самовоспламенения уменьшалась, а при температуре $2200\text{ }^{\circ}\text{C}$ становилась неувлимо малой. Тогда Малляр и Ле-Шателье заключили, что, безусловно, опасными по отношению к МВС будут те ВВ, температура продуктов взрыва которых равна $2200\text{ }^{\circ}\text{C}$ и выше. При более низких температурах возможность воспламенения МВС определяется временем воздействия на нее продуктов взрыва. Если время воздействия продуктов взрыва ВВ, имеющих высокую температуру, больше времени задержки самовоспламенения МВС при этой температуре, то взрыв ВВ воспламеняет ее. Эти положения в дальнейшем получили развитие в работах Е. Одибера [70], Л.В. Дубнова [71], С.М. Когарко с сотрудниками [72], Льюиса и Эльбе [73], которые сделали следующий вывод. При определенной схеме смешения высокотемпературных продуктов взрыва ВВ по мере проникновения их потока во взрывоопасную МВС они обогащаются метаном и кислородом. Через некоторый промежуток времени образуется горючая (взрывчатая) смесь, состоящая из продуктов взрыва ВВ, метана и воздуха. Если при

этом температура смеси будет выше температуры самовоспламенения МВС, то полученная смесь может воспламениться. Поэтому газообразные продукты взрыва ВВ также рассматриваются как источник воспламенения МВС при взрыве в ней заряда ВВ.

Третий фактор – нагретые или горящие частицы ВВ. Еще в начале XX века некоторые ученые, исследуя явление взрыва, сфотографировав в темноте пламя взрыва зарядов ВВ, помещенных в канал мортиры, обнаружили следы искр, которые приписали твердыми частицам ВВ [74]. В дальнейшем эти опыты были продолжены Е. Одибером [75] и П.И. Кушнеровым [76], которые исследовали роль твердых частиц в процессе воспламенения метана при взрывных работах в шахтах. В наиболее полной мере исследования действия твердых частиц на взрывоопасную МВС при взрыве заряда ВВ были проведены К. Бейлингом [77]. Фотографируя взрыв патронов ВВ, он установил, что твердые неразложившиеся частицы ВВ вместе с газообразными продуктами взрыва выбрасываются в среду, окружающую заряд, в которой они могут дефлагрировать. Именно горением этих частиц К. Бейлинг объясняет их способность воспламенять взрывоопасные смеси. Он провел целенаправленные исследования в опытном штреке и в опытной шахте по изучению воспламеняющего действия горящих частиц ВВ на взрывоопасную МВС. Было установлено, что во время полета горящая частица имеет высокую температуру, при которой время задержки самовоспламенения МВС настолько мало, что это воспламенение происходит даже при большой скорости полета частиц. Таким образом, основным фактором, воздействующим на МВС при взрыве в ней заряда ВВ, расположенного в канале мортиры, К. Бейлинг считал дефлагрирующие частицы ВВ.

На практике рассматривать каждый из опасных факторов взрыва ВВ как источник воспламенения МВС при взрыве в ней заряда оказалось крайне не удобно, потому что при разработке новых типов ПВВ и обосновании уровня их предохранительных свойств такой подход очень часто давал неверный результат. Дело в том, что для каждого фактора необходимо было определять критерий, с помощью которого оценивалась антигризутность заряда ПВВ. Однако надежность полученных критериев оценки антигризутности зарядов ПВВ по каждому фактору нивелирова-

лась их совместным воздействием на МВС. В этом и состояла главная проблема решения количественной задачи определения антигризутности детонирующего заряда ПВВ.

В последние годы было предложено несколько качественных моделей процесса воспламенения МВС при взрыве заряда ПВВ [78, 79, 80], суть которых сводилась к следующему. Для конкретных условий взрывания в опытном штреке зарядов ПВВ, расположенных в канале мортиры (модель шпура), в угловой мортире или открытых свободноповешенных предлагался механизм воспламенения МВС, позволяющий оценить параметры ВВ, влияющие на ее воспламенение, и наметить пути повышения антигризутности ПВВ. В середине 70-х годов XX века Б.Н. Кукиб и Б.И. Вайнштейн предложили модель воспламенения МВС детонирующим открытым зарядом [80,81], которая заключалась в следующем. При детонации заряда на границе его раздела с МВС формируется сильная ударная волна, поддерживаемая расширяющимися продуктами взрыва заряда ПВВ, с давлением во фронте несколько сот атмосфер. Поэтому в МВС в ближайшей к заряду зоне возникает пересжатая детонация, которая характеризуется вынужденным сжиганием метана в смеси при ее адиабатическом сжатии в ударной волне. На этой стадии процесс горения не может быть самораспространяющимся, так как скорость ударной волны гораздо больше скорости стационарной детонации МВС. По мере удаления ударной волны от заряда ее скорость и давление во фронте уменьшаются, уменьшается и скорость выгорания метана. Затухающий процесс вынужденного горения может закончиться переходом пересжатой детонации МВС в стационарный режим при уменьшении давления во фронте ударной волны до критического значения – $P_{кр} = 1,6 \cdot 10^6$ Па, если в этот момент в критической точке выполняется условие $\frac{d\tau}{dt} \leq 1$, где τ – время индукции самовоспламенения МВС при адиабатическом сжатии, t – время сжатия в ударной волне.

Этот критерий для условий воспламенения МВС был предложен Л.В. Дубновым. Если указанное условие не выполняется, то переход вынужденного горения метана непосредственно в стационарный режим детонации МВС на данной стадии процесса не реализуется. Однако ударная волна продолжает распространяться по горючей

смеси, осуществляет ее адиабатический разогрев, но не вызывает больше в ней реакции окисления метана. При этом авторы модели подчеркивают, что пока параметры ударной волны не уменьшатся до критических значений, в процессе воспламенения не могут принимать участие газообразные продукты взрыва ВВ, а также его горящие частицы, так как они контактируют не со взрывчатой МВС, а с продуктами окисления метана, образовавшимися при вынужденном его горении. Поэтому если в критической точке выполняется указанное выше условие, то происходит переход от вынужденного воспламенения к самораспространяющемуся, которое будет чисто ударным, так как вызвано ударной волной без участия других поджигающих факторов. В противном случае самораспространяющееся воспламенение МВС возникает в результате ее контакта с продуктами взрыва ВВ, смешанными с продуктами вынужденного горения метана, образовавшегося при пересжатой детонации или в результате контакта с дефлагрирующими частицами ВВ, которые наиболее долго сохраняют поджигающую способность. При взрыве открытых зарядов ВВ процесс воспламенения характеризуется количеством энергии, выделившейся в детонационной волне, которая может быть оценена величиной скорости детонации ВВ.

При взрыве зарядов ВВ в канале мортиры критические условия воспламенения МВС должны определяться общей выделяемой при взрыве потенциальной энергией, поскольку именно этот параметр определяет температуру продуктов взрыва ВВ, температуру его частиц и интенсивность ударной волны (давление во фронте и время положительной фазы сжатия).

Таким образом, авторы вышеуказанных работ делают, по сути, подмену агрессивных факторов взрыва на параметры самого ВВ. При этом для условий взрывания в канале мортиры наиболее существенным параметром ВВ является его потенциальная энергия взрыва, так как в этих условиях от ее величины зависят все три опасных фактора взрыва, действующих на МВС. Для взрывания открытых зарядов существенными параметрами ВВ, отвечающими за действие опасных факторов взрыва на МВС, являются скорость детонации ВВ и энергия взрыва, выделяющаяся при детонации, которая в целом отличается по величине от значения потенциальной энергии ВВ. В дальнейшем в результате исследований Б.Н. Кукибом и Б.И. Вайнштей-

ном были получены эмпирические зависимости, позволяющие аналитически оценить предохранительные свойства ПВВ по его параметрам – расчетной удельной потенциальной теплоте взрыва и экспериментально измеренной скорости детонации [82, 83]. Они имеют следующий вид:

– для открытых зарядов

$$m_{50} = \frac{1,05 \cdot 10^8}{D^{3,15} (Q_v p_0)^{1,89}}, \text{ г (Б.Н. Кукиб)}, \quad (1.1)$$

$$m_{50} = 1,06 \cdot 10^8 D^{-6} \cdot Q_v^{-1}, \text{ г (Б.И. Вайнштейн)}, \quad (1.2)$$

– для зарядов в канале мортиры

$$m_{50} = 3,035 \cdot Q_v^{-5} (\beta_D - 0,435 \beta_D^2)^{-3}, \text{ г (Б.И. Вайнштейн)}, \quad (1.3)$$

где m_{50} – масса заряда ПВВ, дающая 50% воспламенений МВС;

D – скорость детонации ВВ, км/с;

Q_v – удельная теплота взрыва ВВ, кДж/кг;

p_0 – доля энергии, выделяющаяся при взрыве открытого заряда ВВ, $p_0 = 0,25 \dots 0,4$;

β_D – параметр, характеризующий полноту выделения энергии взрыва при детонации ВВ:

$$\beta_D = \frac{D}{0,63 \rho_{ВВ} \cdot \sqrt{Q_v}},$$

где $\rho_{ВВ}$ – плотность ВВ, г/см³.

Несомненным достоинством предложенной качественной модели процесса воспламенения МВС детонирующим зарядом ПВВ является то, что удалось получить аналитические зависимости изменения массы заряда ВВ, определяющей уровень его предохранительных свойств, от известных параметров ВВ (1.1 – 1.3). Однако эти зависимости имеют низкую надежность расчета, так как скорость детонации ВВ и его потенциальная энергия не в полной мере характеризуют агрессивность действия факторов взрыва на МВС и, главное, не учитывают механизм и химизм реакции окисления метана при воспламенении. Поэтому полученные аналитические зависимости не могут быть критериями, описывающими антигризутность ПВВ по

отношению к взрывоопасной МВС. К тому же результаты многочисленных экспериментов А.И. Гольбиндера, Л.В. Дубнова, Е. Одибера показали, что воспламеняющая способность ВВ зависит от состава продуктов взрыва и еще в большей степени от наличия и концентрации в его составе твердого пламегасителя. Роль пламегасителя в составе ПВВ может быть троякой (по К.К. Андрееву). Во-первых, соль пламегасителя, нагреваясь за счет теплоты взрыва ВВ, снижает температуру продуктов взрыва и параметры образующихся ударных волн в окружающей заряд среде. Во-вторых, смешиваясь, продукты взрыва ВВ, содержащие соли-пламегасители, являющиеся ингибиторами реакции окисления метана, эффективно тормозят эту реакцию, обрывая развитие элементарных цепей активных центров при воспламенении МВС. В-третьих, как показано в работе А.П. Глазковой [84], соли-пламегасители влияют на некоторые реакции, протекающие при взрыве заряда ВВ в зоне детонации, способствуя более полному их завершению и снижению в продуктах взрыва содержания активных промежуточных продуктов (катализаторов) и горящих частиц, способствующих воспламенению МВС. Таким образом, получается, что построение аналитических зависимостей, описывающих влияние на предохранительные свойства тех или иных параметров ПВВ без учета роли пламегасителя и солей-ингибиторов, находящихся в составе ВВ, обречены на провал. Не меньшее значение имеет и количественный состав газообразных продуктов взрыва ВВ, так как от температуры и состава газов зависит содержание радикалов и активных центров, влияющих на уровень предохранительных свойств. Экспериментально доказано, что некоторые газообразные продукты взрыва ВВ являются активными катализаторами процесса воспламенения МВС. Так, Л.В. Дубнов, Е. Одибер, Б.И. Вайнштейн, Ф.М. Галаджий установили, что обогащенные окислами азота продукты взрыва ВВ значительно легче воспламеняют МВС. Аналогичным образом влияют и продукты взрыва ВВ, содержащие в своем составе большое количество окиси углерода и водород. Следовательно, необходимо учитывать неблагоприятный фактор влияния состава продуктов взрыва ВВ на уровень его предохранительных свойств. Все это наглядно показывает, что агрессивных факторов взрыва, влияющих на воспламенение МВС, может быть существенно больше, чем предполагалось ранее. Нельзя не

учитывать и состояние самой взрывоопасной смеси, взрывчатость которой зависит от начального давления и температуры, концентраций в ней метана и кислорода. Поэтому с помощью простой качественной модели, описывающей механизм воспламенения МВС и его связи с параметрами ПВВ, определяющими детонационную способность и энергию взрыва, нельзя получить критические условия антигризутности заряда ПВВ. Для этого необходимо создать достаточно обоснованную теорию предохранительных свойств ВВ, которая учитывала бы энергетические и детонационные параметры ПВВ, его состав продуктов взрыва, механизм и условия протекания химических реакций окисления метана при воспламенении МВС, включая их отрицательный катализ (ингибирование) солями-ингибиторами. Научные вопросы при таком подходе должны решаться с помощью известных положений теории воспламенения горючих газов и предложенных ранее гипотез и представлений о механизме воспламенения МВС как детонирующими, так и выгорающими зарядами ВВ.

Обоснование критических параметров антигризутности заряда ПВВ потребовало проведения новых исследований, направленных на выяснение механизма воспламенения МВС зарядами ВВ и учета отрицательного катализа реакции окисления метана находящимися в составе ВВ солями-ингибиторами.

1.6. Анализ условий воспламенения горючих газов и взрывозащиты при взрывных работах

Вопросы обеспечения взрывобезопасности представляют именно такую область техники, в которой необходимым является непосредственное использование положений современной теории горения и воспламенения газов. В основе этих положений лежат труды советских ученых – академиков Н.Н. Семенова и Я.Б. Зельдовича и их последователей – Д.А. Франк-Каменецкого, О.М. Тодеса, В.В. Воеводского, Л.Н. Хитрина, К.И. Щелкина, А.С. Соколика и многих других, чьи идеи были развиты в начале и середине XX века. Начало развития теории воспламенения и горения газов связано с работами французских ученых Малляра и Ле-Шателье, которые, изучая распространение пламени в трубах, нашли, что в известных условиях

горючие смеси способны к воспламенению и горению с большими скоростями [85]. Открытие в 1881 г. явления детонации в газах Малляром и Ле-Шателье, а также, независимо от них, Бертелло и Вьелем поставило вопрос о том, какой же физический процесс продвигает горение со столь большой скоростью.

В 1883 г. для объяснения явления горения и детонации газов первыми выдвинули гипотезу Малляр и Ле-Шателье, а затем ее количественное описание было дано известным русским ученым Михельсоном в 1890г. [86].

В 20-х годах XX века Н.Н. Семеновым и профессором Хиншельвудом (Англия) вводятся понятия теплового и цепного взрывов. Существование этих двух различных типов взрывов экспериментально было доказано в результате исследований, выполненных в СССР и Англии [87]. При тепловом взрыве при определенной температуре и определенном давлении скорость реакции достигает критического значения, при котором равновесие между тепловыделением вследствие химической реакции и теплоотводом в окружающую среду становится невозможным. Это нарушение теплового равновесия и приводит к прогрессивному саморазогреву и взрыву с большой скоростью. Малляром и Ле-Шателье температура воспламенения горючей смеси трактовалась как ее характеристика. Однако тепловая теория показала, что температура воспламенения не есть особое свойство горючей смеси, что она представляет собой результат обратного воздействия на нормальный химический процесс выделяющегося при нем тепла [88]. В 1927 – 1929 гг. было введено понятие цепного воспламенения [89]. На основании проведенных опытов Н.Н. Семенов и Ю.Б. Харитон определили условия химических реакций, при которых взрывчатый процесс протекал по иной схеме, не имеющей ничего общего с тепловым взрывом. Было экспериментально установлено, что цепное воспламенение свойственно большому числу химических систем. В науку вошло понятие предела реакций, как некой очень узкой области изменения какого-либо внешнего параметра, внутри которого происходит переход от практически инертного состояния вещества к состоянию бурной реакции. Тепловому взрыву обязательно предшествует медленная, но все же вполне измеримая реакция, цепной же взрыв возникает в таких условиях, когда предшествующая ему реакция неизмеримо мала. При тепловом взрыве тепло, выде-

ляемое реакцией, является причиной воспламенения. В цепном взрыве выделение тепла – это следствие развития цепной лавины промежуточных реакций. Теория цепного самовоспламенения базируется на следующих постулатах:

1. Скорость зарождения цепей (скорость процесса, приводящего к возникновению активных центров – носителей цепи) ничтожно мала.

2. Цепи имеют материальный характер, т.е. осуществляются через посредство атомов и радикалов, вступающих в реакцию.

3. Активные центры – атомы и радикалы могут вступать в реакции трех типов:

– обрыв цепей – реакции, в результате которых происходит уничтожение активных центров путем их превращения непосредственно в стабильные молекулы или путем получения малоактивных радикалов;

– продолжение цепей – реакции, при которых в ходе одного элементарного акта образуется столько же активных радикалов, сколько и вступает в него;

– разветвление цепей – реакции, в результате которых количество активных центров в системе увеличивается.

Итак, цепные реакции обязательно сопровождаются образованием активных частиц – радикалов. В ходе реакции количество их может увеличиваться или уменьшаться. Эти изменения весьма существенны и определяют основные черты цепной кинетики реакции воспламенения.

Таким образом, современное состояние теории воспламенения и взрывов горючих смесей позволяет дать объективную оценку состоятельности тех или иных гипотез механизма воспламенения МВС зарядом ПВВ и параметров взрывозащиты в забое выработки при взрывных работах.

В работе [90] эмпирически установлена количественная связь между вероятностью вспышек и взрывов МВС при взрывных работах и уровнем предохранительных свойств ВВ, который определяется величиной предельного заряда. Б.И. Вайнштейн показал, что эта зависимость подчиняется логарифмически нормальному закону и имеет следующий вид [90]:

$$\Psi(P) = 9,276 \cdot \lg \frac{m}{m_{50}}, \quad (1.4)$$

где $\Psi(P)$ – квантиль интеграла вероятности;

m – масса заряда ВВ;

$\frac{m}{m_{50}}$ – приведенная масса заряда ВВ;

Им же получена зависимость массы заряда m_{50} от концентрации метана C :

$$\lg \frac{m_{50}}{m_{50 \min}} = 9,15 - 22,22 \frac{C}{C_{\min}} + 16,9 \left(\frac{C}{C_{\min}} \right)^2 - 3,83 \left(\frac{C}{C_{\min}} \right)^3, \quad (1.5)$$

где $m_{50 \min}$ – масса заряда ВВ, дающего 50% воспламенений при $C_{\min} = 8,5 \dots 9,5$ % метана в МВС.

Сравнив уравнения (1.4) и (1.5), видно, что вероятность воспламенения метана при взрывных работах зависит от массы заряда ВВ и концентрации метана в забое горной выработки. Вместе с тем воспламеняемость МВС зависит не только от концентрации в ней метана и массы заряда ВВ, но и от содержания в МВС инертных веществ, способных создавать предохранительную среду. Установлено, что наибольшее влияние на изменение концентрационных пределов воспламенения МВС оказывает примесь химически активных ингибиторов реакции окисления метана кислородом воздуха [91]. Действие отрицательных катализаторов сводится к рекомбинации активных центров поверхностью соли-ингибитора и к обрыву цепей реакции [92]. Ингибиторами реакции окисления метана кислородом воздуха являются соли щелочных металлов [93]. Наибольшую эффективность имеют галогены щелочных металлов, из них самыми распространенными ингибиторами являются хлористый натрий и хлористый калий, которые, как отмечалось в разделе 1.4, широко используются в составах ПВВ в качестве пламегасителей. Таким образом, получается, что при взрыве ПВВ в МВС ингибитор взрывом распыляется и оказывает взрывоподавляющее действие на способность МВС воспламеняться. Так, в работе [94] М.К. Песоцким с сотрудниками был изучен способ инертизации взрывчатой МВС инертными газами, находящимися в продуктах взрыва ПВВ. Результаты этих исследований показали, что продукты взрыва ПВВ могут флегматизировать МВС и делать ее не взрывчатой. Однако такой способ взрывозащиты при взрывных работах не применяется вследствие низкого уровня предохранительных свойств применяе-

мых ПВВ. В настоящее время рекомендовано создавать предохранительную среду при взрывных работах путем взрывного распыления флегматизатора (вода или порошковый ингибитор), находящегося вместе с зарядом ВВ в уложенных на почве выработки или подвешенных к крепи легко разрушаемых сосудах [95, 96]. Под действием взрыва заряда ВВ происходит распыление флегматизатора во всех направлениях. В процессе расширения облака из продуктов взрыва ВВ и флегматизатора происходит их интенсивное смешивание с рудничной атмосферой, и в случае наличия в ней газа метана она превращается в невзрывчатую смесь [97]. Однако создание предохранительной среды таким способом в ряде случаев носит негативный характер. Это связано с тем, что необходимо применение дополнительных ВВ и СВ, кроме того, данный способ требует безусловного применения как порошковых ингибиторов, так и ВМ. В противном случае, сами ВМ могут быть причиной воспламенения МВС, если они не будут использованы по назначению, а будут просто уничтожены. Производственный опыт взрывных работ показывает, что обеспечить необходимый уровень их взрывобезопасности с помощью дополнительных предохранительных завес (см. раздел 1.2) не удастся во многом по причине «человеческого фактора», поскольку в тяжелых условиях труда шахтерам приходится постоянно решать: применять дополнительные средства взрывозащиты или нет. В случае отсутствия надлежащего контроля над действиями ответственных лиц при взрывных работах, положение иногда усугубляется тем, что ВМ, предназначенные для применения в средствах взрывозащиты, уничтожаются без всяких правил, что зачастую приводит к крупным авариям и катастрофам. Поэтому использование зарядов ПВВ с низким уровнем предохранительности в качестве средств, создающих предохранительную среду в забое, есть достаточно серьезный недостаток современной концепции обеспечения безопасности взрывных работ. Вместе с тем, наличие ингибиторов в продуктах взрыва ВВ поможет создать надежную взрывозащиту в забое выработки, что сэкономит дорогостоящие ВМ и, главное, не даст повода к их неправильному использованию при взрывных работах. Возможность создания взрывозащиты с помощью солей-ингибиторов, способных ингибировать цепные реакции взрывного горения метана, теоретически обоснована в работах М.Е. Краснянского

[98]. Исследования действия эффекта ингибирования на распространение пламени в газовых смесях и химического подавления взрыва горючих газов с воздухом химически активными добавками даны в работах известных ученых В.В. Азатьяна и Е.Т. Денисова [99,100]. Эти исследования указывают на необходимость создания таких условий при взрывных работах, когда взрывозащита в выработке создается автоматически зарядами ПВВ. Модернизация ПВВ, шпуровых зарядов и условий их безопасного применения в угольных шахтах потребует решения целого ряда вопросов по выбору эффективных ингибиторов и разработке способов их применения во взрывчатых веществах.

1.7. Постановка задач исследований и выбор направлений для их решения

Одним из главных показателей процесса ведения взрывных работ в угольных шахтах, опасных по газу и взрывам угольной пыли является взрывобезопасность шахтной атмосферы. Согласно ГОСТ 12.1.010-76 [101], производственные процессы должны разрабатываться таким способом, чтобы вероятность взрыва на любом взрывоопасном участке производства в течение года не превышала 10^{-6} . Однако данные по количеству взрывов, которые привели к авариям при взрывных работах в угольных шахтах, показали, что вероятность взрыва при их производстве существенно выше. В соответствии с п. 1.2 ГОСТ 12.1.010-76, взрывобезопасность производственных процессов должна быть обеспечена взрывопреупреждением, взрывозащитой и организационно-техническими мероприятиями. Эти три положения нормативного документа сформулированы в ныне действующей концепции обеспечения безопасности взрывных работ в угольных шахтах, как показано, к сожалению, не эффективно. Во многом такое положение дел связано с тем, что методы оценки взрывобезопасности производственных процессов в угольных шахтах находятся в стадии научного поиска [102,103]. Тем не менее, одним из наиболее перспективных направлений развития методов, позволяющих оценить взрывобезопасность средств ведения взрывных работ, является моделирование условий их применения во взрывной камере опытного штрека. Натурное моделирование в опытном штреке позволяет сразу делать объективный вывод о взрывобезопасности зарядов ПВВ, средств

взрывания и условий их применения. Поэтому во взрывной камере опытного штрека создают наиболее опасные условия взрывания зарядов при концентрации метана 9...9,5 %, которые моделируют аварийные ситуации в забое при взрывных работах [104]:

1) взрывание заряда ПВВ в канале стальной мортиры без забойки, квалифицируемое как торцевое обнажение заряда при прямом и обратном его инициировании;

2) взрывание заряда ПВВ в угловой мортире с отражательной стенкой, расположенной на расстоянии 0,2...0,6 м от заряда, квалифицируемое как боковое обнажение заряда, когда часть шнура разрушена или пересечена трещинами, заполненными взрывоопасной МВС;

3) взрывание свободноповешенного открытого заряда ВВ, квалифицируемое как взрыв патрона-боевика или всего заряда, находящегося вне шнура, когда он выброшен или находится в полиэтиленовом сосуде водяной завесы.

В результате испытаний в этих условиях зарядов ПВВ определяют максимальную (предельную) массу заряда, при которой отсутствуют воспламенения взрывоопасной среды в опытном штреке. Величина предельного заряда ВВ характеризует уровень его предохранительных свойств в МВС или антигризутность заряда. Следовательно, так как предельный заряд ВВ обеспечивает предотвращение воспламенения взрывоопасной среды, то он характеризует взрывопредупреждение при взрывных работах. Требования к взрывозащите при взрывных работах сформулированы в работах В.И. Стикачева и Н.Р. Шевцова и сводятся к формированию в забое инертных газовых, пенных, водяных или порошковых завес [105]. Для научного обоснования концепции создания взрывозащиты самими зарядами ПВВ достаточно материала пока нет. Но Н.Р. Шевцовым разработана специальная методика, позволяющая экспериментально определить ингибирующую концентрацию в МВС веществ, распыляемых взрывным способом [106], и она может быть использована для оценки эффективности взрывозащиты, создаваемой продуктами взрыва ПВВ. Поэтому можно утверждать, что особая роль в обеспечении безопасности взрывных работ отводится предохранительным ВВ. До настоящего времени обоснование их основных взрыво-технических показателей делалось без должного научного подхода к обеспечению зарядами взрывопредупреждения МВС и взрывозащиты горных

выработок. Это сказалось на надежности, применяемой в настоящее время концепции обеспечения безопасности взрывных работ, в которой ПВВ отводилась далеко не главная роль. Необходимость научного решения проблемы, связанной с неудовлетворительным состоянием безопасности взрывных работах требуют решения следующих задач:

- выполнить анализ состояния безопасности взрывных работ в угольных шахтах и определить причины воспламенения взрывоопасной среды зарядами ПВВ;

- установить критерии безопасного применения шпуровых зарядов при разрушении газоносных горных массивов и обосновать направления модернизации зарядов ПВВ путем выявления свойств солей-ингибиторов и комплексного их использования в составах ВВ;

- выявить влияние солей-ингибиторов на величины зарядов, обеспечивающих безопасность взрывания в МВС, на устойчивость ПВВ к выгоранию, на образование горящих частиц и ударных волн во взрывоопасной среде, контактирующей с зарядом;

- определить параметры образования и расширения двухфазной ингибиторной системы, взаимодействия ее со взрывоопасной средой и условия предотвращения воспламенения;

- обосновать выбор солей-ингибиторов для ПВВ, установить безопасный способ взрывания заряда и разработать конструкцию шпурового заряда ПВВ;

- определить параметры образуемой предохранительной среды при взрывных работах для предотвращения воспламенения МВС;

- провести испытания, промышленную проверку и установить безопасные параметры взрывного действия шпуровых зарядов ПВВ на газоносный горный массив.

Изложенные выше задачи объединены по трем направлениям научных исследований:

1. Исследование условий воспламенения МВС от детонирующего и выгорающего заряда ПВВ.

2. Разработка критериев антигризутности заряда ПВВ, содержащего в составе

соли-ингибиторы.

3. Модернизация зарядов ПВВ и способов их взрывания, обеспечивающих взрывозащиту в горных выработках при взрывных работах.

Системный анализ состояния техники безопасности взрывных работ в угольных шахтах позволяет сделать следующие выводы:

– уровень производственного травматизма в угольных шахтах Украины в 2005 – 2009 гг. составил 2,0...2,3 чел. на 1 млн. тонн добытого угля;

– взрывы газа метана и пыли в угольных шахтах составили более 20% от общего числа травмирующих факторов;

– наиболее взрывоопасными технологическими участками угольных шахт являются выемочные участки и тупиковые подготовительные выработки. Пятая часть взрывов и вспышек газа метана на этих участках произошла при взрывных работах от детонирующих (54 %) и выгорающих (46 %) зарядов ПВВ;

– подавляющее число аварий, связанных с воспламенением МВС, произошло при применении ПВВ IV (67,9 %), а для ПВВ V (14,3 %) и VI (17,8 %) классов;

– при взрывных работах и сотрясательном взрывании в опасных условиях шахт выявлена ненадежность принятой концепции безопасности взрывных работ и взрывозащиты горных выработок;

– при взрывных работах аварийные ситуации возникают вследствие обнажения зарядов, переуплотнения, нарушения детонационной способности ВВ и образования трещин в массиве, заполняющихся МВС;

– необходима модернизация зарядов и ПВВ путем повышения их предохранительных свойств и устойчивости к выгоранию, когда соль-ингибитор реакции окисления метана будет являться ингибитором поджигаемости ПВВ;

– предложено развитие концепции безопасности взрывных работ в угольных шахтах.

РАЗДЕЛ 2

ИССЛЕДОВАНИЕ УСЛОВИЙ ПРИМЕНЕНИЯ ПВВ ПРИ ВЗРЫВНЫХ РАБОТАХ И ФАКТОРОВ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИХ АНТИГРИЗУТНОСТЬ ИХ ЗАРЯДОВ

2.1. Исследование параметров паспортов БВР, применяемых при взрывных работах в шахтах, опасных по газу и пыли

Установлено [107,108], что во время взрывных работ при разрушении газоносных горных массивов, выделяющих горючие газы, опасные ситуации, приводящие к контакту источников воспламенения и взрывоопасной среды, возникают в разрушаемом массиве вблизи забоя выработки и в трещинах (рис. 2.1). Для изучения безопасности и эффективности взрывных работ в забоях горных выработок, отнесенных к опасным по газу и внезапным выбросам угля, породы и газа, были проанализированы существующие на шахтах паспорта БВР. Основные параметры паспортов БВР позволяют получить данные о величине зарядов ПВВ в шпурах, последовательности их взрывания, удельном расходе ВВ и на основании этих данных сделать вывод как о безопасности взрывных работ, так и о их эффективности.

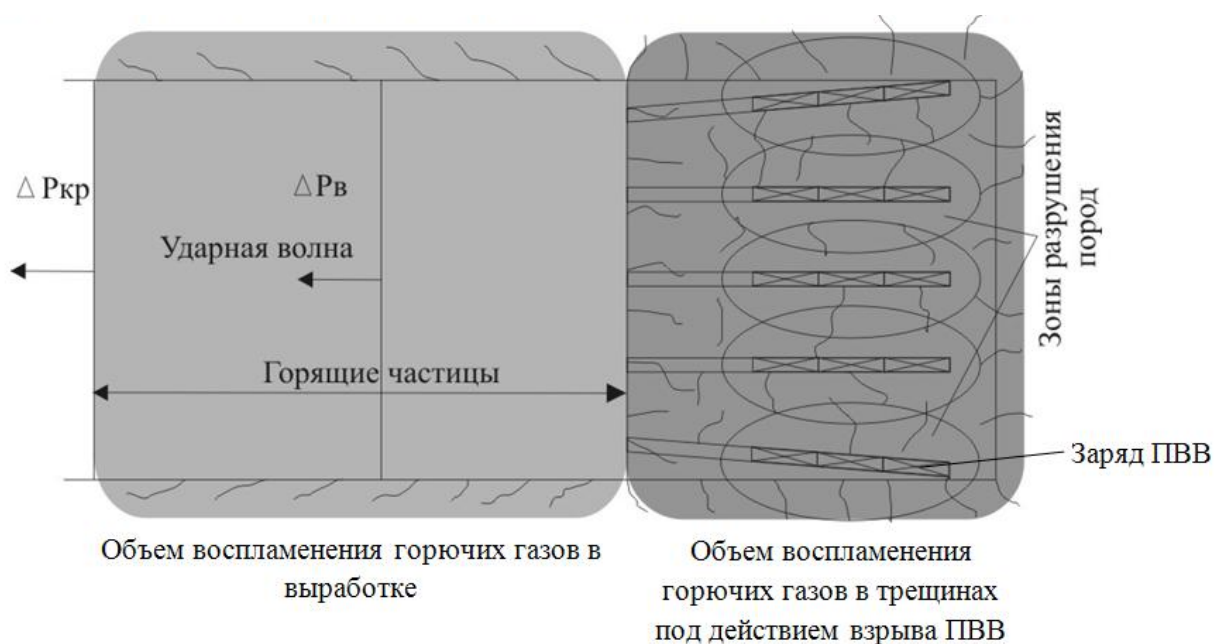


Рис. 2.1. Зоны воспламенения горючих газов при разрушении горных пород

Системному анализу были подвергнуты паспорта БВР, которые использовались или используются на различных шахтах Донбасса при применении ПВВ IV, V, VI классов как при сотрясательном взрывании на выбросоопасных пластах, так и в обычном режиме взрывания в местах, где разрешено применение ПВВ этих классов. Отдельно проанализированы параметры паспортов БВР, используемых для сотрясательного взрывания с применением ПВВ IV класса. Проанализировано 18 паспортов БВР для сотрясательного взрывания в угольных забоях, 20 паспортов БВР для смешанных забоев и 15 паспортов для чистопородных забоев горных выработок. Данные паспорта охватывают всю изменчивую гамму горно-геологических условий шахт Донбасса, в которых залегают особо опасные по выбросам и газу метану угольные пласты. Взрывные работы в этих условиях велись в забоях выработок с сечением (вчерне) $S=7,8...25,4 \text{ м}^2$, крепостью по шкале проф. М.М. Протоdjeяконова угля $f=1,0...2,0$ и горных пород $f=4,0...12,0$.

Аналогично изучены параметры паспортов БВР для условий, где разрешено применение ПВВ V и VI классов. Проанализировано 55 паспортов БВР при применении ПВВ V класса: 39 – угольные забои, 14 – смешанные, 2 – породные и 18 паспортов БВР при применении ПВВ VI класса: 13 – угольные забои, 2 – смешанные и 3 – породные.

Оценка показателей, характеризующих параметры паспорта БВР, проводилась согласно правилам определения оценок и доверительных границ для параметров нормального распределения [109]. Для осуществления такой оценки исходили из того, что эффективность взрывных работ оценивается с помощью коэффициента использования шпура (к.и.ш.).

Коэффициент использования шпура η определяют по формуле:

$$\eta = \frac{l_{ш} - l_{ст}}{l_{ш}} = \frac{l_{зах}}{l_{м}}, \quad (2.1)$$

где $l_{ш}$, $l_{зах}$ – длина шпура и заходки за взрывание соответственно, м;

$l_{ст}$ – длина «стакана» шпура после взрывания.

Эти величины зависят от основных параметров паспорта БВР, в качестве которых выбраны:

1. Отношение количества шпуров – $N_{ш}$ к сечению забоя проводимой выработки вчерне: $N_{ш}/S$, ш/м².

2. Отношение массы ВВ – $m_{ВВ}$ на цикл к числу шпуров (средняя масса заряда в одном шпуре): $m_{ВВ}/N_{ш}$, кг/ш.

3. Отношение массы ВВ в шпуровом заряде к длине шпура: $\frac{m_{ВВ}}{N_{ш}l_{ш}}$, кг/м · ш.

4. Отношение массы ВВ к сечению забоя выработки вчерне: $\frac{m_{ВВ}}{S}$, кг/м².

5. Удельный расход ВВ на 1 м³ взорванной породы – $q_{ВВ}$:

$$q_{ВВ} = m_{ВВ}/Sl_{зак}, \text{ кг/м}^3. \quad (2.2)$$

Средние значения выбранных параметров для принятой выборки позволяют, используя t_v -статистику, сделать оценку выборочной величины и построение доверительного интервала для среднего значения \bar{x} . Выборочное распределение подчиняется t_v -распределению Стьюдента с числом степеней свободы $\bar{n} - 1$. Тогда доверительный интервал, в который с вероятностью $P = 0,95$ попадет истинное значение показателя – $\bar{x}m_u$, равен:

$$P \left\{ \bar{x}m_u - t_v(0,975) \frac{\bar{x}\sigma-1}{\sqrt{\bar{n}}} < m_u < \bar{x}m_u + t_v(0,975) \frac{\bar{x}\sigma-1}{\sqrt{\bar{n}}} \right\} = 0,95,$$

где \bar{n} – объем выборки;

$\bar{x}m_u$ – оценка для генерального среднего квадратичного отклонения $\sigma-1$ нормального распределения, для которого выборочное среднеквадратичное отклонение – S_o равно:

$$S_o^2 = \frac{1}{\bar{n}-1} \sum_{i=1}^{\bar{n}} (x_i - \bar{x})^2.$$

Нижняя – m_u^n и верхняя границы – m_u^g двухстороннего доверительного интервала для средней величины определялись согласно [110] по формулам:

$$m_u^g = \bar{x}_{m_u} + t_v(0,975) \cdot \frac{\bar{x}_{\sigma-1}}{\sqrt{\bar{n}}}, \quad (2.3)$$

$$m_u^H = \bar{x}_{m_u} - t_v(0,975) \cdot \frac{\bar{x}_{\sigma-1}}{\sqrt{\bar{n}}}. \quad (2.4)$$

Согласно t_v -статистики Стьюдента, проанализированы и рассчитаны значения параметров паспортов БВР для ПВВ IV, V, VI классов. В табл. 2.1 представлены результаты расчета для угольных забоев при сотрясательном взрывании ПВВ IV класса. В табл. 2.2 представлены результаты расчетов параметров паспортов БВР при применении ПВВ IV класса в породных и смешанных забоях горных выработок. Аналогично проведены результаты расчетов паспортов БВР при применении ПВВ V и VI классов в угольных, смешанных и породных забоях горных выработок. Показатели паспортов БВР приведены для ПВВ IV класса в табл. 2.3 и 2.4, а для ПВВ V и VI классов – в табл. 2.5.

Средние значения параметров паспортов БВР при взрывных работах ПВВ IV, V, VI классов по каждому типу забоев горных выработок дано в табл. 2.6. Результаты сравнения показателей паспортов БВР следующие.

Коэффициент использования шпуров к.и.ш. во всех забоях, где применяют ПВВ IV, V и VI классов, примерно одинаковый. Для ПВВ IV класса $\eta_{IV} = 0,871 \dots 0,889$, для V класса $\eta_V = 0,862 \dots 0,89$, для VI класса $\eta_{VI} = 0,856 \dots 0,889$. Вместе с тем, другие параметры паспортов БВР отличаются друг от друга. Это связано с тем, что ПВВ разных классов существенно отличаются между собой по работоспособности. Поэтому для достижения одних и тех же показателей проведения выработок приходится изменять расходы бурения и ВВ. При применении ПВВ V и VI классов расход ВВ выше, чем при ПВВ IV класса.

Для оценки взрывопреупреждения МВС при взрывных работах большое значение имеет масса шпурового заряда ВВ, взрываемого в забое. Она дает достаточно объективную оценку безопасности взрывания ВВ в МВС, что отмечено в работах

Таблица 2.1

Расчет параметров паспортов БВР при применении ПВВ IV класса

№	Крепость угля в забое выработки по шкале М.М. Протодьяконова	$\frac{N_{ш}}{S_{вч}}$, шп./м ²	$\frac{m_{ВВ}}{N_{ш}}$, кг/шп.	$l_{ш,ср}$, м	$\frac{m_{ВВ}}{l_{ш}}$, кг/м	$l_{зак}$, м	q_1 , кг/м ³	$\frac{m_{ВВ}}{S_{вч}}$, кг/м ²	$\frac{m_{ВВ}}{S_{вч} \cdot l_{зак}}$, кг/м ³ (q_2)	q_1/q_2	К.И.Ш.
Угольные забои (согрясательное взрывание ВВ аммонитом Т-19)											
1	f=1,0 – 1,5	1,8	0,567	2,04	0,278	1,8	0,500	1,02	0,567	0,88	≈ 0,882
2	f=1,5 – 2,5	1,988	0,656	2,03	0,323	2,0	0,642	1,304	0,652	0,984	≥ 0,985
3	f=1,0 – 1,5	1,933	0,678	2,00	0,339	1,8	0,655	1,311	0,728	0,9	≈ 0,9
4	f=1,0 – 1,5	1,706	0,724	2,00	0,362	1,8	0,618	1,235	0,686	0,9	≈ 0,9
5	f=1,2	1,625	0,6	2,30	0,261	2,0	0,424	0,975	0,488	0,869	≈ 0,87
6	f=1,2	1,04	0,6	2,30	0,261	2,0	0,271	0,623	0,311	0,871	≈ 0,87
7	f=1,2	1,604	0,6	2,30	0,261	2,0	0,419	0,962	0,481	0,871	≈ 0,87
8	f=1,5	2,180	0,6	2,00	0,300	1,8	0,654	1,308	0,726	0,9	≈ 0,9
9	f=1,5	2,692	0,886	1,99	0,445	2,0	1,198	2,385	1,192	1,005	1,005
10	f=1,2	1,170	0,6	2,30	0,261	2,0	0,305	0,702	0,351	0,869	0,87
11	f=1,3	1,826	0,6	2,30	0,261	2,0	0,477	1,096	0,548	0,871	0,87
12	f=1,5	1,753	0,6	2,30	0,261	2,3	0,458	1,052	0,457	1,002	1,0
13	f=1,5	1,889	0,6	3,00	0,200	2,8	0,378	1,133	0,405	0,934	0,933
14	f=1,5	2,000	0,6	3,00	0,200	2,5	0,400	1,200	0,480	0,833	0,833
15	f=1,3	2,828	0,6	1,60	0,375	1,4	1,060	1,697	1,212	0,875	0,875
16	f=1,25	2,954	0,300	1,20	0,050	0,7	0,738	0,886	1,266	0,583	0,583
17	f=1,25	4,250	0,529	1,84	0,287	2,0	1,220	2,250	1,125	1,048	1,087
18	f=2,0	2,222	0,736	1,854	0,397	1,44	0,882	1,636	1,136	0,776	0,777
19	Среднее значение	2,081	0,615	2,131	0,296	-	-	-	$\bar{x} = 0,712$	-	$\bar{x} = 0,889$
									$\bar{x}_{\sigma-1} = 0,712$		

Таблица 2.2

Результаты расчета параметров паспортов БВР при применении ПВВ IV класса

№	Крепость пород в забое выра- ботки	$\frac{N_{ш}}{S_{вч}}$, шп./м ²	$\frac{m_{BB}}{N_{ш}}$, кг/шп.	$l_{шср}$, м	$\frac{m_{BB}}{l_{ш}}$, кг/м	$l_{зах}$, м	q_1 , кг/м ³	$\frac{m_{BB}}{S_{вч}}$, кг/м ²	$\frac{m_{BB}}{S_{вч} \cdot l_{зах}^3}$, кг/м ³ (q_2)	q_1/q_2	к.и.ш.	Примечания
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Породные забой												
1	$f_{пор} = 3-4$	1,295	0,817	1,74	0,469	1,40	0,608	1,058	0,755	0,805	0,805	верхняя подрывка $S_{пор} = 13,9$; $S_{в} = 20,5$
2	$f_{пор} = 4$	1,406	0,900	1,82	0,494	1,60	0,694	1,266	0,791	0,877	0,879	верхняя подрывка $S_{пор} = 12,8$; $S_{в} = 22,0$
3	$f_{пор} = 3-4$ угл. 10П	1,882	1,000	1,80	0,555	1,50	1,045	1,882	1,255	0,833	0,833	верхняя подрывка $S_{пор} = 8,5$; $S_{в} = 16,0$
4	$f_{пор} = 4-6$	3,00	0,869	1,67	0,520	1,50	1,561	2,608	1,738	0,898	0,898	ч/п забой
5	$f_{пор} = 4-6$	2,483	0,958	2,15	0,446	1,60	1,106	3,379	1,487	0,744	0,744	ч/п забой
6	$f_{пор} = 6-10$	3,472	0,900	2,19	0,410	2,0	1,424	3,125	1,562	0,911	0,913	ч/п забой
7	$f_{пор} = 4-6$	4,333	0,850	1,97	0,432	1,80	1,871	3,686	2,048	0,914	0,914	ч/п забой
8	$f_{пор} = 7-9$	3,524	0,876	1,75	0,499	1,75	1,760	3,086	1,763	0,998	1,000	ч/п забой, детона- тор ДемЗbN
9	$f_{пор} = 7-9$	4,123	0,900	1,80	0,500	1,50	2,062	3,711	2,474	0,833	0,833	ч/п забой
10	$f_{пор} = 7-8$	4,407	0,893	2,08	0,430	1,90	1,895	3,938	2,073	0,914	0,913	ч/п забой
11	$f_{пор} = 7-8$	4,407	0,893	1,98	0,451	1,80	1,988	3,938	2,188	0,909	0,909	ч/п забой
12	$f_{пор} = 8-9$	3,270	0,891	1,78	0,500	1,60	1,634	2,915	1,822	0,897	0,899	ч/п забой

Продолжение табл. 2.2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
13	$f_{\text{пор}} = 7-9$	4,5	1,070	1,97	0,544	1,60	2,448	4,817	3,010	0,813	0,812	ч/п забой
14	$f_{\text{пор}} = 8$ угл. Э-6	1,651	1,000	1,80	0,555	1,62	0,9172	1,651	1,019	0,900	0,900	верхняя подрывка $S_{\text{пор}} = 10,9 \text{ м}^2$; $S_{\text{в}} = 16,0$
15	Среднее значение - x - $x_{\sigma-1}$	3,352	0,901	1,908	0,475				1,809		0,877	
		1,150	0,063	0,172	0,041				0,638		0,0674	

Таблица 2.3

Результаты расчета параметров паспортов БВР при применении ПВВ IV класса

№	Крепость угля в забое выра- ботки по шка- ле М.М. Про- тодяконова	$\frac{N_{ш}}{S_{бч}}$, шп./м ²	$\frac{m_{BB}}{N_{ш}}$, кг/шп.	$l_{шср}$, м	$\frac{m_{BB}}{l_{ш}}$, кг/м	$l_{зах}$, м	q_1 , кг/м ³	$\frac{m_{BB}}{S_{бч}}$, кг/м ²	$\frac{m_{BB}}{S_{бч} \cdot l_{зах}}$, кг/м ³ (q_2)	q_1/q_2	К.И.Ш.
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Смешанные забой											
1	$f_y = 1,0$ $f_{кр} = 2-3$ $f_{пучв} = 7-8$	1,496	0,947	2,084	0,454	1,5	0,68	1,417	0,945	0,72	0,72
2	$f_y = 1,0$ $f_{кр} = 5-6$ $f_{пучв} = 3-5$	1,575	0,6	1,2	0,5	1,0	0,787	0,945	0,945	0,833	0,833
3	$f_y = 1,0$ $f_{пор} = 4-6$	2,561	0,729	1,8	0,405	1,53	1,037	1,866	1,219	0,85	0,85
4	$f_y = 1,5$ $f_{пор} = 4-6$	2,140	0,79	1,8	0,439	1,53	0,939	1,69	1,104	0,85	0,85
5	$f_y = 1,4$ $f_{пор} = 5-7$	1,976	0,684	1,71	0,4	1,45	0,794	1,352	0,932	0,848	0,848
6	$f_y = 1,5$ $f_{пор} = 7-9$	2,812	0,744	1,8	0,414	1,62	1,163	2,094	1,292	0,9	0,9
7	$f_y = 1,5$ $f_{пор} = 7-9$	2,876	0,736	1,8	0,409	1,53	1,176	2,118	1,384	0,85	0,85
8	$f_y = 1,3$ $f_{пор} = 4-6$	2,278	0,958	2,03	0,472	1,5	1,075	2,183	1,456	0,738	0,739

Продолжение табл. 2.3

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
9	$f_y = 1,0$ $f_{\text{пор}} = 4-6$	2,529	0,948	1,97	0,481	1,5	1,217	2,396	1,598	0,762	0,761
10	$f_y = 1,25$ $f_{\text{пор}} = 4-6$	2,552	0,957	2,02	0,473	1,5	1,208	2,441	1,628	0,742	0,743
11	$f_y = 1,5$ $f_{\text{пор}} = \text{нет дан-}$ ных	2,439	0,354	1,49	0,238	1,5	0,579	0,863	0,576	1,006	1,006
12	$f_y = 1,5$ $f_{\text{пор}} = \text{нет дан-}$ ных	2,982	0,3	1,29	0,233	1,0	0,693	0,894	0,894	0,775	0,775
13	$f_y = 1,0$ $f_{\text{пор}} = 7-9$	4,980	0,659	1,65	0,399	1,5	1,987	3,28	2,187	0,909	0,909
14	$f_y = 1,5$ $f_{\text{пор}} = 4,0$	2,723	0,6	1,78	0,337	1,6	0,919	1,634	1,021	0,9	-
15	$f_y = 1,5-2,0$ $f_{\text{пор}} = 7-9$	2,201	0,840	1,8	0,457	1,6	1,027	1,849	1,156	0,889	0,889
16	$f_y = 1,0$ $f_{\text{пор}} = 7-9$	4,38	0,890	1,76	0,505	1,75	2,211	3,9	2,229	0,992	0,994
17	$f_y = 1,0$ $f_{\text{пор}} = 7-9$	5,118	0,867	1,91	0,454	1,87	2,322	4,436	2,372	0,979	0,979
18	$f_y = 1,0$ $f_{\text{пор}} = 7-9$	5,422	0,713	1,73	0,412	1,7	2,233	3,867	2,274	0,982	0,989
19	$f_y = 1,0$ $f_{\text{пор}} = 8-9$	4,478	0,87	1,95	0,447	1,87	2,001	3,895	2,083	0,96	0,959

Продолжение табл. 2.3

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
20	$f_y = 1,0$ $f_{\text{Гор}} = 4-7$	4,328	0,896	1,98	0,452	1,86	1,958	3,88	2,086	0,938	0,939
21	Среднее значение - x - $x_{\sigma-1}$	3,092	0,754	1,778	0,420				1,469		0,871
		1,2198		0,232	0,0476				0,555		0,09

Таблица 2.4

Значения параметров паспортов БВР с применением ПВВ IV класса

№ п/п	Показатель паспорта БВР	Тип забоев		
		угольный	смешанный	породный
1	2	3	4	5
1	Количество шпуров на 1 м ² выработки вчерне, шт./м ²	2,081±0,366	3,092±0,570	3,352±0,742
2	Масса заряда ВВ на шпур, кг/шп.	0,615±0,00562	0,754±0,0869	0,901±0,041
3	Средняя длина шпура, м	2,13±0,212	1,778±0,108	1,908±0,113
4	Масса ВВ на 1 п.м. шпура, кг/м	0,296±0,033	0,420±0,035	0,475±0,027
5	Удельный расход ВВ на 1 м ³ горного массива (уголь, порода)	0,712±0,162	1,469±0,259	1,809±0,419
6	Коэффициент использования шпура (к.и.ш.)	0,889±0,052	0,871±0,042	0,877±0,044

[111, 112, 113]. Однако для обоснования массы шпурового заряда ВВ, как показателя антигизутности заряда при взрывных работах, необходимо учитывать достаточность совершаемой работы взрыва заряда при разрушении пород. Это необходимо для того, чтобы установить, какие величины шпуровых зарядов ВВ при взрывных работах можно применять безопасно, достигая необходимой эффективности взрывных работ, то есть необходимо достижение компромисса между эффективностью шпурового заряда ВВ и безопасностью при его взрывании. Таким критерием, характеризующим шпуровые заряды, является масса ВВ, от которой зависят предохранительные свойства ВВ и работа взрыва шпурового заряда.

В работе [114] приведены основы расчета массы шпуровых зарядов ПВВ с учетом их работоспособности (фугасности) и уровня предохранительных свойств. В основе расчета лежит прямо пропорциональная зависимость массы заряда ВВ от

Таблица 2.5
 Расчетные значения показателей параметров паспортов БВР с применением ПБВ V и VI классов

Количество за-боев, n	$\frac{N_{ш}}{S_{бч}}$, ШП./М ²	$\frac{m_{BB}}{N_{ш}}$, КГ/ШП.	$l_{ш}$, М	$\frac{m_{BB}}{N_{ш} \cdot l_{ш}}$, КГ/М	К.И.Ш.	$\frac{m_{BB}}{S_{бч} \cdot l_{зак}}$, КГ/М ³
1	2	3	4	5	6	7
V класс						
Угольные забои						
$n = 39$ $t_{13}(0,975) = 2,03$	$\bar{x}_{\sigma_n} = 0,917$	$\bar{x}_{\sigma_n} = 0,163$	$\bar{x}_{\sigma_n} = 0,216$	$\bar{x}_{\sigma_n} = 0,066$	$\bar{x}_{\sigma_n} = 0,067$	$\bar{x}_{\sigma_n} = 0,479$
	$\bar{x}_{\sigma_{n-1}} = 0,929$	$\bar{x}_{\sigma_{n-1}} = 0,165$	$\bar{x}_{\sigma_{n-1}} = 0,219$	$\bar{x}_{\sigma_{n-1}} = 0,067$	$\bar{x}_{\sigma_{n-1}} = 0,068$	$\bar{x}_{\sigma_{n-1}} = 0,485$
	$\bar{x} = 3,245 \pm 0,302$	$\bar{x} = 0,625 \pm 0,054$	$\bar{x} = 1,613 \pm 0,071$	$\bar{x} = 0,388 \pm 0,022$	$\bar{x} = 0,89 \pm 0,022$	$\bar{x} = 1,442 \pm 0,158$
Смешанные забои						
$n = 14$ $t_{13}(0,975) = 2,16$	$\bar{x}_{\sigma_n} = 0,487$	$\bar{x}_{\sigma_n} = 0,163$	$\bar{x}_{\sigma_n} = 0,199$	$\bar{x}_{\sigma_n} = 0,081$	$\bar{x}_{\sigma_n} = 0,054$	$\bar{x}_{\sigma_n} = 0,436$
	$\bar{x}_{\sigma_{n-1}} = 0,506$	$\bar{x}_{\sigma_{n-1}} = 0,169$	$\bar{x}_{\sigma_{n-1}} = 0,206$	$\bar{x}_{\sigma_{n-1}} = 0,084$	$\bar{x}_{\sigma_{n-1}} = 0,056$	$\bar{x}_{\sigma_{n-1}} = 0,452$
	$\bar{x} = 2,769 \pm 0,292$	$\bar{x} = 0,958 \pm 0,097$	$\bar{x} = 2,043 \pm 0,119$	$\bar{x} = 0,471 \pm 0,048$	$\bar{x} = 0,862 \pm 0,032$	$\bar{x} = 1,529 \pm 0,26$
Породные забои						
$n = 2$	$\bar{x} = 1,935$	$\bar{x} = 1,2$	$\bar{x} = 2,0$	$\bar{x} = 0,6$	$\bar{x}_{\sigma_n} = 0,025$ $\bar{x}_{\sigma_{n-1}} = 0,035$ $\bar{x} = 0,875$	$\bar{x}_{\sigma_n} = 0,038$ $\bar{x}_{\sigma_{n-1}} = 0,0534$ $\bar{x} = 1,33$

Продолжение табл. 2.5

1	2	3	4	5	6	7
VI класс						
Угольные забои						
$n = 13$ $t_{12} (0,975)$	$\bar{x}_{\sigma_n} = 0,662$	$\bar{x}_{\sigma_n} = 0,0728$	$\bar{x}_{\sigma_n} = 0,244$	$\bar{x}_{\sigma_n} = 0,054$	$\bar{x}_{\sigma_n} = 0,085$	$\bar{x}_{\sigma_n} = 0,496$
	$\bar{x}_{\sigma_{n-1}} = 0,627$	$\bar{x}_{\sigma_{n-1}} = 0,0757$	$\bar{x}_{\sigma_{n-1}} = 0,254$	$\bar{x}_{\sigma_{n-1}} = 0,056$	$\bar{x}_{\sigma_{n-1}} = 0,084$	$\bar{x}_{\sigma_{n-1}} = 0,516$
	$\bar{x} = 2,627+0,379$	$\bar{x} = 0,552+0,046$	$\bar{x} = 1,52+0,154$	$\bar{x} = 0,368+0,034$	$\bar{x} = 0,871+0,051$	$\bar{x} = 1,148+0,312$
Смешанные забои						
$n = 2$	$\bar{x}_{\sigma_n} = 0,285$	$\bar{x}_{\sigma_n} = 0,128$	$\bar{x} = 1,8$	$\bar{x}_{\sigma_n} = 0,071$	$\bar{x}_{\sigma_n} = 0,011$	$\bar{x}_{\sigma_n} = 0,342$
	$\bar{x}_{\sigma_{n-1}} = 0,366$	$\bar{x}_{\sigma_{n-1}} = 0,181$		$\bar{x}_{\sigma_{n-1}} = 0,10$	$\bar{x}_{\sigma_{n-1}} = 0,015$	$\bar{x}_{\sigma_{n-1}} = 0,483$
	$\bar{x} = 3,044$	$\bar{x} = 0,718$		$\bar{x} = 0,399$	$\bar{x} = 0,889$	$\bar{x} = 1,383$
Породные забои						
$n = 3$ $t_2 (0,975) = 4,3$	$\bar{x}_{\sigma_n} = 0,882$	$\bar{x}_{\sigma_n} = 0,108$	$\bar{x} = 1,5$	$\bar{x}_{\sigma_n} = 0,0718$	$\bar{x}_{\sigma_n} = 0,042$	$\bar{x}_{\sigma_n} = 0,37$
	$\bar{x}_{\sigma_{n-1}} = 1,08$	$\bar{x}_{\sigma_{n-1}} = 0,132$		$\bar{x}_{\sigma_{n-1}} = 0,088$	$\bar{x}_{\sigma_{n-1}} = 0,051$	$\bar{x}_{\sigma_{n-1}} = 0,453$
	$\bar{x} = 2,338+2,06$	$\bar{x} = 0,939+0,33$		$\bar{x} = 0,626+0,22$	$\bar{x} = 0,856+0,126$	$\bar{x} = 1,673+1,123$

Таблица 2.6

Средние значения параметров паспортов БВР при взрывных работах ПВВ IV, V и VI классов

№ п	Параметры паспорта БВР	Тип забоя и класс ПВВ при БВР											
		угольный			смешанный			породный					
		IV кл.	V кл.	VI кл.	IV кл.	V кл.	VI кл.	IV кл.	V кл.	VI кл.			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11			
1	Количество шпуров на м ² выработки в черне, шт./м ²	2,081	3,245	2,628	3,092	2,769	3,044	3,352	1,935	2,338			
2	Масса заряда ВВ на шпур, кг/шт.	0,615	0,625	0,552	0,754	0,958	0,718	0,901	1,20	0,939			
3	Средняя длина шпура, м	2,13	1,613	1,52	1,778	2,043	1,80	1,908	2,0	1,5			
4	Масса ВВ на 1 м шпура, кг/м	0,296	0,388	0,369	0,42	0,471	0,399	0,475	0,6	0,626			
5	Удельный расход ВВ на 1 м ³ породы за цикл	0,712	1,442	1,148	1,468	1,529	1,383	1,809	1,33	1,673			
6	Коэффициент использования шпура (к.и.ш.)	0,889	0,89	0,871	0,871	0,862	0,889	0,877	0,875	0,856			
7	Масса ПВВ на 1 м шпура отн-но ПВВ IV класса	1,00	1,31	1,25	1,00	1,12	0,95	1,00	1,26	1,32			
8	Удельный расход ПВВ отн-но ПВВ IV класса	1,00	2,03	1,61	1,00	1,04	0,94	1,00	0,74	0,90			

объема взрывающейся породы или принцип постоянства удельного расхода ВВ. Из этого принципа следует, что зная удельный расход одного ВВ (массу заряда в шпуре), можно найти удельный расход любого другого ВВ или массу его шпурового заряда при условии, что известна их работоспособность (фугасность) в сопоставимых условиях взрывания. Поэтому была поставлена задача определения коэффициентов, учитывающих изменение работоспособности ВВ в зависимости от их класса.

В настоящее время приняты и используются следующие экспериментальные методы определения работоспособности (фугасности) ВВ: метод Трауцля с использованием свинцовых бомб и метод баллистического маятника [115].

Для зарядов ВВ, испытанных в свинцовой бомбе, получены коэффициенты e_1 и e_2 , учитывающие изменение работоспособности зарядов в зависимости от фугасности ВВ относительно эталона (аммонит №6ЖВ): e_1 – когда плотности ВВ при испытании различные, а массы зарядов ВВ в бомбе одинаковые; e_2 – когда объем заряда ВВ и его плотность одинаковы.

В результате проведенных исследований на двухмаятниковой баллистической установке [116] была получена эмпирическая зависимость работы взрыва – A от параметров ВВ:

$$A = \left[\frac{2,4055}{\left(\frac{Q_v \cdot \eta_\varepsilon \cdot m_{BB} \cdot N_y}{N_2^{k-1}} \right)^{0,8} \cdot (m_{BB} \cdot D^2 \cdot \eta_\varepsilon)^{0,2}} \right]^{-1}, \text{ Дж}, \quad (2.5)$$

где k – показатель адиабаты продуктов взрыва ВВ;

m_{BB} – масса заряда ВВ, кг;

N_y – объем взрывной камеры установки в молях воздуха: $N_y = 4,464 \cdot 10^{-2}$;

N_2 – число молей газообразных продуктов взрыва ВВ;

η_ε – коэффициент, учитывающий влияние соли-ингибитора на работоспособность ВВ.

Для ВВ, продукты взрыва которых содержат конденсированную фазу – соль-ингибитор или другую добавку, уравнение (2.5) запишется в виде:

$$A = \left\{ \frac{Q_v (1 - \varepsilon_p)^{0,5} (1 - \varepsilon_6)}{N_2^{k-1}} \right\}^{0,8} \cdot \{D^2 (1 - \varepsilon_p)^{0,5} (1 - \varepsilon_6)\}^{0,2}, \text{ кДж/кг}, \quad (2.6)$$

где ε_6 – содержание балластной добавки;

ε_p – содержание соли, образованной при взрывной реакции ВВ.

При взрывании шпуровых зарядов различных ВВ в одинаковых горно-геологических условиях установлена функциональная связь между величиной работы взрыва ВВ и значением его удельного расхода:

$$q_{BB} = 24173,43 A^{-1,229}, \text{ кг/м}^3. \quad (2.7)$$

Тогда коэффициент e_3 , который корректирует удельный расход ВВ в зависимости от фугасности ВВ – A_{BB} и фугасности эталонного ВВ – $A_э$, будет равен:

$$e_3 = \frac{q_{BB}}{q_э} = \left(\frac{A_{BB}}{A_э} \right)^{-1,229}. \quad (2.8)$$

Развитие экспериментальных методов определения фугасности ВВ позволило с помощью дифференциального баллистического маятника определить относительную работоспособность ВВ [117] через приращение работы взрыва испытываемого ВВ: $\Delta A = A_э - A_u$. Величина ΔA определяется по значению угла отклонения дифференциального баллистического маятника. Падение напряжения на сопротивлении датчика – μV (мВ) пропорционально углу отклонения маятника и, следовательно, величине ΔA . Коэффициент относительной работоспособности ВВ определяется по формуле:

$$e_4 = 1 - 0,359 \mu V^{0,702}. \quad (2.9)$$

В результате проведенных исследований для известных типов и классов ВВ удалось определить коэффициент пересчета удельного расхода ВВ, учитывающий их фугасность относительно эталонного ВВ. В качестве эталона был принят амматол 80/20 (80% – аммиачная селитра, 20% – тротил), фугасность которого принята за единицу. Результаты расчета коэффициентов пересчета удельного расхода ВВ по отношению к эталонному – e_1 , e_2 , e_3 и e_4 приведены в табл. 2.7.

Таблица 2.7

Коэффициенты пересчета массы зарядов ВВ в зависимости от их работоспособности

Класс ВВ	Наименование ВВ	Средняя плотность ВВ в патронах, кг/м ³	Метод свинцовой бомбы						Метод ДБУ		Метод дифференциального маятника		Среднее значение e	
			$V_{ВВ}/V \cdot 10^2$	e_1	$\Delta V, \text{см}^3$	e_2	$A, \text{кДж/кг}$	e_3	$\mu U, \text{мВ}$	e_4	Аммотол 80/20	Аммонит № 6ЖВ		
I	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13		
II	Аммотол 80/20	1000	2,2323	1,0	387	1,0	3172,1	1,0	0,0	1,0	1,0	-		
	Аммонит № 6ЖВ	1050	2,114	1,05	391	1,04	3326,4	1,06	-0,06	1,05	1,05	1,0		
	Аммонал скальный № 1	1450	1,353	1,56	462	1,72	4361,0	1,48	-	-	1,58	1,5		
III	Аммонит	1050	2,565	0,82	312	0,85	2680,5	0,81	-	-	0,83	0,79		
	АП-5ЖВ													
IV	Аммониты:													
	ПЖВ-20	1050	2,973	0,75	260	0,71	2359,6	0,70	-	-	0,72	0,69		
	Т-19	1050	2,974	0,75	265	0,72	2420,0	0,72	-0,55	0,76	0,74	0,70		
V	Ф-5	1060	-	-	-	-	-	-	-0,60	0,75	0,75	0,71		
	Углениты:													
	Э-6	1200	3,94	0,56	150,5	0,47	1599,5	0,43	-1,56	0,51	0,49	0,47		
VI	13П	1220	3,22	0,69	193,0	0,61	1797,7	0,50	-1,4	0,55	0,59	0,56		
	13П/1	1200	3,84	0,58	155,8	0,48	1590	0,43	-1,64	0,49	0,49	0,47		
	Углениты:													
VI	12ЦБ	1300	4,28	0,46	119	0,40	1172,5	0,30	-1,98	0,42	0,40	0,38		
	10П	1200	3,874	0,57	154	0,48	1460	0,39	-1,89	0,44	0,47	0,45		

Примечание. Знак «-» означает, что ВВ имеет работоспособность меньше, чем у эталонного ВВ.

В шахтах, опасных по газу и пыли, аммониты ПЖВ-20 или Т-19 (IV класс) приняты за эталонные ВВ, так как для большого количества паспортов БВР точно определен удельный расход этих ВВ. Для перехода с паспорта БВР ПВВ IV класса на паспорт БВР ПВВ V или VI класса требуется сделать правильный пересчет массы шпуровых зарядов. При этом должна быть равной работа взрыва их шпуровых зарядов. С помощью среднего значения $e = (e_1 + e_2 + e_3 + e_4)/4$ (табл. 2.7) для ПВВ V и VI классов рассчитаны удельный расход ВВ и массы шпуровых зарядов, которые имеют одинаковую работу взрыва относительно ПВВ IV класса.

Для ПВВ V класса угленита 13П удельный расход q_V относительно удельного расхода ПВВ IV класса равен:

$$q_V = \frac{0,7q_{IV}}{0,56} = 1,25q_{IV}; \quad (2.10)$$

для ПВВ V класса угленита 13П/1:

$$q_V = \frac{0,7q_{IV}}{0,47} = 1,40q_{IV}; \quad (2.11)$$

для ПВВ VI класса угленита 10П удельный расход равен:

$$q_{VI} = \frac{0,7q_{IV}}{0,45} = 1,56q_{IV}. \quad (2.12)$$

По уравнениям (2.10)...(2.12) рассчитаны удельные расходы ПВВ IV, V, VI классов и сделан пересчет массы шпуровых зарядов, дающих при взрывных работах одинаковую работу взрыва (табл. 2.8). Для типовых паспортов БВР с длиной шпуров $l_{ш} = 2,0$ м (наиболее широко применяемая в шахтах при взрывных работах длина шпуров) принимаем, что ПВВ IV класса патронируются в патроны массой 0,3 кг, а ПВВ V и VI класса – в патроны массой 0,2 кг. Тогда массы шпуровых зарядов должны быть кратными массам патронов. Результаты расчета массы шпуровых зарядов ПВВ даны в табл. 2.9. Определив массу шпуровых зарядов ПВВ с равной работой взрыва, можно оценить их антигрозутность, так как она зависит от массы заряда ВВ и условий его взрывания в МВС. Выбор критерия антигрозутности заряда ПВВ, характеризующего безопасность взрывания ВВ во взрывоопасной среде, должен быть сделан с учетом опасной ситуации в забое выработки.

Таблица 2.8

Результаты расчета массы ВВ шпуровых зарядов равной работоспособности взрыва

ПВВ	Класс ПВВ	Масса шпуровых зарядов равной работоспособности, кг								
		M ₁	M ₂	M ₃	M ₄	M ₅	M ₆	M ₇	M ₈	M ₉
Аммонит Т-19	IV	0,200	0,300	0,400	0,500	0,600	0,700	0,800	0,900	1,000
Угленит 13П	V	0,250	0,375	0,500	0,625	0,750	0,875	1,000	1,125	1,250
Угленит 10П	VI	0,312	0,468	0,624	0,780	0,936	1,092	1,248	1,404	1,560
Угленит 13П/1	V	0,280	0,421	0,561	0,702	0,842	0,982	1,123	1,263	1,404

Таблица 2.9

Масса шпуровых зарядов ПВВ IV, V, VI классов при взрывных работах

ПВВ	Класс	Вид забоя выработки					
		угольный		смешанный		породный	
		масса заряда, кг	уточненная масса заряда, кг	масса заряда, кг	уточненная масса заряда, кг	масса заряда, кг	уточненная масса заряда, кг
1	2	3	4	5	6	7	8
Аммонит Т-19	IV	0,592	0,600	0,840	0,900	0,950	0,900
Угленит 13П	V	0,740	0,800	1,050	1,000	1,187	1,200
Угленит 13П/1	V	0,828	0,800	1,176	1,200	1,33	1,400
Угленит 10П	VI	0,923	1,000	1,310	1,400	1,48	1,400

2.2. Исследование и выбор критериев антигризутности зарядов ВВ

Сделаем предположение, что антигризутность зарядов ПВВ, при их равной работе взрыва, определяется только массой ВВ в шпуре $m(A)$. Известно, что уровень предохранительных свойств ПВВ зависит от предельного заряда, определяемого в опытном штреке. Для любого ВВ существует масса предельного заряда в МВС M_{np} . Тогда, если выполняется условие, при котором масса шпурового заряда не превышает массу предельного, то есть

$$\frac{m(A)}{M_{np}} \leq 1, \quad (2.18)$$

то шпуровой заряд ПВВ обладает антигризутностью.

Обоснование критерия антигризутности заряда ПВВ для условий взрывания в канальной мортире дано в работе [118]. При испытании ВВ в опытном штреке было установлено, что величина предельного заряда зависит от плотности заряжания ВВ в

стальной мортире, расположения заряда ВВ в канале (у дна или у устья), способа его инициирования (прямой или обратный) и энергетических показателей ВВ (удельная теплота взрыва и давление детонации). В.И. Зениным и Б.Н. Кукибом [119,120] было установлено, что если мортира, в которой испытывается ВВ, изготовлена не из стали, а из разрушаемого при взрыве материала (цементный блок), то воспламеняющая способность ВВ резко падает, но в целом общая зависимость воспламенения МВС от массы заряда ВВ сохраняется. Исследованиями, проведенными МакНИИ в шахтах [121], было установлено, что при взрывных работах еще не взорванные заряды ВВ динамически уплотняются взрывом ранее взорванных при короткозамедленном взрывании зарядов. ВВ заполняет все сечение шпура. Поэтому критическое условие (2.18), определяющее безопасность применения зарядов ВВ в шахтах, требует доказательства, учитывающего условия взрывания ВВ и коэффициент заполнения шпура.

В основу доказательства положим эмпирические зависимости массы предельного заряда ПВВ при испытании в канальной мортире от удельной теплоты взрыва ВВ и содержания в продуктах взрыва ингибитора окисления метана. Зависимость массы предельного заряда ПВВ от показателя предохранительности ВВ в канальной мортире – $\Pi_{к.м.}$ выражается формулой:

$$M_{np} = 406000 \Pi_{к.м.}^{1,06}, \text{ кг.} \quad (2.19)$$

Показатель предохранительности ПВВ определяется следующим выражением:

$$\Pi_{к.м.} = \frac{\varepsilon}{Q_v \cdot N_2 \cdot \sqrt{1 - \varepsilon}}, \frac{\text{кг} \cdot \text{кг}}{\text{кДж} \cdot \text{моль}}, \quad (2.20)$$

где ε – содержание ингибитора (кг) в продуктах взрыва 1 кг ВВ.

Вводим параметр K_3 – коэффициент заполнения шпура, равный отношению объемов заряда ВВ – $V_{ВВ}$ и шпура – $V_{ш}$:

$$K_3 = \frac{V_{ВВ}}{V_{ш}}. \quad (2.21)$$

Тогда уравнение (2.21) примет вид:

$$K_3 = \frac{V_{ВВ}}{V_{ш}} = \frac{4m_{ВВ}}{\pi d_{ш}^2 l_{ш} \rho_{ВВ}}, \quad (2.21a)$$

где $d_{ш}$ – диаметр шпура.

Легко показать, что если $\rho_{ВВ}$, $d_{ш}$, $l_{ш}$ постоянны, то K_3 зависит только от массы заряда ВВ в шпуре. Тогда, если выражение (2.18) справедливо, то при условии $m = M_{пр}$ должна быть функциональная связь между K_3 и $\Pi_{к.м.}$: $K_3 = \varphi(\Pi_{к.м.})$. Наличие этой связи определяем путем корреляционного анализа имеющихся экспериментальных данных, полученных В.И. Зениным и Б.Н. Кукибом при испытании зарядов ПВВ в каналах стальных мортир и цементных блоков. При этом выражение (2.20) преобразуем к виду:

$$\Pi_{к.м.} = \frac{\varepsilon}{Q_v \cdot N_2 \cdot \sqrt{1-\varepsilon}} = \frac{m_{инг}}{N_2} \cdot \frac{1}{Q_v \cdot \sqrt{1-\varepsilon}}, \frac{г}{\text{моль}} \cdot \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}, \quad (2.22)$$

где $m_{инг} / N_2$ – концентрация ингибитора в продуктах взрыва, г/моль;

$\frac{1}{Q_v \cdot \sqrt{1-\varepsilon}}$ – величина, обратная удельной теплоте взрыва ВВ за вычетом теп-

лоты, утилизированной ингибитором.

Результаты экспериментов, приведенные в работах [119, 120], и расчета показателя по формуле (2.22) сведены в табл. 2.10. Обработка этих результатов позволила получить для предельных зарядов корреляционную связь между показателем предохранительности ВВ и коэффициентом заполнения шпура. Для стальных мортир эмпирическая зависимость имеет вид:

$$K_3 = 30,27644 \Pi_{к.м.}^{0,82625}, /r/ = 0,966, \quad (2.23)$$

для разрушаемых при взрыве цементных блоков зависимость имеет вид:

$$K_3 = 57,932 \Pi_{к.м.}^{0,227}, /r/ = 0,952. \quad (2.24)$$

Таким образом, доказана универсальность показателя $\Pi_{к.м.}$, характеризующего уровень предохранительных свойств ПВВ при взрывании в мортирах вне зависимости от материала, из которого они изготовлены, и от коэффициента заполнения канала ВВ. Полученный результат позволяет сделать важные выводы: K_3 имеет значения в интервале $1,0 \geq K_3 \geq 0$, $K_3 = 0$ соответствует незаполненному шпуру, а $K_3 = 1$ отвечает полному заполнению ВВ шпура по всему объему. Экспериментально установили, что в результате обжатия шпуров ВВ заполняет весь их объем при коротко-

Показатель предохранительности ПВВ, коэффициент заполнения шпура и предохранительные свойства ВВ при обратном инициировании заряда в МВС

Таблица 2.10

ВВ	Удельная теплота взрыва, Q_v , кДж/кг	Кол-во га-зообр. продуктов взрыва, моль/кг	Содержание ингибитора, ε , кг/кг	$\sqrt{1-\varepsilon}$	Показатель предохранения $\frac{P_{к,м^2}}{z} \cdot \frac{кг}{моль \cdot кДж}$	Коэффициент заполнения шпура, K_3		Предохранительные свойства	
						стальная мортира	цементный блок	m , Г	частота воспламенений
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Смесь гексогена - Г и NaCl, %:	118,8	7,714	0,8	0,447	0,2074	0,159	-	60	0/10
- 20 Г/80 NaCl						0,366	-	138	0/10
- 30 Г/70 NaCl	1678,2	11,571	0,7	0,548	0,0658	0,660	-	240	0/10
- 40 Г/60 NaCl	2237,6	15,428	0,6	0,632	0,0275	0,5885	-	205	0/10
- 50 Г/50 NaCl	2797,0	19,285	0,5	0,707	0,0131	0,640	-	210	0/10
- 60 Г/40 NaCl	3356,4	23,143	0,4	0,775	0,00664	0,714	-	228	0/10
Аммонит № 6ЖВ	4310,0	39,96	0,0	1,0	0,0	0,098	-	29,3	10/10
						-	0,085	28,0	10/10

Продолжение табл. 2.10

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Гексамон - 10NaCl	3999,9	35,982	0,1	0,949	$7,321 \cdot 10^{-4}$	0,095 0,126	- - 0,314 0,629	30,2 40,1 110 220	0/10 3/3 0/3 4/8
Гексамон - 20NaCl	3569,0	31,964	0,2	0,894	$1,961 \cdot 10^{-3}$	0,158 0,247	- - 0,640	78,0 80,9 230	0/3 4/4 0/2
Гексамон - 30NaCl	3138,0	27,991	0,3	0,837	$4,08 \cdot 10^{-3}$	0,245 0,364	- -	85,2 127,0	0/4 2/2
Гексамон - 35NaCl	2921,8	26,176	0,35	0,806	$5,68 \cdot 10^{-3}$	0,344 0,521	- - 0,579	125,0 189,0 230	0/4 3/3 0/3
Гексамон - 40NaCl	2707,1	23,973	0,40	0,775	$7,953 \cdot 10^{-3}$	0,634 0,854	- -	230 310	0/3 2/2
Гексамон - 45NaCl	2490,7	22,01	0,45	0,742	0,01106	0,942	-	342	0/3
Аммонит Т-19	3414,1	32,08	0,2	0,894	$2,043 \cdot 10^{-3}$	0,045 0,090	- -	100 200	0/3 8/10
Аммонит ПЖВ-10	3401,6	32,01	0,2	0,894	$2,055 \cdot 10^{-3}$	- -	0,758 0,454	500 300	7/15 0/5

замедленном взрывании ($K_3 = 1$). Поскольку материал цементных блоков достаточно близок по своим физико-механическим свойствам к горным породам, то можно с достаточной степенью надежности определить показатель предохранительности ВВ, характеризующий массу предельного заряда для наиболее опасного случая взрывания шпуровых зарядов ПВВ во взрывоопасной атмосфере забоев горных выработок. Из уравнения (2.24) для случая $K_3 = 1,0$ получаем:

$$\left(\frac{K_3}{57,932} \right)^{\frac{1}{0,7227}} = \Pi_{к.м.} = 3,636 \cdot 10^{-3}.$$

Таким образом, получено значение показателя предохранительности ПВВ, отвечающее наиболее опасным условиям взрывания заряда в шпуре. Неравенство (2.18) полностью определяет условие безопасности применения ПВВ в угольных шахтах, если масса предельного заряда, полученная при испытании ПВВ в МВС, окажется не более массы заряда ВВ в шпуре. В табл. 2.11 приведены показатели ПВВ III...VII классов и дано сравнение их уровня предохранительных свойств, определенного в опытном штреке, с необходимой антигризутностью заряда ВВ согласно условию (2.18). Эти результаты показывают, что ПВВ III и IV класса не удовлетворяют требованиям необходимой антигризутности зарядов ВВ при взрывных работах в шахтах, а ПВВ V, VI и VII классов удовлетворяют. Исходя из этого, можно установить параметры ПВВ, отвечающие необходимому уровню безопасности. По уравнению (2.22) найдем величину удельной работы взрыва ПВВ за вычетом теплоты, утилизированной ингибитором:

$$3,636 \cdot 10^{-3} = \frac{300}{29,3} \cdot \frac{1}{A} \quad \text{или} \quad A = \frac{10,239}{3,636 \cdot 10^{-3}} \approx 2816,0 \text{ (кДж/кг)}.$$

Согласно уравнению (2.9), максимально возможная работоспособность ПВВ должна быть при $A \approx Q_v$, тогда фугасность ВВ в бомбе Трауцля – ΔV равна:

$$\Delta V = 2,2 \cdot 10^{-3} \cdot Q_v \cdot \sqrt{1 - \varepsilon} \cdot N_2 + 39,8 = 2,2 \cdot 10^{-3} \cdot 2816,0 \cdot 29,3 + 39,8 \approx 220 \text{ (см}^3\text{)}.$$

Эта работоспособность максимально возможная для ПВВ, имеющих предохранительные свойства, обеспечивающие антигризутность шпуровых зарядов при взрывных работах. Дальнейший ее рост не возможен без решения вопроса о более

Показатель уровня предохранительных свойств ПВВ III, IV, V, VI, VII классов и антигризунтность их зарядов при взрывных работах

Таблица 2.11

ВВ	Класс	Взрывчатые показатели			Предохранительные свойства ПВВ в опытном штрэке в канальной mortире	Показатель предохранительности, $P_{к.м.}$	Соответствие предохранит. свойств не-обходимому уровню анти-гризунтности	Отношение работоспособности ПВВ к работоспособности аммонита № 6ЖВ
		Q_v , кДж/кг	N_b , моль/кг	ε , кг/кг				
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Аммонит № 6ЖВ	II	4310,0	39,96	0,0	-	0,0	-	1,0
Аммонит АП-5ЖВ	III	3795,0	35,13	0,12	$m_{50} = 0,175$ кг	$9,4 \cdot 10^{-4}$	не соотв.	0,79
Аммонит Т-19	IV	3414,0	32,08	0,2	$m_{50} = 0,3$ кг	$2,043 \cdot 10^{-3}$	не соотв.	0,70
Аммонит ПЖВ-20	IV	3401,6	32,01	0,2	$m_{50} = 0,3$ кг	$2,055 \cdot 10^{-3}$	не соотв.	0,69
Угленит Э-6	V	2610,8	24,643	0,39	$M_{np} \geq 1,2 \dots 1,4$ кг	$7,764 \cdot 10^{-3}$	соотв.	0,47
Угленит 13П	V	2836,0	29,248	0,3	$M_{np} \geq 1,0 \dots 1,2$ кг	$4,323 \cdot 10^{-3}$	соотв.	0,56
Угленит 12ЦБ	VI	1703,0	24,777	0,245	$M_{np} \geq 1,4$ кг	$6,67 \cdot 10^{-3}$	соотв.	0,38
Угленит 10П	VI	2480,7	25,667	0,369	$M_{np} \geq 1,5$ кг	$7,3 \cdot 10^{-3}$	соотв.	0,45
Ионит	VII	1891,2	25,8	0,372	$M_{np} \geq 1,5$ кг	$9,626 \cdot 10^{-3}$	соотв.	0,33

эффективном ингибировании реакций при взрыве метана или угольной пыли, чем существующими ингибиторами (NaCl, KCl), входящими в составы ПВВ.

Не менее важным является решение обратной задачи моделирования условий испытания заряда ВВ во взрывоопасной среде опытного штрека. В критическое условие антигризутности заряда ВВ подставляем необходимое значение показателя $P_{к.м.} = 3,636 \cdot 10^{-3}$. В этом случае при испытании заряда ПВВ в канальной мортире получим коэффициент заполнения канала мортиры ВВ:

$$K_3 = 30,27644 \cdot (3,636 \cdot 10^{-3})^{0,82625} \approx 0,29213.$$

Подставляя его в уравнение (2.21а), находим массу предельного заряда ПВВ, характеризующую антигризутность шпурового заряда при взрывных работах:

$$0,29213 = \frac{4m_{ВВ}}{\pi d_w^2 l \rho_{ВВ}} \text{ или } m_{ВВ} = \frac{0,29213 \cdot 3,14 \cdot 5,5^2 \cdot 105 \cdot 1,25}{4} \approx 910(\text{г}).$$

Таким образом, если в канальной мортире опытного штрека ПВВ имеет уровень предохранительных свойств, характеризующийся предельным зарядом не менее 0,91 кг, то данное ПВВ может обеспечить безопасность взрывных работ. Если предположить, что заряд ПВВ полностью заполняет шпур и имеет торцевое обнажение при взрывании, то можно сделать вывод, что предельные заряды ПВВ V...VII классов, в отличие от ПВВ IV класса, могут обеспечить антигризутность шпуровых зарядов при взрывных работах.

Однако при короткозамедленном взрывании происходит разрушение взрывом устья шпуров еще невзорвавшихся шпуровых зарядов, поэтому они могут частично обнажаться. В этом случае длина заряда ПВВ, которая изначально была меньше длины шпура, становится как бы больше. Получается, что при обнажении заряда коэффициент заполнения шпура ВВ как бы больше единицы: $K_3 > 1$. Это говорит о том, что, во-первых, показатель, характеризующий предохранительные свойства ПВВ, может не удовлетворять условиям антигризутности, так как происходит обнажение заряда, а, во-вторых, вид зависимости показателя предохранительных свойств зарядов ПВВ, взрывающихся в открытом виде, – P от параметров ВВ изменяется. Ранее исследованиями Дж. Тейлора, Б.И. Вайнштейна, Б.Н. Кукиба было установлено, что предохранительные свойства ВВ при взрыве зарядов в открытом виде в

сильной степени зависят от скорости детонации ВВ. В связи с этим в данной работе были проведены дальнейшие исследования [122,123,124] и использованы зарубежные данные [125]. Все результаты приведены в табл. 2.12. При выборе критерия антигризутности для частично обнаженных зарядов ВВ исходили из следующего. Взрывание ПВВ в канале mortar позволяет установить вероятность воспламенения МВС в опытном штреке в зависимости от массы заряда (рис. 2.2). При значении вероятности $P = 0$ ПВВ не дает воспламенений МВС и масса его заряда равна предельному заряду $M_{кр}$, который характеризует уровень предохранительных свойств ВВ. Следуя аналогии, можно определить массу ПВВ при испытании обнаженных зарядов, которая не будет вызывать воспламенения МВС ($P = 0$), то есть установить предельный заряд в уголкового mortar, так как испытания в уголкового mortar моделируют условия взрывания обнаженных зарядов ПВВ во взрывоопасной смеси. Для регулирования жесткости испытаний уголкового mortar оборудована отражательной стенкой, которая устанавливается на расстоянии 0,2...0,6 м от заряда ПВВ. Кроме того, уголкового mortar изготовлена из металла, что еще более усиливает жесткость проведения испытаний. Установлено, что испытание зарядов ПВВ в mortar из разрушаемых материалов, эквивалентных горной породе, менее жесткое и увеличивает предельные заряды ПВВ. Будем рассматривать условия взрывания зарядов ПВВ в уголкового mortar, облицованной разрушаемым материалом. Такие опыты были проведены в МакНИИ В.М. Расторгуевым [126] и В.И. Зениным. Результаты этих исследований обобщены и приведены в табл. 2.13. Они показывают, что разрушаемый материал при испытании открытых зарядов ПВВ оказывает существенное влияние на уровень их предохранительных свойств в уголкового mortar. В ПВС в разрушаемом уголке испытания выдерживают заряды ПВВ массой в три раза больше, чем в стальном уголке. Аналогичная картина наблюдается и при испытании зарядов ПВВ в МВС. В этом случае у ПВВ V и VI классов предельные заряды возрастают в 1,6...1,73 раза (среднее – 1,66).

Рассмотрим результаты испытаний, приведенные в табл. 2.13. В ней даны предельные заряды ПВВ и массы зарядов, вызывающих воспламенение МВС с вероят-

Таблица 2.12

Результаты испытаний открытых зарядов ПВВ во взрывоопасной МВС (взрывание в уголковой mortarе с отрагательной стенкой)

№ п / п	ПВВ (страна)	Диаметр патрона, d_n , мм	Плотность ВВ, $\rho_{ВВ}$, кг/м ³	Скорость детонации ВВ, D , м/с	Уровень предохранительных свойств ПВВ, кг		Приведенная критическая длина заряда, $\ell_{кр}$, м
					m_{50}	$M_{пр}$	
1	2	3	4	5	6	7	8
1	Угленит Э-6 (СССР)	36	1200	2150	0,193	0,118	0,1581
2	Угленит № 5 (СССР)	36	1250	1750	1,000	0,610	0,7864
3	Угленит 7у (СССР)	36	1200	1800	0,725	0,442	0,5939
4	Селектит-1 (СССР)	36	1100	1980	0,250	0,153	0,2234
5	Ионит (СССР)	36	1170	1680	1,800	1,098	1,5123
6	НИИТ-2 (СССР)	36	1200	2120	0,250	0,153	0,2048
7	Угленит № 8 (СССР)	36	1150	1580	1,400	0,854	1,1967
8	Гармонит V (Чехия)	36	1220	2030	0,225	0,137	0,1813
9	A10/10 – опытный образец	36	1190	1796	0,493	0,301	0,4073
10	A12/10 – опытный образец	36	1200	2075	0,250	0,153	0,2048
11	1Г – опытный образец	36	1150	2302	0,175	0,107	0,1496
12	ПЖВ-65 – опытный образец	36	1250	2256	0,225	0,137	0,1769
13	ПЭ-6 – опытный образец	36	1250	2144	0,175	0,107	0,1376
14	Угленит 13К (Украина)	36	1220	2030	0,350	0,214	0,2820
15	Harmonit AD (Чехия)	30	1360	2050	0,750	0,458	0,7806
16	Ostravit C (Чехия)	30	1410	1960	0,750	0,458	0,7500
17	Wetterenergit B (Германия)	30	1260	1750	1,000	0,700	1,1230
18	№ 294 – опытный образец	36	1200	1980	0,350	0,214	0,2867
19	И5 – опытный образец	36	1200	2000	0,400	0,244	0,3277
20	Панкинит-2 (СССР)	36	1200	2250	0,300	0,183	0,2458

1	2	3	4	5	6	7	8
21	Панкинит-2 (СССР)	36	1100	1720	1,400	0,852	1,2511
22	А9,5/25 – опытный образец	36	1130	2120	0,125	0,080	0,1087
23	Панкинит-3 (СССР)	36	1140	1600	1,400	0,853	1,2070
24	Шарбит 4/50 (Бельгия)	30	1100	1500	-	2,000	2,9598
25	Угленит 12ЦБ (СССР)	36	1350	1962	1,000	0,650	0,8740
26	ЗМ – опытный образец	36	1300	2006	0,850	0,520	0,6427
27	Алтаниит 6А (СССР)	36	1300	1840	0,600	0,366	0,4537
28	Угленит Н-12 (СССР)	36	1250	1890	1,000	0,610	0,7864
29	Угленит 13П (Украина)	36	1270	2497	0,150	0,100	0,1161
30	У10Д – опытный образец	36	1170	1712	0,400	0,244	0,3361
31	У12П – опытный образец	36	1320	2020	0,550	0,336	0,4096
32	Барбарит L (Польша)	30	1500	2280	0,130	0,080	0,1227
33	Барбарит FGH-2 (Польша)	30	1610	2005	0,315	0,192	0,2769
34	Метаниит Д-6G (Польша)	34	1050	2190	0,245	0,150	0,2572
35	Специальный метаниит С (Польша)	34	1060	1850	0,550	0,336	0,5718
36	9Г – опытный образец	36	1300	1808	1,315	0,802	0,9944
37	К5/7 – опытный образец	36	1300	2362	0,175	0,107	0,1323
38	НТМ+10%КСI – опытный образец	36	1050	1890	0,360	0,220	0,3725
39	Угленит 13П/1 (Украина)	36	1220	2080	0,340	0,250	0,2739
40	Кемпоксит-1 (Бельгия)	30	1200	1840	-	1,400	2,7131
41	Угленит 10П (Украина)	36	1220	1940	0,820	0,500	0,6607
42	Веттеркарбонит С (Германия)	30	1200	1500	-	2,000	2,7131
43	Аммонит ПЖВ-20 (Россия)	36	1070	3950	0,035	0,022	0,0322

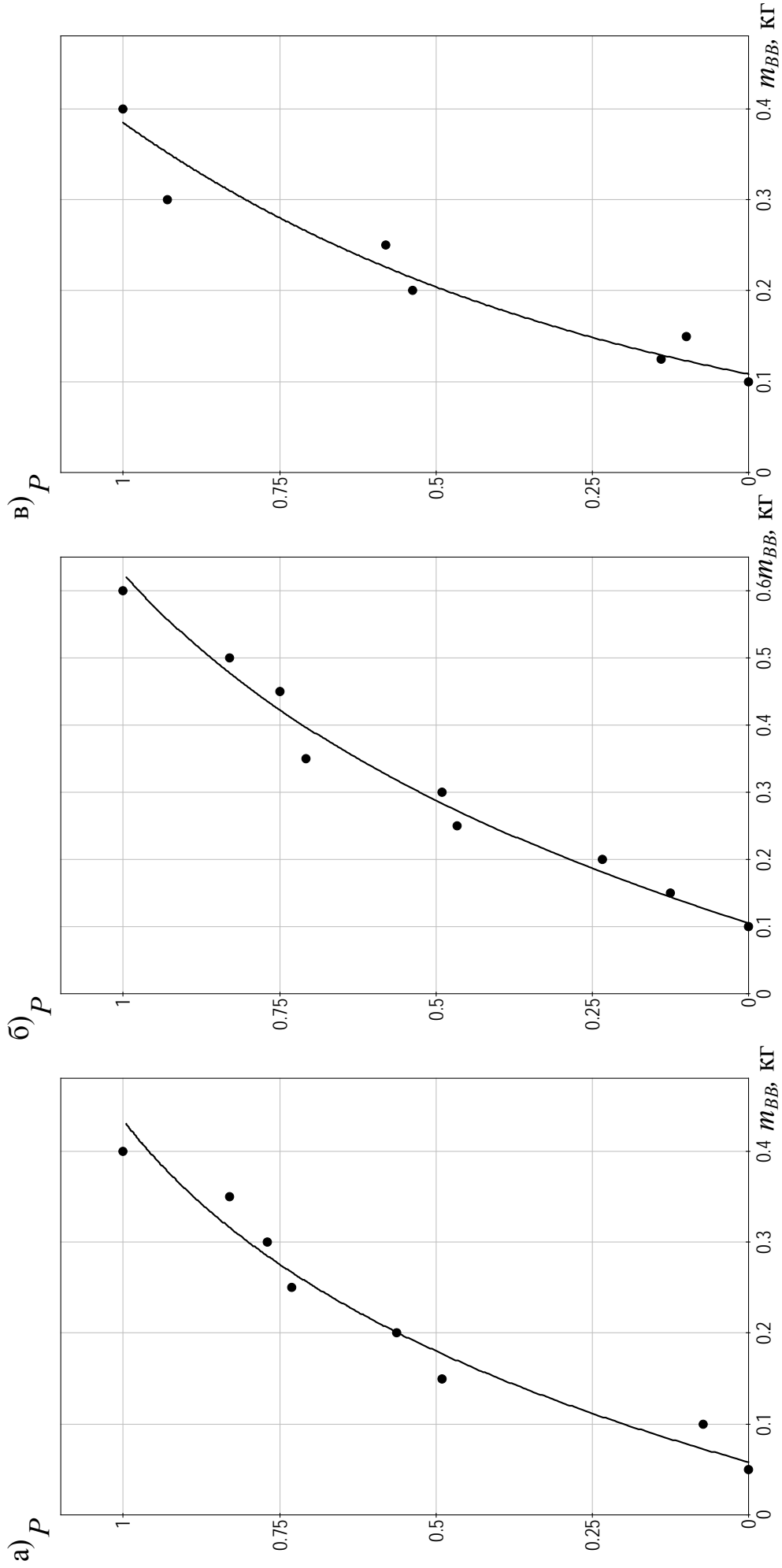


Рис. 2.2. Частота воспламенений МВС при испытании зарядов ПБВ III, IV, V классов

- а) аммонит АП-5ЖВ в канальной мортире;
- б) аммонит Т-19 в канальной мортире;
- в) угленил Э-6 в уголкового мортире

Таблица 2.13

Уровень предохранительных свойств ПВВ при их испытании в уголковой мортире, облицованной разрушаемым материалом (силикатный кирпич)

ПВВ (класс)	Материал уголковой мортиры	Масса испытываемого заряда ПВВ во взрывоопасной среде, кг					
		ПВС с отражатель- ной стенкой на рас- стоянии $l_{отр} = 0,6$ м		МВС с отражательной стенкой на расстоянии ($l_{отр}$, м)			
		M_{np1}	$\frac{M_{np2}}{M_{np1}}$	m_{50i} (0,6)	$\frac{m_{502}}{m_{501}}$	m_{50i} (0,3)	$\frac{m_{502}}{m_{501}}$
1	2	3	4	5	6	7	8
АП-5ЖВ (III)	сталь	0,25 ₁	3,0	-	-	-	-
АП-5ЖВ (III)	кирпич	0,75 ₂		-	-	-	-
Т-19 (IV)	сталь	0,30 ₁	3,0	-	-	-	-
-//-	кирпич	0,90 ₂		-	-	-	-
Угленит Э-6(V)	сталь	-	-	0,25 ₁	1,60	-	-
-//-	кирпич	-	-	0,40 ₂		-	-
Угленит 7у (VI)	сталь	-	-	-	-	0,275	1,73
-//-	кирпич	-	-	-	-	0,475	

ностью $P = 0,5$. Для всех испытанных зарядов ПВВ в стальной уголковой мортире было получено отношение $m_{50}/M_{np} \approx 1,64$. Если сравнить с ним отношение масс зарядов ПВВ, которые были определены при испытании в уголковых мортирах из кирпича (m_{50_2}) и стали (m_{50_1}): $m_{50_2}/m_{50_1} \approx 1,66$, то получится, что они примерно равны. Этот результат позволяет сделать вывод, что в обоих случаях предохранительные свойства ВВ зависят от длины обнаженного заряда. Поэтому новый параметр, характеризующий предохранительные свойства, был назван приведенной длиной обнаженного заряда ПВВ. Он может быть получен, исходя из массы m_{50} , которая характеризует воспламеняющую способность обнаженного заряда в МВС. Для расче-

та приведенной длины обнаженного заряда ПВВ получена формула:

$$l_{np} = \frac{1,274m_{50}}{d_n^2 \rho_{BB}}, \text{ м.} \quad (2.25)$$

В табл. 2.12 даны значения l_{np} для зарядов ПВВ. Используя эти данные в работе [127], была установлена корреляционная связь между массой предельного заряда и отношением l_{np}/D :

$$M_{np} = 441,51 \left(\frac{l_{np}}{D} \right)^{0,865}, \text{ кг.} \quad (2.26)$$

В дальнейшем это эмпирическое уравнение было уточнено с помощью компьютерной программы Curve Expert 1.3:

$$M_{np} = 349,1 \left(\frac{l_{np}}{D} \right)^{0,83138}, \text{ кг } ([S] = 0,0446, /r/ = 0,995). \quad (2.27)$$

Уравнение (2.27) можно использовать при оценке антигизутности обнаженных зарядов ПВВ при взрывных работах, если известны значения l_{np} , предельные заряды ПВВ и измерена их скорость детонации. Если знать длину обнажения шпурового заряда ПВВ, то по уравнению (2.27) можно рассчитать массу предельного заряда. Если ее значение $M_{np}(l_{np})$ не больше массы предельного заряда ПВВ, при взрыве которого не происходит воспламенений МВС в опытном штреке:

$$\frac{M_{np}(l_{np})}{M_{np}} \leq 1, \quad (2.28)$$

то антигизутность обнаженного заряда ПВВ при взрывных работах достаточная.

Для оценки взрывного действия зарядов ВВ, равных по работе взрыва, можно принять, что объем разрушения пород зависит только от массы ВВ в заряде. В работе [128] приведен расчет действия взрыва ВВ в горной породе, из которого получены формулы для определения бокового обнажения шпурового заряда. Для зарядов одинаковой работоспособности (работы взрыва) можно получить:

1) радиус сферы действия взрыва заглубленного заряда:

$$R_{сф} = l_{ш} \sqrt{\frac{l_{ш} + 1}{l_{ш}}};$$

2) радиус воронки выброса:

$$r_g = \sqrt{R_{сф}^2 - l_{ш}^2};$$

3) взаимосвязь между параметрами шпуров и расстоянием между ними:

$$\frac{l_{ш}}{r_g} = \frac{l_{срез}}{(r_g - a_{ш})},$$

где $l_{срез}$ – длина срезанной взрывом части шпура;

$a_{ш}$ – расстояние между смежными шпурами.

Величина $a_{ш}$ определяется согласно § 243 «ЕПБ при ВР» и регламентируется в зависимости от крепости горных пород и класса применяемых ВВ.

Для известных параметров паспортов БВР сделан расчет длины обнажения заряда ПВВ при взрывных работах (рис. 2.3) в зависимости от расстояния между шпурами и длины заряда ВВ – l_3 по формуле: $l_{обн} = l_3 - (l_{ш} - l_{срез})$. Результаты расчетов приведены в табл. 2.14. Они показывают, что шпуровые заряды ПВВ IV, V и VI классов в однотипных условиях взрывания могут быть частично обнажены. Оказалось, что чем меньше расстояние между смежными шпурами, тем больше обнажение шпурового заряда, взрывающегося с замедлением. Так, при расстоянии между шпурами $a_{ш} = 0,3$ м для равных по работе взрыва шпуровых зарядов получается: длина обнажения шпуровых зарядов ПВВ IV класса – 0,282 м, V класса – 0,325 м, VI класса – 0,511 м. Принимаем эти значения обнаженной части заряда как критические ($l_o = l_{np}$) и подставляем в уравнение (2.27). Получим для ПВВ IV, V и VI классов массу заряда ПВВ $M_{np}(l_{np})$, не воспламеняющую МВС. Исходя из критического условия (2.28), получим для ПВВ:

– IV класса аммонитов Ф5 и Г5 ($D = 4160$ м/с)

$$M(l_{np}) = 349,1 \left(\frac{0,282}{4160} \right)^{0,83138} \approx 0,12(\text{кг}), \quad M_{np} = 0,024 \text{ кг}, \quad \frac{M(l_{np})}{M_{np}} > 1, \text{ следовательно, их}$$

обнаженные заряды не антигризутны;

– V класса угленитов 13П ($D = 2497$ м/с) и 13П/1 ($D = 2150$ м/с) соответственно:

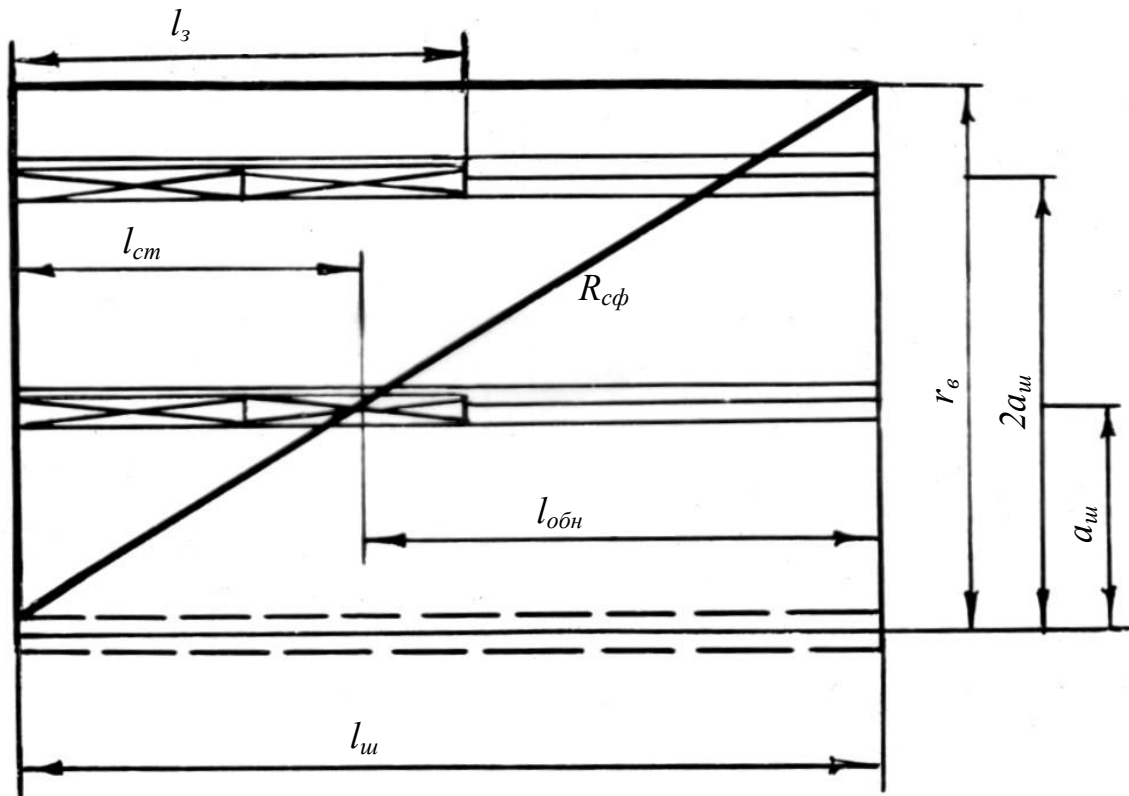


Рис. 2.3. Схема обнажения заряда ВВ при взрыве смежных шпуров

Таблица 2.14

Расчет значений обнажений шпуровых зарядов для ПВВ IV, V, VI классов

ПВВ (класс)	Вид забоя	Плотность ВВ в патронах, $\rho_{ВВ}$, кг/м ³	Расстояние между шпурами в забое, $a_{ш}$, м	Длина шпура, $\ell_{ш}$, м	Длина срезания шпура, $\ell_{срез}$, м	Глубина стакана шпура, $\ell_{ст}$, м	Масса шпурового заряда, m , кг	Длина заряда ВВ в шпуре, ℓ_3 , м	Длина бокового обнажения заряда, $\ell_{обн}$, м
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Аммониты Т-19, Ф5, Г5 (IV класс)	угольный породный	1050	0,6	2,0	1,0	1,0	0,671	0,628	нет
			0,3	2,0	1,4	0,6	0,942	0,882	0,282
Углениты 13П, 13П/1 (V класс)	угольный породный	1250	0,5	2,0	1,13	0,87	0,839	0,66	нет
			0,3	2,0	1,40	0,6	1,177	0,925	0,325
Угленит 10П (VI класс)	угольный породный	1300	0,4	2,0	1,26	0,74	1,05	0,794	0,054
			0,3	2,0	1,40	0,6	1,47	1,11	0,511

$$M(l_{np}) = 349,1 \left(\frac{0,325}{2497} \right)^{0,83138} = 0,205(\text{кг}), M_{np} \approx 0,1 \text{ кг}, \frac{M(l_{np})}{M_{np}} > 1,$$

следовательно, обнаженные заряды угленита 13П не антигризутны;

$$M(l_{np}) = 349,1 \left(\frac{0,325}{2150} \right)^{0,83138} = 0,232(\text{кг}), M_{np} \approx 0,25 \text{ кг}, \frac{M(l_{np})}{M_{np}} < 1, \text{ следовательно, об-}$$

наженные заряды угленита 13П/1 антигризутны;

– VI класса угленита 10П ($D = 1948$ м/с)

$$M(l_{np}) = 349,1 \left(\frac{0,511}{1948} \right)^{0,83138} = 0,368(\text{кг}), M_{np} \approx 0,45 \text{ кг}, \frac{M(l_{np})}{M_{np}} < 1, \text{ следовательно, их}$$

обнаженные заряды антигризутны.

Установили, что заряды ПВВ IV и угленит 13П V класса, применяющиеся при взрывных работах, не удовлетворяют критерию антигризутности (2.28) для условий взрывания частично обнаженных шпуровых зарядов, контактирующих с МВС. Вместе с тем, ПВВ V класса угленит 13П/1 и VI класса угленит 10П имеют достаточный уровень предохранительных свойств, который обеспечивает им антигризутность шпуровых зарядов при взрывных работах.

Таким образом, критерии антигризутности зарядов ПВВ в виде неравенств (2.18) и (2.28) для условий взрывания в канале мортиры и открытых зарядов в угловой мортире дают достаточно точный результат относительно соответствия уровня предохранительных свойств ПВВ антигризутности их зарядов при взрывных работах. Это позволяет сформулировать общий подход к критериям антигризутности зарядов ПВВ. Он заключается в том, что равные по работе взрыва заряды ПВВ, устойчивые к выгоранию, при производстве взрывных работ в тех или иных опасных условиях взрывания должны иметь массы, не превышающие массы предельных зарядов в опытном штреке при аналогичных условиях взрывания в МВС. Достоверность полученных критериев антигризутности зарядов ВВ основана на результатах исследования безопасности взрывания ПВВ IV, V, VI классов в опытном штреке МакНИИ.

2.3. Исследование безопасности взрывания в МВС равных по работе взрыва зарядов ПВВ

Результаты исследования по определению безопасных параметров обнажения шпуровых зарядов ПВВ IV, V, VI классов и установление зависимости вероятности воспламенения МВС от массы зарядов ПВВ приведены в работе [123]. Исследования предохранительных свойств зарядов ПВВ проводили в условиях, моделирующих частичное обнажение шпуровых зарядов при взрывных работах в шахтах. Испытания зарядов ПВВ в МВС проводили в комбинированной мортире [130]. Это устройство для испытания зарядов ПВВ в опытном штреке МакНИИ представляет собой цельную конструкцию из канальной мортиры, канал которой имеет продолжение и переходит в форму уголка уголковой мортиры. Конструкция позволяет моделировать условия взрывания как частично обнаженных зарядов ВВ, так и зарядов, расположенных в канале мортиры при прямом и обратном способах инициирования. Первая серия опытов была сделана для исследования уровня предохранительных свойств ПВВ в комбинированной мортире при прямом инициировании зарядов. Результаты этих испытаний приведены в табл. 2.15.

Обработка результатов, полученных в опытах, позволила получить эмпирические зависимости частоты воспламенения МВС как вероятности P от длины обнаженной части детонирующего заряда ВВ:

для ПВВ IV класса

$$P = 0,281 + 0,258 \ln l_{обн} / r = 0,948; \quad (2.29)$$

для ПВВ V класса

$$P = 0,699 \ln l_{обн} - 1,6923, /r/ = 0,936; \quad (2.30)$$

для ПВВ VI класса

$$P = 6,5 \ln l_{обн} - 25,139, /r/ = 0,995. \quad (2.31)$$

Если в эти уравнения подставить значение вероятности, равное нулю, то можно найти безопасную длину обнажения в комбинированной мортире для зарядов ПВВ IV...VI классов. Для ПВВ IV класса $l_{обн} = 2,9$ см, для ПВВ V класса $l_{обн} = 11,3$ см и для ПВВ VI класса $l_{обн} = 48,0$ см. Частота воспламенений МВС при испытании

Таблица 2.15

Частота воспламенений МВС при различной длине обнаженной части зарядов ПВВ

ПВВ (класс)	Масса заряда, кг (число патронов в заряде)	Длина обнажения заряда, $l_{обн}$, см	Число воспламенений МВС	Число опытов	Частота воспламенений МВС при испытании	
					опытная	расчет по уравнению регрессии
1	2	3	4	5	6	7
Аммонит Т-19 (IV)	0,3 (1)	0,0	0	10	0,00	-
	0,3 (1)	3,0	6	10	0,60	0,564
	0,3 (1)	6,0	7	10	0,70	0,743
	0,3 (1)	9,0	8	10	0,80	0,848
	0,3 (1)	13,0	10	10	1,00	0,943
Угленит 13П (V)	0,8 (4)	10,0	0	10	0,00	-
	0,8 (4)	24,0	3	10	0,30	0,529
	0,8 (4)	28,0	6	10	0,60	0,634
	0,8 (4)	32,0	8	10	0,80	0,730
	0,8 (4)	40,0	10	10	1,00	0,886
Угленит 10П (VI)	1,0 (5)	48,0	0	10	0,00	-
	1,0 (5)	52,0	6	10	0,60	0,544
	1,0 (5)	56,0	10	10	1,00	1,000

частично обнаженных зарядов в комбинированной мортире показана на рис. 2.4.

Вторая серия опытов была посвящена изучению воспламеняющей способности детонирующих обнаженных зарядов ПВВ IV, V, VI классов при обратном способе инициирования заряда. Результаты этих опытов приведены в табл. 2.16. Обработка результатов исследований позволила получить эмпирические зависимости вероятности воспламенения МВС от величины обнаженной части заряда при обратном способе инициирования.

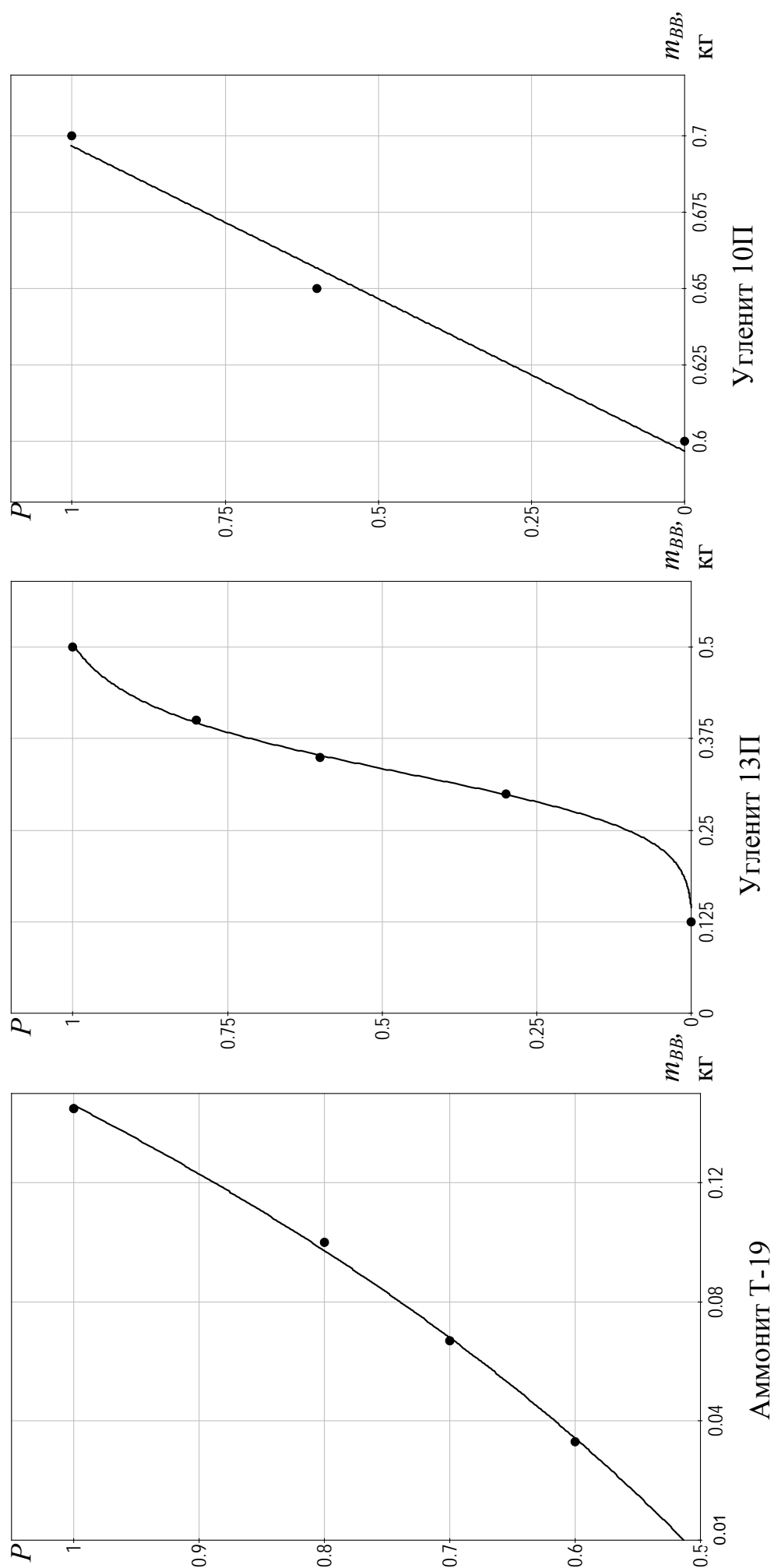


Рис. 2.4. Частота воспламенений МВС при натурном моделировании взрывов частично обнаженных шпуровых зарядов ПВВ IV, V и VI классов в комбинированной мортире опытного штрека

Таблица 2.16

№ п / п	ПВВ	№ пар-тии	Масса заряда, кг	Величина обнаженного заряда, см	Тип электродетонатора	Частота воспламенений МВС* при	
						прямом и обратном инициировании зарядов ВВ IV-VI классов	Частота воспламенений МВС* при обратном инициировании
1	2	3	4	5	6	7	8
1	Аммонит Т-19	27	0,3	0	ДеМ-ZbN** (0 серия)	0/1	
2	Аммонит Т-19	27	0,3	2,0	ДеМ-ZbN (0 серия)	1/4	
3	Аммонит Т-19	27	0,3	13,0	ДеМ-ZbN (0 серия)	3/3	
4	Аммонит Т-19	27	0,3	9,0	ЭДКЗ-ОП	8/8 + 1/2 = 9 / 10	8/10
5	Угленит 13П	6	1,0	16,0	ЭДКЗ-ОП	0/1	
6	Угленит 13П	6	1,0	24,0	ЭДКЗ-ОП	3/3	
7	Угленит 13П	9	0,8	12,0	ЭДКЗ-ОП	0/5	
8	Угленит 13П	9	0,8	24,0	ЭДКЗ-ОП	1/10	
9	Угленит 13П	9	0,8	32,0	ЭДКЗ-ОП	0/2	
10	Угленит 13П	9	0,8	40,0	ЭДКЗ-ОП	2/8 + 2/2 = 4/10	10/10
11	Угленит 13П/1	2	1,0	24,0	ЭДКЗ-ОП	0/1	
12	Угленит 13П/1	2	1,0	32,0	ЭДКЗ-ОП	2/3	
13	Угленит 13П/1	2	1,0	40,0	ЭДКЗ-ОП	3/3	
14	Угленит 10П	1	1,0	48,0	ЭДКЗ-ОП	0/1	
15	Угленит 10П	1	1,0	56,0	ЭДКЗ-ОП	1/5 + 0/5 = 1/10	
16	Угленит 10П	3	1,0	48,0	ЭДКЗ-ОП	0/10	10/10

* Числитель – число воспламенений, знаменатель – число опытов.

** ДеМ-ZbN – тип электродетонаторов короткозамедленного действия чехословацкого производства.

Для частично обнаженных зарядов ПВВ IV класса аммонита Т-19 получена следующая эмпирическая зависимость:

$$P = 0,41 \ln l_{обн} - 0,0285, /r/ = 0,998. \quad (2.32)$$

Для частично обнаженных зарядов ПВВ V класса (масса в канале 0,8...1,0 кг) получены эмпирические зависимости:

$$P = 0,651 \ln l_{обн} - 1,7888 \text{ для угленита 13П, } /r/ = 0,996; \quad (2.33)$$

$$P = 1,975 \ln l_{обн} - 6,246 \text{ для угленита 13П/1, } /r/ = 0,993. \quad (2.34)$$

Для частично обнаженных зарядов ПВВ VI класса угленита 10П получили:

$$P = 0,649 \ln l_{обн} - 2,531, /r/ = 1,0. \quad (2.35)$$

Найдем безопасную величину обнажения заряда ПВВ при $P = 0$. Согласно уравнениям (2.32) – (2.35), при обратном способе инициирования заряда получим:

- для ПВВ IV класса аммонита Т-19 $l_{обн} = 1,1$ см;
- для ПВВ V класса угленита 13П $l_{обн} = 15,6$ см, угленита 13П/1 $l_{обн} = 23,6$ см;
- для ПВВ VI класса угленита 10П $l_{обн} = 48,0$ см.

Сравнение безопасных обнажений зарядов, определяющих предохранительные свойства ПВВ, показало, что критические обнажения заряда при прямом $-l_{обн}^{np}$ и обратном его инициировании $-l_{обн}^{обр}$ существенно отличаются между собой. Для разных классов ПВВ это различие может быть прямо противоположным. Так, для ПВВ IV класса (аммонит Т-19) установлено, что при обратном инициировании заряда его предохранительные свойства в МВС снижаются. Об этом можно судить по критической длине обнажения зарядов: $l_{обн}^{np} > l_{обн}^{обр}$ ($2,9 > 1,1$). У ПВВ V класса результат прямо противоположный: при обратном способе инициирования длина критического обнажения зарядов угленитов 13П и 13П/1 существенно больше, чем при прямом ($15,6 > 11,3$). Для ПВВ VI класса способ инициирования заряда практически не влияет на критическую длину обнажения заряда: $l_{обн}^{np} \approx l_{обн}^{обр}$. Однако, при одинаковой длине частично обнаженного заряда (56 см) при прямом способе наблюдалось 100% воспламенений МВС, а при обратном – всего 10% воспламенений. Полученные результаты показали, насколько надежным и достоверным является способ испытания ча-

стично обнаженных зарядов ПВВ в МВС в комбинированной мортире. Учитывая это, в комбинированной мортире были проведены исследования по определению уровня предохранительных свойств у равных по работе взрыва зарядов ПВВ IV, V и VI классов, массы которых равны 1,2 кг для угленита 13П (V класс) и 1,5 кг для угленита 10П (VI класс). Эти массы эквивалентны по работе взрыва заряду ПВВ IV класса аммонита Г5 (аналог аммонита Т-19) массой 0,9 кг. Испытания зарядов аммонита Г5 массой 0,9 кг в комбинированной мортире дали 100% воспламенений МВС как при прямом, так и при обратном инициировании зарядов. Испытания зарядов ПВВ V и VI классов проводили методом «вверх-вниз». Для равных по работе взрыва зарядов ПВВ в качестве переменной величины была принята длина обнаженной части заряда. Ее величина изменялась от опыта к опыту в зависимости от результата взрывания в МВС при постоянной массе ПВВ в заряде. Если происходило воспламенение МВС, длину обнажения заряда уменьшали, а если воспламенения не было, то увеличивали до тех пор, пока не получали воспламенение. При испытании зарядов ПВВ V и VI классов в комбинированной мортире использовали способ обратного инициирования. Результаты этих испытаний приведены на рис. 2.5 и 2.6.

Установили, что воспламенений МВС не происходит при $l_{обн} = 18$ см для угленита 13П и $l_{обн} = 54$ см для угленита 10П. Испытания в комбинированной мортире позволили сделать заключение о том, что антигризутность зарядов ПВВ IV и V классов при взрывных работах недостаточная: заряды ПВВ IV класса воспламеняют МВС при любой длине обнажения заряда, а ПВВ V класса – при $l_{обн} > 18$ см. Длина 18 см меньше возможного обнажения заряда 32,5 см (см. табл. 2.14). Заряды ПВВ VI класса не воспламеняют МВС при взрыве, если длина их обнажения до 54 см (больше возможной длины 51,1 см). Поэтому антигризутность частично обнаженных зарядов ПВВ VI класса достаточная. Образцы этих же партий угленитов 13П и 10П были испытаны и по стандартным методам. Результаты испытаний в уголковой мортире [129] методом «вверх-вниз» представлены на рис. 2.7. Согласно работе [131], были рассчитаны $m_{50} = 300$ г, $M_{np} = 183$ г для угленита 13П и $m_{50} = 800$ г, $M_{np} = 483$ г для угленита 10П. По уравнению (2.27) была также рассчитана масса пре-

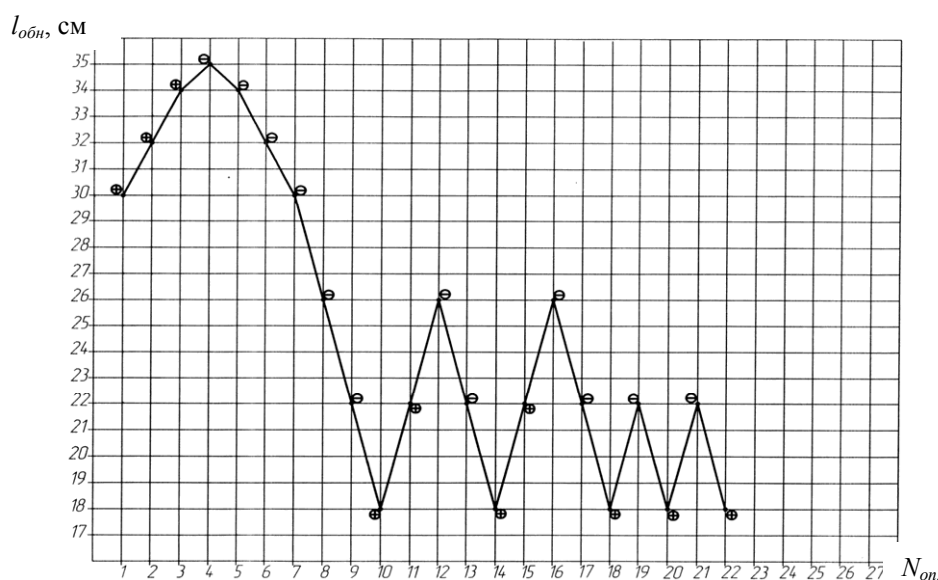


Рис. 2.5. Воспламеняющая способность зарядов угленита 13П массой 1,2 кг в комбинированной мортире: «+» – воспламенение, «-» – нет воспламенения

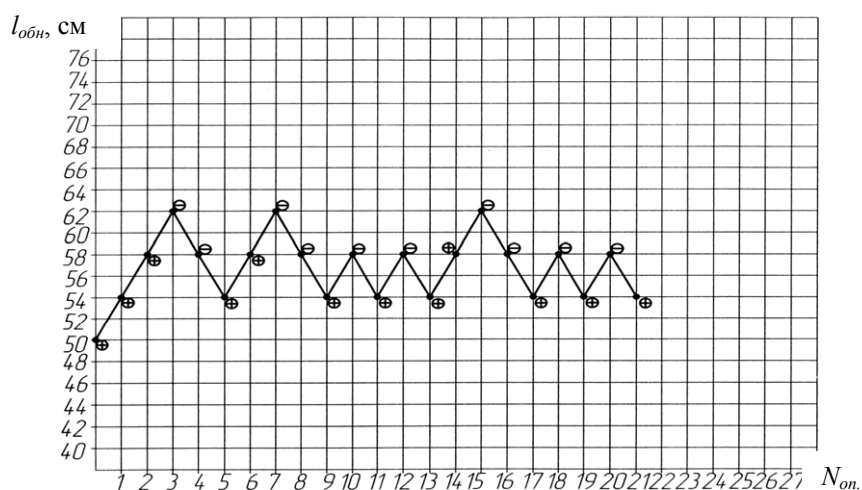


Рис. 2.6. Воспламеняющая способность зарядов угленита 10П массой 1,5 кг в комбинированной мортире: «+» – воспламенение, «-» – нет воспламенения

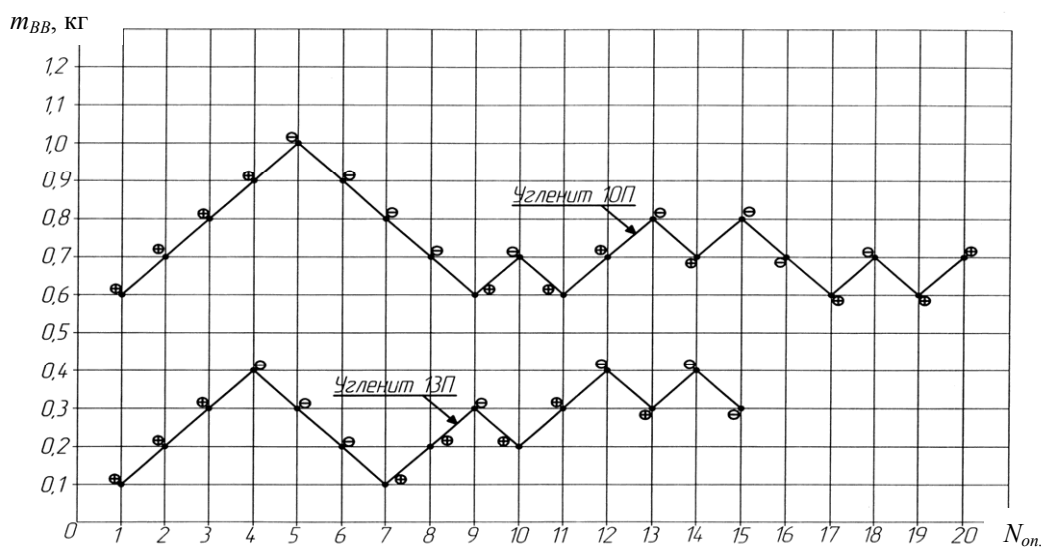


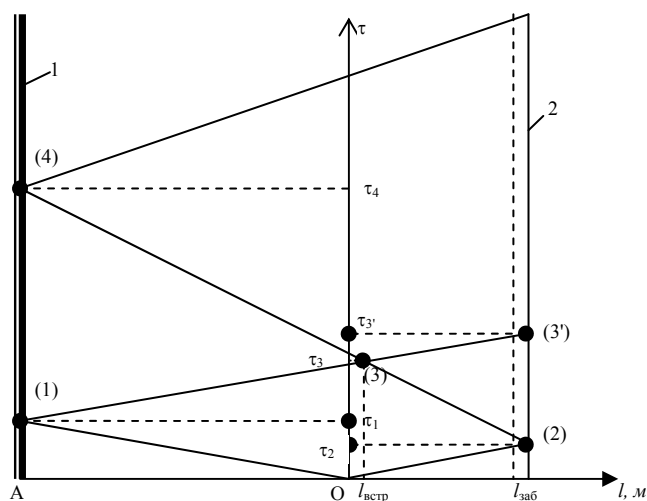
Рис. 2.7. Предохранительные свойства угленитов 13П и 10П в уголковой мортире дельного обнаженного заряда: для угленита 13П ($\rho_{ВВ} = 1,25 \text{ г/см}^3$ и $D = 2327 \text{ м/с}$)

$M_{np} = 162$ г, для угленита 10П ($\rho_{BB} = 1,27$ г/см³ и $D = 1999$ м/с) $M_{np} = 423$ г. Оба результата имеют хорошее соответствие с данными испытаний. Таким образом, проведенные исследования позволили обосновать два критерия антигризутности зарядов ПВВ при взрывных работах – условия (2.18) и (2.28), которые на основании данных о массе предельного заряда в МВС и массе шпурового заряда ПВВ позволяют сделать вывод о безопасности взрывания шпурового заряда во взрывоопасной среде. Эти критерии охватывают условия взрывания не обнаженных и частично обнаженных шпуровых зарядов ВВ в МВС. Они позволяют оценить антигризутность этих зарядов при взрывных работах при прямом и обратном способах их инициирования. Однако до настоящего времени специалисты взрывного дела и по безопасности взрывных работ в шахтах расходятся в оценке безопасности способа обратного инициирования шпуровых зарядов. Решение этого вопроса имеет важное научное и практическое значение для повышения эффективности взрывных работ.

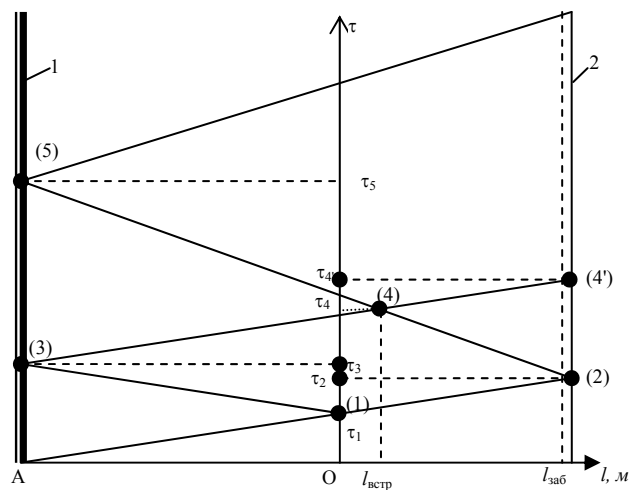
2.4. Исследование факторов, определяющих безопасные и эффективные параметры шпурового заряда ПВВ

Исследования, проведенные за последние годы в МакНИИ и ИГД им. А.А. Скочинского [132, 133, 134, 135, 136], показывают, что способ обратного инициирования шпуровых зарядов ВВ повышает эффективность и безопасность взрывных работ в угольных шахтах. В разделе 2.3 показано, что обратное инициирование зарядов ПВВ V и VI классов обеспечивает высокий уровень безопасности этих ВВ при испытании в МВС. В работах [133,134] установлено, что при распространении детонации по заряду ВВ от донной части шпура к его устью действие взрыва усиливается. Эффективность взрывных работ в горных выработках при применении обратного способа инициирования шпуровых зарядов на 10...18 % больше, чем при применении прямого. Для того, чтобы выяснить вопрос о физической сущности процессов, происходящих при разрушении горных пород взрывом при прямом и обратном способах инициирования шпуровых зарядов, была поставлена и решена газодинамическая задача о распределении давления и скорости газа в продуктах детонации ВВ

вдоль образующей поверхности шпура и распространении в нем волн сжатия и разряжения. В основу этой задачи положены теоретические представления и математические выкладки Ф.А. Баума [137, 138, 139]. Схемы распространения волн детонации по заряду ВВ и возникающих в породе волн сжатия и разряжения при взрыве заряда в шпуре показаны на рис. 2.8.



I – прямое инициирование заряда ВВ в шпуре:



II – обратное инициирование заряда ВВ в шпуре

Рис. 2.8. Схемы распространения детонации по заряду ВВ и волн, возникающих при взрыве шпурового заряда:

- 1 – неразрушаемое дно шпура;
- 2 – грудь забоя с устьем шпура.

Рассмотрим прямое инициирование заряда ВВ в шпуре (см. I рис. 2.8). Точка О – это точка, из которой начинает распространяться детонация по заряду ВВ вдоль оси длины l . При прямом инициировании заряда она движется ко дну шпура, расположенного на плоскости 1. Расстояние $OA=l_3$ соответствует длине заряда ВВ, а $Ol_{заб}$ – расстоянию от заряда ВВ до свободной поверхности (плоскость 2), где находится устье шпура. Влево от точки О движутся продукты детонации ВВ со скоростью D , а вправо движется волна разряжения, которая увлекает за собой часть продуктов детонации. Их скорость равна U . Напишем характеристические уравнения, полученные К.П. Станюковичем [140]:

$$\frac{dJ_+}{dt} + J_+ \frac{dJ_+}{dl} = 0, \quad (2.36)$$

$$\frac{dJ_-}{dt} + J_- \frac{dJ_-}{dl} = 0, \quad (2.37)$$

где J_+ – характеристика волн ($J_+ = W + C$, $J_- = W - C$);

W – скорость движения продуктов взрыва;

C – местная скорость звука в веществе;

t – время детонации.

Решения этих уравнений являются автомодельными, так как зависят от l/t . Поэтому уравнение (2.36) допускает два решения: $J_+ = l/t$ и $J_+ = const$. Те же два автомодельных решения имеет и уравнение (2.37). Тогда $J_+ = D$, потому что на фронте волны $l = D \cdot t$ и $l/t = D$. Но в то же время $J_+ = W + C$, тогда как для движущегося фронта детонационной волны $D = W + C$. Для волны разряжения $J_- = U$, тогда

$$J_- = W - C = \frac{D}{n+1} - \frac{n}{n+1}D = -\frac{D(n-1)}{n+1}. \text{ Таким образом, при показателе политропы } n = 3$$

$U = -D/2$. Знак минус указывает на то, что движение волны разряжения происходит в противоположном направлении от направления движения продуктов детонации ВВ. В момент времени $\tau_1 = OA/D$ продукты детонации достигают дна шпура (1) и отражаются от него. В результате отражения возникает первая отраженная волна (1) – (3'), которая начинает свое движение в сторону свободной поверхности 2. В это же время в ту же сторону движется волна напряжения со скоростью U , которая через

время $\tau_2 = Ol_{заб}/U$ достигает поверхности 2. При ее отражении в точке (2) в массиве возникает волна разряжения, которая движется вглубь массива. С момента ее взаимодействия в точке (3) с отраженной от дна шпура волной напряжения новых волн возникать не будет. В этот момент времени должно произойти истечение продуктов детонации ВВ через трещины в разрушенном этой волной горном массиве. Момент, при котором происходит взаимодействие волн разряжения и напряжения, определяется временем $\tau_3 = \frac{2 \cdot OA}{D} = \frac{2 \cdot Ol_{заб}}{U}$. Тогда $2l_{ВВ} = 4Ol_{заб}$ и $Ol_{заб} = 0,5l_{ВВ}$. В этом случае импульс взрыва, передаваемый породе при прямом инициировании заряда ВВ, будет равен:

$$i_{np} = \int_{l_3/D}^{2l_3/D} P_{66} dt = S_3 P_n \left(\frac{l_3}{D} \right)^3 \int_{l_3/D}^{2l_3/D} \frac{dt}{t^3} = \frac{8}{9} S_3 P_n \frac{l_3}{D} = \frac{8}{9} 2\pi r_3 (r_3 + l_3) l_3 \frac{P_n}{D}, \text{ Н}\cdot\text{с}, \quad (2.38)$$

где P_{66}, P_n – давление продуктов взрыва и детонации ВВ, Па;

S_3 – сечение заряда, м²;

r_3 – радиус заряда ВВ, м.

Теперь рассмотрим обратное инициирование заряда ВВ в шпуре (см. II рис. 2.8). Точка А – это точка, из которой начинает распространяться детонация по заряду ВВ. В точке (1) продукты детонации ВВ сталкиваются с забойкой, отражаются от нее и возникающая волна отражения движется ко дну шпура от точки (1) до точки (3). По забойке и окружающей ее породе движется волна напряжения со скоростью U вдоль линии (1)-(2). В точке (2) происходит ее отражение от свободной поверхности и возникает волна разряжения, которая от этой точки движется в направлении дна шпура к точке (5). В это время в точке (3) в результате отражения волны (1)-(3) возникает новая волна, которая движется в направлении свободной поверхности 2. В точке (4) она взаимодействует с волной разряжения, которая движется ей навстречу от устья шпура. С этого момента новых волн возникать не будет. Тогда, по аналогии с прямым инициированием заряда, можно записать условие взаимодействия волн напряжения и разряжения:

$$\tau_4 = \frac{3AO}{D} = \frac{2Ol_{заб}}{U}.$$

При условии примерного равенства скоростей ($D \approx U$) получим: $Ol_{заб} = 3/2AO$. При этом импульс взрыва, передаваемый при обратном инициировании заряда ВВ, равен:

$$i_{обр} = \int_{l_3/D}^{3l_3/D} P_{вв} dt = S_3 P_n \left(\frac{l_3}{D} \right)^3 \int_{l_3/D}^{3l_3/D} \frac{dt}{t^3} = \frac{256}{243} 2\pi r_3 (r_3 + l_3) l_3 \frac{P_n}{D}, \text{ Н}\cdot\text{с}. \quad (2.39)$$

Из уравнений (2.38) и (2.39) видно, что для одного и того же ВВ импульс взрыва, передаваемый породе при обратном инициировании заряда ВВ, больше импульса взрыва, передаваемого при прямом инициировании. Отношение импульсов при обратном и прямом способах инициирования будет равно: $\bar{\eta} = i_{обр} / i_{пр} = 1,185$. Следовательно, и эффективность действия взрыва заряда ВВ при обратном способе его инициирования будет выше, что и доказано экспериментально Э.О. Миндели в работе [135].

Рассмотрим ситуацию, при которой с взрывчатой атмосферой контактирует торцевая часть шпурового заряда ВВ. В канальной мортире, располагаемой в опытном штреке с взрывоопасной МВС, заряд ВВ, расположенный на расстоянии 5 см от устья канала мортиры, взрывают без забойки при прямом и обратном инициировании. Результаты испытаний ВВ II, IV, V, VI и VII классов в канальной мортире при их прямом и обратном инициировании показали следующее. При обратном способе инициирования зарядов ВВ в канале мортиры масса предельного заряда, не воспламеняющая МВС, меньше, чем при прямом способе. Этот экспериментальный факт специалисты, критикующие обратный способ инициирования, используют как аргумент, указывающий, по их мнению, на увеличение опасности применения ВВ в МВС и ПВС. Однако теоретического объяснения этот факт не получил.

Для рассмотрения процессов, происходящих при взрыве ВВ в канале мортиры, применим решение задачи об определении скорости истечения продуктов детонации ВВ в воздух, полученное Л.Д. Ландау и К.П. Станюковичем [141]. Согласно этому решению, скорость истечения продуктов детонации ВВ в воздух – W_u находится в интервале:

$$\frac{3n-1}{n^2-1}D \leq W_u \leq \frac{3n-1}{n^2-1}D + \frac{2C_k}{k-1}, \quad (2.40)$$

где n – показатель политропы продуктов детонации ВВ;

k – показатель адиабаты продуктов взрыва ВВ;

C_k – скорость звука в расширяющихся продуктах взрыва ВВ в точке сопряжения.

Для случая детонации заряда ВВ в канале мортиры имеет место закон $P_{\text{вв}} V_{\text{ВВ}}^n = \text{const}$, а закон для идеальных газов – $P_{\text{вв}} V_{\text{ВВ}}^k = \text{const}$ не выполняется. Поэтому скорость истечения продуктов взрыва ВВ из канала мортиры будет зависеть только от скорости детонации ВВ и показателя политропы:

$$W_u = \frac{3n-1}{n^2-1}D. \quad (2.41)$$

Следовательно, с учетом уравнений (2.36) и (2.37) можно определить отношение скоростей истечения продуктов взрыва при прямом и обратном инициировании:

$$\theta = \frac{W_u^{\text{обп}}}{W_u^{\text{нп}}} = \frac{n+1}{n-1}. \text{ При } n = 3 \theta = 2, \text{ то есть скорость истечения продуктов детонации}$$

ВВ при обратном способе инициирования в 2 раза больше, чем при прямом. Практически, для всех промышленных ВВ в диаметре патронов 32...36 мм при плотности ВВ 1,0...1,3 г/см³ показатель политропы $2 \leq n < 3$. Поэтому для ВВ II, IV, V, VI и VII классов можно рассчитать скорость истечения продуктов детонации из канала мортиры как при прямом, так и при обратном способе инициирования. Результаты этих расчетов и значения предельных зарядов ВВ, не воспламеняющих МВС при испытании их в канальной мортире опытного штрека МакНИИ, приведены в табл. 2.17. Последние исследования, о которых говорится выше, показывают, что в комбинированной мортире воспламеняющая способность заряда ВВ зависит от способа его инициирования и длины той части заряда, которая обнажена и непосредственно контактирует с МВС. Поэтому были проведены исследования для определения вли-

Таблица 2.17

Результаты расчета скорости истечения продуктов детонации ВВ из канала мортиры

ВВ	Класс ВВ	Скорость детонации ВВ, м/с	Показатель	Скорость истечения продуктов детонации ВВ из канала мортиры, м/с		Кэфф эффици	Предельные заряды ВВ при испытании в МВС, кг	
				затель политропы	обратное инициир.		прямое инициир.	обратное инициир.
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Аммонит № 6ЖВ	II	4204	2,24	5981,8	2289,3	2,61	~0,015	~0,02
Аммонит Т-19	IV	4161	2,26	5854,6	2262,8	2,59	0,2	0,08
Угленит Э-6	V	2224	2,05	3575,9	1231,0	2,9	~1,5	0,90
Угленит 13П	V	2208,2	2,09	3455,1	1218,8	2,83	1,0	0,6
Угленит 12ЦБ	VI	1927	2,23	2759,8	1050,9	2,63	1,5	> 1,0
Угленит Н-12	VI	1911	2,01	3161,8	1060,9	2,98	> 1,0	> 1,0
Угленит 10П	VI	1955,3	2,40	2963,8	1220,4	2,43	> 1,5	> 1,0
Ионит	VII	1676	2,21	2429,4	915,7	2,65	> 1,5	> 1,5

яния обратного способа инициирования заряда ВВ на его предохранительные свойства. Анализ результатов, полученных в шахтах Японии и в опытной шахте Польши «Барбара» при взрывных работах с применением высокопредохранительных ВВ показал следующее [142]. Опытные взрывания в забое с МВС шпуровых зарядов ПВВ прямым и обратным способами инициирования не выявили различий, которые могли бы повлиять на их антигризутность. Тем не менее, в канале mortarы уровень предохранительных свойств ПВВ существенно ниже при обратном способе инициирования заряда ВВ, чем при прямом. Почему это происходит?

Рассмотрим условия истечения продуктов взрыва ПВВ из канала mortarы при взрыве заряда ПВВ [143]. Оно характеризуется их удельным расходом – B :

$$B = W_u \cdot S_{к.м.} \cdot \rho_{зар}, \text{ кг/с}, \quad (2.42)$$

где $S_{к.м.}$ – сечение канала mortarы, м^2 ;

$\rho_{зар}$ – плотность заряжения ПВВ в канале, кг/м^3 ,

который определяет время – t_u , необходимое для истечения продуктов взрыва заряда ВВ из канала:

$$t_u = \frac{m_{ВВ}}{B} = \frac{l_{к.м.}}{W_u}, \text{ с}, \quad (2.43)$$

где $l_{к.м.}$ – длина канала mortarы, вдоль которого происходит движение продуктов взрыва ВВ.

При прямом способе инициирования $l_{к.м.}$ равна полной длине канала mortarы, а при обратном – исходя из условий взрывания заряда ПВВ: $l_{к.м.} = l_{зар} + 0,05$ (м) или $l_{к.м.} = 982,936 \cdot m_{ВВ} / \rho_{ВВ} + 0,05$ (м). Различие возникает потому, что при прямом способе продукты взрыва движутся по всей длине канала mortarы, а при обратном – только в направлении устья канала на расстояние 0,05 м. Время истечения продуктов взрыва ПВВ из канала mortarы при обратном способе инициирования существенно меньше, чем при прямом. В табл. 2.18 приведены результаты расчетов t_u в зависимости от массы предельных зарядов ПВВ.

Результаты расчета показывают, что время, в течение которого продукты взрыва заряда ПВВ истекают из канала mortarы, может оказывать существенное

Таблица 2.18

Пределные заряды ПВВ в канале мортиры при прямом и обратном инициировании

№ п	ПВВ	Прямое инициирование заряда					Обратное инициирование заряда					$\frac{t_{u,n}}{t_{u,o}}$
		$l_{к.м.}$ м	W_{wb} м/с	M_{np}^n кг	$t_{u,n}$ мс	$l_{к.м.}$ м	W_{wb} м/с	M_{np}^n кг	$t_{u,o}$ мс			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11		
1	Аммонит АП-5ЖВ	1,05	2350,0	0,120	0,4468	0,097	5920,7	0,05	0,01635	27,3		
2	Аммонит Т-19	1,05	2262,8	0,18-0,20	0,464	0,1249	5854,6	0,08	0,0213	21,8		
3	Аммонит ПЖВ-30 (опытный образец)	1,05	2004,0	~0,4	0,524	0,284	5210,4	0,20	0,05451	9,6		
4	Угленит Э-6	1,05	1231,0	1,4-1,5	0,853	0,758	3575,9	0,9	0,212	4,0		
5	Угленит 13П	1,05	1332,0	1,0-1,2	0,7883	0,5334	3769,6	0,6	0,1415	5,6		
6	Угленит 12ЦБ	1,05	1050,9	1,4-1,5	0,9991	0,9237	2759,8	~1,2	0,3347	2,9		
7	Угленит 10П	1,05	1220,4	1,4-1,5	0,86	0,8557	2963,8	1,0	0,2887	2,9		
8	Ионит	1,05	915,7	1,5-1,6	1,147	1,05	2429,4	1,4	0,4322	2,6		

влияние на уровень предохранительных свойств ПВВ. Вместе с тем, это влияние не одинаково для зарядов ПВВ, существенно отличающихся по уровню предохранительных свойств. Так, ПВВ с низким уровнем предохранительных свойств (III и IV классы) имеют различие между предельными зарядами, полученными при прямом и обратном способе инициирования примерно в 2,5...3 раза, тогда как время истечения продуктов взрыва при прямом способе инициирования больше времени при обратном в 21,8...27,3 раза. По мере повышения уровня предохранительных свойств ПВВ различия как в величинах предельных зарядов, так и во времени истечения продуктов взрыва из канала мортиры при прямом и обратном способах инициирования существенно уменьшаются. Для высокопредохранительных ВВ отношение масс предельных зарядов при прямом и обратном способах составляет всего 1,2...1,5 раза, а времена истечения продуктов взрыва из канала отличаются в 2,6...2,9 раза. Был проведен корреляционный анализ данных табл. 2.18 и получены эмпирические зависимости массы предельного заряда ПВВ в канале мортиры от времени истечения продуктов взрыва из канала при прямом и обратном способе инициирования заряда. Для прямого способа инициирования зависимость имеет следующий вид:

$$M_{np}^n = 1,6 - 2,082 \exp[-3,4347 t_{u.n}^{2,8483}], \text{ кг, } /r/ = 0,99. \quad (2.44)$$

При обратном способе вид зависимости следующий:

$$M_{np}^o = 2,2184533[0,98133664 - \exp(-2,4022323 t_{u.o})], \text{ кг, } /r/ = 0,998, \quad (2.45)$$

где M_{np}^n , M_{np}^o – предельные заряды ПВВ при прямом и обратном способе инициирования заряда, кг;

$t_{u.n}$, $t_{u.o}$ – время истечения продуктов взрыва из канала мортиры при прямом и обратном способе инициирования, мс.

Была установлена корреляционная связь между отношениями предельных зарядов в мортире M_{np}^n / M_{np}^o и времен истечения продуктов взрыва из канала $t_{u.n} / t_{u.o}$.

Зависимость имеет вид:

$$\frac{M_{np}^n}{M_{np}^o} = 1,904 \left[1,408 - \exp(-0,1107 \left\{ \frac{t_{u.n}}{t_{u.o}} \right\}) \right], /r/ = 0,993. \quad (2.46)$$

Полученные зависимости позволяют решить задачу о влиянии способа инициирования зарядов при взрывных работах на антигризутность зарядов ПВВ. В основу решения этой задачи положим установленные в работе факты. Первый – уменьшение предельного заряда ПВВ в МВС при уменьшении времени истечения продуктов взрыва ПВВ из канала mortarы – зависимости (2.44) и (2.45). Второй – уменьшение отношения масс предельных зарядов ПВВ, полученных при прямом и обратном способе инициирования, при уменьшении отношения времен истечения продуктов взрыва при тех же способах взрывания. Третий факт установлен в разделе 2.2: массы предельных зарядов ПВВ, взрывааемых в канале стальной mortarы и mortarы из разрушаемого материала (углецементные блоки) также отличаются между собой. Это различие можно установить из зависимостей (2.23) и (2.24). Действительно, если их преобразовать с учетом уравнения (2.21), то получим отношение предельных зарядов ПВВ, взрывааемых в канале разрушаемого углецементного блока и стальной mortarы:

$$\frac{M_{np}^p}{M_{np}^m} = \frac{57,932}{30,27644} \left(\frac{P_{к.м}}{P_{к.м}} \right)^{-0,103}. \quad (2.47)$$

Сравнивая уравнения (2.47) и (2.46), можно установить влияние способа инициирования заряда на антигризутность заряда ПВВ. Для конкретного ПВВ показатель $P_{к.м}$ зависит от его параметров и не зависит от условий взрывания ВВ.

$\left(\frac{P_{к.м}}{P_{к.м}} \right)^{-0,103} = 1$. Тогда $\frac{M_{np}^p}{M_{np}^m} = \frac{M_{np}^n}{M_{np}^o}$. Это равенство объясняется следующим. Масса

предельного заряда ПВВ зависит от предела прочности материала mortarы, в которой он взрывается. В случае разрушаемой mortarы она возрастает и ее можно определить по уравнению (2.47). При изменении способа инициирования заряда в канале mortarы, например, с прямого на обратный, масса предельного заряда уменьшается и ее можно определить по уравнению (2.46). Взрывные работы характерны тем, что необходимо одновременно учитывать как степень разрушения горных пород взрывом, так и способ инициирования заряда ПВВ. Вследствие разрушения горной породы взрывом заряда ПВВ его уровень предохранительных свойств повышается, а в

случае обратного способа инициирования по сравнению с прямым снижается. Согласно критериям оценки антигризутности зарядов ПВВ (2.18) и (2.28), можно установить следующее. Равенство отношений масс предельных зарядов ПВВ, которые характеризуют их уровень предохранительных свойств в стальной и разрушаемой мортире и которые получены в канале мортиры, но при разных способах инициирования заряда, не должно изменяться. Следовательно, можно определить критическое отношение $t_{u.n}/t_{u.o}$, которое будет оказывать влияние на антигризутность заряда ПВВ, взрываемого в разрушаемой горной породе. Подставляем уравнение (2.47) в уравнение (2.46) и решаем его относительно $t_{u.n}/t_{u.o}$:

$$\frac{57,932}{30,27644} \left(\frac{П_{к.м}}{П_{к.м}} \right)^{-0,103} = 1,904 \left[1,408 - \exp \left(-0,1107 \left\{ \frac{t_{u.n}}{t_{u.o}} \right\} \right) \right]$$

или

$$1,934 = 1,904 \left[1,408 - \exp \left(-0,1107 \left\{ \frac{t_{u.n}}{t_{u.o}} \right\} \right) \right]. \text{ Следовательно, } t_{u.n}/t_{u.o} = 8,45.$$

Полученное значение отношения показывает, что обратный способ инициирования заряда в шпурах, пробуренных в разрушаемой породе, действительно может оказывать влияние на антигризутность заряда ПВВ. Оно начинает сказываться только при $t_{u.n}/t_{u.o} \geq 8,45$, при меньших значениях влияния не будет. Поэтому при проведении экспериментов в шахтах и не было отмечено существенной разницы в антигризутности зарядов ПВВ при обратном и прямом способе инициирования. Из табл. 2.18 видно, что $t_{u.n}/t_{u.o} > 8,45$ только у ПВВ с низким уровнем предохранительных свойств (III и IV классы), а $t_{u.n}/t_{u.o} < 8,45$ имеют высокопредохранительные ПВВ (V и VI классы). Поэтому на антигризутность шпуровых зарядов ПВВ V и VI классов способ обратного инициирования не влияет, тогда как для зарядов ПВВ III и IV класса он может снизить безопасность взрывных работ. Таким образом, изучение такого фактора взрыва заряда ПВВ в канале мортиры, как время истечения продуктов взрыва ПВВ из ее канала, показало, что существуют условия взрывания, когда время истечения оказывает влияние на антигризутность заряда ПВВ.

В начале XX века исследованиями К. Бейлинга (разд. 1) было установлено, что

вероятность воспламенения МВС при взрыве заряда ПВВ в канале мортиры зависит от длины свободного пространства – расстояния от устья шпура до заряда. Позднее в работах [144,145] ВостНИИ (О.Г. Чулков) и МакНИИ (В.И. Зенин и В.М. Расторгуев) исследовались причины воспламенения МВС в канале мортиры. Было установлено, что воспламеняющая способность заряда ПВВ IV класса существенным образом зависит от расстояния между торцом заряда и устьем канала мортиры. Аналогичные результаты получили Ульрих и Харцт [146] для ПВВ, сенсibilизированных нитроэфирами. Исследования показали, что частота воспламенения МВС при взрыве заряда ПВВ в канале мортиры уменьшается с увеличением длины свободного пространства, а масса предельного заряда возрастает с увеличением расстояния от торца заряда до устья шпура. Причем, эта тенденция сохраняется как при прямом, так и при обратном способе инициирования заряда. Изменение уровня предохранительных свойств ПВВ в зависимости от величины времени истечения продуктов взрыва из канала мортиры экспериментально установлено. Весомым доводом в пользу доказательства этого факта является применение внутренней забойки. Работами А.И. Селезнева, Ф.М. Галаджия, Н.Я. Удовиченко, Э.О. Миндели, П.А. Демчука, В.Е. Александрова, В.И. Стикачева и Н.Р. Шевцова [147, 148] установлено, что забойка, расположенная внутри канала, оказывает значительное влияние на массу предельного заряда ПВВ и условия воспламенения МВС. Оказалось, что даже не-предохранительные ВВ, которые воспламеняют МВС, могут быть достаточно безопасными в ней, если в канале мортиры имеется забойка.

2.5. Исследование взаимодействия продуктов взрыва ПВВ с внутренней забойкой шпуров

Рассматривая забойку шпуров как средство обеспечения безопасности взрывных работ, многие авторы в своих работах пытались дать объяснение ее влиянию на увеличение массы предельного заряда ВВ в МВС [149]. Системное обоснование безопасных параметров внутренней забойки шпуров дано А.И. Селезневим, Ф.М. Галаджиим и В.И. Стикачевим в МакНИИ [150]. Их работами были установлены

безопасная длина забойки в шпурах и необходимое время для запираания продуктов взрыва ВВ во взрывной камере. Вместе с тем, Н.Я. Удовиченко установила, что безопасная длина забойки в канале мортиры может существенно изменяться в зависимости от массы заряда ПВВ и содержания пламегасителя в его составе. Учитывая это, проф. Н.Р. Шевцов предложил определять безопасную длину забойки с помощью пламегасящей и флегматизирующей способности ее материала [151]. Тогда предохранительные свойства заряда ПВВ могут быть повышены забоечным материалом, который при движении в шпуре вместе с продуктами взрыва ПВВ отбирает у них тепло и снижает температуру газообразных продуктов взрыва. Кроме того, под действием продуктов взрыва ПВВ забоечный материал вылетает из канала шпура с образованием из мелких частиц забойки облака, которое, смешиваясь с МВС, предотвращает воспламенение метана и угольной пыли.

Согласно этой модели, длина забойки, которая должна обеспечивать охлаждение продуктов взрыва ПВВ до безопасной температуры МВС – T_6 (923⁰К), определяется по следующей формуле:

$$l_{заб} = 80,17 \cdot 10^{-5} \sqrt{a_o} \sqrt{\frac{Q_t}{\eta_3}}, \text{ м}, \quad (2.48)$$

где a_o – коэффициент, определяющий долю энергии, которую должен отобрать у продуктов взрыва ПВВ в процессе теплообмена с ними забоечный материал;
 Q_t – скорость выделения энергии взрыва при детонации заряда ПВВ:

$$Q_t = \frac{Q_v m_{ВВ} D}{l_3}, \text{ Дж/кг}; \quad (2.49)$$

η_3 – показатель теплофизической эффективности (способность поглощать энергию) материала забойки относительно воздуха: $\eta_3 = 2,8 \cdot 10^{-9} \lambda_3^{3/2} \rho_{заб}$;

λ_3 – удельная теплопоглощающая способность материала забойки;

$\rho_{заб}$ – плотность материала забойки.

Для расчета безопасной длины забойки l_3 необходимо знание критерия a_o . Для этого были проведены исследования влияния материала забойки как предохранительной буферной среды при взрыве зарядов на его теплообмен с продуктами дето-

нации ПВВ [151]. Исходя из времени запыриания продуктов взрыва ПВВ в канале мортиры [152], определяли максимальный линейный размер зоны охлаждения раскаленных продуктов взрыва ВВ в невзрывчатой забоечной среде.

Размер данной зоны определяется длиной буферной среды – $L_{\bar{o}}$, при прохождении которой нагретые до высокой температуры продукты взрыва ВВ охлаждаются и становятся не способными при смешивании с МВС вызывать ее воспламенение. Известна зависимость $L_{\bar{o}}$ от параметров, характеризующих агрессивность действия взрыва заряда ВВ на взрывоопасную среду и параметров буферной среды [153]:

$$L_{\bar{o}} = \alpha_o \left(\frac{a_o Q_t}{\lambda_3^{3/2} \rho_c} \right)^{1/2}, \text{ м}, \quad (2.50)$$

где α_o – коэффициент, учитывающий относительное различие тепловых потоков через единицу площади буферной среды в открытом ($\alpha_o = 1$) и замкнутом ($\alpha_o > 1$) пространстве канала при расширении продуктов взрыва и буферной среды;

ρ_c – плотность буферной среды.

Основным параметром, характеризующим предохранительные свойства буферной среды (способность предотвращать и локализовать взрыв), является взрывопредотвращающая концентрация флегматизатора в предохранительной среде:

$$C_n = \frac{m_{\phi}}{l_{nc} S_{к.м.}}, \text{ кг/м}^3, \quad (2.51)$$

где m_{ϕ} – масса флегматизатора, идущего на создание предохранительной буферной среды;

l_{nc} – длина предохранительной буферной среды.

Из уравнения (2.51) найдем длину предохранительной буферной среды:

$$l_{nc} = \frac{m_{\phi}}{S_{к.м.} C_n}, \text{ м}. \quad (2.52)$$

При расширении буферной среды происходит ее смешение с продуктами взрыва ВВ, их разбавление и одновременное снижение в буферной среде концентрации флегматизатора. С учетом этого уравнение (2.52) будет иметь вид:

$$l_{nc} = \frac{K_p m_\phi}{S_{к.м.} C_n}, \text{ м}, \quad (2.53)$$

где $K_p = C_n/C_\phi$ – коэффициент разбавления, учитывающий снижение концентрации флегматизатора в предохранительной среде от начальной (C_n) до C_ϕ , предотвращающей взрыв МВС.

Критические условия образования предохранительной буферной среды при взрыве таковы: если $L_{\bar{\sigma}} > l_{nc}$, то воспламенение возможно, так как длина предохранительной среды меньше длины разлета высокотемпературных продуктов взрыва в буферной среде; если $L_{\bar{\sigma}} \leq l_{nc}$, то воспламенение не возможно, так как длина предохранительной среды превышает длину разлета высокотемпературных продуктов взрыва ВВ.

Представим материал внутренней забойки шпура как предохранительную буферную среду. Тогда при $L_{\bar{\sigma}}/l_{nc} = 1$ из уравнений (2.48) и (2.53) получим:

$$\frac{L_{\bar{\sigma}}}{l_{nc}} = \frac{\alpha_o a_o^{0,5} Q_t^{0,5} S_{к.м.} C_n}{K_p m_\phi \lambda_3^{0,75} \rho_c^{0,5}} = 1. \quad (2.54)$$

Из этого равенства можно определить коэффициент a_o , показывающий, какую долю энергии должна отобрать буферная среда у продуктов взрыва в процессе их теплообмена при смешении:

$$a_o^{0,5} = \frac{K_p m_\phi \lambda_3^{0,75} \rho_c^{0,5}}{\alpha_o Q_t^{0,5} S_{к.м.} C_n}. \quad (2.55)$$

Практический интерес вызывает влияние коэффициента a_o на длину забойки, обеспечивающей безопасность взрывания заряда ВВ в канале мортиры. В опытном штреке с МВС были проведены экспериментальные исследования взрывов зарядов непредохранительного ВВ в канале мортиры с забойкой. Установили минимальные безопасные длины забоек, которые предотвращали воспламенение МВС [154]. Безопасная длина забойки – $l_{\bar{\sigma}}$ в канале мортиры вплоты к заряду аммонита № 6ЖВ приведена в табл. 2.19. Забойка в этих условиях взрывания предотвращает воспламенение МВС, если при взрыве в канале мортиры создается предохранительная буферная среда.

Таблица 2.19

Безопасная длина забойки в канале Mortиры

№ п/ п	Характеристика забоечного материала				Масса заряда ВВ, $m_{ВВ}$, кг	Безопас- ная длина забойки, l_0 , см
	Название материала	Плот- ность за- бойки, $\rho_{заб}$, кг/м ³	λ_3 , кДж/ кг	η_3		
1	2	3	4	5	6	7
1	Огнетушащий порошок ПФ	700	1020	2019	0,5	5,0
2	Сыпучая забойка ВМК-1	1050	2040	8566	0,6	5,0
3	Песчано-глиняная смесь ПГС	1810	965	4805	0,5	5,0
4	Пластичная забойка ПЗМ-3	1800	953	4682	0,6	5,0
5	Огнетушащий порошок ПСБ-3	1020	1420	4738	0,5	7,0
6	Алюмоаммонийные квасцы ААК	590	2480	8296	0,5	7,5
7	Вода	1000	2307	9811	0,6	11,0
8	Карбамид (порошок)	600	2270	5746	0,5	15,0
9	Флюорит	1180	634	1668	0,5	25,0
10	Забойка ВМК в п/э шланге Ø 50 мм	1050	2040	8566	0,5	30,0
11	Песок	1620	643	2339	0,5	33,0
12	Пластичная забойка ПЗМ-3 в п/э ампуле Ø 37 мм	1800	953	4682	0,6	33,0

Энергия взрыва заряда ВВ, выделяемая в единицу времени, равна:

$$Q_t = Q_v m_{BB} \frac{3,24 Q_v^{0,5}}{l_3}, \text{ кДж/с.}$$

С учетом этого уравнения и приняв массу забойки $m_{заб} = m_{\phi}$, получим:

$$a_o = \frac{K_p^2 m_{заб} \lambda_3^{1,5} \rho_c l_3}{\alpha_o^2 (3,24 Q_v)^{1,5} m_{BB} C_n S_{к.м.}}.$$

Выразим l_3 через l_o и длину канала мортиры – $l_{к.м.}$. Тогда

$$a_o = \left(\frac{K_p}{\alpha_o} \right)^2 \left(\frac{\lambda_3}{3,24 Q_v} \right)^{1,5} \frac{m_{заб}}{m_{BB}} \cdot \frac{\rho_c}{C_n} \cdot \frac{l_{к.м.} - l_o}{S_{к.м.}}. \quad (2.56)$$

Результаты расчета a_o по уравнению (2.56) даны в табл. 2.20. Расчет показал, что доля тепла, которую поглощает материал забойки у продуктов взрыва ВВ при их теплообмене в предохранительной буферной среде, предотвращающей воспламенение МВС, не велика. Максимальное значение $a_o = 0,2$, минимальное – $a_o = 0,0003$, то есть они отличаются примерно в 670 раз. Этот результат говорит о том, что теплообмен в предохранительной буферной среде между материалом забойки и продуктами взрыва не играет существенной роли в повышении безопасности взрывания заряда ВВ в МВС. Следовательно, необходимо учитывать более значимые факторы. К ним относится время запираания продуктов взрыва ПВВ забойкой [155]. В этой работе дана формула для расчета скорости выбрасывания забойки из канала мортиры:

$$U_{в.з.} = \left[\frac{P_n (V_3/V_k)^k}{\rho_{заб} \left(1 + 0,5 \Sigma_s + \Sigma_t + 1/2 \Sigma_p \frac{l_o}{S_{к.м.}} \right)} \right]^{1/2}, \text{ м/с,} \quad (2.57)$$

где P_n – начальное давление продуктов взрыва заряда ВВ в зарядной камере канала мортиры;

V_3, V_k – объемы заряда ВВ и канала мортиры соответственно;

$\Sigma_s, \Sigma_t, \Sigma_p$ – коэффициенты аэродинамического сопротивления, трения и расхода материала забойки соответственно.

Для зарядов ВВ в канале мортиры плотность заряжания не превышает 1000 кг/м^3 ,

Таблица 2.20

Результаты расчета a_0 для безопасной длины забойки в канале мортиры радиусом $0,0275$ м, сечением $2,375 \cdot 10^{-3}$ м² и длиной $0,9$ м при взрыве зарядов аммонита № 6ЖВ

Забоечный материал	\varnothing	l_0 , м	$m_{заб}$, кг	λ_3 , кДж/кг	Q_v , кДж/кг	l_3 , м	$m_{ВВ}$, кг	$\Delta_{ВВ}$, кг/м ³	α_0	K_p	ρ_c , кг/м ³	C_{n_3} , кг/м ³	$\frac{l_{заб}}{l_{к.м.}} - l_3$	$\left(\frac{l_3}{l_{к.м.}}\right)^k$	$\rho_{заб}$, кг/м ³	a_0
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
ВМК-1	36	0,05	0,125	2040	4284,4	0,55	0,6	460,0	24,44	7,0	404,9	150,4	0,143	0,554	1050	0,2000
ПГС	32	0,05	0,215	965	4284,4	0,57	0,5	370,0	25,02	6,6	488,1	274,3	0,151	0,578	1810	0,0770
ПЗМ-3	36	0,05	0,214	953	4284,4	0,55	0,6	460,0	24,44	7,0	512,2	257,4	0,143	0,554	1800	0,0850
ПСБ-3	32	0,07	0,170	1420	4284,4	0,57	0,5	370,0	25,02	4,71	421,2	216,9	0,212	0,578	1020	0,0600
ААК	32	0,075	0,105	2480	4284,4	0,57	0,5	370,0	25,02	4,4	339,08	133,9	0,227	0,578	590	0,0980
Н ₂ О	36	0,11	0,261	2307	4284,4	0,55	0,6	460,0	24,44	3,182	568,8	314,0	0,314	0,578	1000	0,0730
Карба-мид	32	0,15	0,214	2270	4284,4	0,57	0,5	370,0	25,02	2,2	486,3	273,0	0,454	0,554	600	0,0310
Флюорит	32	0,25	0,701	1668	4284,4	0,57	0,5	370,0	25,02	1,32	1107,0	894,4	0,757	0,578	1180	0,0160
Песок	32	0,33	1,27	643	4284,4	0,57	0,5	370,0	25,02	1,0	1833,8	1620	1,0	0,578	1620	0,0003
ВМК-1 п/э шл. Ø 50	32	0,30	0,618	2040	4284,4	0,57	0,5	370,0	25,02	1,1	1081,2	867,4	0,909	0,578	867,8	0,0133
ПЗМ-3 п/э шл. Ø 37	36	0,33	0,638	953	4284,4	0,55	0,6	460,0	24,44	1,0	1068,8	814,0	1,0	0,554	814,6	0,0035
Воздух	36	0,875	$2,54 \cdot 10^{-3}$	455	4284,4	0,171	0,1865	460,0	11,22	1,00	53,33	1,22	1,0	0,133	1,22	0,0018

поэтому начальное давление в канале можно определить по уравнению, предложенному Дж. Тейлором [156]:

$$P_n = 80540,1 \frac{NT_g \Delta_{BB}}{1 - 0,01 \bar{\alpha} \Delta_{BB}} \sigma(x), \text{ Па}, \quad (2.58)$$

где N – число молей газа продуктов взрыва в 0,1 кг ВВ;

T_g – температура продуктов взрыва, °K;

Δ_{BB} – плотность заряжения ВВ, кг/м³;

$$\sigma(x) = 1 + x + 0,625x^2 + 0,287x^3 + 0,193x^4, \quad x = \frac{v}{100/\Delta_{BB} - \bar{\alpha}}, \quad v = \sum_{i=1}^i N_i v_i,$$

v – второй вириальный коэффициент продуктов взрыва ВВ;

$\bar{\alpha}$ – объем, занимаемый негазообразными продуктами взрыва в 0,1 кг ВВ.

Для условий взрывания аммонита № 6ЖВ с забойкой, имеющей безопасную длину в МВС, по уравнениям (2.57) и (2.58) рассчитана скорость выбрасывания забойного материала. Используя значения безопасной длины забойки и скорости выбрасывания материала из мортиры, установили время запираания продуктов взрыва ВВ забойкой в канале:

$$\tau_3 = l_{\sigma} / U_{\sigma.з.}, \text{ мс}. \quad (2.59)$$

Результаты расчетов по уравнениям (2.57), (2.58) и (2.59) представлены в табл. 2.21. По этим данным сделан корреляционный анализ, который позволил установить степень влияния на величины a_o и l_{σ} при взрыве заряда непродохранительного ВВ в канале мортиры различных факторов, определяющих предохранительное действие забойки в МВС. В табл. 2.22 приведены результаты анализа без учета свойств воздуха, находящегося в канале мортиры, в табл. 2.23 – с учетом его свойств.

Исследования показали, что для предохранительной буферной среды в виде забойки, расположенной в канале мортиры, существует сильная связь между длиной забойки и временем запираания продуктов взрыва в канале. Достоверной же связи между длиной забойки ($l_{заб}$) и коэффициентом, характеризующим теплоотбор у продуктов взрыва ВВ материалом забойки (a_o) не установлено. Поэтому можно установить зависимость безопасной длины забойки в канале мортиры от параметров взры-

Таблица 2.21

Результаты расчета времени запыления продуктов взрыва ВВ забойкой в канале мортиры

№ п	Забоечный материал	ρ_c , кг/м ³	$P_{н0}$ Па	$\left(\frac{V_3}{V_k}\right)^k$	l_0 , м	$l_{к.м.} - l_3$, м	$U_{6.3.}$, м/с	a_0	Время запыления, τ_3 , мс
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	ВМК-1	404,9	$6,396 \cdot 10^8$	0,553	0,05	0,35	715,2	0,2	0,49
2	ПГС	488,1	$5,14 \cdot 10^8$	0,632	0,05	0,35	624,2	0,077	0,53
3	ПЗМ-3	512,2	$6,396 \cdot 10^8$	0,553	0,05	0,35	635,9	0,085	0,55
4	ПСБ-3	421,2	$5,14 \cdot 10^8$	0,632	0,07	0,33	644,0	0,060	0,51
5	ААК	339,08	$5,14 \cdot 10^8$	0,632	0,075	0,33	709,1	0,098	0,47
6	Вода	568,8	$6,396 \cdot 10^8$	0,553	0,11	0,35	608,9	0,073	0,57
7	Карбамид	486,3	$5,14 \cdot 10^8$	0,632	0,15	0,33	472,2	0,031	0,696
8	Флюорит	1107,0	$5,14 \cdot 10^8$	0,632	0,25	0,33	231,0	0,016	1,43
9	Песок	1833,8	$5,14 \cdot 10^8$	0,632	0,33	0,33	145,0	0,0003	2,28
10	ВМК-1 п/э шл. Ø 50 мм	1081,2	$5,14 \cdot 10^8$	0,632	0,30	0,33	203,8	0,0133	1,62
11	ПЗМ-3 п/э шл. Ø 37 мм	1068,8	$6,396 \cdot 10^8$	0,553	0,33	0,33	198,2	0,0035	1,67
12	Воздух	53,33	$6,396 \cdot 10^8$	0,133	0,875	0,875	477,3	0,0018	1,83

Таблица 2.22

Результаты корреляционного анализа влияния различных факторов на a_0 и l_0 без учета воздуха

Характеристики корреляционной связи	a_0										l_0			
	ρ_c	l_0	$U_{\text{в.з.}}$	τ_3	λ_3	C_n	K_p	τ_3	λ_3	$U_{\text{в.з.}}$	ρ_c	C_n		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13		
Коэффициент корреляции, /г/	0,618	0,71	0,75	0,655	0,3	0,63	0,756	0,87	0,25	0,891	0,81	0,81		
Ошибка коэффициента корреляции, $S_{ r }$	0,262	0,234	0,222	0,252	0,317	0,259	0,218	0,164	0,323	0,152	0,196	0,197		
Показатель достоверности коэффициента корреляции, $t_{ r } > t_{\nu} (9; 0,05); t_{\nu} = 2,26$	2,36	3,04	3,37	2,6	0,96	2,433	3,47	5,31	0,77	5,89	4,12	4,12		
Наличие корреляц. связи	слабая	есть	есть	есть	нет	есть	есть	есть	нет	есть	есть	есть		

Таблица 2.23

Результаты корреляционного анализа влияния различных факторов на a_0 и l_0 с учетом воздуха

Характеристики корреляционной связи	a_0										l_0			
	$U_{\text{в.з.}}$	l_0	τ_3	$U_{\text{в.з.}}^2$	$U_{\text{в.з.}}^2 \rho_c$	$\lambda_3 m_{\text{заб}}$	a_0	$U_{\text{в.з.}}$	τ_3	$U_{\text{в.з.}}^2 \rho_c$	$U_{\text{в.з.}}^2 m_{\text{заб}}$	$\lambda_3 m_{\text{заб}}$	$U_{\text{в.з.}} \tau_3$	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13		
Коэффициент корреляции, /г/	0,719	0,562	0,686	0,75	0,412	0,562	0,424	0,689	0,734	0,753	0,052	0,79		
Ошибка коэффициента корреляции, $S_{ r }$	0,219	0,2615	0,23	0,209	0,288	0,262	0,286	0,229	0,215	0,208	0,316	0,194		
Показатель достоверности коэффициента корреляции, $t_{ r } > t_{\nu} (10; 0,05); t_{\nu} = 2,228$	3,273	2,148	2,98	3,58	1,43	2,147	1,48	3,05	3,42	3,62	0,0166	4,08		
Наличие корр. связи	есть	нет	есть	есть	есть	нет	нет	есть	есть	есть	нет	есть		

ва заряда ВВ [157].

Предположим, что безопасная длина забойки в канале мортиры функционально связана с массой забойки, массой заряда ВВ в мортире и временем запираения продуктов взрыва во взрывной камере:

$$l_{\sigma} = F(m_{заб}, m_{ВВ}, \tau_3). \quad (2.60)$$

Вид этой функции не известен, но может быть установлен по данным проведенных экспериментов. Выразим все интересующие нас неизвестные величины через время запираения продуктов взрыва ВВ в канале забойкой. Данные корреляционного анализа позволяют установить зависимости между факторами $m_{заб}$ и τ_3 :

$$m_{заб} = F(\tau_3) = 0,389\tau_3^{1,284}, \quad /r/ = 0,965 \quad (2.61)$$

и факторами τ_3 и $m_{заб}/m_{ВВ}$:

$$\tau_3 = F(m_{заб}/m_{ВВ}) = 1,268(m_{заб}/m_{ВВ})^{0,761}, \quad /r/ = 0,963. \quad (2.62)$$

Далее преобразуем уравнение (2.61) к виду:

$$l_{заб} S_{к.м.} \rho_{заб} = 0,389\tau_3^{1,284}$$

или

$$l_{заб} = \frac{0,389}{S_{к.м.} \rho_{заб}} \tau_3^{1,284} \quad (2.63)$$

и, подставив в него уравнение (2.62), получим:

$$l_{заб} = \frac{0,528}{S_{к.м.} \rho_{заб}} \left(\frac{m_{заб}}{m_{ВВ}} \right)^{0,977}, \quad \text{м.} \quad (2.64)$$

Это уравнение позволяет расчетным путем определить длину забойки, при которой взрыв заряда непродохранительного ВВ не воспламеняет МВС. В табл. 2.24 приведены результаты экспериментов по определению безопасной длины забойки в канале мортиры и расчетная длина забойки по уравнению (2.64) для аммонита № 6ЖВ. Видно хорошее совпадение между экспериментальными и расчетными значениями. Ошибка в расчетах не превышает 10%, что находится в пределах точности измерений длины забойки в экспериментах. Это позволяет с достаточной степенью надежности установить влияние забойки на антигризутность зарядов ПВВ в МВС.

Таблица 2.24

Безопасная длина забойки в канале mortar для непредохранительного ВВ аммонита № 6ЖВ

№ п/п	Тип за- бойки	Параметры за- бойки		Масса забой- ки, $m_{заб}$, кг	Масса заряда, ВВ, $m_{ВВ}$, кг	Отно- ше- ние $\frac{m_{заб}}{m_{ВВ}}$	Безопасная длина забойки в канале	
		диа- метр, d_z , м	плот- ность, $\rho_{заб}$, кг/м ³				экспе- римен- тальная (в МВС), м	рас- четная по уравне- нию (2.64), м
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	ПФ	0,055	700	0,083	0,5	0,166	0,05	0,055
2	ВМК-1	0,055	1050	0,125	0,6	0,2083	0,05	0,046
3	ПГС	0,055	1810	0,215	0,5	0,43	0,05	0,054
4	ПЗМ-3	0,055	1810	0,214	0,6	0,3567	0,05	0,045
5	ПСБ-3	0,055	1020	0,170	0,5	0,340	0,070	0,076
6	ААК	0,055	590	0,105	0,5	0,21	0,075	0,082
7	Вода	0,055	1000	0,261	0,6	0,435	0,11	0,099
8	Карбамид	0,055	600	0,214	0,5	0,428	0,15	0,160
9	Флюорит	0,055	1180	0,701	0,5	1,402	0,25	0,26
10	ВМК-1	0,050	1050	0,618	0,5	1,236	0,30	0,31
11	Песок	0,055	1620	1,27	0,5	2,54	0,33	0,34
12	ПЗМ-3	0,037	1800	0,638	0,6	1,063	0,33	0,29

Проанализируем данные А.И. Селезнева и Н.Я. Удовиченко, полученные в МакНИИ. Используя уравнение (2.64), рассчитаем массу предельного заряда ВВ в МВС для заряда с глиняной или песчано-глиняной забойкой, расположенной в канале mortar. Массу заряда ВВ выразим через его энергию взрыва и удельную тепло-

ту взрыва ВВ, а массу забойки – через ее диаметр – $d_{заб}$ и плотность. Тогда, согласно уравнению (2.64), безопасная $l_{заб}$ для аммонита № 6ЖВ будет иметь вид:

$$l_{\bar{o}} = \frac{0,6726}{d_{заб}^2 \rho_{заб}} \left(\frac{0,785 d_{заб}^2 l_{заб} \rho_{заб} Q_v}{m_{BB} Q_v} \right)^{0,977}.$$

Для аммонита № 6ЖВ $Q_v = 4310,0$ кДж/кг, следовательно:

$$l_{\bar{o}} = 1887,7 d_{заб}^{0,046} \rho_{заб}^{0,023} \left(\frac{l_{заб}}{m_{BB} Q_v} \right)^{0,977}. \quad (2.65)$$

Для предельного заряда ВВ в МВС должно выполняться условие, при котором длина забойки равна безопасной длине: $l_{\bar{o}}/l_{заб}^{0,977} = 1$. Тогда, преобразуя последнее уравнение, можем определить массу предельного заряда ВВ:

$$M_{np} = \frac{2254,5}{Q_v \sqrt{1 - \varepsilon}} d_{заб}^{0,0471} \rho_{заб}^{0,02354}, \text{ кг}. \quad (2.66)$$

Это уравнение позволяет рассчитать массу предельного заряда для любого ВВ, если известны его удельная теплота взрыва, содержание в продуктах детонации конденсированной фазы (ингибитор) и длина забойки. Расчетные значения этой массы сравнили с экспериментально полученными значениями массы предельного заряда при определении безопасности взрывания заряда ВВ с забойкой в МВС (антигризутность). Результаты приведены в табл. 2.25. Они показывают, что для не-предохранительных ВВ и ПВВ с низким уровнем предохранительных свойств расчетная масса предельного заряда с безопасной длиной забойки в канале мортиры хорошо согласуется с полученной экспериментально. Однако для угленита 13П они не согласуются. Угленит 13П – это ПВВ с повышенным уровнем предохранительных свойств в МВС, который достигается в канальной мортире и без забойки. Большая масса предельного заряда угленита 13П в канальной мортире получается за счет высокого содержания ингибиторов в составе ПВВ, что делает использование забойки в канале мортиры при взрывании, как бы, не нужным. Полученный результат для подобного типа ПВВ создает новое представление об их безопасности. Оно заключается в том, что для современных высокопредохранительных ВВ внутреннюю забойку шпуров стоит рассматривать не как средство повышения антигризутности их

Таблица 2.25

Антигризутность зарядов ПВВ в канале mortar с забойкой

№ п/п	ВВ	Теплота взрыва, Q_v , кДж/кг	Содер- жание инги- битора, ε , кг/кг	Расчетный предель- ный заряд с забой- кой, кг	Экспериментальные данные	
					предель- ный заряд с забой- кой, кг	безопасная длина за- бойки, м
1	2	3	4	5	6	7
1	62%-ный динамит	5119,1	0,108	0,482	0,44-0,48	0,23
2	29%-ный гризутин	2769,0	0,0	0,847	0,4-0,42	< 0,12
3	Аммонит 2	3034,7	0,0	0,773	0,4	< 0,12
4	Аммонит № 6ЖВ	4310,0	0,0	0,554	0,5	0,05
5	Аммонит АП-5ЖВ	3795,0	0,12	0,659	0,6	0,01
6	Аммонит ПЖВ-20	3414,0	0,2	0,768	0,75	0,01
7	Угленит 13П	2836,0	0,3	0,989	1,0-1,1	без забойки

зарядов при взрывных работах, а как средство повышения эффективности взрывания. Для ПВВ с низким уровнем предохранительных свойств вывод другой: повышение антигризутности их шпуровых зарядов можно достичь за счет качественной внутренней забойки шпуров. Однако, забойка увеличивает время запираания продуктов взрыва в зарядной камере шпура, чем может облегчить поджигаемость ВВ и привести к выгоранию заряда в случае не полной детонации заряда ПВВ.

2.6. Исследование условий выгорания шпурового заряда ПВВ, ограниченного забойкой

Общеизвестно, что переход детонации ПВВ в шпуровых зарядах в дефлаграцию – выгорание ВВ представляет собой крайне нежелательное явление, которое может вызвать воспламенение взрывоопасной среды. Поэтому влияние поджигаемости

сти ВВ и параметров забойки шпуров на устойчивость зарядов ВВ к выгоранию рассмотрены в работах [158, 159]. Выгорание заряда начинается с поджигания некоторого начального слоя ВВ – l_o и продолжается дальнейшим развитием процесса горения, достаточным для установления стационарного режима, который определяется как скоростью горения ВВ, так и условиями заряжания заряда. Поджигание заряда и выделение газообразных продуктов его горения происходит не сразу после затухания детонационного процесса в заряде ВВ, а через некоторый промежуток времени, необходимый для прогрева слоя ВВ и его воспламенения. Источниками энергии для прогрева и поджигания слоя ВВ являются горячие продукты детонации взорвавшейся части заряда и экзотермические реакции, идущие в конденсированной фазе ВВ, ускоряющие процесс прогрева его слоя до температуры воспламенения. В общем виде условия поджигания слоя ВВ можно записать так:

$$\frac{L_{охл}}{l_o} \geq 1; \frac{\tau_o}{\tau_1} \geq 1, \quad (2.67)$$

то есть эффективный путь теплоотдачи горячих газов продуктов взрыва – $L_{охл}$ должен превышать толщину начального слоя ВВ, в котором скорость горения ВВ минимальная; при этом время прогрева этого слоя – τ_o должно быть больше времени τ_1 достижения на поверхности заряда температуры самовоспламенения ВВ. Следовательно, при поджигании заряда ВВ температура его поверхности – T_n превышает температуру самовоспламенения ВВ – $T_s(\tau_a, E_a)$ с учетом времени индукции теплового воспламенения – τ_a и энергии активации процесса горения ВВ – E_a :

$$T_n \geq T_s(\tau_a, E_a). \quad (2.68)$$

Прогрев заряда с учетом внутренней энергии, заключенной в ВВ, до момента его воспламенения в одномерной схеме описывается уравнением теплопроводности в твердом теле:

$$c\rho_{ВВ} \frac{dT(L, \tau)}{d\tau} = \frac{d}{dL} \left[\lambda \frac{dT(L, \tau)}{dL} \right] + q_{в.э.}, \quad (2.69)$$

где c, λ – теплоемкость и коэффициент теплопроводности ВВ;

L – нормальная к поверхности обогрева координата, совпадающая с осью за-

ряда;

$T(L, \tau)$ – температура заряда ВВ в сечении на расстоянии L от поверхности обогрева в момент времени τ ;

$q_{в.э.}$ – объемная скорость выделения энергии в ВВ на расстоянии L от поверхности обогрева в момент времени τ , Дж/м³ · с.

Уравнение (2.81) должно удовлетворять следующим начальным и граничным условиям [160]:

$$T(L, 0) = T_{нач}, \quad (2.70)$$

$$-\lambda \left. \frac{dT(L, \tau)}{dL} \right|_{L=0} = \alpha [T_{Г} - T(0, \tau)], \quad (2.71)$$

$$T(L, \tau) \Big|_{L=\infty} = T_{нач}, \quad (2.72)$$

где $T_{нач}$ – начальная температура заряда ВВ ($T_{нач} = \text{const}$);

α – суммарный коэффициент теплоотдачи от газов продуктов взрыва к заряду ВВ.

Объемным источником тепла в заряде являются реакция термического разложения ВВ и первые стадии экзотермических реакций между продуктами распада компонентов ВВ и углем на контакте с поверхностью заряда. Эти реакции носят локальный случайный характер в первый момент времени, однако с повышением температуры до величины, достаточной для разрыва связей в молекулах, они приобретают регулярный характер.

Пусть средняя относительная доля разложившегося ВВ в слое толщиной dl_0 на расстоянии L от поверхности обогрева в момент времени τ равна $\beta(l, \tau)$. Для реакций первого порядка функцию $\beta(l, \tau)$ можно записать в виде следующего дифференциального уравнения [160]:

$$\frac{d\beta(l, \tau)}{d\tau} = [1 - \beta(l, \tau)]K(T). \quad (2.73)$$

Из этого уравнения следует, что скорость реакций в твердой фазе ВВ в каждом его слое пропорциональна относительному количеству непрореагировавшего ВВ в этом слое и некоторой функции средней температуры слоя. Эта функция называется

ся коэффициентом скорости реакции – $K(T)$ и по закону Аррениуса равна

$$K(T) = k_0 \exp\left[-\frac{E_a}{R_0 T}\right], \text{ с}^{-1}, \quad (2.74)$$

где k_0 – постоянная, называемая предэкспонентом;

R_0 – универсальная газовая постоянная.

Величины E_a и k_0 являются индивидуальными характеристиками каждого вида ВВ. Объемная скорость выделения энергии определяется по формуле:

$$q_{в.э.} = Q_p \rho_{ВВ} \frac{d\beta}{d\tau} = Q_p \rho_{ВВ} (1 - \beta) K(T), \quad (2.75)$$

где Q_p – тепловой эффект реакций, происходящих в ВВ, Дж/кг.

Коэффициент теплоотдачи α вычисляют по формуле:

$$\alpha = \frac{q_{изл}}{T_2 - T(0, \tau)} + \frac{\lambda}{d} Nu_d, \quad (2.76)$$

где $q_{изл}$ – тепловой поток, обусловленный излучением;

Nu_d – местное число Нуссельта;

T_2 – температура горения ВВ;

d – эффективный диаметр сечения заряда.

Согласно [160], под условием горения заряда подразумевается связь между температурой $T(0, \tau)$, количеством прореагировавшего ВВ $\beta(0, \tau)$ и давлением в зарядной камере шнура. Из физических предположений, согласно условиям (2.67) и (2.68), ясно, что горение ВВ может быть, если в некотором тонком слое конечной толщины средняя температура и среднее количество прореагировавшего вещества достигли определенных критических значений. В работе [160] для случая линейного приближения было принято следующее условие горения зарядов ВВ:

$$T(0, \tau) + K \frac{Q_p}{c} \beta(0, \tau) = \theta(P_n), \quad (2.77)$$

где K и $\theta(P_n)$ – соответственно константа, соответствующая критическим условиям поджигания ВВ и функция давления поджигания ВВ, устанавливаемые для каждого ВВ экспериментально.

Для определения поджигаемости ВВ применяют метод МакНИИ – МХТИ им.

Д.И. Менделеева [161]. По этому методу определяют показатель поджигаемости P_{50} , который характеризует массу воспламенительного состава, состоящего из смеси – 50% мелкокристаллической сухой аммиачной селитры и 50% сухого просеянного коллоксилина, дающей 50% поджигания испытываемого ВВ. Для манометрической бомбы установлен свободный объем $V_0 = 120 \text{ см}^3$. Воспламенитель патронируют в бумажную гильзу с плотностью $0,3 \text{ г/см}^3$, расчетная температура сгорания воспламенителя $T_c \approx 2684^\circ\text{К}$, показатель адиабаты продуктов горения $k = 1,213$. По методике испытаний массу воспламенителя ПВВ определяют методом «вверх-вниз». Результат фиксируют с помощью датчика давления. Он позволяет определить давление газов в манометрической бомбе после сгорания воспламенителя и фиксировать момент загорания ВВ по началу возрастания давления в бомбе. Поэтому можно достаточно легко установить давление газов в бомбе в момент поджигания заряда ВВ от воспламенителя. Так же можно установить по уравнению (2.77) вид функции $\theta(P_n)$, определяющей условия горения ВВ. Для этого надо получить зависимость давления продуктов сгорания воспламенителя от массы воспламенителя. Результаты экспериментальных данных по определению этого давления приведены в табл. 2.26.

Для линейного приближения функции (2.77) получим зависимость давления газов в бомбе при поджигании ВВ от массы воспламенителя при поджигании ВВ P_g . Обработав данные табл. 2.26, получим уравнение регрессии:

$$\theta(P_n) = 8134051,7P_g - 2416137,9, \text{ Па, } /r/ = 0,993. \quad (2.78)$$

Существенным является то, что функция $\theta(P_n)$ не зависит от начальной температуры $T(0, \tau)$, так как в условиях испытаний она выдерживается постоянной во всех опытах. Реальное положение в шпуре при поджигании ВВ в случае отказа части шпурового заряда несколько другое. В процессе нагрева ВВ продуктами взрыва от детонировавшей части заряда ВВ при каком-то значении $\theta(P_n)$ происходит поджигание ВВ. Причем, оно произойдет только в том случае, когда будет иметь место равенство между левой частью уравнения (2.77) и правой – (2.78). Это равенство будет осуществляться и далее после загорания. В реальных же условиях $\theta(P_n)$ зависит от начальной температуры ВВ при поджигании, так как его предварительно прогрева-

ют ударная волна и продукты взрыва детонировавшей части заряда, в которых идут вторичные реакции. Поэтому будем считать, что в большей мере выполнимо условие в виде:

$$T(0, \tau) = \theta_1(P_n), \quad (2.79)$$

в котором функция $\theta_1(P_n)$ уже зависит от начальной температуры ВВ при его поджигании. Следовательно, $\theta_1(P_n) \neq \theta(P_n)$. Для того, чтобы это учесть при поджигании ВВ, учтем догорание продуктов горения воспламенителя в кислороде бомбы и на поверхности их контакта с ВВ. В этом случае вид зависимости (2.78) следующий:

$$\theta_1(P_n) = 664285,71P_n^2 + 5970428,6P_n - 600600,0, \text{ Па, } /r/ = 0,9999. \quad (2.80)$$

Таблица 2.26

Давление продуктов сгорания воспламенителя в бомбе объемом 120 см³

Масса вос- пламе- нителя, г	Объем за- ряда вос- пламе- нителя, см ³	Параметры продуктов сгорания в бомбе				
		с учетом догора- ния воспламените- ля		без учета догорания воспла- менителя		расчетное давление P_n , Па
		P_n , Па	T_z , °К	P_n , Па	T_z , °К	
1	2	3	4	5	6	7
0,6	2,0	-	-	-	-	$2,488 \cdot 10^6$
0,8	2,66	$4,6 \cdot 10^6$	1515	-	-	$4,6 \cdot 10^6$
0,9	3,00	$5,314 \cdot 10^6$	1542	-	-	-
1,0	3,333	$6,03 \cdot 10^6$	1576	$4,865 \cdot 10^6$	1261	$5,41 \cdot 10^6$
1,1	3,670	$6,773 \cdot 10^6$	1603	$5,56 \cdot 10^6$	1291	-
1,2	4,0	$7,52 \cdot 10^6$	1628	$6,1914 \cdot 10^6$	1315	-
1,3	4,39	-	-	$6,9564 \cdot 10^6$	1343	-
1,4	4,67	-	-	$7,5174 \cdot 10^6$	1361	$8,364 \cdot 10^6$
1,5	5,0	-	-	$8,2 \cdot 10^6$	1382	-
1,8	6,0	-	-	-	-	$1,2648 \cdot 10^7$

Изучение условий выгорания ВВ в шпуре сводится к определению давления газообразных продуктов в момент поджигания ВВ и давления при выбросе из шпура забойки. Определение давления продуктов взрыва, при котором происходит поджигание ВВ, позволит ответить на вопрос, как происходит поджигание заряда при наличии забойки, герметизирующей шпур [162]. Материал забойки герметизирует взрывную камеру шпура, и для выброса продуктами взрыва забойки требуется определенное время t . В течение этого времени давление продуктов взрыва ВВ в зарядной камере изменяется:

$$P(t) = \begin{cases} P_n, & \text{при } t = 0; \\ \theta_1(P_n), & \text{при } t = \tau_a; \\ P_a, & \text{при } t = \tau_g; \end{cases} \quad (2.81)$$

где P_a – среднее давление продуктов детонации ВВ в котловой полости на момент выброса забойки из шпура, равное пределу прочности породы $P_a \approx [\sigma]_n$;
 τ_g – время, необходимое для выброса забойки из шпура, равное времени записания продуктов взрыва в шпуре.

Основы расчета давления продуктов взрыва ВВ в зарядной камере предложены в работе [163]. Максимальный радиус расширения продуктов взрыва ВВ в полости горных пород при взрыве цилиндрического заряда – r_n определяем из выражения:

$$\frac{r_n}{r_{ш}} = \left(\frac{P_n}{P_k} \right)^{\frac{1}{2n}} \left(\frac{P_k}{P_a} \right)^{\frac{1}{2k}}, \quad (2.82)$$

где $r_{ш}$ – радиус шпура;

P_k – давление в точке сопряжения двух изэнтроп при расширении продуктов взрыва ВВ.

Среднее начальное давление продуктов детонации заряда ВВ в шпуре примерно равно:

$$P_n = \frac{\rho_{ВВ} D^2}{2(n+1)} \left(\frac{r_3}{r_{ш}} \right)^{2n}, \text{ Па.} \quad (2.83)$$

Расчет давления P_k дан в монографии [164] Ф.А. Баумом, а расчет, приведен-

ный в работе [165], позволяет найти радиус газообразных продуктов взрыва в точке сопряжения – r_k :

$$r_k = r_{ul} \left(\frac{P_H}{P_k} \right)^{\frac{1}{2n}}. \quad (2.84)$$

Разрушение горных пород при взрыве заряда ВВ происходит под влиянием возникающего в горных породах растягивающего напряжения, которое определено А.Н. Ханукаевым [166]. Для угля оно определяется с помощью временного сопротивления сдвигу: $[\sigma]_c = 2,943 \cdot 10^6$ Па. На забойку действуют продукты взрыва ВВ с силой:

$$F = \frac{\pi d_{заб}^2}{4} P(t). \quad (2.85)$$

При этом забойка создает силу сопротивления – F_S расширяющимся продуктам взрыва ВВ:

$$F_S = \pi d_{заб} l_{заб} [\sigma]_c. \quad (2.86)$$

Критическим условием сдвига забойки в шпуре является равенство $F = F_S$. Тогда, приравняв (2.85) и (2.86), получим:

$$P(t) = \frac{4 l_{заб} [\sigma]_c}{d_{заб}}. \quad (2.87)$$

В работе [167] П.И. Кушнеров установил предел прочности песчано-глиняной забойки (влажность 15...16%) при выбросе ее из шпура. Предел прочности такой забойки равен $[\sigma]_c = 5,61 \cdot 10^5$ Па. Согласно руководству по применению забойки при взрывных работах в угольных шахтах, наиболее широко применяется гидрозабойка в ампулах диаметром 38 мм длиной 0,35 м в сочетании с запирающей песчано-глиняной забойкой длиной 0,15 м [168]. Поскольку гидроампула не может герметизировать взрывную камеру шпура ($d_{ul} \approx 0,042$ м), то ее герметизация осуществляется исключительно запирающей песчано-глиняной забойкой. Рассчитаем по уравнению (2.87) критическое значение давления продуктов взрыва на момент движения забойки в шпуре. Далее сравним его со значением функции критического давления от массы воспламенителя $\theta_1(P_n) = \varphi(\Pi_g)$, найденным по уравнению (2.80), которое характеризует поджигаемость ПВВ. Сравнение позволяет ответить на вопрос, какие

ПВВ в отказавшей части шпурового заряда поджигаются и горят. Критическим условием, при котором происходит поджигание ПВВ, является:

$$\frac{P(t)}{\theta_1(P_n)} \geq 1. \quad (2.88)$$

Давление поджигаемости ПВВ в шпуре приведено в табл. 2.27.

Таблица 2.27

Показатели поджигаемости ПВВ в шпурах ($d_{ш} = 0,042$ м)

Показатели	ПВВ							
	аммони- ты Т-19, ПЖВ-20	угле- нит Э-6	угле- нит 12ЦБ	угле- нит 13П	угле- нит 13П/1	угле- нит 10П	аммо- нит Г5	аммо- нит П5
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Поджигаемость (средняя), P_{50} , г	0,8	0,81	0,74	1,47	1,81	1,72	1,44	1,61
Поджигаемость 5% (предельная), P_5 , г	0,652	0,66	0,603	1,198	1,475	1,402	1,174	1,312
Критическое дав- ление $\theta_1(P_n)$, МПа	3,574	3,574	3,241	7,505	9,651	9,076	7,324	8,376
Давление $P(t)$ при забойке $l_{заб} = 0,15$ м, МПа	8,014	8,014	8,014	8,014	8,014	8,014	8,014	8,014
Отношение $\frac{P(t)}{\theta_1(P_n)}$	2,242	2,242	2,473	1,067	0,83	0,88	1,094	0,957

В работе [169] В.С. Казачков определил P_{50} – поджигаемость ПВВ (массу воспламенителя ПВВ, дающую 50% поджиганий) и получил зависимость вероятности поджигания ПВВ от массы воспламенителя. Для среднего квадратичного отклонения – S , зная P_{50} , можно рассчитать вероятность поджигания ПВВ при любой другой массе воспламенителя:

$$\lg(\Pi_6 / \Pi_{50}) = 0,054\psi(P). \quad (2.89)$$

Однако метод «вверх-вниз» не позволяет получать удовлетворительные результаты параметра на концах кривой нормального распределения при $\Pi_6 \rightarrow \Pi_{np}$ (предельное значение показателя поджигаемости, при котором вероятность поджигания $P = 0$) [170]. Тем не менее, можно рассчитать значение показателя Π_5 – 5%-ную точку, показывающую, что при этой массе воспламенителя вероятность воспламенения $P = 0,05$. Для коэффициента Стьюдента $t_S = -1,645$ по уравнению (2.89)

$$\lg \Pi_5 = \lg \Pi_{50} - 0,054 \cdot 1,645 = \lg \Pi_{50} - 0,08883.$$

Полученные результаты характеризуют условия поджигания ВВ в зарядной камере шпура. В соответствие с критическим условием (2.88), поджигание ПВВ произойдет, если $P(t) \geq \theta_I(P_n)$, и не произойдет, если $P(t) < \theta_I(P_n)$. Поэтому углениты 13П/1 и 10П и аммонит П5, у которых $P(t) < \theta_I(P_n)$, не могут поджигаться в шпурах с забойкой и, соответственно, их заряды не могут выгорать. Другое дело ПВВ, у которых $P(t) \geq \theta_I(P_n)$. Опыт их применения показал, что аммониты Т-19 и ПЖВ-20 и углениты Э-6 и 12ЦБ очень часто давали выгорания шпуровых зарядов при взрывных работах. Использование угленита 13П и аммонита Г5 в шахтах пока не позволяет точно ответить на вопрос об их устойчивости против выгорания. Хотя их показатель поджигаемости удовлетворяет техническим требованиям, за 18 лет применения угленита 13П имел место всего один случай выгорания заряда, и у сравнительно нового аммонита Г5 за 3 года его применения выгораний не наблюдалось вообще. Вместе с тем, критерий (2.88) основан на сравнении значений $P(t)$ и $\theta_I(P_n)$ как параметров горения ПВВ. Окончательный вывод может быть сделан только путем оценки критических условий (2.67) и (2.68). Они заданы в неявном виде, поэтому, чтобы их конкретизировать, нужно установить время, необходимое для поджигания ПВВ, параметры горения заряда ПВВ и период индукции воспламенения ВВ при температуре вспышки. Для решения этой задачи необходимо знать время выброса забоечного материала из полости шпура. На выброс забойки из шпура затрачивается энергия $m_{заб} U_{6.3}^2 / 2$, которая будет равна работе, затрачиваемой продуктами взрыва на расширение в полости шпура, по которому движется забойка. Тогда получим:

$$\frac{m_{заб} U_{в.з.}^2}{2} = (P(t) - P_a) \frac{\pi d_{заб}^2}{4} l_{заб}.$$

Сделав преобразование этого уравнения, получим:

$$U_{в.з.}^2 = 2 \frac{P(t) - P_a}{\rho_{заб}}. \quad (2.90)$$

При взрывании по углю (самый опасный случай в отношении выгорания заряда) можно принять, что давление P_a приблизительно равно пределу прочности угля на сдвиг $[\sigma]_c$. Плотность песчано-глиняной забойки в шпуре примем около 1800 кг/м^3 , тогда скорость выбрасывания забойки из шпура будет равна:

$$U_{в.з.} = \sqrt{2 \frac{P(t) - [\sigma]_c}{1800}} \approx \sqrt{\frac{8,014 \cdot 10^6 - 2,943 \cdot 10^6}{900}} \approx 75,1 \text{ (м/с)}.$$

Время выброса забойки из шпура определяется по формуле:

$$\tau_{в} = \frac{l_{ш} - l_3}{U_{в.з.}}.$$

Согласно § 241 «ЕПБ при взрывных работах», в угольных шахтах длина забойки должна быть не менее $0,5 \text{ м}$. Следовательно, $l_{ш} - l_3 = 0,5 \text{ м}$. Тогда время герметизации шпура забоечным материалом равно:

$$\tau_{в} = \frac{0,5}{75,1} \approx 6,66 \text{ мс}.$$

В течение этого времени горение заряда ВВ в шпуре будет возможно, если выполняются критические условия (2.67) и (2.68), то есть время индукции теплового самовоспламенения ПВВ будет не больше времени герметизации забойкой шпура:

$$\tau_a \leq \tau_{в}. \quad (2.91)$$

Согласно теории теплового взрыва, по известному уравнению [171] определяем период индукции теплового самовоспламенения ВВ в шпуровом заряде:

$$\tau_a = \frac{c_V R_0 \exp \left[\frac{E_a}{R_0 T_{кр}} \right] T_{кр}^2}{Q_V k_0 E_a}, \text{ с}, \quad (2.92)$$

где c_V – удельная теплоемкость продуктов реакции, Дж/г·°К;

$T_{кр}$ – критическая температура поверхности заряда при воспламенении ВВ.

Устанавливаем $T_{кр}$ с учетом критерия (2.91):

$$\frac{(l_{ш} - l_3)Q_V k_0 E_a}{U_{в.з.} c_V R_0} = \exp\left[\frac{E_a}{R_0 T_{кр}}\right] T_{кр}^2. \quad (2.93)$$

Расчеты по этому уравнению показали, что при длине забойки 0,5 м минимальная температура поверхности заряда при поджигании ПВВ IV и V классов $T_{кр} = 558...585^{\circ}\text{K}$ в зависимости от их типа. Однако если длину забойки уменьшить до длины запирающей забойки, равной 0,15 м, то критическая температура поверхности заряда ПВВ возрастет всего на 5% и составит $590...620^{\circ}\text{K}$. Получается, что даже при сравнительно небольшой длине забойки (всего 0,15 м) в случае отказа детонации шпурового заряда ВВ создаются условия для его поджигания. Процесс выгорания заряда ВВ будет характеризоваться устойчивостью горения ВВ в полости шпура. Необходимо установить, что же обеспечивает устойчивость горения заряда ВВ в полости шпура в момент выброса из него забойки.

С этой целью были проведены экспериментальные исследования на моделях шпуров, которые воспроизводили условия выгорания заряда в шпуре. В основу исследований по определению устойчивости горения заряда ПВВ в шпуре с забойкой положен метод Одибера-Дельмаса, усовершенствованный Аренсом в Германии [172]. Суть метода проста и заключается в следующем. Заряд ПВВ, окруженный угольной оболочкой, помещается в герметичную камеру (стальная труба диаметром 46 мм), моделирующую взрывную полость шпура. Воспламенение этого заряда осуществляется с помощью нагревательного элемента. Степень герметизации камеры изменяется с помощью специальной съемной крышки с калиброванным соплом, диаметр которого при испытании можно менять. В этих условиях провели исследования зарядов ПВВ IV, V и VI классов, у которых предварительно была установлена поджигаемость ВВ $П_{50}$. Критерием устойчивости ПВВ (заряда ПВВ) к выгоранию считаем степень устойчивости горения ПВВ (заряда ПВВ), определяемую длиной сгоревшей части патрона – l_y (отношением l_y / l_3): чем меньше эта длина (это отношение), тем больше степень устойчивости. Основные результаты этих исследований приведены в табл. 2.28. Обработав их методом корреляционного анализа, было установлено, что устойчивость горения ПВВ при его выгорании можно оценить по

поджигаемости. Получена эмпирическая зависимость между показателем, характеризующим устойчивость горения заряда ПВВ в окружении угля $-l_y/l_z$ и поджигаемостью:

$$\ln\left(\frac{l_y}{l_z}\right) = -3,395 - 1,4225(\ln \Pi_{50} - 0,986) + 1,0643(\ln \Pi_{50} - 0,986) \tanh \frac{\ln \Pi_{50} - 0,986}{0,1384}, \quad (2.94)$$

$$S = 1,258, \quad r = 0,705.$$

График этой зависимости показан на рис. 2.9. Анализ полученной зависимости позволил установить, что существует область (на рисунке заштрихована), в которой заряды ПВВ не могут устойчиво гореть. Граница этой области $\ln \Pi_{50} = 0,485$ при пересечении с графиком в точке $\ln l_y/l_z = -2,095$ позволяет установить критическое значение $\Pi_{50} = 1,625$ г, начиная с которого ПВВ уже не может устойчиво гореть в шпуре в случае отказа детонации и его поджигания. В результате проведенных работ, исходя из поджигаемости Π_{50} , удалось обосновать устойчивость ПВВ к выгоранию в шпурах при наличии забойки. В существующих технических требованиях к ПВВ нормируемое значение $\Pi_{50} = 1,2$ г. Поэтому для него необходимо оценить вероятность выгорания шпурового заряда. Используя основные уравнения и критические условия (2.80), (2.82), (2.83), (2.84), (2.89), численно смоделируем условия разрушения угля вокруг шпура при взрыве заряда ВВ. Оценим вероятность выгорания заряда, если произошли нарушение его полноты детонации и поджигание. Результаты расчетов, полученные при моделировании выгорания ПВВ при взрыве шпурового заряда в угле с песчано-глиняной забойкой длиной 0,5 м, приведены в табл. 2.29.

По данным работы [170] получаем формулу вероятности поджигания ВВ:

$$P = \frac{1,0115702}{1 + 1,0294317 \exp[-1,6388272 \psi(P)]}. \quad (2.95)$$

Из формулы (2.89) находим квантиль интеграла вероятности: $\psi(P) = -7,59$. Тогда

$$P = \frac{1,0115702}{1 + 1,0294317 \exp[-1,6388272(-7,59)]} = 3,871 \cdot 10^{-6}.$$

Таблица 2.28

Результаты испытаний по определению устойчивости заряда ПВВ к выгоранию

№ п	ПВВ	Поджига- емость, P_{50} , Г	$\ln P_{50}$	Длина за- ряда, l_3 , см	l_y (соплю Ø 2 мм), см	l_y (без за- бойки), см	l_y / l_3 (без забойки)	$\ln\left(\frac{l_y}{l_3}\right)$
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	Аммонит Т-19	0,8	-0,2231	27,0	27,0	27,0	1,0	0,000
2	Угленит Э-6	0,81	-0,2107	16,0	16,0	16,0	1,0	0,000
3	Угленит 12ЦБ	0,74	-0,3011	16,0	7,5	5,5	0,344	-1,0671
4	Ионит	0,69	-0,37106	14,0	14,0	14,0	1,0	0,000
5	Веттеркарбонит А	-	-	1 патрон	1 патрон	1 патрон	1,0	-
6	Угленит 13К	1,82	0,59884	16,0	1,0	1,0	0,0625	-2,7726
7	Угленит 13П	1,32...1,39	0,300	16,0	2,0	2,5...15,0	0,547	-0,6033
8	Аммонит Г5	1,44	0,3646	27,0	1,0	1,0	0,037	-3,2970
9	Образец А12/10	1,62	0,4824	16,0	1,5	10,0...15,0	0,781	-0,24720
10	Образец К5/4	1,22	-	16,0	1,0	-	-	-
11	Образец К6/1	1,13...1,27	0,239	16,0	-	1,0	0,0625	-2,7726
12	Образец 14Ф	3,3	1,1940	16,0	<0,5	<0,5	0,0312	-3,4673
13	Обр. 14Ф + 15% NH ₄ NO ₃	-	-	16,0	1,5	1,5	-	-
14	Образец К5/7-3	1,27	0,239	16,0	2,0	15,0	1,0	0,000
15	Образец А-1	1,13	0,1222	16,0	1,0	1,0	0,0625	-2,77260
16	Образец К5/7-М	1,01-1,13	0,00995	16,0	15,0	15,0	1,0	0,000
17	Обр. 12/10 + 3% CO(NH ₂) ₂	2,2...2,56	0,94	16,0	<0,5	0,5	0,0312	-3,4673
18	Обр. 13К + 15% NH ₄ NO ₃	-	-	16,0	<0,5	0,5	-	-
19	Аммонит Т-19 в сланце- вом штыбе	1,61	0,4760	27,0	взрыв па- трона	1,5	0,055	-2,900

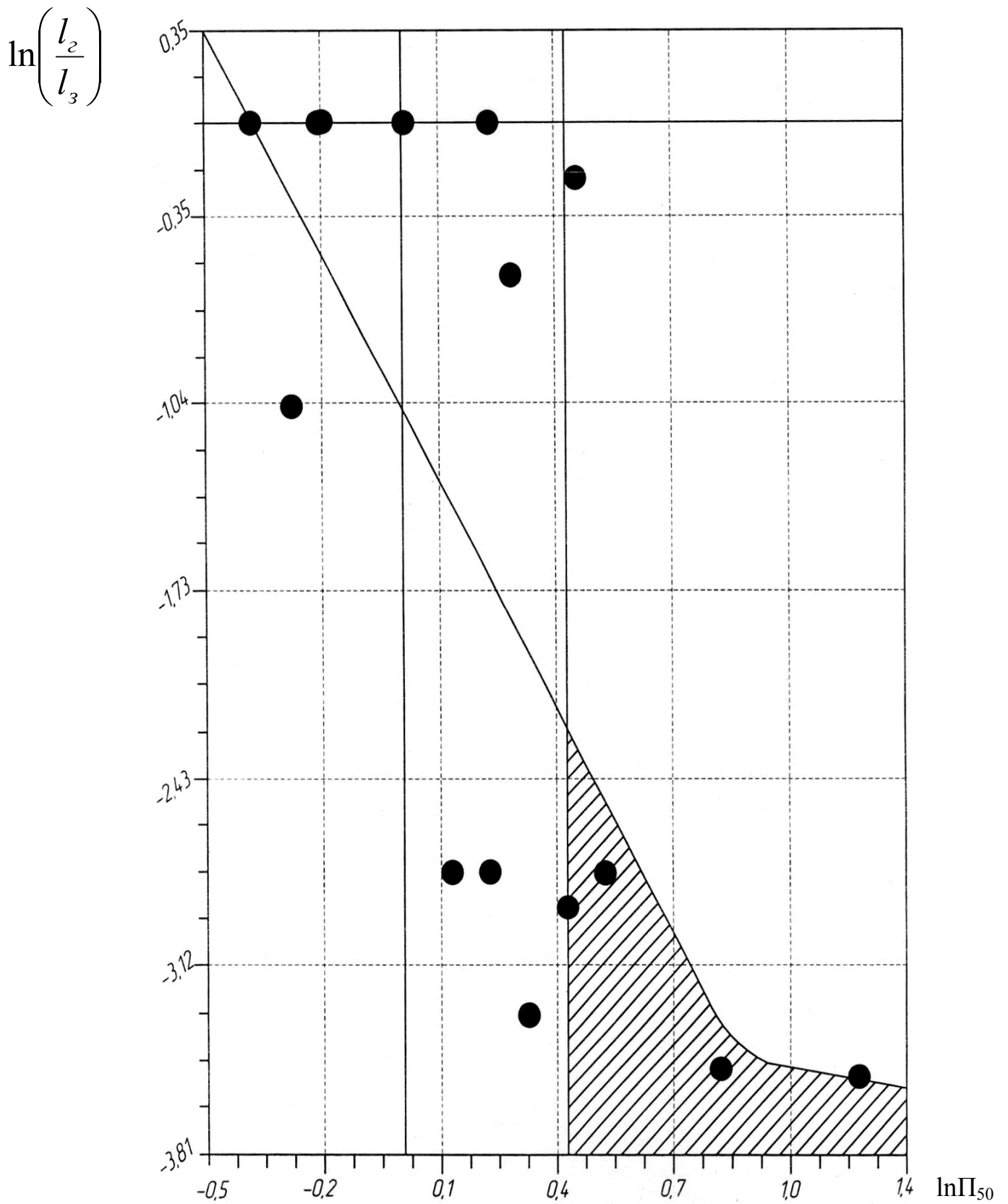


Рис. 2.9. График зависимости устойчивости горения шпурового заряда ВВ от его поджигаемости

Таблица 2.29

Параметры выгорания шпурового заряда ПВВ в угле

Показатели шпуровых зарядов	Ед. изм.	ПВВ (класс)	
		аммонит Г5 (IV)	угленил 13П (V)
Радиус заряда, r_z	м	0,018	0,018
Радиус шпура, $r_{ш}$	м	0,021	0,021
Радиус продуктов взрыва в точке сопряжения, r_k	м	0,0332	0,02837
Начальное давление взрыва, P_n	Па	$1,04678 \cdot 10^9$	$5,37006 \cdot 10^8$
Давление в точке сопряжения, P_k	Па	$8,1 \cdot 10^7$	$7,94 \cdot 10^7$
Радиус камуфлетной полости, r_n	м	0,142	0,139
Остаточное давление в полости, P_a	Па	$2,937 \cdot 10^6$	$2,932 \cdot 10^6$
Плотность ВВ в заряде, $\rho_{ВВ}$	кг/м ³	1050	1220
Скорость детонации ВВ, D	м/с	4000	2320
Показатель политропы ВВ, n	-	2,6	2,1
Показатель адиабаты продуктов взрыва, k	-	1,165	1,145
Давление поджигаемости, $\theta_1(P_n)$	Па	$2,9225 \cdot 10^6$	$2,922 \cdot 10^6$
Масса воспламенителя, P_e	г	0,56	0,56
Поджигаемость ПВВ, P_{50} , – средняя	г	1,27...1,61 1,44	1,22...1,67 1,44
Плотность забойки, $\rho_{заб}$	кг/м ³	1800	1800
Скорость выброса забойки, $U_{в.з.}$	м/с	75,1	75,1
Вероятность поджигания ПВВ в шпуре, P	-	$3,871 \cdot 10^{-6}$	$3,871 \cdot 10^{-6}$

В.И. Зенин предлагает определять вероятность выгорания шпурового заряда как произведение вероятности отказа детонации ВВ в шпуре на вероятность поджигания ВВ в шпуре [173]:

$$P_{\text{выг}} = P \cdot P_{\text{отк}}. \quad (2.96)$$

Согласно работе В.И. Зенина [174], находим вероятность отказа детонации заряда ВВ в шпуре: $P_{\text{отк}} \approx 0,05$. Тогда $P_{\text{выг}} = 0,05 \cdot 3,871 \cdot 10^{-6} = 1,9355 \cdot 10^{-7}$.

Предполагаемое количество выгораний ПВВ при взрывных работах можно оценить, используя интегральную теорему Лапласа [175], согласно которой в каждом независимом взрывании шпурового заряда вероятность выгорания ПВВ $P = 1,9355 \cdot 10^{-7}$. При взрывании N шпуровых зарядов можно принять вероятность появления выгорания заряда $P(1, N) = 0,99$. Воспользуемся интегральной теоремой Лапласа, согласно которой получим:

$$P_N(K_1, N) = \Phi(x'') - \Phi(x') = \Phi\left[\frac{K_2 N_p}{\sqrt{NPq}}\right] - \Phi\left[\frac{K_1 N_p}{\sqrt{NPq}}\right],$$

где $q = (1 - P) = 0,999999806$.

Решая это уравнение, получим $N = 37,92$ млн. шпуровых зарядов (шпуров). При ежегодном взрывании около 2 млн. шпуров по углю можно ожидать появления выгорания ПВВ примерно 1 раз в 19 лет.

Проанализируем опыт применения угленита 13П и аммонита Г5. Аммонит Г5 начал применяться с 2003 г. и выгораний шпуровых зарядов до настоящего времени не было. Угленит 13П применяется с 1992 г. и на сегодняшний день зафиксирован пока один случай выгорания шпурового заряда в угольном забое при взрывных работах на шахте «Комсомолец Донбасса». Учитывая ряд допущений, принятых в расчете, можно сказать, что в целом он правильно отражает положение дел при применении ПВВ, имеющих низкую поджигаемость. Этот факт указывает на обоснованность и достоверность сделанных выводов, а также на необходимость принятия решения о корректировке показателя поджигаемости для ПВВ.

2.7. Обоснование комплексного критерия антигрязности зарядов ПВВ при взрывных работах

Исследования показали, что ПВВ имеет уровень предохранительных свойств, зависящий от параметров детонационной способности и взрывчатых свойств ВВ. Оценивают уровень предохранительных свойств ВВ величиной массы предельного заряда M_{np} . Следовательно, масса предельного заряда ВВ определяется взрывотехническими факторами – x_i :

$$M_{np} = F(x_1; x_2; x_3; \dots; x_{n-1}; x_n). \quad (2.97)$$

При взрывных работах в угольных шахтах применение ВВ связано с взрыванием шпуровых зарядов, масса которых определяется взрывотехническими факторами ВВ и горно-геологическими факторами массива y_i . Масса шпурового заряда ВВ определяется как функция:

$$m_{BB} = F(x_1; \dots; x_n; y_1; y_2; \dots; y_{n-1}; y_n). \quad (2.98)$$

Критерий антигрязности заряда ПВВ – $A_i(m_{BB})$ определяет безопасность его применения, если:

$$A_i(m_{BB}) = \frac{m_{BB}[F(x_n; y_n)]}{M_{np}[F(x_n)]} \leq 1, \quad (2.99)$$

то есть масса предельного заряда ПВВ при взрывании должна быть не менее массы шпурового заряда.

Антигрязность заряда ПВВ при взрывных работах в угольных шахтах зависит и от условий взрывания шпурового заряда и полноты детонации ВВ в шпуре. Следовательно, антигрязность заряда ПВВ является функцией ряда факторов, определяющих условия его взрывания и возникновения опасных ситуаций – Z_y , и вероятности отказа и выгорания ВВ – Π_{BB} :

$$A(m_{BB}) = F(Z_y; \Pi_{BB}). \quad (2.100)$$

Таким образом, антигрязность заряда ПВВ при взрывных работах является многофакторной функцией, зависящей от каждого фактора в отдельности:

$$A(m_{BB}) = F[A_1(m_{BB}); A_2(m_{BB}) \dots A_n(m_{BB})]. \quad (2.101)$$

Анализ этой функции антигрозутности заряда ПВВ и критических условий (2.99) для каждого фактора позволил выбрать наиболее опасные факторы, которые и определяют функцию антигрозутности заряда.

Опасными условиями взрывания заряда ВВ является взрывание без забойки в нарушенном массиве с системой трещин и отколов. В этом случае наиболее опасные будут у частично обнаженных зарядов и, наконец, самые опасные условия взрывания заряда ВВ в шпурах – когда возникает его отказ, поджигание ВВ и выгорание заряда. Таким образом, сравнительно простой анализ с помощью критерия (2.99) позволил установить вид комплексного критерия антигрозутности шпурового заряда ПВВ при взрывных работах:

$$A(m_{BB}) = F[A_1(m_{мор}), A_2(m_{yz}), A_3(\Pi_{BB})], \quad (2.102)$$

где $A_1(m_{мор})$ – антигрозутность при взрывании заряда без внутренней забойки в шпуре ;

$A_2(m_{yz})$ – антигрозутность при взрывании обнаженного заряда;

$A_3(\Pi_{BB})$ – антигрозутность при выгорании заряда ВВ.

Заранее нельзя предполагать, как функция антигрозутности заряда ВВ реализуется при взрывных работах. Аналитическое представление связей в этой функции, а тем более распределение трех случайных величин становится слишком неопределенным и носит вероятностный характер. Три непрерывные случайные величины $A_1(m_{мор})$, $A_2(m_{yz})$ и $A_3(\Pi_{BB})$ имеют плотность совместного распределения – $A(m_{мор}, m_{yz}, \Pi_{BB})$. Тогда совместная функция плотности вероятности случайных величин A_1 , A_2 и A_3 определяется теоремой умножения их вероятностей и равна комплексному критерию антигрозутности шпурового заряда ПВВ:

$$A(m_{BB}) = F(m_{мор}, m_{yz}, \Pi_{BB}) = F(m_{мор}) \cdot F(m_{yz}) \cdot F(\Pi_{BB}). \quad (2.103)$$

Этот критерий показывает взаимодействие входящих в него показателей, которые характеризуют безопасность применения ПВВ. Он обладает теми же свойствами, что и критерий антигрозутности (2.99) для каждого показателя в отдельности. Тогда можно установить его интервал применимости:

$$0 \leq A(m_{BB}) \leq 1. \quad (2.104)$$

Нижняя граница комплексного показателя $A(m_{BB}) = 0$ показывает, что заряд

ПВВ не обладает антигризутностью, а верхняя – $A(m_{BB}) = 1$ наоборот, что антигризутность его наивысшая.

Одним из наиболее удачных способов определения такого рода комплексного показателя с большим количеством взаимодействий входящих в него показателей является предложенная Харрингтоном обобщенная функция желательности [176]. В работе [177] эта же функция была использована для оценки применения ПВВ в угольных шахтах. В данном случае комплексный показатель антигризутности заряда ПВВ полностью повторяет функцию желательности, для него также необходимо построение шкалы антигризутности как безразмерного показателя для каждого потенциально опасного случая взрывания шпурового заряда или выгорания ПВВ. Для построения шкалы антигризутности заряда удобно использовать метод количественных оценок, в котором оценки показателя желательной антигризутности заряда ПВВ находятся в интервале от нуля до единицы. Значение $A_i = 0$ соответствует абсолютно неприемлемому уровню антигризутности, а $A_i = 1$ – самому наилучшему значению, дальнейшее улучшение которого не возможно. Согласно работам [173,175], выбраны значения антигризутности заряда ПВВ для каждого показателя, характеризующего комплексный показатель:

$$A_1(m_{мор}) = \begin{cases} 0, & \text{если } m_{BB} > M_{np} \\ 1, & \text{если } m_{BB} \leq M_{np} \end{cases},$$

$$A_2(m_{yz}) = \begin{cases} 0, & \text{если } m_{BB} > M_{np} \\ 1, & \text{если } m_{BB} \leq M_{np} \end{cases},$$

$$A_3(\Pi_{BB}) = \begin{cases} 0, & \text{если } \Pi < \Pi_{50} \\ 1, & \text{если } \Pi \geq \Pi_{50} \end{cases}.$$

Промежуточные значения функции желательности антигризутности зарядов ПВВ следующие: 1,0...0,8 – очень хорошо; 0,8...0,63 – хорошо; 0,63...0,37 – удовлетворительно; 0,37...0,2 – плохо; 0,2...0,0 – очень плохо. Для односторонних ограничений вида $m_{BB} > M_{np}$ или $m_{BB} < M_{np}$ удобной формой преобразования служит экспоненциальная зависимость, которая описывает большинство физических процессов:

$$A(m_{BB}) = \exp[-\exp(-m_{BB}^1)], \quad (2.105)$$

где $m_{BB}^1 = \epsilon_0 + \epsilon_1 m_{BB}$.

Коэффициенты ϵ_0 и ϵ_1 можно определить, если задать для двух значений шкалы соответствующие значения желательности уровня предохранительных свойств ПВВ и его устойчивости против выгорания. Тогда решение системы уравнений для каждого уровня желательности позволяет определить коэффициенты ϵ_0 и ϵ_1 для любого показателя A_i . В табл. 2.30 приведены значения уровня предохранительности ПВВ для каждого показателя антигризутности заряда. Коэффициенты ϵ_0 и ϵ_1 определяем по данным таблицы. Подставляя в уравнение (2.105) значения A_i , получаем частные функции желательности показателя антигризутности A_i :

$$A_1(m_{мор}) = \exp[-\exp(2,452 - 3,2932m_{BB})], \quad (2.106)$$

$$A_2(m_{уг}) = \exp[-\exp(0,871 - 3,2932m_{BB})], \quad (2.107)$$

$$A_3(\Pi_{BB}) = \exp[-\exp(6,055 - 4,649\Pi_{50})]. \quad (2.108)$$

Таблица 2.30

Уровень предохранительности ПВВ и желательность функции антигризутности заряда

Показатели ПВВ	$A_1(m_{мор})$		$A_2(m_{уг})$		$A_3(\Pi_{BB})$	
	заряд в канале мортиры (шпура)		обнаженный заряд		поджигаемость ПВВ, Π_{50}	
	хорошо	плохо	хорошо	плохо	хорошо	плохо
1	2	3	4	5	6	7
Уровень предохранительности ПВВ	1,2 кг	0,6 кг	0,6 кг	0,1 кг	1,625 г	1,2 г
Желательность функции антигризутности A_i	0,8	0,2	0,8	0,2	0,8	0,2

В табл. 2.30 для показателя « $A_1(m_{мор})$ – хорошо» принят заряд массой 1,2 кг: такой предельный заряд имеют ПВВ V класса при взрывании в комбинированной

мортине, и он эквивалентен по работоспособности заряду массой 0,9 кг для ПВВ IV класса. Отметка «плохо» соответствует заряду массой 0,6 кг: такой заряд в шпуре имеет ПВВ IV класса при взрывании по углю. При взрывании этого заряда в разрушаемой мортине он вызывает примерно 50% воспламенений МВС, а в стальной мортине с забойкой 1 см не дает воспламенений вообще. Для показателя « $A_2(m_{yz})$ – хорошо» принят открытый обнаженный заряд (m_o) в комбинированной мортине массой 0,6 кг, при котором ПВВ VI класса не вызывают воспламенений метана. Отметка «плохо» соответствует уровню предохранительных свойств ПВВ V класса в уголковой мортине ($m_o = 0,1$ кг). Показателю « $A_3(\Pi_{BB})$ – хорошо» соответствует масса воспламенителя Π_{50} , при которой в шпурах с забойкой не возможно выгорание ПВВ ($\Pi_{50} = 1,625$ г). Отметке «плохо» соответствует нормируемый техническими требованиями к ПВВ показатель поджигаемости $\Pi_{50} = 1,2$ г.

Таким образом, получен комплексный показатель антигризутности зарядов ПВВ для оценки безопасности взрывных работ:

$$A(m_{BB}) = F(m_{мор}, m_{yz}, \Pi_{BB}) = F(m_{мор}) \cdot F(m_{yz}) \cdot F(\Pi_{BB}).$$

Для оценки по шкале функции антигризутности $F(m_{мор}, m_{yz}, \Pi_{BB})$ необходимо получить среднее геометрическое значение комплексного показателя по формуле:

$$A(m_{BB}) = \sqrt[3]{A_1(m_{мор}) \cdot A_2(m_{yz}) \cdot A_3(\Pi_{BB})}. \quad (2.109)$$

Значение функции антигризутности зарядов ПВВ IV, V, VI классов при взрывных работах в шахтах даны в табл. 2.31.

Определение комплексного показателя антигризутности зарядов ПВВ показало, что аммонит Г5 имеет плохую оценку, угленит 13П – удовлетворительную, а угленит 10П очень хорошую. Необходимо отметить, что расчет комплексного показателя антигризутности зарядов ПВВ необходимо делать для эквивалентных условий взрывания равных по работе взрыва зарядов.

Выполненные в разделе теоретические и экспериментальные исследования условий применения ПВВ при взрывных работах в угольных шахтах и факторов, определяющих антигризутность зарядов, позволяют сделать следующие выводы:

– на основании анализа действующих в угольных шахтах паспортов БВР

определили их основные параметры, которые позволили установить массу шпурового заряда ВВ и массы равных по работе взрыва зарядов ПВВ IV, V, VI классов;

– установили, что существует взаимосвязь между величиной шпурового заряда ПВВ и его антигризутностью при взрывных работах. Получены эмпирические зависимости массы предельного заряда ПВВ в МВС от его параметров и условий взрывания;

– предложены критерии антигризутности шпуровых зарядов ПВВ на основании испытаний их в канальной и комбинированной мортирах при прямом и обратном способе инициирования ВВ в опытном штреке;

– дана оценка эффективности и безопасности применения в шахтах обратного способа инициирования шпуровых зарядов ПВВ IV, V, VI классов;

– установили, что время истечения продуктов взрыва ПВВ из канала мортиры или шпура при прямом и обратном способе инициирования заряда влияет на его антигризутность. Наибольшее влияние на время истечения продуктов взрыва ПВВ оказывает внутренняя забойка шпура;

Таблица 2.31

Значение функции антигризутности зарядов ПВВ при взрывании по углю

ПВВ (класс)	Значения параметров шпуровых зарядов и функции антигризутности						$F(m_{мор}, m_{угл}, П_{ВВ})$	$A(m_{ВВ})$
	$m_{мор}, кг$	$A_1(m_{мор})$	$m_{ВВ}, кг$	$A_2(m_{угл})$	$П_{50}, с$	$A_3(П_{ВВ})$		
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Аммонит Г5 (IV)	0,6	0,2	0,05	0,1407	1,44	0,5901	0,0166	0,255
Угленит 13П (V)	1,0	0,6497	0,15	0,2669	1,44	0,5901	0,10234	0,468
Угленит 10П (VI)	1,2	0,800	0,60	0,800	1,72	0,86635	0,55446	0,822

– исследования условий выгорания заряда ПВВ позволили установить негативное влияние внутренней забойки шпура на устойчивость горения ВВ. С увеличением длины и массы забойки вероятность выгорания ПВВ возрастает. Следовательно, необходимо изменить норму по поджигаемости ПВВ – I_{50} с 1,2 до 1,625 г;

– обоснован комплексный критерий антигризутности шпуровых зарядов ПВВ при взрывных работах, выраженный в виде функции желательности, зависящей от уровня предохранительных свойств ПВВ и его устойчивости к выгоранию. Это позволило установить, что антигризутность зарядов ПВВ IV класса аммонита Г5 плохая, V класса угленита 13П – удовлетворительная, а VI класса угленита 10П очень хорошая.

РАЗДЕЛ 3

ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕЙСТВИЯ НА МВС РАЗЛИЧНЫХ ФАКТОРОВ ВЗРЫВА ЗАРЯДА ПВВ

3.1. Исследование воспламеняющего действия ударных волн на МВС

Современные представления [178, 179] об опасности в МВС того или иного фактора взрыва заряда базируются на их зависимости от теплоты взрыва ВВ. Общеизвестно, что чем больше энергия взрыва заряда ВВ, тем выше параметры ударной волны (давление во фронте и скорость движения) и, следовательно, ее агрессивность по отношению к взрывоопасной МВС. Аналогично можно сказать и о продуктах взрыва ВВ: чем выше их удельное теплосодержание и температура, тем более они опасны по отношению к МВС. Вместе с тем, в исследованиях опасности того или иного фактора взрыва заряда ВВ по отношению к взрывоопасной МВС многие вопросы еще не достаточно выяснены. Прежде всего, это относится к определению критических параметров ударных волн, вызывающих воспламенение МВС, выяснению влияния состава газообразных продуктов взрыва и горящих частиц при взрыве и выгорании шпурового заряда ВВ на МВС. Для того, чтобы ответить на эти вопросы и установить, насколько опасны эти факторы взрыва для МВС, необходимо провести дополнительные исследования.

Исследования базируются на основных положениях физики взрыва заряда ВВ в воздухе и детонации МВС, изложенных в работах [180, 181]. Начали с установления части энергии взрыва, идущей на образование ударной волны в газовой среде при взрыве ПВВ различного состава и уровня предохранительных свойств. Был применен энергетический закон подобия при взрыве, который успешно исследовали и развили академики Л.И. Седов и М.А. Садовский [182]. Энергетический закон можно применять для сравнения не только различных ВВ, но и взрывов различной природы. При сравнении последних достаточно знать энергию, выделившуюся при взрыве. Основным параметром закона подобия при взрывах имеет вид $\sqrt[3]{E}/R$, в него входит не полная энергия взрыва заряда ВВ – E_n , а только та ее часть – E , которая

передается в ударную волну. Основной характеристикой, определяющей фазу сжатия и действия ударной волны на окружающую среду, является избыточное давление во фронте ударной волны ΔP . Если необходимо определить, каким оно будет на расстоянии R от заряда ВВ, то, согласно энергетическому закону подобия при взрыве, необходимо знать функцию вида:

$$\Delta P = F(\sqrt[3]{E}/R). \quad (3.1)$$

Эта функция была установлена из опыта. Опытные замеры давления во фронте ударных волн производились с помощью пьезоэлектрических и емкостных датчиков давления. В МакНИИ В.С. Матюниным [183] впервые были применены сегнето-керамические емкостные датчики для измерения параметров ударных волн в газовой среде при взрыве зарядов ВВ. С помощью разработанного комплекса измерительной аппаратуры В.М. Расторгуевым в опытном штреке МакНИИ было измерено избыточное давление во фронте воздушной ударной волны, образовавшейся при взрыве открытых зарядов ВВ с различным уровнем предохранительных свойств и энергии взрыва [184].

Академик М.А. Садовский, используя большой объем экспериментальных данных, получил при взрывании открытых зарядов тротила следующий вид функции (3.1):

$$\Delta P = 0,84 m_{BB}^{1/3} / R + 2,7 m_{BB}^{2/3} / R^2 + 7 m_{BB} / R^3, \text{ кг/см}^2. \quad (3.2)$$

Если в это уравнение ввести коэффициент $a_y = E/E_{ТНТ}$, учитывающий отношение энергии, передаваемой при взрыве ВВ в ударную волну, к энергии взрыва заряда тротила – $E_{ТНТ}$, то получим следующее уравнение:

$$\Delta P = 0,84(E/E_{ТНТ})^{1/3} m_{BB}^{1/3} / R + 2,7(E/E_{ТНТ})^{2/3} m_{BB}^{2/3} / R^2 + 7(E/E_{ТНТ}) m_{BB} / R^3. \quad (3.3)$$

Подставив использованные В.М. Расторгуевым [184] значения массы заряда ВВ $m_{BB} = 0,2$ кг и расстояния от центра заряда до датчика измерения давления $R = 1,5$ м, будем иметь:

$$\Delta P = 0,328 a_y^{1/3} + 0,410 a_y^{2/3} + 0,415 a_y.$$

Заменим переменную $a_y = \beta_0^3$. В результате получим кубическое уравнение:

$$\beta_0^3 + 0,988\beta_0^2 + 0,79\beta_0 - 2,41\Delta P = 0. \quad (3.4)$$

Для тротила $\beta_0 = 1$. Тогда для его заряда массой 0,2 кг $\Delta P = 1,153$ кг/см². Опытное значение давления, полученное прямым измерением при взрыве заряда, дает $\Delta P = 1,150$ кг/см². Это указывает на то, что закон энергетического подобия для зарядов тротила выполняется, следовательно, он будет выполняться и для других ВВ. Результаты расчета коэффициентов a_y и β_0 при $m_{ВВ} = 0,2$ кг и $R = 1,5$ м для промышленных ВВ, использованных в опытах, даны в табл. 3.1

Таблица 3.1

Результаты расчета коэффициентов a_y и β_0 для зарядов ВВ по измеренному избыточному давлению во фронте ударной волны

ВВ	Избыточное давление ΔP , кг/см ²	Значение энергетических показателей относительно тротила	
		β_0	a_y
1	4	5	6
Тротил	1,15	1,0	1,0
Аммонал скальный № 1	1,35	1,059	1,187
Детонит 10А	1,20	1,02	1,06
Аммонит № 6 ЖВ	1,00	0,933	0,813
Победит ВП-4	0,94	0,905	0,741
Аммонит ПЖВ-20	0,87	0,871	0,660
Угленит Э-6	0,520	0,664	0,293
Угленит № 5	0,340	0,520	0,141
Угленит 7	0,40	0,573	0,188

Экспериментальные данные позволяют достаточно точно рассчитать коэффициент a_y для каждого ВВ. Для того, чтобы определить энергию взрыва заряда ВВ, передаваемую в ударную волну, необходимо знать энергию взрыва открытого заряда тротила. В работе [185] приведены экспериментальные данные по определению конечного химического состава продуктов взрыва тротила и его удельной теплоты

взрыва. Это позволило рассчитать энергию взрыва открытых зарядов ПВВ, передаваемую в ударную волну. Результаты расчета приведены в табл. 3.2.

Таблица 3.2

Результаты расчета энергии взрыва ВВ, передаваемой в ударную волну

ВВ	Скорость детонации заряда ВВ, D , м/с	Коэффициент, a_y	Энергия, передаваемая в ударную волну, E , кДж/кг	Энергия ВВ во фронте детонационной волны, E_l , кДж/кг	Потенциальная энергия взрыва ВВ, Q_v , кДж/кг	Отношение $\frac{E}{Q_v}$
1	2	3	4	5	6	7
Тротил	6800	1,0	4665,2	3853,6	5430,0	0,859
Аммонал скальн. № 1	6600	1,187	5537,6	3630,2	5710,7	0,967
Детонит 10 А	5300	1,06	4945,1	2340,9	5104,5	0,968
Аммонит № 6ЖВ	4000	0,813	3792,8	1333,4	4284,4	0,885
Победит ВП-4	4200	0,741	3456,9	1470,1	3830,8	0,902
Аммонит ПЖВ-20	4000	0,66	3079,0	1333,4	3373,1	0,913
Угленит Э-6	2200	0,293	1366,9	403,3	2610,8	0,523
Угленит № 5	1850	0,141	657,8	285,2	1235,9	0,532
Угленит 7	1800	0,188	877,06	270,0	1885,7	0,465

Приведенные в таблице 3.2 результаты расчетов энергии взрыва, передаваемой в ударную волну при взрыве зарядов ПВВ, показали следующие. Предохранительные ВВ III и IV классов передают в ударную волну около 90% от общей потенциальной энергии взрыва заряда ВВ. При этом фактически нет принципиальной разницы между ними и не предохранительными ВВ I и II классов. При взрыве ПВВ V и

VI классов в ударную волну передается около 50% их потенциальной энергии взрыва. Получается, что остальная часть остается в продуктах взрыва или вообще не выделяется. Далее исследовали ПВВ, чтобы установить их предельные заряды в зависимости от энергии E и энергии ВВ во фронте детонационной волны – E_1 (энергия детонации ВВ). Результаты исследований приведены в табл. 3.3.

Таблица 3.3

Предельный заряд ВВ в зависимости от их энергии детонации и энергии взрыва, передаваемой во фронт ударной волны

ВВ	Класс ВВ	Предельный заряд ВВ (открытый в МВС), M_{np} , кг	E , кДж/кг г	E_1 , кДж/кг г	$\frac{E}{Q_v}$	$\frac{E_1}{Q_v}$	$M_{np} \cdot E$, кДж
1	2	3	4	5	6	7	8
Аммонит №6ЖВ	II	0,005-0,010	3792,8	1333,4	0,885	0,311	18,96
Победит ВП-4	III	0,010-0,020	3456,9	1470,1	0,902	0,384	41,48
Аммонит ПЖВ-20	IV	0,020-0,025	3079,0	1333,4	0,913	0,395	69,28
Угленит Э-6	V	0,25-0,3	1366,9	403,3	0,523	0,154	375,9
Угленит № 5	V	0,75	657,8	285,2	0,532	0,231	493,35
Угленит 7	VI	1,0	877,1	270,0	0,465	0,143	877,06

С помощью корреляционного анализа данных, приведенных в таблице, установили следующие зависимости:

$$M_{np} = (0,975 + 4,3226 \cdot 10^{-5} E)^{-1/0,037065}, \text{ кг}, \quad /r/ = 0,926, \quad (3.5)$$

$$M_{np} = \frac{1}{(0,004961 E_1^{1,219545} - 3,5784)}, \text{ кг}, \quad /r/ = 0,999. \quad (3.6)$$

Их сравнение показывает, что энергия E_1 имеет более сильное влияние на предохранительные свойства ВВ, чем энергия E [186]. В связи с этим необходимы исследования, которые позволят определить начальные параметры ударных волн в газообразной среде при детонации заряда ВВ. Это достаточно сложная задача. В работах Л.Д. Ландау, К.П. Станюковича и Ф.А. Баума [187] дается решение, которое позволяет

определять параметры ударной волны вблизи поверхности заряда ВВ в зависимости от давления детонации ВВ – P_H , скорости его детонации и скорости истечения продуктов детонации в воздух W_D . Тогда отношение начального давления во фронте ударной волны – P_x к давлению детонации ВВ на границе раздела «ВВ – газообразная среда» можно определить по формуле:

$$\frac{P_x}{P_H} = \frac{\rho_e (\gamma_a + 1)(n + 1)}{2\rho_{ВВ}} \cdot \left(\frac{W_D}{D}\right)^2, \quad (3.7)$$

где ρ_e – плотность воздуха;

γ_a – показатель адиабаты воздуха с учетом его ионизации, $\gamma_a \approx 1,2$.

В работе [188] римановское решение доводится до конца, рассматривая отдельно обе части уравнения, описывающего расширение продуктов детонации и взрыва ВВ, и связывая решения в точке их сопряжения. Таким образом, имеем решение, позволяющее оценить в характерном для этого случая интервале расширения скорость истечения продуктов детонации (ПД) ВВ в газообразную среду:

$$\frac{3n-1}{n^2-1} D \leq W_D \leq \frac{3n-1}{n^2-1} D + \frac{2C_k}{k-1}, \quad (3.8)$$

где C_k – скорость звука в точке сопряжения продуктов взрыва и ПД ВВ;

k – показатель адиабаты продуктов взрыва ВВ.

Уравнение (3.8) позволяет приближенно определить значение скорости истечения продуктов детонации ВВ в этом интервале. Тогда среднее значение скорости истечения можно найти из уравнения:

$$W_{Dcp} = \frac{3n-1}{n^2-1} D + \frac{C_k - C}{k-1}, \text{ м/с.} \quad (3.9)$$

где C – скорость звука в ударно-сжатой газовой среде.

Согласно работе [188], значение скорости звука в продуктах взрыва ВВ равно:

$$C_k = \frac{nD}{n+1} \left(\frac{P_k}{P_H}\right)^{\frac{n-1}{2n}}. \quad (3.10)$$

Метод расчета P_k дан в работе [187]. Известным методом «аквариума» [189] экспериментально были определены значения параметров детонации зарядов промышленных ВВ II...VII классов [190]. Это позволило при условии $C_k = C$ по уравне-

ниям (3.7) – (3.10) рассчитать начальные параметры ударных волн при взрыве ВВ. Результаты расчета приведены в табл. 3.4.

Таблица 3.4

Начальные параметры ударных волн в воздухе при взрыве ВВ

ВВ	Класс ВВ	Параметры детонации ВВ					Параметры истечения ПД в газовую среду		M_{np} в МВС, кг
		$\rho_{ВВ}$, кг/ м ³	D , м/с	n	k	P_H , Па	W_{Dcp} , м/с	P_x , Па	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Аммонит №6ЖВ	II	1050	4204	2,24	1,19	$5,73 \cdot 10^9$	5985,38	$4,829 \cdot 10^7$	~ 0,010
Аммонит Т-19	IV	1050	4176	2,26	1,165	$5,576 \cdot 10^9$	5855,14	$4,586 \cdot 10^7$	~ 0,025
Угленит Э-6	V	1220	2224	2,05	1,195	$1,978 \cdot 10^9$	3576,46	$1,723 \cdot 10^7$	~ 0,25
Угленит 13П	V	1200	2318	2,09	1,145	$2,087 \cdot 10^9$	3626,93	$1,773 \cdot 10^7$	~ 0,20
Угленит 12ЦБ	VI	1300	1927	2,23	1,13	$1,495 \cdot 10^9$	2759,85	$1,0267 \cdot 10^7$	~ 1,2
Угленит 10П	VI	1250	1985	2,35	1,15	$1,47 \cdot 10^9$	2655,44	$9,5004 \cdot 10^6$	~ 1,0
Ионит	VII	1170	1676	2,21	1,13	$1,024 \cdot 10^9$	2429,36	$7,954 \cdot 10^6$	~ 1,5

Расчеты показывают, что начальные параметры воздушных ударных волн ВВ II...VII классов тем больше, чем больше их скорость детонации. Для ПВВ II...IV классов с высокой скоростью детонации начальное давление ударных волн в воздухе или весьма близкой к нему 9,0%-ной МВС имеет очень большое значение, в десятки раз выше, чем давление во фронте детонационной волны МВС. Высокотехнологичные ВВ V и VI классов образуют при взрыве менее интенсивные ударные волны, однако и их параметры превышают параметры детонации МВС в 5...10 раз. Эти результаты показывают, что, если бы основным источником воспламенения МВС являлись ударные волны, то воспламенение метана происходило бы от любых ВВ. Вместе с тем, мы наблюдаем, что одни ВВ легко воспламеняют МВС и имеют малый предельный заряд, а другие, наоборот, с трудом ее воспламеняют и имеют

большой предельный заряд. Если сравнить аммонит Т-19 и ионит, то получается, что давление в образованных этими ВВ ударными волнами отличается в 5,76 раза, тогда как масса предельных свободноподвешенных зарядов при взрыве в МВС – в 60 раз. Следовательно, начальные параметры ударных волн, образованных при взрыве зарядов ПВВ в МВС, не следует рассматривать как критерий антигризутности зарядов ПВВ. Для дальнейшего уточнения механизма воспламенения МВС ударными волнами были проведены исследования по установлению их критических параметров.

3.2. Исследование критических параметров ударных волн, вызывающих воспламенение МВС при детонации заряда ПВВ

Для установления критических параметров ударных волн при воспламенении МВС детонирующим зарядом ПВВ были использованы результаты экспериментальных работ Н.Р. Шевцова, В.И. Стикачева [191] и В.В. Адушкина [192]. В работе [191] экспериментально определили критический размер безопасной воздушной оболочки вокруг заряда ВВ в МВС. Эти данные приведены в табл. 3.5.

В работе [192] В.В. Адушкин получил эмпирические уравнения, которые позволяют определить избыточное давление во фронте воздушной ударной волны, скорость разлета продуктов детонации ВВ и радиус сферы продуктов взрыва, начиная с момента выхода детонационной волны на поверхность сферического заряда до момента достижения радиуса $R = (10...15)r_3$. Воспользуемся этими результатами для преобразования эмпирических зависимостей, полученных для зарядов из тэна в работе [192]. При определении избыточного давления во фронте ударной волны и скорости разлета продуктов детонации открытых зарядов ПВВ вводим в эти уравнения коэффициент a_y и коэффициент, учитывающий энергетическое подобие между ВВ. В результате преобразования уравнений, полученных в работе [192] с учетом работы [193], окончательно имеем:

Таблица 3.5

Критические размеры безопасных воздушных оболочек вокруг заряда ВВ в МВС

ВВ, его класс	$m_{ВВ}$, кг	Радиус заряда ВВ, $r_з$, м	Расстояние от заряда ВВ до МВС, м		Критическое расстояние, R , м
			воспламенение есть	воспламенения нет	
1	2	3	4	5	6
Тротил, I	0,2	0,03581	1,25	1,35	1,3
Аммонит 6ЖВ, II	0,2	0,03581	0,6	0,7	0,65
Аммонит 6ЖВ, II	0,4	0,0451	0,85	0,9	0,88
Аммонит 6ЖВ, II	0,6	0,516	1,0	1,1	1,05
Детонит 10А, II	0,2	0,0343	0,75	0,8	0,78
Детонит 10А, II	0,4	0,04315	0,9	1,0	0,95
Детонит 10А, II	0,8	0,05435	1,15	1,25	1,2
Аммонал скальный №1, II	0,2	0,03581	0,9	1,0	0,95
Аммонит ПЖВ-10, III	0,3	0,04099	0,6	0,65	0,6
Аммонит ПЖВ-10, III	0,9	0,0591	-	1,0	1,0
Аммонит ПЖВ-20, IV	0,2	0,0358	0,4	0,45	0,43
Аммонит ПЖВ-20, IV	0,3	0,041	0,55	0,6	0,58
Аммонит ПЖВ-20, IV	0,9	0,0591	0,9	1,0	0,95
Угленит Э-6, V	0,75	0,0532	0,03	0,1	0,065
Угленит Э-6, V	1,07	0,0599	0,3	0,4	0,375

$$\Delta P = \frac{63549,886(\rho_{BB} E_n a_y)^{0,46}}{(R/r_3)^{1,38}}, \text{ Па}, \quad (3.11)$$

$$W_u = \frac{284,806(\rho_{BB} E_n)^{0,2165} (1-\varepsilon)^{0,5}}{(R/r_3)^{0,65}}, \text{ м/с}, \quad (3.12)$$

Критические размеры безопасной воздушной оболочки вокруг заряда, через которую не передается детонация от ВВ к МВС, были установлены экспериментально путем взрывания зарядов ПВВ в опытном штреке с взрывчатой МВС (9...10% CH_4). Согласно методике экспериментальной работы, предложенной проф. Шевцовым Н.Р. [194], были установлены размеры воздушной оболочки, при которой взрываемый заряд в 10-ти опытах не вызывал воспламенение МВС, и размер оболочки, при которой происходили воспламенения. Средний размер воздушной оболочки в этих опытах рассматривали как критический и использовали его в уравнениях (3.11) и (3.12) для расчета критических параметров ударных волн. Экспериментальные и расчетные данные этих опытов приведены в табл. 3.6 и 3.7.

Скорость ударной волны (УВ), входящей в МВС из воздушной оболочки, окружающей заряд ВВ, определяли по уравнению, полученному в результате обработки табличных данных работы [187]:

$$D_y = 315,4(1,46245 + \Delta P/P_0)^{0,49305}, \text{ м/с}, \quad (3.13)$$

где P_0 – атмосферное давление воздуха, Па.

Температуру МВС во фронте ударной волны определяли по формуле, полученной в работе [195]:

$$T_\phi = T_0 + T_y, \text{ } ^\circ\text{К},$$

где T_0 – начальная температура МВС;

$$T_y = \frac{2D_y^2}{c_p(T)(1+k)^2} k - \text{ударное приращение температуры МВС во фронте УВ};$$

$c_p(T)$ – молярная теплоемкость МВС при постоянном давлении в диапазоне температур ($T_0 \dots T_y$).

На рис. 3.1 показан график зависимости температуры МВС в ударном фронте от скорости волны.

Таблица 3.6

Критические параметры воздушных оболочек вокруг зарядов ВВ и ударных волн в них при воспламенении МВС

ВВ	Класс	Радиус заряда ВВ, r_3 , м	Критический радиус оболочки, R , м	$\frac{R}{r_3}$	Критические параметры УВ для МВС	
					давление, ΔP , Па	скорость, D_y , м/с
Тротил	I	0,03581	1,3	36,303	$5,343 \cdot 10^5$	805,7
Аммонит № 6ЖВ	II	0,03581	0,65	18,151	$1,264 \cdot 10^6$	1153,8
Аммонит № 6ЖВ	II	0,0451	0,88	19,512	$1,1442 \cdot 10^6$	1103,4
Аммонит № 6ЖВ	II	0,0516	1,05	20,3488	$1,08 \cdot 10^6$	1076,0
Детонит 10А	II	0,0343	0,78	22,7405	$1,1126 \cdot 10^6$	1090,0
Детонит 10А	II	0,04315	0,95	22,016	$1,163 \cdot 10^6$	1111,5
Детонит 10А //-	II	0,05435	1,2	22,079	$1,159 \cdot 10^6$	1109,5
Аммонал скальный № 1	II	0,03581	0,95	26,529	$8,91 \cdot 10^5$	990,7
Аммонит ПЖВ-10	III	0,04099	0,6	14,6377	$1,6255 \cdot 10^6$	1289,7
Аммонит ПЖВ-10	III	0,0591	1,0	16,92	$1,331 \cdot 10^6$	1179,3
Аммонит ПЖВ-20	IV	0,0358	0,43	12,0112	$2,031 \cdot 10^6$	1427,5
Аммонит ПЖВ-20	IV	0,041	0,58	14,1463	$1,621 \cdot 10^6$	1287,9
Аммонит ПЖВ-20	IV	0,0591	0,95	16,0744	$1,359 \cdot 10^6$	1190,1
Угленит Э-6	V	0,0532	0,065	1,222	$3,48 \cdot 10^7$	3605,0
Угленит Э-6	V	0,0599	0,375	6,204	$3,651 \cdot 10^6$	1877,4

Анализ экспериментальных и расчетных данных, приведенных в табл. 3.7, показал следующее. Аммонит № 6ЖВ, детонит 10А и аммонал скальный № 1 (прессованный) имели при взрыве практически одинаковые критические параметры ударных волн, необходимые для воспламенения МВС: $\Delta P = (0,9 \dots 1,1) \cdot 10^6$ Па. Совсем другая картина наблюдалась при взрыве зарядов тротила, имеющего резко отрицательный кислородный баланс. Продукты взрыва этого ВВ состоят, в большей части, из продуктов неполного окисления горючих элементов. Поэтому при взрыве они дают в смеси с воздухом вторичное пламя, которое, как видно из эксперимента, сильно снизило критические параметры ударных волн, необходимые для воспламенения МВС: $\Delta P = 5,3 \cdot 10^5$ Па, что примерно в два раза меньше, чем у ВВ II класса.

Таблица 3.7

Результаты расчета критических параметров ударных волн для МВС, отделенной от зарядов ВВ воздушной оболочкой

ВВ	$\frac{R}{r_3}$	Критические параметры УВ в МВС при $R = R_{sp}, T_0 = 288^{\circ}\text{K}$					скорость ис- течения ПВ, W_D , м/с
		давление УВ, ΔP , Па	скорость УВ, D_y , м/с	$T_y, ^{\circ}\text{K}$	$T_{\phi}, ^{\circ}\text{K}$		
1	2	3	4	5	6	7	
Тротил	36,303	$5,343 \cdot 10^5$	805,7	274,1	563,1	680,3	
Аммонит № 6ЖВ	18,151	$1,264 \cdot 10^6$	1153,8	519,9	807,9	1193,0	
Аммонит № 6ЖВ	19,512	$1,1442 \cdot 10^6$	1103,4	481,2	769,2	1138,3	
Аммонит № 6ЖВ	20,3488	$1,08 \cdot 10^6$	1076,0	460,6	748,6	1107,8	
Детонит 10 А	22,7405	$1,1126 \cdot 10^6$	1090,0	471,1	759,1	1045,8	
Детонит 10 А	22,016	$1,163 \cdot 10^6$	1111,5	487,4	775,4	1068,0	
Детонит 10 А	22,079	$1,159 \cdot 10^6$	1109,5	485,9	773,9	1066,1	
Аммонал скальный № 1 прессов.	26,529	$8,9024 \cdot 10^5$	990,7	398,5	686,5	944,1	
Аммонит ПЖВ – 10	14,6377	$1,6255 \cdot 10^6$	1289,7	629,4	917,4	1258,9	
Аммонит ПЖВ – 10	16,92	$1,33088 \cdot 10^6$	1179,3	539,9	827,9	1154,8	
Аммонит ПЖВ – 20	12,0112	$2,03115 \cdot 10^6$	1427,5	747,6	1035,6	1325,2	
Аммонит ПЖВ – 20	14,1463	$1,6206 \cdot 10^6$	1287,9	627,9	915,9	1191,5	
Аммонит ПЖВ – 20	16,0744	$1,35866 \cdot 10^6$	1190,1	548,5	836,5	1090,5	
Угленит Э-6	1,222	$3,48 \cdot 10^7$	5605,0	5629,1	5917,1	4969,1	
Угленит Э-6	6,2604	$3,651 \cdot 10^6$	1877,4	1180,1	1468,1	1718,3	

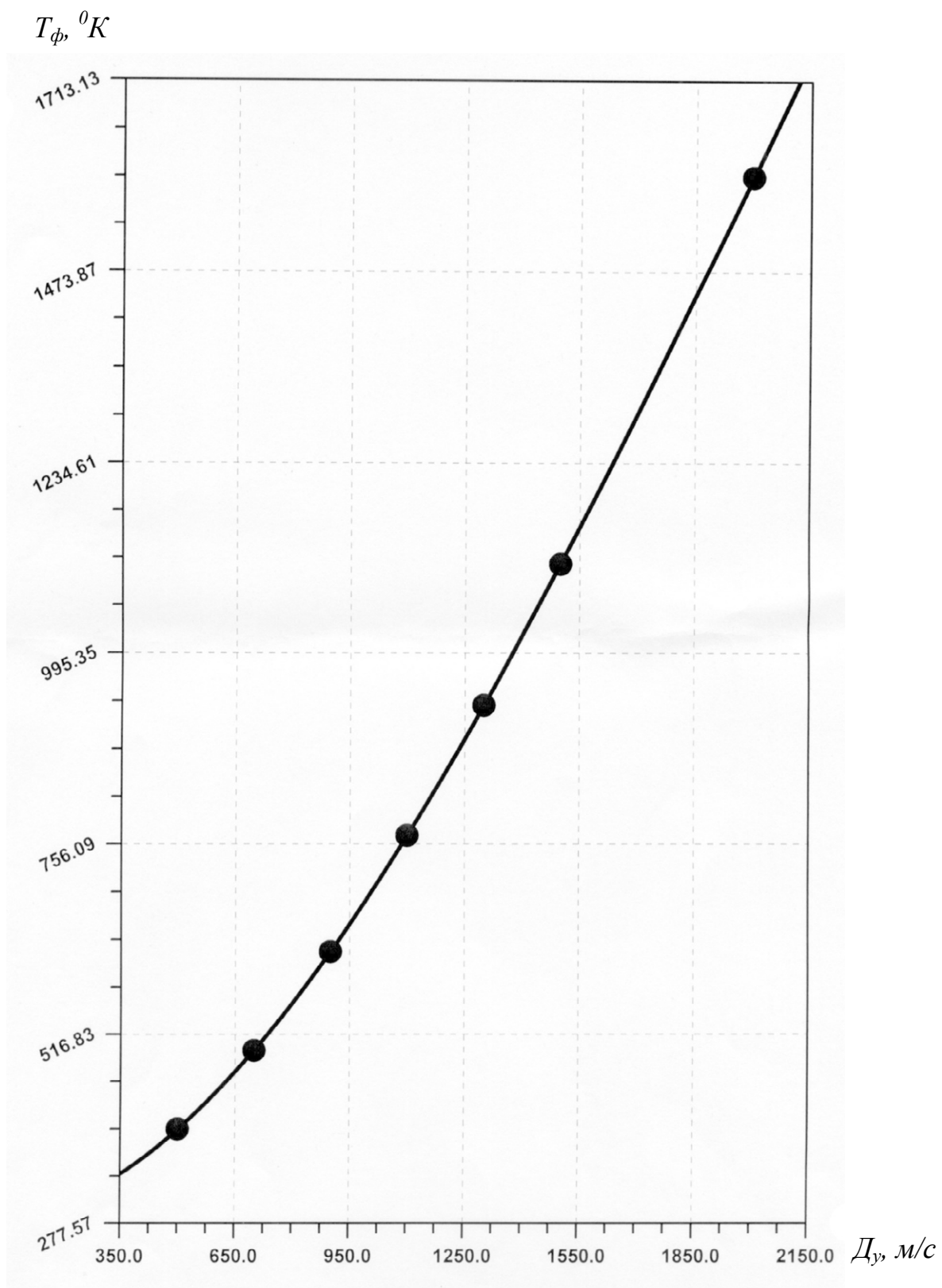


Рис. 3.1. График зависимости температуры МВС во фронте ударной волны от ее скорости

Противоположным действием тротила на МВС в экспериментах было действие ПВВ, которые, как известно, сбалансированы по кислороду и содержат в своем составе соль-ингибитор реакции окисления метана. Для зарядов ПВВ III...V классов было установлено, что чем больше в их составе ингибитора, тем выше критические параметры ударных волн, необходимые для воспламенения МВС. На рис. 3.2 показан график зависимости критического давления во фронте ударной волны, воспламеняющей МВС, от содержания ингибитора в продуктах взрыва ПВВ. Данная зависимость описывается эмпирическим уравнением:

$$\Delta P = \frac{-9522,31}{1 - 1,0083 \exp(-0,0144133 \cdot \varepsilon)}, \text{ Па.} \quad (3.14)$$

Анализ экспериментальных результатов показал, что увеличение концентрации соли-ингибитора в продуктах взрыва ПВВ повышает критические параметры УВ, необходимые для воспламенения МВС. Так, например, для предохранительного аммонита № 6ЖВ, не имеющего ингибитора в составе, то есть $\varepsilon = 0$, критические параметры УВ составили: $\Delta P = 1,12 \cdot 10^6$ Па, $D_y = 1111,0$ м/с, для предохранительного угленита Э-6 они имели следующие значения: $\Delta P = 3,65 \cdot 10^6$ Па, $D_y = 1877,4$ м/с. Другой интересный факт заключается в том, что для критических условий инициирования взрывной реакции при взрыве аммонита температура ударно-сжатой МВС во фронте волны, рассчитываемая по уравнению

$$T_\phi = 275,94 + 3,43566 \cdot 10^{-2} D_y + 4,4974 \cdot 10^{-4} D_y^2 - 6,8772 \cdot 10^{-8} D_y^3, \text{ } ^\circ\text{К,}$$

составила $T_\phi = 775,3$ $^\circ\text{К}$, а при взрыве угленита 1470,5 $^\circ\text{К}$.

Таким образом, исследования показали, что наличие в продуктах взрыва ВВ соли-ингибитора оказывает существенное влияние как на параметры ударных волн, инициирующих взрыв МВС, так и на кинетику реакций окисления метана, происходящих во фронте волны детонации. Наличие ингибитора может существенно затруднить воспламенение МВС при взрыве в ней заряда, если при детонации ВВ в его продуктах взрыва образуются эффективные соли, способные тормозить реакции окисления метана. Механизм ингибирования ударно-сжатой МВС солью основан на рекомбинации ингибитором активных центров в зоне реакции и эффективном ее торможении вплоть до полного прекращения [196]. Высокая скорость полета нано-

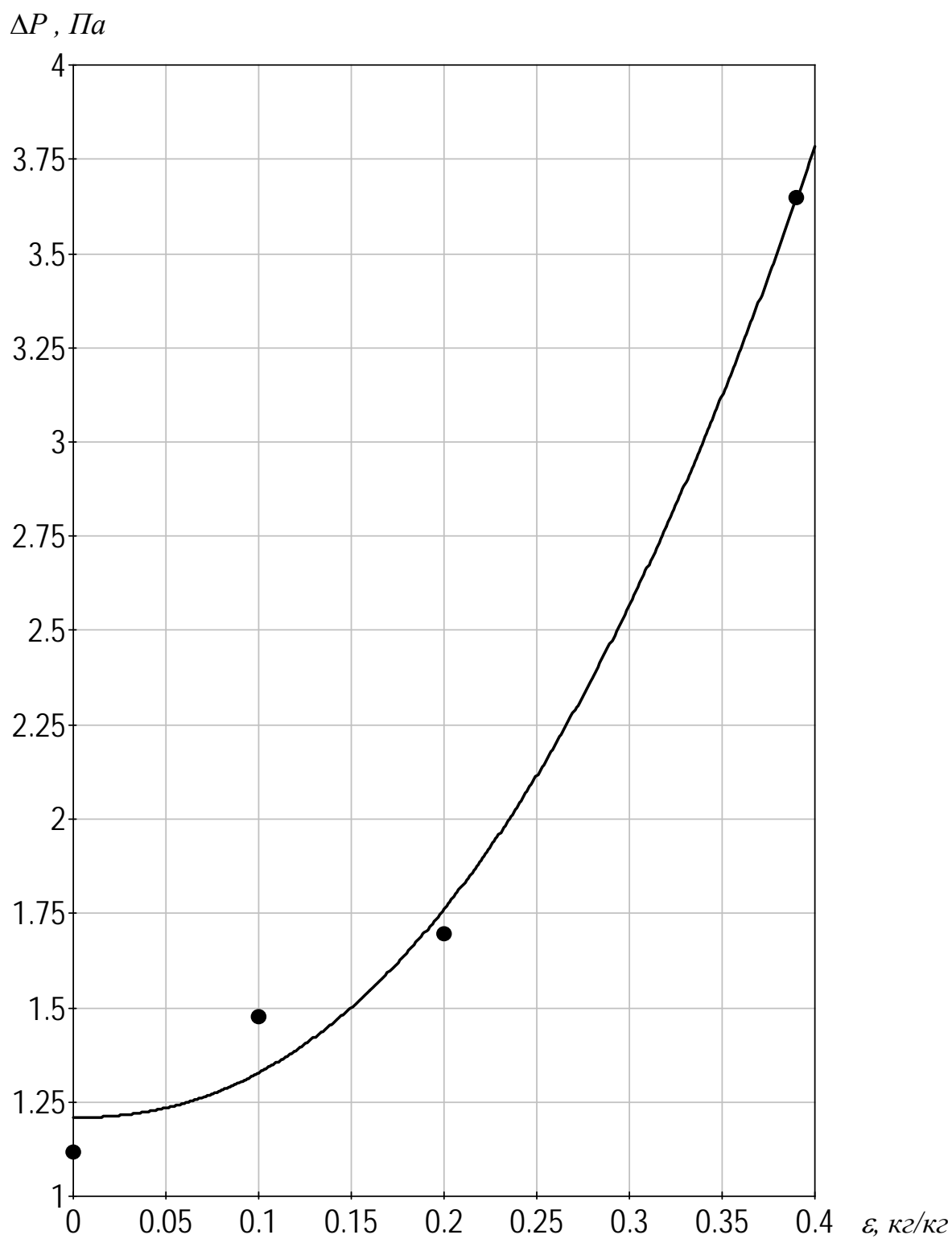


Рис. 3.2. График зависимости давления во фронте ударной волны, воспламеняющей МВС, от содержания в продуктах взрыва ПВВ ингибитора

частиц ингибитора и малое миделевое сечение частиц позволяет им двигаться вслед за ударной волной на большее расстояние, чем радиус расширения газообразных продуктов взрыва заряда. По мере расширения продуктов взрыва и движения УВ происходит возрастание периода индукции МВС за ударной волной вследствие уменьшения ее параметров, а быстро летящие наночастицы ингибитора за этот период времени достигают зоны ударно-сжатой МВС. Это приводит к ингибированию реакции окисления метана в смеси, ее прекращению и подавлению воспламенения МВС.

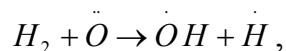
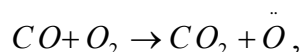
Этот эффект поддается объяснению с позиций цепного механизма реакций, происходящих при окислении метана кислородом воздуха. Проф. М.Е. Краснянский в своей работе «Механизмы ингибирования реакций пламенного горения» так объясняет механизм реакции окисления метана [197].

Одностадийная реакция окисления метана кислородом воздуха:



принципиально не возможна, так как имеет очень высокий энергетический барьер – энергию активации реакции. Вместо нее в зоне реакции протекает множество промежуточных реакций с участием активных радикалов – $\dot{H}, \ddot{O}, \dot{OH}, \dot{C}H_3$ и молекул метана и кислорода.

Эти реакции в газовой фазе протекают почти без «активационного барьера», очень быстро. Поэтому скорость окисления метана кислородом воздуха определяется концентрацией радикалов в зоне реакции между молекулами метана и кислорода: чем больше концентрация радикалов, тем больше скорость сгорания метана и тем легче воспламеняется МВС. Вот почему, если продукты взрыва ВВ содержат продукты неполного окисления, способные к вторичным реакциям образования в продуктах взрыва активных центров-радикалов, например:



то воспламенение МВС происходит значительно эффективнее и быстрее.

Необходимо установить, имеется ли функциональная зависимость между кри-

тическим давлением во фронте ударной волны и составом продуктов взрыва ВВ, которые содержат продукты неполного окисления горючих элементов и соль-ингибитор. Очевидно, что такая зависимость представляет собой сложную функцию нескольких переменных:

$$\Delta P = F(A_{BB}, \varepsilon), \quad (3.15)$$

где $A_{BB} = \frac{c}{2a + b/2}$ – кислородный коэффициент ВВ, характеризующий полноту

окисления атомов углерода – a и водорода – b кислородом c .

Так как A_{BB} и ε представляют собой безразмерные величины, то ΔP выразим через $P^* = \Delta P / P_{MBC}$, где P_{MBC} – давление детонации МВС.

По экспериментальным данным табл. 3.6 и 3.7 проведем корреляционный анализ и установим вид функции:

$$P^* = F(A_{BB}, \varepsilon). \quad (3.16)$$

В результате анализа установлен вид функции $\ln(P^*)$ от $F[\ln A + \ln(1 + \varepsilon)]$, график который показан на рис. 3.3:

$$\ln(P^*) = \frac{2,38479x - 0,3707}{1 - 1,186x + 0,436476x^2}, \quad x = [\ln A + \ln(1 + \varepsilon)], \quad /r/ = 0,989. \quad (3.17)$$

В результате проведенных исследований удалось доказать влияние оксида углерода, водорода и соли-ингибитора (хлористый натрий) в продуктах взрыва ВВ на критические параметры ударной волны, воспламеняющей МВС.

3.3. Исследование влияния состава продуктов взрыва ПВВ на воспламенение МВС

В разделе изложен механизм воспламенения МВС за фронтом ударной волны расширяющимися продуктами взрыва ВВ в зависимости от их состава и температуры [198]. Ранее отмечалось, что необходимыми факторами воспламенения МВС при смешении с ней газообразных продуктов взрыва ВВ являются их температура – $T_{ПВ}$ и время индукции МВС τ . Температура продуктов взрыва должна быть выше тем-

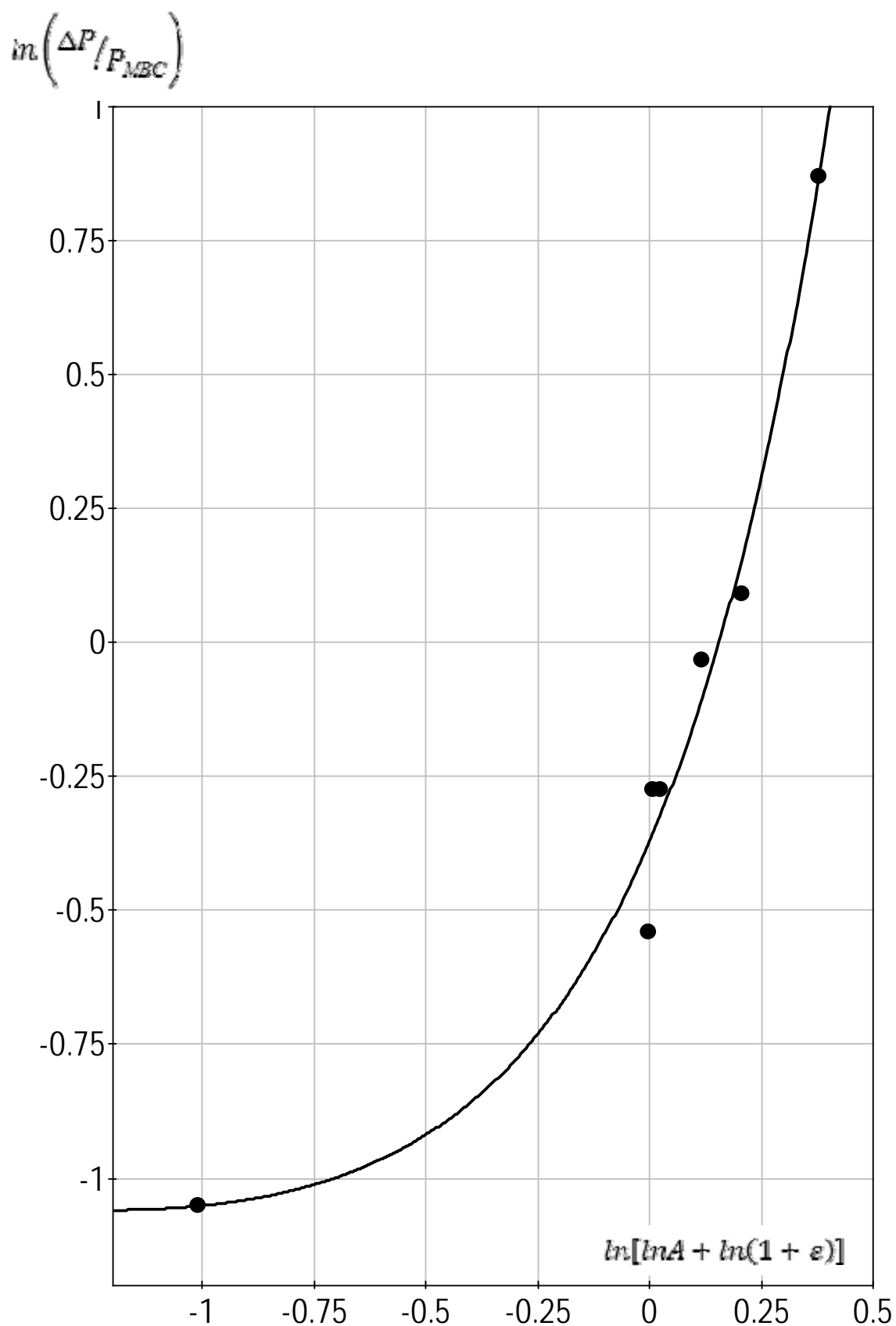


Рис. 3.3. График зависимости $\ln(\Delta P / P_{MBC})$ от параметра $\ln[\ln A + \ln(1 + \varepsilon)]$, характеризующего состав продуктов взрыва ПВВ

пературы вспышки МВС – $T_{всп}$, а время контакта продуктов взрыва ВВ с МВС – t должно быть больше времени индукции. Поскольку период индукции является функцией температуры T , давления P , концентрации метана и кислорода, то индукционный период также является некоторой функцией $\varphi(t)$. По Л.В. Дубнову, период индукции МВС при воспламенении равен:

$$\tau = f(T). \quad (3.18)$$

В то же время температура смеси есть функция от времени:

$$T = F(t), \quad (3.19)$$

тогда

$$\tau = \varphi(t). \quad (3.20)$$

Для функций (3.18) – (3.20) критическое значение функции $\varphi(t)$, отвечающее условиям воспламенения МВС, должно удовлетворять неравенствам:

$$\frac{d\tau}{dt} \leq 1, \quad \frac{T_{ПВ}}{T_{всп}} \geq 1. \quad (3.21)$$

Вместе с тем, не удалось получить численное решение для условия воспламенения МВС, удовлетворяющее уравнениям (3.18) – (3.20) и неравенствам (3.21). Связано это с тем, что не известен вид функций (3.18) – (3.21) и не изучена динамика изменения температуры продуктов взрыва во время их смешения с МВС.

В МакНИИ М.Ф. Галаджий, Б.И. Вайнштейн и В.Н. Бондаренко [198] экспериментально определили зависимость температуры продуктов взрыва ВВ при расширении их в воздухе от радиуса расширения. Для аммонитов № 6ЖВ и ПЖВ-20 и угленита Э-6 данная зависимость имеет соответственно следующий вид:

$$\frac{T(R)}{T_n} = 0,10383 + \frac{0,89575}{R/r_3}; \quad (3.22)$$

$$\frac{T(R)}{T_n} = 0,1493 + \frac{0,851}{R/r_3}; \quad (3.23)$$

$$\frac{T(R)}{T_n} = 0,1865 + \frac{0,8141}{R/r_3}, \quad (3.24)$$

где T_n , $T(R)$ – начальная температура продуктов взрыва и их температура на расстоянии R , °К.

Теперь рассмотрим параметры продуктов взрыва заряда ВВ в воздухе. Очевидно, что при взрыве ВВ в неограниченной среде продукты взрыва через некоторое время после начала разлета займут предельный объем – V_∞ , отвечающий остаточному в них давлению, равному атмосферному P_0 . Метод расчета V_∞ уже ранее приводился. Он позволяет определить V_∞ по формуле:

$$V_\infty = V_0 \left(\frac{P_n}{P_\kappa} \right)^{\frac{1}{n}} \left(\frac{P_\kappa}{P_0} \right)^{\frac{1}{k}}, \quad (3.25)$$

где V_0 – начальный объем заряда.

Определив объем, находим радиус ударной волны – R_y – расстояние, при котором ударная волна отрывается от расширяющихся продуктов взрыва ВВ. В работе [187] Ф.А. Баум приводит следующее уравнение:

$$\left(\frac{R_y}{r_\infty} \right)^3 = (\gamma - 1) \frac{3}{2}. \quad (3.26)$$

Для воздуха при $\gamma = 1,4$ это уравнение примет окончательный вид:

$$R_y = r_\infty \left[\frac{3}{2} (\gamma - 1) \right]^{0,333} = 0,844 r_\infty. \quad (3.27)$$

Время индукции самовоспламенения для МВС (9% метана) получено Л.В. Дубновым [199] в виде уравнения:

$$\tau = 10^{-12} e^{\frac{30000}{T}} P^{-1,8}, \text{ с}. \quad (3.28)$$

Для трех промышленных ВВ сделан расчет показателей, характеризующих механизм воспламенения МВС путем её смешения с продуктами взрыва этих ВВ. Степень сжатия МВС ударной волной: $s = V_0/V_\kappa$ (V_0 , V_κ – начальный и конечный объемы МВС) не может превысить некоторого значения s_{max} . При $P_y \gg P_0$ $V_\kappa \rightarrow V_\infty$, тогда

$$s_{max} = \frac{V_0}{V_\infty} = \frac{\gamma + 1}{\gamma - 1} = 6.$$

Получим предельное давление сжатия $P_s = P_0 s^{1,4} = 1,25 \cdot 10^6$ Па. Результаты расчетов по уравнениям (3.22) – (3.28) приведены в табл. 3.8.

Таблица 3.8

Результаты расчетов температуры продуктов взрыва ВВ и времени индукции МВС при взрыве в ней свободно подвешенных зарядов

ВВ	n	k	$P_{нв}$ Па	$P_{кв}$ Па	$\frac{r_{\infty}}{r_3}$	$\frac{R_y}{r_3}$	$\frac{T(R)}{T_n}$	$T_{нв}$ °К	$T(R)$, °К	τ , с
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Аммонит № 6ЖВ	2,24	1,19	$2,864 \cdot 10^9$	$1,013 \cdot 10^8$	11,422	9,64	0,197	2316	456,6	∞
Аммонит ПЖВ-20	2,50	1,16	$2,4 \cdot 10^9$	$8,16 \cdot 10^7$	10,74	9,06	0,243	2150	522,9	∞
Угленит Э-6	2,05	1,13	$9,89 \cdot 10^8$	$1,02 \cdot 10^8$	8,861	7,479	0,295	1815	536,1	∞

Результаты расчетов показывают, что время индукции $\tau \rightarrow \infty$, то есть при смешивании продуктов взрыва ВВ с МВС в момент времени, когда ударная волна отрывается от них, воспламенение не возможно. Основная часть энергии взрыва ВВ при этом переходит в ударную волну (около 90%). Усложним задачу и предположим, что «диффузия» продуктов взрыва ВВ происходит в область ударно-сжатой МВС (со степенью сжатия $s = 6$), находящуюся сразу за фронтом ударной волны. Прделаем аналогичные расчеты для тех же ВВ, заменив в уравнении (3.25) P_0 на P_s . Результаты расчетов, полученные для этих условий, приведены в табл. 3.9. И в этом случае результаты расчета показывают, что воспламенение МВС при ее смешении с продуктами взрыва ВВ не возможно. Поэтому взгляды Е. Одибера, Л.В. Дубнова и др. на тепловой механизм воспламенения МВС от продуктов взрыва ВВ путем их смешения и теплообмена ней являются не бесспорными. Смешение продуктов взрыва ВВ с МВС на более ранних стадиях их расширения не возможно вследствие гораздо более высокой плотности продуктов взрыва по сравнению с газообразной средой, окружающей заряд.

Таким образом, физические предпосылки – температура и теплопередача, положенные в основу механизма воспламенения МВС продуктами взрыва, не могут

Таблица 3.9

Результаты расчетов температуры продуктов взрыва ВВ и времени индукции для ударно-сжатой МВС

ВВ	$\frac{R_y}{r_3}$	$\frac{T(R)}{T_n}$	T_n , °К	$T(R)$, °К	P_s , Па	τ , с
1	2	3	4	5	6	7
Аммонит № 6ЖВ	5,66	0,262	2316	607,0	$1,25 \cdot 10^6$	$3,2 \cdot 10^7$
Аммонит ПЖВ-20	5,23	0,312	2150	670,8	$1,25 \cdot 10^6$	$2,9 \cdot 10^5$
Угленит Э-6	4,23	0,379	1815	688,1	$1,25 \cdot 10^6$	$9,4 \cdot 10^4$

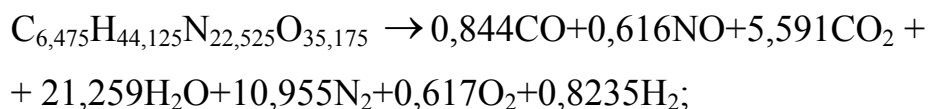
удовлетворять критическим условиям в виде неравенств (3.21).

Вместе с тем, существуют несколько достоверных экспериментальных доказательств, указывающих на то, что воспламенение взрывоопасной среды от продуктов взрыва ВВ может быть при их смешении.

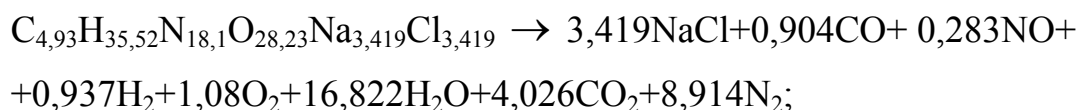
Основными доводами в пользу такого механизма являются: установленный факт влияния состава продуктов взрыва ВВ на его уровень предохранительных свойств, образование «вторичного пламени» при взрыве в воздухе продуктами взрыва ВВ, имеющего отрицательный кислородный баланс.

Для внесения ясности в этот вопрос были проведены исследования по определению состава продуктов взрыва промышленных ВВ – не предохранительного аммонита № 6ЖВ и предохранительных ВВ IV...VI классов. Заряды ВВ взрывали в герметичной камере, из нее отбирали пробы и по результатам их анализа определяли по известной методике [200] состав продуктов взрыва на 1 кг следующих ВВ:

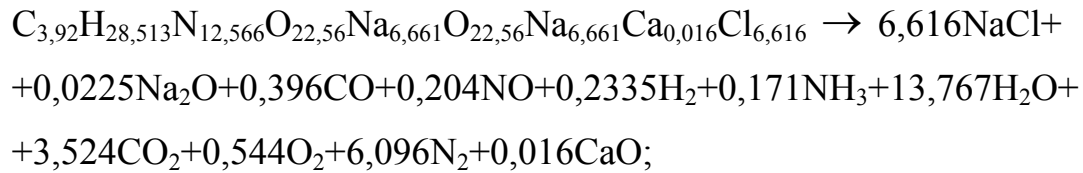
1) аммонит № 6ЖВ (II класс) –



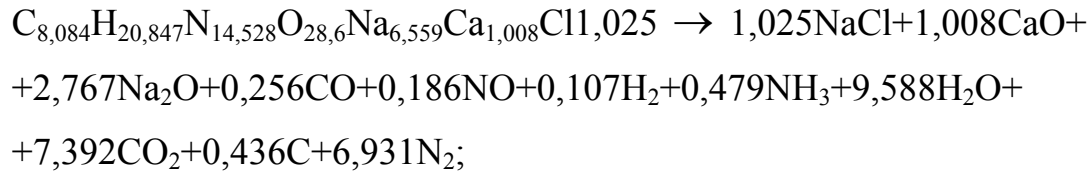
2) аммонит ПЖВ-20 (IV класс) –



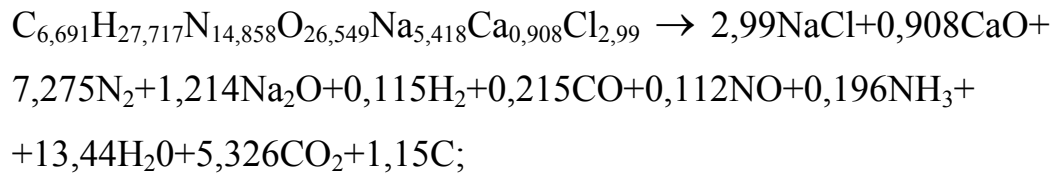
3) угленит Э-6 (V класс) –



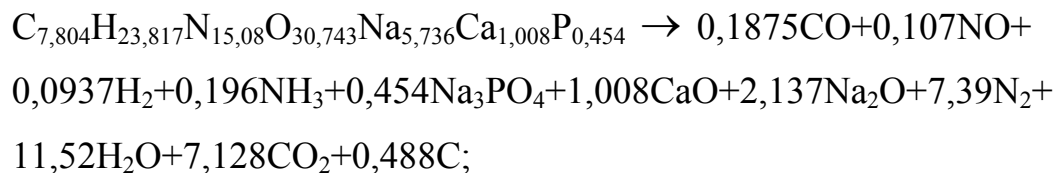
4) угленит 12ЦБ (VI класс) –



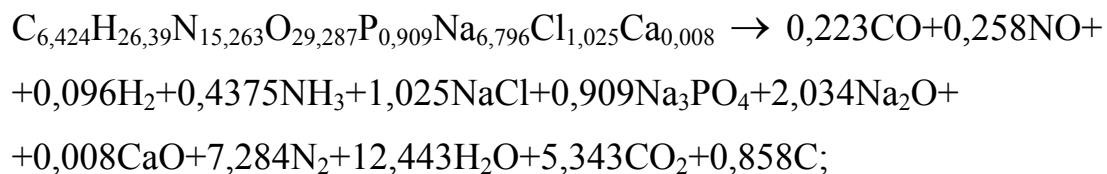
5) угленит Н-12 (VI класс) –



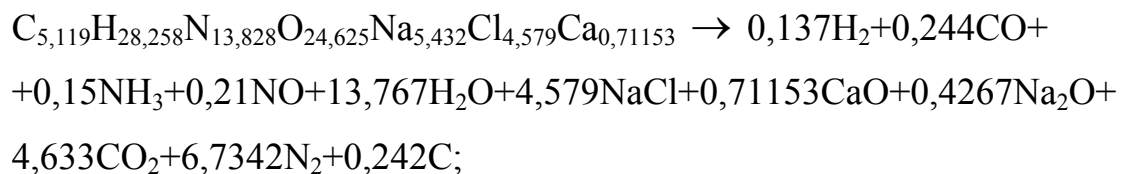
6) угленит 12ЦБ, образец 3М (VI класс) –



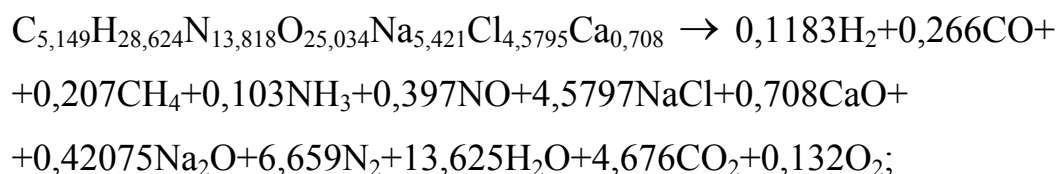
7) алтанит 6а (VI класс) –



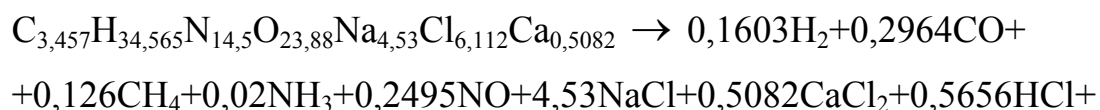
8) угленит 13/2 (V класс) –

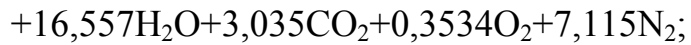


9) угленит 13К (V класс) –

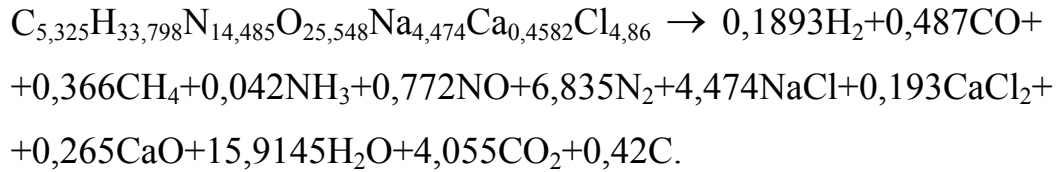


10) угленит 12/10 (VI класс) –





11) углени́т 13П (V класс) –



Проведенные исследования показали, что продукты взрыва всех без исключения ВВ наряду с продуктами полного окисления содержат химические соединения, представляющие как продукты неполного окисления, так и свободные химические элементы. Независимо от класса ВВ, в их газообразных продуктах взрыва вместе с парами воды и углекислым газом содержатся оксиды углерода и азота, углерод, азот, водород, аммиак, кислород. Продукты взрыва предохранительных ВВ содержат конденсированную фазу, которая представлена химическими соединениями, солями, ингибиторами реакции окисления метана кислородом воздуха. В отличие от ингибиторов реакции окисления метана, многие газообразные химические соединения, входящие в состав продуктов взрыва, являются катализаторами реакции окисления метана. Так Е. Одибер, Л.В. Дубнов и К.К. Андреев указывают, что сильное каталитическое влияние на данную реакцию имеют содержащиеся в продуктах взрыва ВВ оксиды азота и углерода, водород и кислород, что приводит к снижению предохранительных свойств ВВ. Вместе с тем, четкого механизма и ясного понимания процесса, происходящего при этом нет. Задача еще более усложняется в связи с тем, что не возможно описать воспламенение метана при смешении продуктов взрыва ВВ с исходной МВС по тепловому механизму. Это наводит на мысль, что существует иной, так сказать, «холодный механизм» инициирования химических реакций.

Действительно, академиком Я.Б. Зельдовичем [201] был предложен механизм цепного инициирования волны превращения для определенной схемы химического процесса. В основу механизма инициирования химической реакции активными центрами (радикалы, атомы) положена теория академика Н.Н. Семенова о цепном механизме химической реакции [202].

Химическая реакция окисления метана кислородом воздуха имеет цепной ме-

ханизм. Поэтому химическое превращение в МВС, идущее посредством цепного разветвления процесса, можно интенсифицировать введением в газовую смесь активных центров, обеспечивающих разветвление цепи. В результате элементарные промежуточные реакции могут идти в реагирующей газовой смеси при низкой температуре, при этом скорость этих актов определяется частотой столкновения активных центров с компаньонами по элементарным цепям; так что суммарная скорость химического превращения оказывается большой при незначительной концентрации активных частиц. Поэтому при таком механизме реакции температура самовоспламенения газовой взрывчатой смеси является величиной относительной, а вовсе не константой взрывчатой смеси, как это считали Е. Одибер и Л.В. Дубнов. В связи с этим, система неравенств (3.21) не может быть использована для описания критических условий, при которых происходит воспламенение МВС посредством инициирования активными центрами реакции окисления метана кислородом воздуха. Очевидность этого вывода заключается в том, что критические условия инициирования данной реакции будут полностью определяться только концентрацией активных центров в МВС, а не ее температурой.

Активные центры, образовавшиеся в продуктах взрыва ВВ, будут попадать во взрывчатую МВС посредством диффузии, обусловленной наличием градиента температуры и давления между продуктами взрыва и окружающей заряд ВВ средой. Поскольку коэффициент диффузии активных центров из продуктов взрыва в МВС будет обусловлен скоростью их движения, то необходимо учитывать тепловую скорость молекул или атомов – \bar{U} , которая однозначно определяется температурой газа – $T, \text{°K}$ и его молекулярной (атомной) массой – μ :

$$\bar{U} = \sqrt{\frac{8R_0T}{\pi\mu}}. \quad (3.29)$$

Длина свободного пробега молекул (атомов) – Δ_{np} также зависит от температуры:

$$\Delta_{np} \approx \bar{\theta}_0 T^{0,25}, \quad (3.30)$$

где $\bar{\theta}_0$ – коэффициент, зависящий от концентрации молекул (атомов) в газе.

Определив состав продуктов взрыва ВВ с помощью уравнений (3.29) и (3.30),

можно достаточно точно сказать, что молекулы и атомы водорода будут обладать наиболее высокой тепловой скоростью и наибольшей длиной свободного пробега, чем атомы и молекулы других газов. Поэтому фронт расширяющихся продуктов взрыва ВВ будет состоять, в основном, из молекул и атомов водорода, которые посредством диффузии смешиваются с исходной МВС. Учитывая то, что атомарный водород \dot{H} обладает высокой реакционной способностью и легко вступает в химические окислительно-восстановительные реакции, его можно рассматривать как наиболее вероятный активный центр, ответственный за инициирование реакции окисления метана в МВС. Действительно, реакцию окисления метана можно представить следующим образом. В случае попадания в МВС активных центров, представленных атомарным водородом \dot{H} , происходит возникновение цепи реакций:



радикал $\dot{H}O_2$ обеспечивает размножение активного центра:



в результате чего возникают цепи промежуточных реакций, связанных с продолжением цепей:



Кроме того, вследствие выделения тепла при окислении метана кислородом воздуха начинает играть роль и реакция диссоциации метана:



В конечном итоге реакция окисления метана при низких температурах, но высоком давлении сжатия МВС ударной волной осуществляется следующим образом:



После реакций (3.33) происходит лавинообразное возникновение радикалов в МВС и, как следствие, ее самовоспламенение. Поскольку установлен состав продуктов взрыва ВВ и их термодинамическая температура, то можно рассчитать концентрацию атомов и молекул водорода в продуктах взрыва при их термодинамическом равновесии. Продукты взрыва ВВ содержат определенное количество водорода с

концентрацией $[H_0]$. В результате реакции



с константой равновесия

$$K = \frac{[H]^2}{[H_2]}, \quad (3.37)$$

используя закон сохранения вещества

$$2[H_2] + [H] = [H_0], \quad (3.38)$$

получаем квадратное уравнение для определения концентрации $[H]$:

$$\frac{2}{K[H]^2} + [H] = [H_0], \quad (3.39)$$

из двух решений которого

$$[H] = \frac{\left(-1 \pm \sqrt{1 + \frac{8[H_0]}{K}}\right) \cdot K}{4} \quad (3.40)$$

физический смысл имеет лишь одно – положительная концентрация.

Активные радикалы \dot{H} диффундируют из продуктов взрыва в МВС и вызывают реакцию окисления метана (3.35). Введем следующие обозначения концентраций для компонентов реакций (3.31) – (3.34): $[H] = a$, $[O_2] = b$, $[HO_2] = c$. Основное кинетическое уравнение для реакции окисления метана относительно изменения концентрации радикалов \dot{H} при этом будет следующее;

$$\frac{da}{dt} = D_d \Delta_{np} a - k_1 ab + k_2 a^2 c, \quad (3.41)$$

где D_d – коэффициент диффузии атомарного водорода;

k_1, k_2 – константы реакций (3.31) и (3.35).

В начальный момент времени – момент иницирования имеем:

$$t = 0; \quad a = a_0(P, T); \quad a = 1, 0; \quad c = 0. \quad (3.42)$$

Некоторое количество активного центра – атомов водорода существует в системе за счет реакции (3.34), происходящей вследствие того, что $T(t) > T_0$. Посколь-

ку концентрация $a = \frac{n(H)}{V(\Delta)}$ (где n – число атомов активных центров, $V(\Delta)$ – объем, в котором инициируется цепная реакция окисления метана), а объем $V(\Delta)$ не известен, с учетом начальных условий (3.42) приведем уравнение (3.41) к следующему виду:

$$\frac{dn}{dt} = W_0(n_0) + f_D n - g n + f_1 n^2, \quad (3.43)$$

где $W_0(n_0)$ – скорость образования активных центров водорода в исходной смеси;
 f_D – константа скорости реакции зарождения цепи, происходящей вследствие диффузии атомов водорода в МВС;

g – константа скорости реакции обрыва цепи, происходящей вследствие захвата радикала;

f_1 – константа скорости реакции разветвления цепи и размножения радикалов.

Уравнение (3.43) преобразуем к следующему виду:

$$\frac{dn}{dt} = W_0 + (f_D - g)n + f_1 n^2. \quad (3.44)$$

Из этого уравнения видно, что если скорость образования активных центров dn/dt положительна и, следовательно, положителен квадратный трехчлен в правой части уравнения, то происходит цепное воспламенение МВС. Это возможно в двух случаях: при $f_D > g$ (линейный процесс разветвления и гибели активных центров) и при $f_D < g$ и малом W_0 (квадратный процесс). При этом, если W_0 мало, то в начальном состоянии смесь устойчива и не реагирует. Разветвление цепей и воспламенение МВС возможны, если концентрация активных центров превзойдет определенное критическое значение $n_{кр}$:

$$n_{кр} = \frac{\left[g - f_D + \sqrt{(g - f_D)^2 - 4f_1 W_0} \right]}{2f_1}. \quad (3.45)$$

До взрыва ВВ исходная МВС в начальном состоянии устойчива, но будет способна реагировать, если из продуктов взрыва ВВ в нее диффундирует определенное количество активных центров – атомов водорода $n[\text{H}]_{\text{ВВ}}$, приводящее к тому, что $n[\text{H}]_{\text{ВВ}} > n_{кр}$. В результате получено необходимое критическое условие, определяющее возможность воспламенения МВС продуктами взрыва ВВ:

$$\frac{n[H]_{BB}}{n_{кр}} \geq 1. \quad (3.46)$$

Однако выполнение расчетов с целью определения показателей, характеризующих данный механизм и условия воспламенения МВС предохранительными ВВ, затруднено. Это связано с тем, что в уравнении (3.45) значения констант скоростей реакции образования и обрыва цепей не известны. Содержание же в продуктах взрыва ВВ атомов водорода $n[H] = [H]$ можно рассчитать по уравнению (3.40). Для того чтобы разрешить ситуацию, сделаем ряд допущений. Будем считать, что время инициирования радикалами химической реакции в МВС практически равно времени самой химической реакции. Это допущение вытекает из цепного механизма реакции, так как время индукции очень мало ($\tau \rightarrow 0$) вследствие лавинообразной скорости образования разветвляющихся цепных реакций. Тогда время химической реакции окисления метана – $t_{x.p.}$ определяется скоростью реакции окисления – W_p :

$$t_{x.p.} = \varphi(W_p), \quad (3.47)$$

а скорость химической реакции равна:

$$W_p = d\bar{a}/dt,$$

где \bar{a} – концентрация реагирующей смеси.

Изменение концентрации реагирующей смеси во время реакции подчиняется следующему закону:

$$da/dt = -K \cdot a \quad (3.48)$$

Решение этого дифференциального уравнения при $t = t_{x.p.}$ хорошо известно:

$$t_{x.p.} = \frac{\ln \bar{a}_0 - \ln \bar{a}}{K} = \frac{\ln(\bar{a}_0/\bar{a})}{K}, \quad (3.49)$$

где \bar{a}_0/\bar{a} – глубина (полнота) реакции окисления МВС.

Следующее допущение заключается в том, что полнота реакции окисления метана при детонации МВС достигает величины, при которой $\ln(\bar{a}_0/\bar{a}) \geq 1$, а время ее детонации – t_D равно:

$$t_D = d/D_{MBC}, \quad (3.50)$$

где d – критический диаметр детонации, характеризующий ширину ячейки в зоне

реакции за фронтом детонационной волны;

D_{MBC} – скорость детонационной волны в MBC.

Тогда, приравнявая два последних уравнения

$$\ln(\bar{a}_0/\bar{a})/K = d/D_{MBC}$$

и учитывая, что $\ln(\bar{a}_0/\bar{a}) \approx 1$, получим:

$$d = D/K. \quad (3.51)$$

Предположим, что реакция $\dot{H} + O_2 \Leftrightarrow \dot{O} + OH$ является основной в процессе окисления метана при детонации MBC. Для этой реакции известна константа скорости прямой реакции при температуре 700...900°K, отнесенная к одному молю реагирующей смеси: $K = 2,0 \cdot 10^{10}$ см³/моль·с [203]. Тогда для сферического взрыва MBC ($D = 1720$ м/с) может быть определен критический размер $d = R_y - r_{ПВ}$, характеризующий развитие реакции в объеме, занимаемом MBC (1 моль):

$$d = \frac{D}{K} = \frac{172000 \cdot 22400}{2 \cdot 10^{10}} = 1,926 \cdot 10^{-3}, \text{ м.}$$

Критический объем MBC, охваченный реакцией при её детонации, равен:

$$V_{кр} = 1,3333\pi d^3 = 2,993 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3.$$

Допустим, что попадания одного радикала атомарного водорода в критический объем MBC будет вполне достаточно для инициирования в нем реакции окисления метана. Исходя из этого, определим критическую концентрацию атомарного водорода (количество атомов на единицу массы) в реагирующей смеси с плотностью $\rho_{MBC} = 1,2$ кг/м³:

$$n[H]_{кр} = \frac{[H]}{V_{кр} \cdot \rho_{MBC}} = \frac{1}{2,993 \cdot 10^{-8} \cdot 1,2} = 27842744, \text{ атом/кг.}$$

Количество атомов водорода в продуктах взрыва 1 кг ПВВ [H] определяем по уравнению (3.40). Условие воспламенения MBC определяется критическим отношением (3.46). Если оно не меньше 1, то воспламенение происходит за счет достаточности количества активных центров в продуктах взрыва для их диффузии и воспламенения MBC по цепному механизму, если меньше, то воспламенение не происхо-

дит. Вершиной теории, описывающей предлагаемый механизм воспламенения, является возможность расчета максимального (предельного) заряда ВВ, определяющего уровень его предохранительных свойств в МВС.

Примем во внимание, что критическим условием является равенство $n[H]_{кр} = [H]_{ВВ}$, а также то, что единица массы МВС занимает объем в 1000 раз больший, чем единица массы ВВ. В этих условиях можно рассматривать взрыв заряда ВВ как взрыв в неограниченной среде и критическую массу заряда ВВ, которая определяет уровень его предохранительных свойств, можно найти по формуле:

$$m_{ВВ_{крит}} = M_{кр} = \frac{n[H]_{кр}}{\beta_R [H]_{ВВ}} = \frac{27842744}{\beta_R [H]_{ВВ}}, \text{ кг}, \quad (3.52)$$

где β_R – коэффициент, учитывающий, какое количество атомов водорода диффундирует в критический объем МВС.

Результаты расчета предельного заряда ВВ приведены в табл. 3.10. Значение константы равновесия для реакции (3.37) взяты из [204]. Количественное описание механизма воспламенения МВС продуктами взрыва ПВВ II, IV, V и VI классов показывает следующее. Предохранительные ПВВ, температура продуктов взрыва которых более 1609°K (аммониты № 6ЖВ, ПЖВ-20, угленит Э-6, алтанит ба), имеют расчетную критическую массу при взрыве свободно подвешенного открытого заряда ВВ в МВС, очень близкую по величине к экспериментальному предельному заряду, определенному в опытном штреке МакНИИ при испытании этих ВВ.

Вместе с тем, для ПВВ, у которых температура продуктов взрыва не более 1500°K (углениты Н-12, 12ЦБ, 3М), расчетные величины критического заряда превышают экспериментальные значения предельных зарядов этих ПВВ в опытном штреке. Значит, для таких зарядов необходимо учитывать дополнительный источник активных центров, например, источник от действия ударной волны. В этом случае коэффициент β_R в уравнении (3.52) должен быть больше 1. Это может быть только в том случае, если дополнительное количество активных центров попадает в МВС в результате действия на нее ударной волны. Температура и давление МВС в ударной волне зависят от массы взрываемого заряда ВВ и его энергии взрыва. По-

Таблица 3.10

Критическая масса зарядов ВВ, вызывающая воспламенение МВС продуктами взрыва

ВВ	Температура про- дуктов взрыва ВВ, $T, ^\circ\text{K}$	Коли- чество водорода в ПВ 1 кг ВВ, моль/кг	Константа равновесия реакции, К	Количество атомов во- дорода в ПВ 1 кг ВВ, атом/кг	Расчетный пределный заряд ВВ в МВС, $M_{пр}$, кг ($\beta_R = 1$)	Экспериментальный предельный за- ряд ВВ в МВС, $M_{пр}$, кг		
						открытый заряд	заряд в уголковой мортире	заряд в ка- нальной мортире
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Аммонит № 6ЖВ	2316	0,804	$1,181 \cdot 10^{-4}$	$5,35 \cdot 10^9$	$5,2 \cdot 10^{-3}$	$< 5 \cdot 10^{-3}$	-	0,010
Аммонит ПЖВ-20	2150	0,937	$2,053 \cdot 10^{-5}$	$2,406 \cdot 10^9$	$11,6 \cdot 10^{-3}$	$< 15 \cdot 10^{-3}$	$\sim 10 \cdot 10^{-3}$	0,100
Угленит Э-6	1815	0,233	$2,013 \cdot 10^{-7}$	$1,186 \cdot 10^8$	0,235	0,250	0,150	1,000
Алтанит ба	1627	0,096	$7,945 \cdot 10^{-9}$	$1,5153 \cdot 10^7$	1,837	$\sim 1,500$	0,400	$> 1,000$
Угленит Н-12	1511	0,115	$5,952 \cdot 10^{-10}$	4538052	6,135	2,000	0,600	$> 1,100$
Угленит 3М	1463	0,094	$2,020 \cdot 10^{-10}$	2390941	11,645	2,000	0,600	$> 1,100$
Угленит 12ЦБ	1352	0,107	$1,232 \cdot 10^{-11}$	629844	44,206	$> 2,500$	0,800	$> 1,500$
Угленит 13К	1639	0,1183	$1,0175 \cdot 10^{-8}$	19034558	1,46	0,600	0,400	1,000
Угленит 13/2	1701	0,137	$2,151 \cdot 10^{-8}$	29782677	0,935	0,60	0,300	1,000
Угленит 12/10	1628	0,1603	$8,131 \cdot 10^{-9}$	19810439	1,4	0,400	0,300	1,000
Угленит 13П	1805	0,1893	$1,518 \cdot 10^{-7}$	93002457	0,299	0,200	0,110	1,000

этому ВВ могут вызывать воспламенение МВС, воздействуя на неё образовавшейся при взрыве ударной волной. Этот эффект наблюдается при испытании ВВ в уголковой мортире. При этом предельные заряды ВВ существенно уменьшаются. Это связано с более мощным действием ударной волны на МВС. Вместе с тем оказалось, что при испытании заряда ПВВ в канальной мортире при обратном способе инициирования предельная масса заряда этих ВВ возрастает. Следовательно, в МВС попадает меньшее количество радикалов \dot{H} вследствие рекомбинации их как на поверхности канала металлической мортиры, так и на поверхности кристаллов ингибиторов, которые содержатся в продуктах взрыва ПВВ. Таким образом, значение коэффициента β_R может быть как большим, так и меньшим 1 и определяется условиями взрывания заряда ВВ и наличием в их составе кристаллов ингибиторов окисления метана кислородом воздуха. Поэтому был проведен корреляционный анализ влияния параметров ПВВ на уровень их предохранительных свойств при испытании ВВ в опытном штреке. Учитывая нелинейный характер зависимости массы предельного заряда от параметров ВВ, ее анализ был произведен в сетке графика $\ln Y = \varphi(\ln X)$.

Результаты исследований ПВВ и их корреляционного анализа сведены в табл. 3.11 и 3.12. В них приведены значения предельной массы M_{np} и массы зарядов m_{50} , вызывающих 50% воспламенений МВС при испытании ПВВ в опытном штреке. Величины этих зарядов сопоставимы с расчетными значениями критической массы заряда ПВВ, необходимого для инициирования химической реакции окисления метана по предложенному механизму воспламенения МВС при $\beta_R = 1$. Сравнительный анализ результатов испытаний ПВВ в опытном штреке и расчетной критической массы ПВВ, необходимой для воспламенения МВС, показал следующее. Полученные результаты не противоречат ни одному из известных экспериментальных фактов влияния параметров ПВВ на уровень их предохранительных свойств. Более того, теория объясняет влияние различных факторов на предохранительных свойства ПВВ при взрывании их в уголковой и канальной мортирах, а также подтверждает сильное влияние ударной волны на механизм воспламенения МВС (в уравнении (3.52) при $\beta_R > 1$) и пламегасящее действие солей-ингибиторов на цепной механизм воспламенения МВС продуктами взрыва ВВ (при $\beta_R < 1$ в том же уравнении).

Таблица 3.11

Значение параметров ПВВ и величина их предельного заряда в опытном штрехе

ПВВ	Удельная теплота взрыва W_v, Q_v кДж/кг	Удельный объем газов, N_g моль/кг	Температура продуктов взрыва $W_v, T, ^\circ K$	Удельное содержание ингибитора в составе $W_v, \varepsilon, \text{кг/кг}$	Скорость детонации $W_v, D, \text{м/с}$	Предохранительные свойства ПВВ в опытном штрехе			Исследуемые параметры			
						открытый заряд	уголковая мортира	канальная мортира, обратное инициирование	$m_{50} \cdot 10^{-3}, \text{кг}$	$M_{пр} \cdot 10^{-3}, \text{кг}$	$\frac{Q_v, \text{кДж}}{N_g, \text{моль}}$	$\frac{Q_v, \text{кДж}}{\varepsilon, \text{кг}}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Аммонит № 6ЖВ	3830,2	40,726	2316	0,0	4204	~5	<5	20	94,05	0,0	0,0	0,0
Аммонит ПЖВ-20	2762,8	32,966	2150	0,2	3980	25	20	100	83,807	13814,0	10750	79202,0
Угленит Э-6	2357,1	24,94	1815	0,39	2224	440	200	1000	94,51	6043,8	4653,8	12682,5
Угленит Н-12	2053,2	26,688	1511	0,263	1911	~2000	890	>1100	76,933	7806,8	5745,2	13885,6
Угленит 3М	2009,3	26,623	1463	0,301	2008	~2000	1000	>1100	75,472	6675,4	4860,5	13395,5
Угленит 12ЦБ	1686,9	24,94	1352	0,288	1927	~2500	1200	>1500	67,64	5857,3	4694,4	12893,5
Алтанит ба	2329,9	26,08	1627	0,336	2100	~1500	650	>1000	89,34	6934,2	4842,3	13125,0
Угленит 13/2	2302,8	26,021	1701	0,337	2100	~1000	600	1000	88,49	6833,2	5047,5	13086,0
Угленит 13К	2291,4	26,183	1639	0,334	2100	1000	600	1000	87,51	6860,5	4907,2	13203,6
Угленит 12/10	2296,5	28,478	1628	0,3214	2075	600	406	1000	80,64	7145,3	5065,3	13396,4
Угленит 13П	2592,4	29,801	1801	0,290	2400	300	800	1000	86,99	8939,3	6210,3	19862,1

Таблица 3.12

Результаты корреляционного анализа влияния параметров ПВВ на его предельный заряд

Параметры ПВВ	Значения коэффициента корреляции /r/ в зависимости от условий взрывания			
	открытый заряд, m_{50} , Г	уголковая мортира, m_{50} , Г	канальная мортира, обратное инициирование, M_{np} , Г	расчетное значение M_{np} , Г
1	2	3	4	5
Теплота взрыва Q_v , кДж/кг	-0,899	-0,912	-0,928	-0,9960
Температура продуктов взрыва, T , °К	-0,945	-0,977	-0,974	-0,9999
Скорость детонации, D , м/с	-0,933	-0,936	-0,977	-0,636
$\frac{Q_v}{N_2}$, кДж/моль	-0,777	-0,78	-0,59	-0,995
$\frac{Q_v}{\varepsilon}$, кДж/кг	-0,57	-0,606	-0,90	-0,782
$\frac{T}{\varepsilon}$, °К/кг	-0,522	-0,567	-0,88	-0,470
$\frac{D^2}{\varepsilon}$, Дж/кг	-0,56	-0,605	-0,89	-0,221

3.4. Исследование действия горящих частиц ПВВ как источника воспламенения взрывоопасной среды

В работах [205, 206, 207] Ж. Бигур и Ж. Кокю (Франция), Ф.М. Галаджий и В.Н. Бондаренко (СССР) и В.И. Зенин и Ю.В. Манжос (Украина) установили, что выгорающие заряды могут вызывать воспламенение взрывоопасной среды в забое горной выработки. Поэтому опасность выгорающего заряда ПВВ, как источника воспламенения в отношении МВС, сомнений не вызывает. Однако можно добиться у ПВВ такой поджигаемости, чтобы выгорание заряда было невозможным, даже если произойдет нарушение его детонации. В этом случае за счет низкой поджигаемости ПВВ будут исключены возможность его выгорания в шпуре и опасность воспламенения МВС, и ПВВ автоматически будут иметь уровень антигризутности, обеспечивающий им безопасное применение при взрывных работах в шахтах, опасных по газу и пыли.

Иначе обстоит дело в том случае, когда при детонации заряда ВВ или во время передачи детонации от одного патрона к другому образуются горящие частицы ВВ, которые увлекаются быстро расширяющимися газообразными продуктами детонации и выбрасываются из шпура. Чтобы выяснить, возможно ли воспламенение МВС горящими частицами ВВ, К. Бейлингом были проведены специальные исследования в опытном штреке [34]. На основании проведенных экспериментов он делает заключение, что если МВС находится непосредственно перед шпуром, то дефлагрирующие (горящие) частицы ПВВ могут вызвать ее воспламенение. Поэтому при взрывных работах решающую роль в качестве источника воспламенения МВС К. Бейлинг отводит не ударным волнам и нагретым до высокой температуры газообразным продуктам взрыва ПВВ, а его горящим частицам, вылетающим из шпура. К.К. Андреев в работе [37] показывает, что частицы различных горящих ВВ способны вызывать воспламенение МВС, в условиях экспериментов их можно отождествить с выгорающими зарядами ВВ. Однако быстро летящие частицы не всегда представляют опасность для МВС, особенно если их действие сопровождается интенсивным расширением газообразных продуктов взрыва ВВ. Эти продукты образуют облако,

размеры которого зависят от величины взрываемого заряда. В начале взрыва газы имеют высокую температуру, но вследствие быстрого расширения охлаждаются до низкой, менее опасной в отношении метана температуры. Более того, газовое облако может защитить МВС от попадания горящих частиц, так как они там успевают сгореть. Таким образом, факт опасности для МВС быстролетающих горящих частиц ВВ во время взрыва его заряда до настоящего времени в полной мере не установлен. Поэтому исследование этого вопроса вызывает интерес, так как без учета действия на МВС горящих частиц ВВ нельзя обосновать антигризутность зарядов ПВВ при взрывных работах в угольных шахтах.

Учитывая вышеизложенное, рассмотрим условия взаимодействия быстро летящих горящих частиц ВВ с окружающей его заряд МВС [208]. Примем во внимание, что для летящей горячей частицы ВВ время ее существования – τ_z определяется радиусом частицы – r_q и скоростью горения – u_z :

$$\tau_z = r_q / u_z, \quad (3.53)$$

а время полета – τ_n зависит от длины пройденного пути – l_q и скорости полета в газовой среде – U_q :

$$\tau_n = l_q / U_q. \quad (3.54)$$

Приравняв эти два равенства, получим максимальный путь, который частица пролетит за время своего горения:

$$l_q = r_q (U_q / u_z). \quad (3.55)$$

Из полученного уравнения следует критическое условие, которое будет определять возможность попадания в МВС горящих частиц. Оно таково: если путь, пройденный летящей горячей частицей, больше радиуса сферы – $R_{ПВ}$ расширившихся до предельного значения газообразных продуктов взрыва ВВ ($l_q \geq R_{ПВ}$), то частицы на границе этой зоны контактируют с МВС. Найдем максимальный радиус расширения газообразных продуктов взрыва заряда ВВ и путь, пройденный быстро летящими частицами за время их горения. Определим максимальный радиус сферы, заполненной газами взрыва, через удельный объем продуктов взрыва ВВ. Установить размеры частичек ВВ ситовым анализом достаточно легко, а величины скоро-

стей полета и горения – значительно труднее. В настоящее время отсутствуют надежные экспериментальные данные по скорости полета горящих частиц ВВ. Однако имеется большое число экспериментальных данных по скорости осколков оболочки заряда ВВ, на базе которых Ф.А. Баум и К.П. Станюкович получили зависимость скорости готовых заранее осколков, метаемых газообразными продуктами взрыва, от параметров заряда ВВ. Решение этих задач дано в монографии [187] и одним из них можно воспользоваться. Положим, что и частицы ВВ, разбрасываемые продуктами его детонации, схожи с осколками. Тогда предельная скорость частиц (осколков) будет равна:

$$U_{\text{ч}} = \frac{D}{2} \sqrt{\frac{15\beta_{\text{ч}}}{8(5+3\beta_{\text{ч}})} \left[1 - \left(\frac{r_3}{R_{\text{ПВ}}} \right)^8 \right]}, \quad (3.56)$$

где $\beta_{\text{ч}} = m_{\text{ВВ}}/M_{\text{ч}}$, а $M_{\text{ч}}$ – это масса метаемых частиц (осколков).

Для решения уравнения (3.56) вводим понятие активной массы ВВ в заряде – $m_{\text{а}}$, то есть масса ВВ, прореагировавшего во фронте детонационной волны. Масса частиц ВВ, которые не прореагировали при детонации, будет равна $M_{\text{ч}} = m_{\text{ВВ}} - m_{\text{а}}$. Тогда $\beta_{\text{ч}} = m_{\text{а}}/m_{\text{ВВ}}$. Причем основная масса разбрасываемых частиц ВВ будет сосредоточена в поверхностном «слое Харитона» ВВ – h , который, согласно принципу Ю.Б. Харитона, разбрасывается волной разряжения при детонации заряда [209]. В этом случае отношение $\frac{m_{\text{ВВ}}}{m_{\text{а}}} = \frac{d_3^2}{d_3^2 - h^2}$, где d_3 – диаметр заряда ВВ.

Относительно скорости горения быстро летящих частиц ВВ необходимо признать, что отсутствуют прямые экспериментальные данные ее определения, но ее значение можно оценить приблизительно. В работах А.П. Глазковой и Л.В. Дубнова с сотрудниками [210, 211] исследованы скорости горения зарядов промышленных ВВ. Однако эти исследования сделаны для неподвижных зарядов, находящихся в манометрической бомбе постоянного давления. Соответственно скорость горения ВВ в этих условиях не будет соответствовать скорости горения частиц ВВ, летящих с большой скоростью. На такое различие указывает теория горения пороха и приложение ее к реактивным снарядам [212]. Эффект увеличения скорости горения поро-

ха при больших скоростях его обдувания газообразными продуктами горения на выходе у сопла реактивного двигателя объясняет теория раздувания [213]. Согласно этой теории, зависимость скорости горения пороха от движения пороховых газов можно корректировать с помощью коэффициента – χ , дающего поправку на увеличение скорости горения пороха – $\varphi(x)$:

$$\varphi(x) = 1 + 2,5 \cdot 10^{-5} \chi^2, \quad (3.57)$$

где $\chi = \frac{W_n \rho_z}{I_z \rho_{пор}}$;

W_n – скорость потока газа;

$\rho_z, \rho_{пор}$ – плотность газа и пороха соответственно;

I_z – линейная скорость горения пороха.

Поскольку пороха представляют собой те же энергетические системы, что и ВВ, попытаемся использовать их теорию горения для описания процесса горения быстро летящих частиц ВВ. В этом случае уравнение (3.55) примет следующий вид:

$$l_q = \frac{r_q D \sqrt{\frac{15\beta_q}{8(5+3\beta_q)} \left[1 - \left(\frac{r_3}{R_{ПВ}} \right)^8 \right]}}{2I_z \varphi(\chi)}. \quad (3.58)$$

Итак, для угленита Э-6 и аммонита ПЖВ-20 имеются практически все данные: ситовой анализ, линейная скорость горения ВВ [210], скорость детонации ВВ, критический диаметр детонации и диаметр, в котором ВВ при взрыве отказывает. Эти данные позволяют по уравнениям (3.53) – (3.58) определить дальность полета горящих частиц ВВ и оценить возможность их воздействия на МВС. При исследованиях открытые заряды угленита Э-6 ($m_{ВВ} = 200$ г) и аммонита ПЖВ-20 ($m_{ВВ} = 300$ г) были взорваны в темноте, и разлет газообразных продуктов взрыва и траектории горящих частиц ВВ были зафиксированы на светочувствительную пленку. Снимки этих взрывов представлены на рис. 3.4 и 3.5. Исходные данные для расчета дальности разлета горящих частиц сведены в табл. 3.13, а результаты расчета по определению скорости горящих частиц ВВ, размера частиц на основе ситового анализа компонентов угленита и аммонита и дальности разлета горящих частиц ВВ – в табл. 3.14.

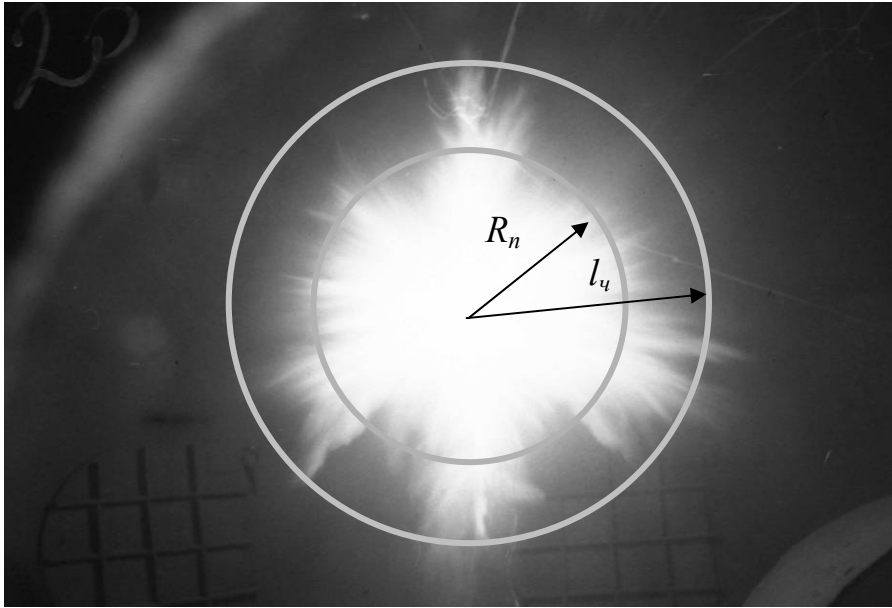


Рис. 3.4. Разлет горящих частиц газообразных продуктов взрыва аммонита ПЖВ-20

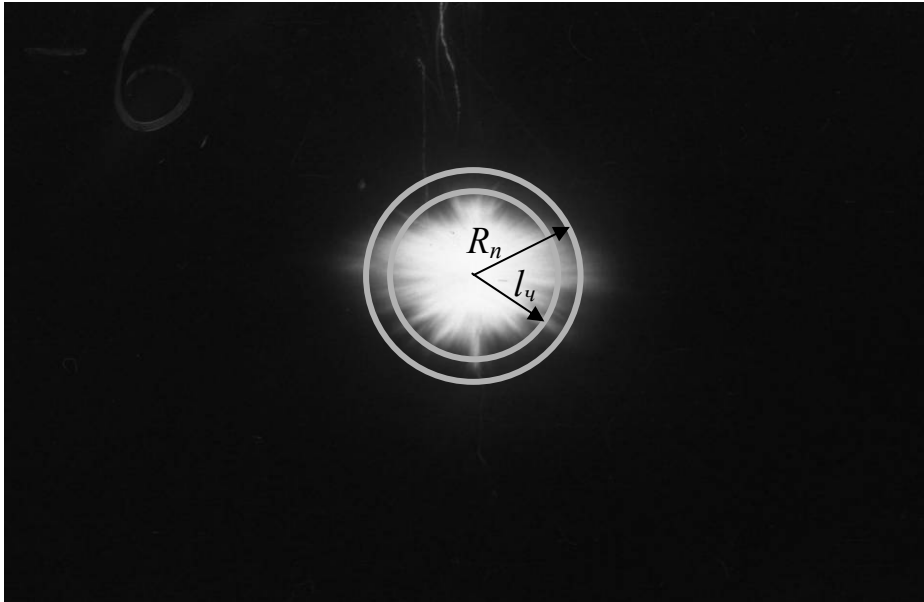


Рис. 3.5. Разлет горящих частиц газообразных продуктов взрыва углянита Э-6

Таблица 3.13

Показатели аммонита ПЖВ-20 и угленита Э-6 для расчета дальности разлета горящих частиц

ВВ	Плотность ВВ, $\rho_{ВВ}$, кг/м ³	Скорость детонации, D , м/с	Диаметр заряда, мм		Критический слой ВВ, h , мм	Скорость горения ВВ, I_2 , см/с	Диаметр заряда, d_3 , мм	Удельный объем газов взрыва, V_2 , м ³ /кг	Масса заряда ВВ, $m_{ВВ}$, кг
			критический, $d_{кр}$	отказа, d_0					
ПЖВ-20	1100	4000	10,0	9,0	4,75	0,312	36,0	0,717	0,3
Э-6	1200	2220	8,0	6,0	3,5	0,0891	36,0	0,560	0,2

Таблица 3.14

Результаты расчета скорости, размера и дальности разлета горящих частиц

ВВ	Радиус сферы ПВ, $R_{ПВ}$, м	Ситовой анализ активных компонентов ВВ: остаток на сите, %			Предельная скорость частиц, $U_ч$, м/с	Средний радиус частиц, $r_ч$, мкр	Поправка на скорость горения, $\varphi(\chi)$	$l_ч$, м	$\frac{l_ч}{R_{ПВ}}$
		№ 15	№ 29	№ 49					
ПЖВ-20	0,372	~ 10,0	63,5	20,0	1271,9	~ 65,0	58,4	0,454	1,22
Э-6	0,299	0,75	46,0	50,0	764,7	~ 50,0	183,1	0,235	0,786

Сделаем сравнение полученных расчетных расстояний разлета горящих частиц с экспериментальными. Для аммонита ПЖВ-20 дальность полета горящих частиц превышает максимальный радиус сферы продуктов взрыва, а для угленита Э-6 – наоборот, $l_q < R_{ПВ}$. Обратимся к эксперименту. На рис. 3.4 видно, что отдельные частицы ПЖВ-20 при взрыве преодолевают за время горения расстояние $l_q \approx 0,49...0,515$ м. Горящие частицы угленита Э-6 преодолевают расстояние $l_q \approx 0,238...0,265$ м (рис. 3.5), то есть опытные данные совпадают с расчетными, и, несмотря на ряд допущений, сходимость вполне удовлетворительная. Это позволяет сделать вывод, что горящие частицы аммонита ПЖВ-20 преодолевают большее расстояние, чем радиус сферы облака газов при взрыве ВВ и могут контактировать с МВС, окружающей заряд. Горящие частицы угленита Э-6 успевают сгореть внутри сферы газов взрыва ВВ и не контактируют с МВС.

В опытном штреке при испытании в 9,5% МВС заряд угленита Э-6 массой 0,2 кг не вызвал ее воспламенение, а заряд аммонита ПЖВ-20 «безотказно» воспламенял метан. Таким образом, напрашивается вывод о том, что при взрыве открытых зарядов горящие частицы, разбрасываемые при детонации ПВВ, могут оказывать отрицательное влияние на антигризутность заряда. Однако, делая такой вывод, мы исключаем действие на МВС образованной при взрыве заряда ударной волны. Делать же этого нельзя, так как ее скорость превышает не только скорость движения горящих частиц, но и скорость расширения газообразных продуктов взрыва ВВ. Исследования, проведенные в разделе 3.2, показали, что при взрыве заряда аммонита ПЖВ-20 массой 0,3 кг параметры ударной волны вплоть до расстояния 0,58 м от поверхности заряда ВВ еще достаточны для воспламенения МВС (см. табл. 3.7). Это указывает на то, что ударная волна имеет параметры, способные вызвать воспламенение МВС на гораздо большем расстоянии, чем горящие частицы ВВ. Вместе с тем, нельзя и не опасаться горящих частиц ВВ и возможности их влияния на антигризутность зарядов, взрываемых в открытом виде и в канале mortarы или шпура. Так, принимая во внимание критическое условие, которое определяет возможность взаимодействия горячей частицы с МВС, окружавшей заряд, то есть $l_q = R_{ПВ}$, можно установить размер частиц ВВ, при котором это условие начинает выполняться:

$$r_c = \frac{2R_{ПВ} I_z \varphi(\chi)}{D \sqrt{\frac{15\beta_q}{8(5+3\beta_q)} \left[1 - \left(\frac{r_3}{R_{ПВ}} \right)^8 \right]}}. \quad (3.59)$$

Особенно актуальным становится влияние горящих частиц на безопасность для условий взрывания зарядов ПВВ в канальной мортире без забойки или в шпуре. Именно для этих условий К. Бейлинг рассматривает горящие частицы ВВ как основной фактор, определяющий возможность воспламенения МВС. Условия взрывания зарядов ПВВ в канальной мортире имеют ряд существенных отличий от условий взрывания открытых зарядов. Эти отличия заключаются в том, что при взрывании в канальной мортире сильное влияние на условия воспламенения МВС оказывают продукты взрыва ВВ, а роль ударной волны в этом процессе второстепенна из-за большого критического радиуса детонации МВС. Поэтому может оказаться так, что при определенном дисперсном составе ВВ его горящие частицы могут достигать тех расстояний, при которых газообразные продукты взрыва ВВ и ударная волна будут иметь параметры, не достаточные для воспламенения МВС. При этом горящие частицы еще будут способны вызывать воспламенение метана. Этот случай исследован с учетом влияния дисперсности компонентов ПВВ на дальность полета частиц и антигризутность его заряда.

Впервые на второстепенную роль ударной волны в процессе воспламенения МВС без участия других факторов при взрыве заряда ВВ в канальной мортире указали Ф.М. Галаджий и Б.И. Вайнштейн [214]. В МакНИИ в опытной штольне с МВС они взрывали заряды аммонита ПЖВ-20 массой 0,9 кг в канальной мортире. Причем воспроизвели такие условия, при которых ударная волна с параметрами, достаточными для воспламенения МВС, ее не воспламеняла. В работе [215] было дано объяснение этому факту с учетом возможного срыва реакции окисления метана в детонационной волне при ее переходе из прочной «оболочки» канала мортиры в свободный объем МВС. Для объяснения опасности действия горящих частиц ВВ на МВС при взрыве заряда ПВВ в канальной мортире необходимо установить критические параметры ударных волн, продуктов взрыва ВВ и дальности полета частиц. Для этого проанализируем результаты работ [216, 217], в которых приведены ноч-

ные съемки свечения продуктов детонации ВВ при истечении из канала mortarы. Они позволили установить схему истечения продуктов взрыва из канала и объем газовой среды с продуктами взрыва ВВ. Схема истечения продуктов взрыва и действие ударных волн на МВС при взрыве заряда ВВ в канале mortarы дана на рис. 3.6, снимок свечения продуктов детонации ВВ в темноте при их истечении из канала – на рис. 3.7.

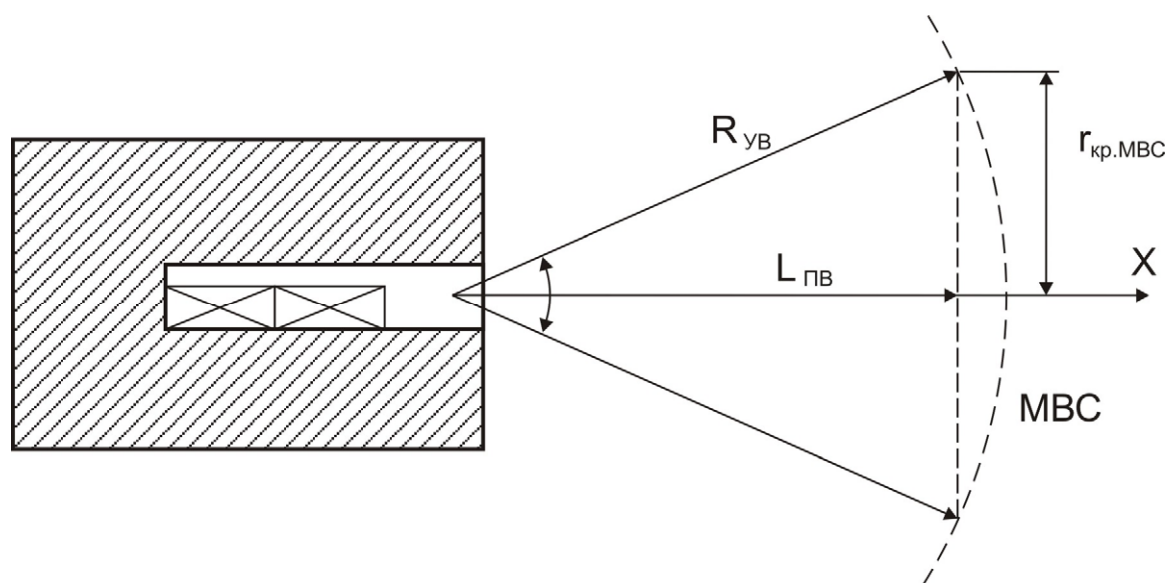


Рис. 3.6. Действие горящих частиц ВВ на МВС при взрыве заряда в канале mortarы:
 $R_{УВ}$ – радиус области действия УВ при взрыве заряда ПВВ;
 $L_{ПВ}$ – радиус области расширения ПВ и движения горящих частиц ВВ;
 $r_{кр.МВС}$ – критический радиус детонации МВС

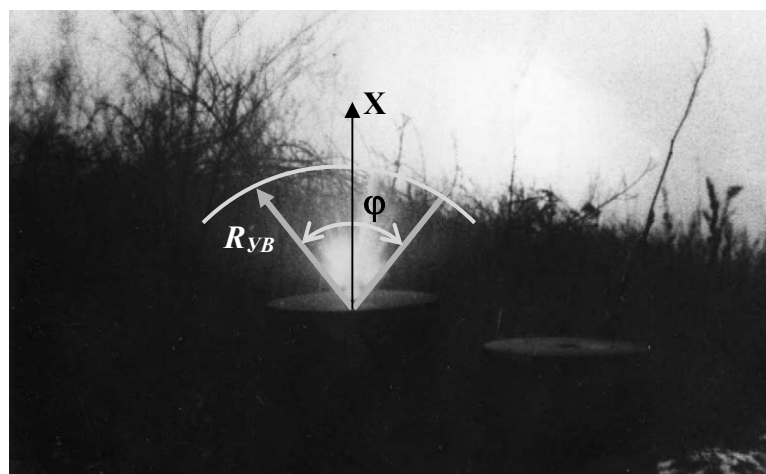


Рис. 3.7. Разлет продуктов взрыва ВВ из канальной mortarы

При ночной съемке взрывов заряда ВВ в канальной мортире определили, что угол раствора, под которым происходит истечение продуктов детонации ПВВ из канала – φ , не зависит от типа ВВ и для зарядов массой 0,3...1,0 кг равен примерно 60^0 . Критический радиус детонации МВС в трубах с прочной оболочкой составляет 2...3 мм, а для сферической детонации в неограниченном объеме 0,65 м. Анализируя полученные результаты, установили следующее. При взрыве заряда ПВВ в канале мортиры детонация МВС возникает потому, что значения параметров ударной волны в канале очень большие, а его радиус гораздо больше критического. На выходе из канала контакт детонационной волны МВС с прочными стенками мортиры пропадает, и она переходит в большой объем смеси, находящейся в опытном штреке. За детонационной волной с высокой скоростью движутся продукты реакции МВС и взрыва ПВВ. Детонационная волна МВС в результате срыва химической реакции за ее фронтом, вследствие действия волн разгрузки на зону реакции, вырождается в ударную волну. Эта волна поддерживается расширяющимися продуктами взрыва ПВВ и охватывает объем МВС в виде шарового сектора радиусом R_{VB} .

Рассмотрим в шаровом секторе движение продуктов взрыва и ударной волны вдоль оси ОХ, совпадающей с осью канала мортиры. Пока радиус действия ударной волны будет меньше критического радиуса детонации МВС, $R_{VB} < r_{крМВС}$, реакция окисления метана в смеси может быть инициирована только продуктами взрыва ВВ, а не ударной волной. Когда же радиус шарового сектора достигнет значения $r_{крМВС}$, $R_{VB} = r_{крМВС}$, тогда появляется возможность детонации МВС от ударной волны, а не от продуктов взрыва ВВ. Зная угол шарового сектора ($\varphi \approx 60^0$), формулу для нахождения его объема, критический радиус сферической детонации МВС ($r_{крМВС} = 0,65$ м), можно определить критический радиус – \bar{R}_{VB} действия ударной волны, образованной при взрыве заряда ВВ в канале мортиры, и максимальный радиус области расширения газообразных продуктов взрыва и движения горящих частиц ВВ – $\bar{L}_{ПВ}$:

$$\left. \begin{aligned} \bar{R}_{VB} &= \frac{r_{крМВС}}{\sin 30^0} = 1,3, \text{ м} \\ \bar{L}_{ПВ} &= 1,528(m_{ВВ}V_z)^{0,333}, \text{ м} \end{aligned} \right\}, \quad (3.60)$$

где V_2 – удельный объем газов взрыва, м³/кг.

Полученная система определяет условия, когда быстро летящие горящие частицы ПВВ, преодолевая расстояние l_q , могут взаимодействовать с МВС. Если $l_q > \bar{R}_{УВ} > \bar{L}_{ПВ}$, то горящая частица взаимодействует с МВС, которая не подвержена воспламеняющему действию ударной волны или газообразных продуктов взрыва ВВ. Определим параметры горящих частиц ВВ, необходимые для воспламенения МВС, в зависимости от их скорости, дальности полета и дисперсности.

Исследования, аналогичные исследованиям Ф.М. Гельфанда [218] и В.И. Зенина с В.М. Расторгуевым [219], были проведены в опытном штреке при взрывании аммонита ПЖВ-20 в канальной мортире с обратным инициированием заряда. При этом способе скорость истечения продуктов детонации в газовую среду будет несколько больше скорости детонации:

$$W = \frac{3n-1}{n^2-1} D = \frac{(3 \cdot 2,24 - 1)4000}{4,0176} \approx 5695 \text{ (м/с)}.$$

Определим для этих условий начальную скорость полета частиц ВВ. Будем считать, что отношение $U_q \setminus W$ между начальной скоростью и скоростью истечения продуктов детонации ВВ в воздух будет одинаковым для условий взрывания свободно подвешенного заряда и заряда ВВ в канале мортиры. Тогда для открытого заряда (свободно подвешенный) ПЖВ-20 $U_q \setminus W = 0,318$, следовательно, начальная скорость полета частиц ВВ из канала мортиры равна $U_q \approx 0,318 \cdot 5695 = 1811$ (м/с). Используя данные ситового анализа аммонита ПЖВ-20 (см. табл. 3.14) и расчетные величины χ и $\varphi(\chi)$, получим дальность полета горящих частиц этого ВВ из канала мортиры:

$$l_q = \frac{r_q U_q}{I_2 \varphi(\chi)} = \frac{65 \cdot 10^{-6} \cdot 1811}{3,12 \cdot 10^{-3} \cdot 60,4} \approx 0,625 \text{ м}.$$

Получается, что дальность полета горящих частиц ВВ значительно меньше и $R_{УВ}$, и $L_{ПВ}$, таким образом, горящие частицы не могут попасть в МВС и, следовательно, ее воспламенить. Этот вывод проверили для предельного заряда ПЖВ-20, полученного при взрывании без забойки. Для ПЖВ-20 при обратном инициирова-

нии в канальной мортире $M_{np} \approx 0,1$ кг, $L_{ПВ} = 0,63$ м, $l_q = 0,62$ м, то есть и в этом случае горящие частицы не влияют на МВС ($l_q < L_{ПВ}$). Однако возможность воспламенения МВС горящими частицами ВВ доказана экспериментально [219]. Все дело в том, что аммонитные ПВВ подвержены процессам слеживания и спекания. В результате этих процессов происходит укрупнение частиц ВВ и пропадает рассыпчатость состава, они также приводят к резкому снижению детонационной способности ВВ. Поэтому если в шпуровом заряде есть хоть один слежавшийся патрон аммонита, то при взрыве заряда из шпура в газовую среду могут попасть горящие частицы спекшегося ВВ.

Уравнение (3.59) позволяет оценить радиус частиц ВВ, которые при взрыве могут попасть в МВС и в случае своего горения воспламенить ее. Так, для аммонита ПЖВ-20 массой шпурового заряда 0,9 кг критический радиус горящих частиц, обеспечивающий им попадание в МВС, составит:

$$r_q \geq \frac{L_{ПВ} I_c \varphi(\chi)}{U_q} = \frac{1,32 \cdot 3,12 \cdot 10^{-3} \cdot 60,4}{1811} = 1,374 \cdot 10^{-4} \text{ (м)}.$$

Расчет показывает, что горящие частицы аммонита с размером частиц 280 мкм и более представляют опасность для МВС и могут оказывать влияние на антигризутность заряда ПВВ.

3.5. Исследование влияния инертных солей в составе ПВВ на его предохранительные свойства в МВС

Е. Одибер исследовал воспламенение МВС по механизму ее смешения с высокотемпературными продуктами взрыва ПВВ [220]. Результаты испытаний ПВВ в МВС, проведенные Е. Одибером, показаны на рис. 3.8. На оси абсцисс от начала координат вправо отложены значения nf – избыточного количества кислорода в продуктах взрыва (расчетное), влево – значения z_f – содержания оксида углерода в продуктах взрыва (расчетное), по оси ординат – значения qf – количества теплоты взрыва ВВ, приходящегося на одну молекулу газообразных продуктов взрыва ВВ. Прямые MN и NP отделяют составы ПВВ, вызвавшие воспламенение МВС, от тех сос-

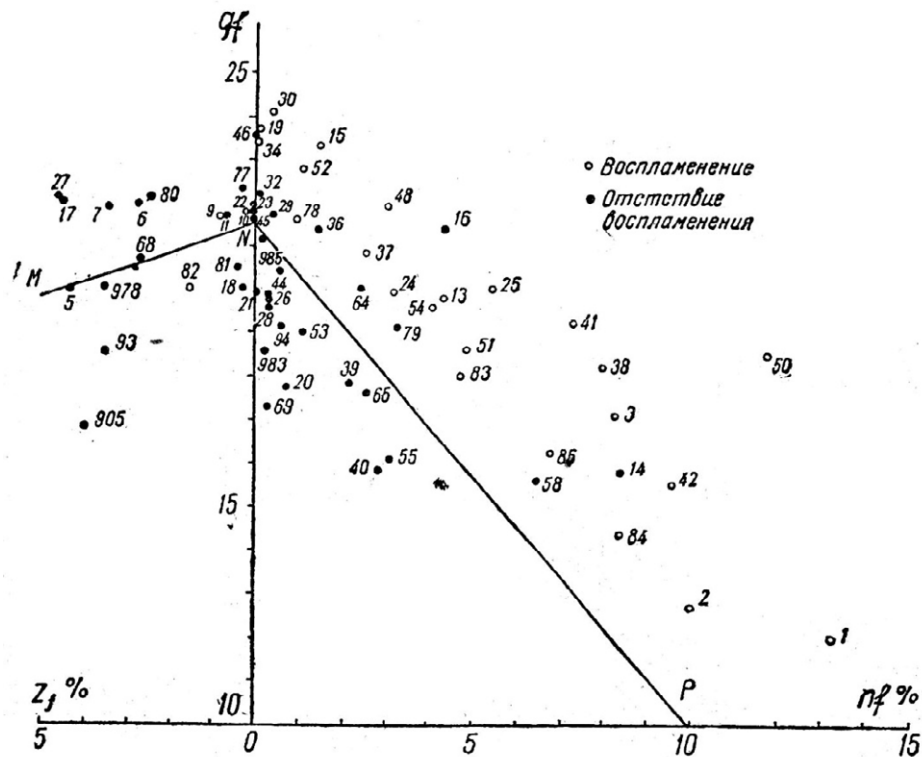


Рис. 3.8. Результаты испытаний ПВВ в МВС, проведенные Е. Одибером:

- nf – избыточное количество кислорода в продуктах взрыва (расчетное);
- qf – минимальное количество теплоты молекулы газа, необходимое для воспламенения взрывчатой атмосферы при их смешении;
- z_f – содержание СО в продуктах взрыва (расчетное).

тавов, которые воспламенений не дали. В табл. 3.15 даны расчетные параметры составов ПВВ, которые были использованы Е. Одибером при испытаниях в опытном штреке. Всего удалось восстановить данные по испытаниям 46 рецептур ПВВ, в том числе предельный заряд и заряд, который давал воспламенение МВС. Расчетные составы ПВВ и полученные предельные заряды в МВС были подвергнуты корреляционному анализу, целью которого было установить влияние на предельный заряд ПВВ его состава продуктов взрыва, удельной теплоты на одни моль газообразных продуктов взрыва и содержания в составе инертной соли (хлористый натрий). Состав продуктов взрыва характеризует кислородный коэффициент – $A_{ВВ}$, удельное содержание инертной соли в составе ПВВ – коэффициент ε , а содержание в продуктах взрыва соли-ингибитора – количество молей соли $NaCl$ $n_{и}$. Согласно теории Одибе-

Таблица 3.15

Расчетные параметры составов ПВВ, испытанных Е. Одибером

Номер состава ПВВ	Удельная теплота взрыва ПВВ, Q_v , ккал/кг	Удельное содержание ингибитора, ε , кг/кг	Количество молей продуктов взрыва ПВВ, $N_{ПВ}$, моль/кг	Количество газообразных молей, N_2 , моль/кг	Количество ингибитора, n_i , моль/кг	Кислородный коэффициент, $A_{ВВ}$	$\frac{Q_v \cdot A_{ВВ}}{N_{ПВ}}$	$\frac{Q_v \sqrt{1-\varepsilon}}{N_2}$	Предельный заряд в МВС, $M_{пр}$, г	Результат испытаний
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
№ 1	519,81	0,0	42,2735	42,2735	0,0	1,422	17,49	17,49	96,2	восплам.
№ 3	616,96	0,215	35,275	31,6	3,6752	1,229	21,49	21,26	81,0	восплам.
№ 5	672,3	0,36	31,435	25,281	6,154	0,9984	21,35	21,24	74,4	не восплам.
№ 6	780,22	0,22	34,904	31,143	3,7607	1,011	22,6	22,37	64,1	не восплам.
№ 7	721,625	0,34	31,422	25,61	5,812	1,005	23,08	23,00	69,3	не восплам.
№ 8	879,08	0,155	36,032	33,382	2,65	1,0089	24,61	24,42	56,9	восплам.
№ 9	667,05	0,20	33,00	29,581	3,419	0,9368	18,94	18,94	74,9	восплам.
№ 10	694,953	0,39	30,973	24,307	6,666	0,9979	22,39	22,28	71,9	не восплам.
№ 11	797,64	0,215	35,678	32,0	3,6752	0,9925	22,19	21,92	62,7	не восплам.
№ 13	721,212	0,126	37,808	35,654	2,154	1,1366	21,68	21,49	69,3	восплам.
№ 14	587,0	0,190	36,958	33,710	3,248	1,2445	19,77	19,50	85,2	не восплам.
№ 15	846,06	0,108	37,47	35,624	1,846	1,0679	24,11	23,95	59,1	восплам.
№ 16	811,47	0,0455	39,39	38,612	0,778	1,1349	23,38	23,30	61,6	не восплам.
№ 17	874,735	0,1312	37,40	35,157	2,243	0,99987	23,38	23,19	57,2	не восплам.
№ 18	634,58	0,425	30,525	23,26	7,265	0,99655	20,72	20,62	78,8	не восплам.
№ 19	896,354	0,145	37,857	35,378	2,4786	0,99995	23,67	23,43	55,8	восплам.
№ 20	530,251	0,535	27,1	17,955	9,1453	1,013	19,82	20,40	94,3	не восплам.
№ 21	642,11	0,40	30,708	23,87	6,8376	1,0077	21,07	20,99	77,9	не восплам.
№ 22	737,025	0,32	32,483	27,013	5,47	0,9984	22,65	22,46	67,8	восплам.
№ 23	744,612	0,3073	33,606	28,353	5,253	0,9984	22,12	21,82	67,1	не восплам.
№ 24	715,661	0,25	35,147	30,873	4,279	1,074	21,87	21,56	69,9	восплам.
№ 25	785,09	0,108	38,542	36,696	1,846	1,1374	23,17	22,98	63,7	восплам.
№ 26	611,71	0,3852	30,9407	24,356	6,5846	1,044	20,64	20,56	81,7	не восплам.
№ 94	641,79	0,320	33,176	27,706	5,47	1,026	10,85	19,61	77,9	не восплам.

Продолжение табл. 3.15

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
№ 32	662,674	0,430	29,022	21,672	7,35	1,0006	22,847	23,1	75,5	не восплам.
№ 33	600,551	0,535	25,962	16,817	9,1453	0,94621	23,044	24,26	83,2	не восплам.
№ 34	760,737	0,335	31,233	25,506	5,7265	1,080	26,305	26,27	65,7	восплам.
№ 36	681,573	0,380	30,3615	23,865	6,496	1,029	23,10	23,14	73,3	не восплам.
№ 37	731,98	0,167	36,618	33,763	2,855	1,0976	21,72	21,72	68,3	восплам.
№ 38	727,765	0,075	39,293	38,011	1,282	1,213	22,47	22,34	68,7	восплам.
№ 39	544,630	0,4339	29,822	22,405	7,4171	1,08	19,72	19,75	91,8	не восплам.
№ 40	481,953	0,483	28,212	19,955	8,2564	1,117	19,10	19,40	103,4	не восплам.
№ 41	764,266	0,00	40,79	40,79	0,00	1,210	22,67	22,67	65,4	восплам.
№ 42	580,443	0,1846	36,453	33,298	3,155	1,275	20,30	20,07	86,1	восплам.
№ 44	662,646	0,3625	31,589	25,392	6,1966	1,00	20,98	20,84	75,5	не восплам.
№ 45	753,875	0,2705	33,502	28,878	4,624	1,00	22,50	22,30	66,3	не восплам.
№ 46	815,136	0,1625	36,01	33,232	2,778	1,008	22,82	22,63	61,3	не восплам.
№ 48	871,94	0,063	40,08	39,003	1,077	1,0715	23,31	23,19	57,3	восплам.
№ 51	784,77	0,00	41,006	41,006	0,00	1,094	20,94	20,94	63,7	восплам.
№ 52	697,78	0,4118	29,033	21,994	7,0393	1,019	24,49	24,79	71,6	восплам.
№ 53	553,23	0,5321	26,605	17,509	9,0957	1,02	22,23	22,06	90,4	не восплам.
№ 78	696,013	0,2914	33,058	28,077	4,9812	1,056	22,23	22,04	71,8	восплам.
№ 81	765,63	0,185	36,749	33,59	3,1624	1,006	20,95	20,70	65,3	не восплам.
№ 83	694,17	0,162	37,286	34,525	2,42735	1,122	20,89	20,65	72,0	восплам.
№ 64	730,6	0,2164	35,408	31,709	3,699	1,06	21,87	21,62	68,4	не восплам.
№ 65	599,22	0,3575	32,11	25,999	6,111	1,06	19,78	19,58	83,4	не восплам.

ра, основные факторы, влияющие на предохранительные свойства ПВВ при испытании в МВС, это кислородный коэффициент, характеризующий состав продуктов взрыва, и удельная теплота на один моль продуктов взрыва – $qf = Q_v / N_{ПВ}$ ($N_{ПВ}$ – число молей продуктов взрыва). Инертная соль влияния не оказывает. Если $A_{ВВ} > 1$, то продукты взрыва ПВВ содержат свободный кислород, а если $A_{ВВ} < 1$, то в продуктах взрыва присутствует оксид углерода. Действительно, корреляционный анализ подтвердил наличие связи у ПВВ между qf , $A_{ВВ}$ и M_{np} . В результате обработки данных табл. 3.15 получена эмпирическая зависимость для предельного заряда ПВВ:

$$M_{np} = \frac{62,918988}{1 - 1471,8022 \exp[-0,43267 \cdot qf \cdot A_{ВВ}]}, \text{ г, /S/} = 7,152; /r/ = 0,801.$$

(3.61)

Таким образом, гипотеза Е. Одибера о влиянии количества тепла в продуктах взрыва на предохранительные свойства ПВВ как бы подтверждается. Вместе с тем, многие составы ПВВ, используемые Е. Одибером в испытаниях, содержали хлористый натрий. Это – известный в наше время эффективный ингибитор МВС, он тормозит реакцию окисления метана кислородом воздуха, поэтому также может выступать одним из факторов, оказывающих влияние на предельный заряд ПВВ при его взрывании в МВС. В упомянутых ранее работах было установлено влияние соли-ингибитора на предельный заряд ПВВ в МВС. Таким образом, необходимо сделать корреляционный анализ составов Е. Одибера на предмет установления связи между величиной предельного заряда ПВВ и параметрами, которые учитывали бы влияние соли-ингибитора. В качестве таких параметров приняты: концентрация ингибитора в продуктах взрыва – n_u / N_2 и теплота взрыва ВВ, утилизированная солью, $Q_v \sqrt{1 - \varepsilon}$. В результате обработки экспериментальных данных удалось установить эмпирическую зависимость с учетом ингибитора:

$$M_{np} = \frac{a + vx}{1 + cx + dx^2}, \text{ г, /S/} = 0,00585; /r/ = 0,88, \quad (3.62)$$

где $a = 0,057736875$; $v = 106,6833$; $c = 892,61761$; $d = -16022,739$;

$$x = \frac{n_u}{N_2} \cdot \frac{A_{BB}}{Q_v \sqrt{1-\varepsilon}}$$

Анализ полученных результатов показывает, что зависимость (3.62), график которой дан на (рис. 3.9), имеет более высокий по сравнению с зависимостью (3.61) коэффициент корреляции. Ее среднеквадратичное отклонение расчетных точек от экспериментальных значений уменьшилось более чем в 1200 раз. Следовательно, на величину предельного заряда ПВВ, взрываемого в мортире, оказывает существенное влияние ингибирующее действие соли, введенной в состав. Причем, ее влияние гораздо сильнее, чем влияние газообразных продуктов взрыва. Таким образом, антигризутность зарядов ПВВ, как и их предохранительные свойства в МВС, зависит от концентрации соли-ингибитора в продуктах взрыва ВВ.

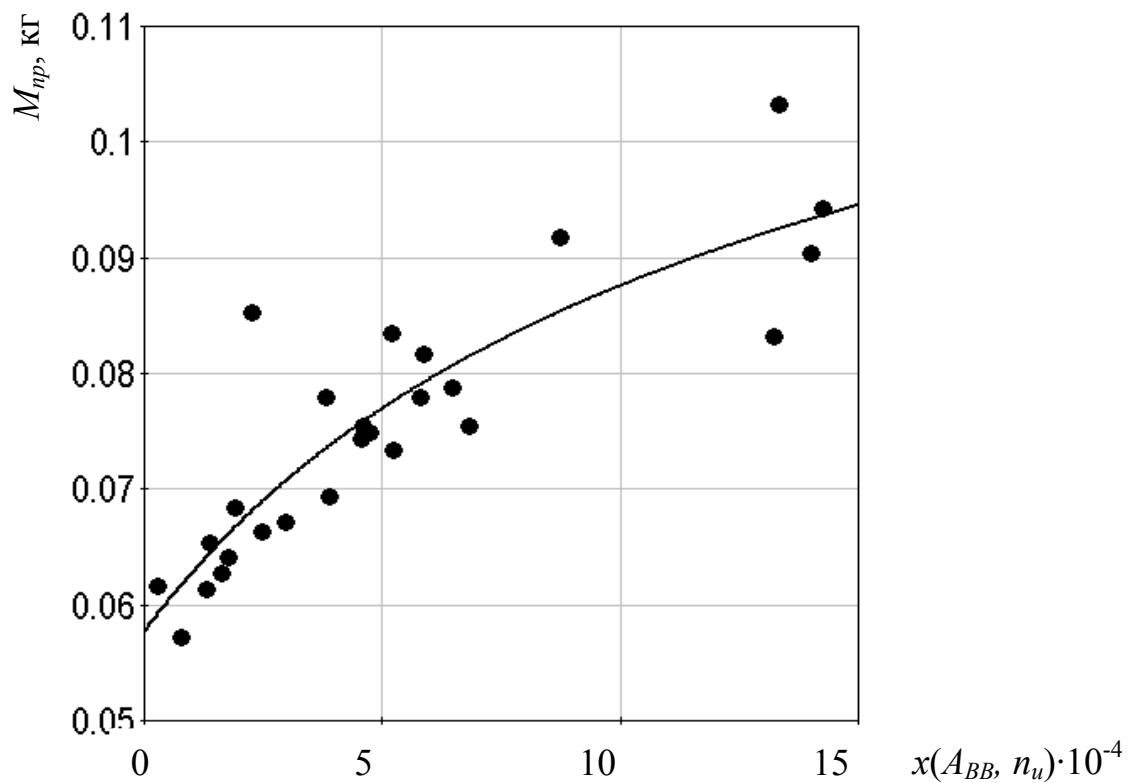


Рис. 3.9. График зависимости (3.62)

3.6. Критические параметры воспламенения МВС при взрыве открытого заряда ПВВ

В работе [221] для зарядов ПВВ, взрываемых в опытном штреке в открытом виде (свободно подвешенные или расположенные в уголковогой мортире), установлен показатель, характеризующий предохранительные свойства ВВ. Он получил название показателя антигрязности ВВ – Π и определяется следующим выражением:

$$\Pi = \frac{(n+1)^2 \rho_{BB}^2}{nP_n} = \frac{(n+1)^2 \rho_{BB}}{nD^2}, \quad (3.63)$$

Выражение $\frac{D^2 \cdot n}{(n+1)^2} = Q_D$ представляет собой энергию, выделяющуюся во фронте детонационной волны. Из уравнения видно, что чем больше энергия детонации ВВ, тем меньше его показатель антигрязности Π и, следовательно, более низкий уровень предохранительных свойств ПВВ (малый предельный заряд) во взрывоопасной МВС. Вместе с тем, критические параметры воспламенения МВС при взрыве открытого заряда не известны.

Рассмотрим взрыв открытого заряда ВВ во взрывоопасной МВС [222]. В результате перехода детонационной волны ВВ в окружающую заряд МВС последней передается энергия взрыва ВВ – E_{BB} , которая зависит от массы заряда и его энергии детонации. Скорость передачи энергии в МВС равна:

$$\frac{dE_{BB}}{d\tau} = \frac{m_{BB} Q_D}{\tau_D}, \quad (3.64)$$

где τ_D – время детонации заряда.

Величина τ_D зависит от скорости движения детонационной волны в заряде ВВ и длины заряда:

$$\tau_D = l_3 / D \quad . \quad (3.65)$$

Выразив массу ВВ в цилиндрическом заряде через его объем и плотность и преобразовав уравнения (3.64) и (3.65), получим:

$$\frac{dE}{d\tau} = \frac{\pi}{4} d_3^2 \rho_{BB} D^3. \quad (3.66)$$

Анализ уравнения (3.66) показывает, что величина $\pi d_3^2 = S_3$ характеризует

площадь поверхности заряда, контактирующего с МВС, а $\rho_{BB}D^2/4 = P_n$ – давление во фронте детонационной волны при показателе политропы $n=3$. Произведение площади на давление детонации ВВ дает силу – F_D , с которой продукты детонации ВВ воздействуют на МВС, силы на скорость детонационной волны – мощность детонационной волны при переходе ее в МВС. Тогда скорость передачи энергии взрыва заряда ВВ в МВС характеризуется мощностью детонационной волны:

$$N_D = dE/d\tau, \text{ Дж/с.} \quad (3.67)$$

Аналогично рассмотрим развитие взрыва МВС в результате инициирования в ней химической реакции окисления метана кислородом воздуха. В результате возникновения реакции окисления метана выделяется энергия – E_{MBC} , равная произведению массы МВС, вовлеченной в реакцию окисления – m_{MBC} , на выделяющуюся при этом удельную энергию q_{MBC} .

По аналогии с уравнением (3.64) можно записать скорость развития реакции окисления метана в МВС:

$$\frac{dE_{MBC}}{d\tau} = m_{MBC}q_{MBC}K_p, \quad (3.68)$$

где K_p – константа скорости реакции окисления метана кислородом воздуха, с^{-1} .

Таким образом, можно записать критические условия, которые необходимы для инициирования реакции окисления метана в МВС при взрыве в ней заряда ВВ:

$$\left\{ \begin{array}{l} \tau_D K_p \geq 1 \\ \frac{E_{BB}}{E_{MBC}} \geq 1 \text{ или } N_D \geq N_{крт} \end{array} \right. \quad (3.69)$$

где N_D – мощность детонационной волны ВВ, Дж/с;

$N_{крт}$ – критическая мощность инициирования детонации МВС, Дж/с.

Первое из условий полученной системы указывает на то, что время действия источника, который вызывает инициирование реакции окисления в МВС (характеризуется временем детонации ВВ), не меньше времени, необходимого на реакцию окисления, которое характеризуется скоростью реакции и ее константой. За это время в МВС выделится энергия, которая идет на поддержание процесса инициирова-

ния взрыва (тепловое инициирование) или на вынужденное горение смеси под действием источника инициирования. Энергия, передаваемая МВС при взрыве ВВ в течение всего периода времени, должна быть всегда больше энергии окисления, выделяющейся в МВС. В противном случае произойдет затухание процесса инициирования взрыва МВС, так как реакция окисления не успевает развиться до стационарного процесса в результате потери тепла на расширение газа.

Теоретические выводы указывают на то, что если величина параметров процесса инициирования не достаточна и не удовлетворяет условиям (3.69), то взрыва МВС не произойдет. Это подтверждает существование критической величины заряда (мощность инициирования) ВВ, при которой вызвать взрыв МВС не возможно. На практике такую величину заряда называют предельным зарядом ВВ и он характеризует предохранительные свойства ВВ. Однако интересно установить, насколько устойчивы критические условия, описывающие развитие процесса инициирования взрыва МВС при взрыве в ней открытого заряда ВВ. До настоящего времени критическая величина $N_{крт}$ для МВС была не определена.

Исследования воспламеняющей способности зарядов ВВ по отношению к МВС проводили в опытном штреке МакНИИ. При анализе данных испытаний были использованы результаты опытов, полученных в работах [223, 224, 225] при взрывании свободно подвешенных зарядов ВВ в песчаных (из кварцевого песка), водяных и воздушных оболочках, без оболочек и зарядов в угловой мортире с отражательной стенкой. Взрывание проводили в МВС с концентрацией метана 8,5...9,5%. Иницирование взрыва МВС осуществлялось взрывом заряда предохранительного или не предохранительного ВВ, который подвешивался в центре взрывной камеры опытного штрека или располагался на грани угловой мортиры. Результаты исследований обработаны с помощью компьютерной программы Curve Expert 1.3. В табл. 3.16 приведены результаты испытаний в МВС зарядов ВВ, расположенных в угловой мортире, в табл. 3.17 – свободно подвешенных в предохранительной оболочке заряда толщиной δ , при которой не происходит взрыв МВС.

Для зарядов ВВ с водяной оболочкой, взрываемых в МВС, получена следующая эмпирическая зависимость:

$$\delta = 5,3079 \ln N_D - 125,6527, \text{ мм, } /r/ = 0,979, \quad (3.70)$$

Для зарядов ВВ с песчаной оболочкой, взрываемых в МВС, имеем:

$$\delta = 0,104242(N_D - 1,4173357 \cdot 10^{10})^{0,23823}, \text{ мм, } /r/ = 0,993. \quad (3.71)$$

Для зарядов ВВ в воздушной оболочке, которая контактирует с взрывчатой МВС,

Таблица 3.16

Результаты испытаний в МВС зарядов ПВВ, расположенных в уголковой мортире

ПВВ	Диаметр заряда, d_z , м	Плотность ВВ в патронах, $\rho_{ВВ}$, кг/м ³	Скорость детонации ВВ, D , м/с	Предельный заряд ВВ, M_{np} , кг	Мощность детонационной волны, N_D , Дж/с
1	2	3	4	5	6
Угленит Э-6	0,036	1200	2150	0,128	$1,213309 \cdot 10^{10}$
Угленит № 5	0,036	1250	1750	0,600	$6,81552 \cdot 10^9$
Угленит 7У	0,036	1200	1800	0,445	$7,1199 \cdot 10^9$
Селектит – 1	0,036	1100	1980	0,200	$8,687 \cdot 10^9$
Ионит	0,036	1170	1676	1,00	$5,6038 \cdot 10^9$
НИИТ-2	0,036	1200	2100	0,150	$1,1306 \cdot 10^9$
Угленит № 8	0,036	1150	1580	0,850	$4,615 \cdot 10^9$
Harmonit V	0,036	1220	2030	0,135	$1,0383 \cdot 10^9$
Угленит А 10/10	0,036	1190	1796	0,300	$7,0136 \cdot 10^{10}$
Угленит А 12/10	0,036	1200	2075	0,150	$1,0907 \cdot 10^{10}$
Опытный образец 1Г	0,036	1150	2301	0,100	$1,42535 \cdot 10^{10}$
ПЖВ – 65	0,036	1250	2256	0,100	$1,46017 \cdot 10^{10}$
Угленит 13К	0,036	1220	2030	0,215	$1,0383 \cdot 10^{10}$
Угленит ПЭ-6	0,036	1250	2144	0,100	$1,25331 \cdot 10^{10}$

Продолжение табл. 3.16

1	2	3	4	5	6
Harmonit AD	0,030	1360	2050	0,40	$8,2778 \cdot 10^9$
Ostravit C	0,030	1410	1960	0,60	$7,5007 \cdot 10^9$
Wetterenergit B	0,030	1260	1750	1,0	$4,7709 \cdot 10^9$
Опытный образец № 294	0,036	1200	1980	0,210	$9,4766 \cdot 10^9$
Опытный образец И5	0,036	1200	2000	0,200	$9,767 \cdot 10^9$
Панкинит – 2	0,036	1200	2250	0,180	$1,3906 \cdot 10^{10}$
Панкинит – 2	0,036	1100	1720	0,850	$5,6945 \cdot 10^9$
Угленит 9,5/25	0,036	1130	2120	0,125	$1,0954 \cdot 10^{10}$
Панкинит – 3	0,036	1140	1600	1,000	$4,7505 \cdot 10^9$
Шарбрит 4/50	0,030	1100	1500	1,800	$2,6229 \cdot 10^9$
Угленит 12ЦБ	0,036	1330	1922	0,700	$9,60697 \cdot 10^9$
Угленит 3М	0,036	1300	2006	0,780	$1,0676 \cdot 10^{10}$
Алтанит 6А	0,036	1300	1840	0,400	$8,238943 \cdot 10^9$
Угленит Н–12	0,036	1250	1890	0,600	$8,58559 \cdot 10^9$
Угленит 13П	0,036	1250	2400	0,100	$1,758 \cdot 10^{10}$
Угленит 10Д	0,036	1170	1712	0,350	$5,97272 \cdot 10^9$
Угленит 12П	0,036	1320	2020	0,400	$1,106885 \cdot 10^{10}$
Барбарит L	0,030	1500	2280	0,080	$1,25605 \cdot 10^{10}$
Барбарит FGH–2	0,030	1610	2005	0,190	$9,16814 \cdot 10^9$
Метанит Д–6G	0,034	1050	2190	0,150	$1,000804 \cdot 10^{10}$
Специальный метанит	0,034	1060	1850	0,450	$6,09044 \cdot 10^9$
Угленит 9Г	0,036	1300	1808	0,800	$7,81652 \cdot 10^9$
Угленит К5/7	0,036	1300	2360	0,100	$1,7284 \cdot 10^{10}$

Продолжение табл. 3.16

Опытный образец НТМ–NaCl	0,036	950	1890	0,220	$6,52505 \cdot 10^9$
Угленит 13П/1	0,036	1220	2080	0,300	$1,116926 \cdot 10^{10}$
Кемпоксит № 1	0,030	1200	1840	1,20	$5,2813725 \cdot 10^9$
Угленит 10П	0,036	1250	1920	0,400	$9,00095 \cdot 10^9$
ПЖВ – 20	0,036	1050	4000	0,020	$6,83666 \cdot 10^{10}$

Таблица 3.17

Толщина предохранительной водяной и гидрогелевой оболочек при взрывании свободно подвешенных зарядов ВВ в МВС

ВВ	Плотность ВВ в заряде, $\rho_{ВВ}$, кг/м ³	Масса ВВ, $m_{ВВ}$, кг	Диаметр заряда, d_z , м	Скорость детонации, D , м/с	Мощность детонационной волны, $N_D \cdot 10^{10}$, Дж/с	Толщина предохранительной оболочки, δ , мм		
						водяной	гидрогелевой	средняя
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Аммонит Т-19	1180	0,3	0,036	4050	7,97483	7,0	8,0	7,5
Аммонит Т-19	980	0,9	0,070	4470	33,6678	15,0	13,0	14,0
Аммонит №6ЖВ	1040	0,2	0,032	4000	5,35036	5,0	6,0	5,5
Аммонит №6ЖВ	1070	0,3	0,036	4200	8,2158	8,0	8,0	8,0
Аммонит №6ЖВ	1090	0,9	0,054	4580	23,97	15,0	12,0	13,5
Детонит 10А	1090	0,3	0,036	4840	12,573	11,0	-	11,0

Продолжение табл. 3.17

Детонит 10А	1170	0,9	0,070	5640	80,74	22,0	-	22,0
Тротил	1570	0,3	0,045	6660	73,725	18,0	-	18,0
Аммонит Т-19	1200	0,5	0,045	4120	13,34	-	10,0	10,0
Аммонит Т-19	1200	0,9	0,054	4270	19,96	-	12,0	12,0

эмпирическая зависимость такая:

$$\delta = 430,418 \ln N_D - 8400,1448, \text{ мм}, \quad /r/ = 0,912. \quad (3.72)$$

По результатам взрывания открытых свободно подвешенных зарядов ВВ в бумажных парафинированных гильзах, которые контактировали с МВС со всех сторон, получено эмпирическое уравнение, описывающее зависимость массы предельного заряда от мощности детонационной волны ВВ:

$$M_{np} = M_0 \exp \left[48,228763 - \frac{2,031655 \cdot 10^9}{N_D} - 2,1172 \ln N_D \right], \text{ кг}, \quad M_0 = 1 \text{ кг}, \quad /r/ = 0,9236. \quad (3.73)$$

Эмпирическое уравнение для открытых зарядов ВВ, взрывааемых во взрывной камере опытного штрека в угловой мортире с отражательной стенкой на расстоянии 0,6 м от грани мортиры, имеет вид:

$$M_{np} = \frac{5,4964 \cdot 10^9}{N_D} - 0,2471, \text{ кг}, \quad /r/ = 0,893. \quad (3.74)$$

Полученные зависимости позволяют проанализировать в целом критические условия инициирования взрыва в МВС открытым зарядом ВВ. Оценим критическую мощность детонационной волны, которая образуется в чистой МВС при сферической детонации большого объема этой смеси (более 10 м³). Согласно уравнению (3.67), найдем мощность детонационной волны МВС для объема сферы радиусом r :

$$N_D = 12,56r^2 \rho_{MBC} D_{MBC}^3, \text{ Дж/с}, \quad (3.75)$$

где ρ_{MBC} – плотность МВС.

По данным В.В. Адушкина и С.М. Когарко [226], критический радиус сфери-

ческой детонации равен 0,65 м, а по данным работ [227, 228], критическая скорость детонационной волны МВС, вызывающей сферическую детонацию МВС, находится в интервале 1255...1450 м/с (средняя – 1353,0 м/с). Подставив эти значения в уравнение (3.75), получим критическую мощность инициирования детонации МВС:

$$N_{крт} = 12,56 \cdot 0,65^2 \cdot 1,17 \cdot 1353,0^3 = 1,537785 \cdot 10^{10}, \text{ Дж/с.}$$

Согласно критическим условиям (3.69), инициирование детонации МВС при взрыве ВВ будет происходить, если $N_D \geq N_{крт}$. Проверим это для случая, когда у заряда нет предохранительной оболочки, то есть примем в уравнениях (3.70), (3.71) и (3.72) $\delta = 0$. В результате получаем значение мощности детонационной волны ВВ, развиваемой в начальный момент действия волны на предохранительную оболочку. Для воздуха оно равно $2,990876 \cdot 10^8$ Дж/с, для песчаной оболочки – $1,4173357 \cdot 10^{10}$ Дж/с и водяной $1,90965 \cdot 10^{10}$ Дж/с. Сравним полученные результаты с критическим значением для МВС. Получается, что критические условия абсолютно не выполнимы для воздушной оболочки, так как $2,990876 \cdot 10^8 < 1,537785 \cdot 10^{10}$, то есть воздушная оболочка очень сильно облегчает и усиливает инициирование взрыва МВС от заряда ВВ. Это связано с протеканием в воздухе вторичных химических реакций при его смешении с продуктами взрыва ВВ. Для песчаной оболочки из сухого кварцевого песка критические условия практически выполняются для зарядов ВВ, которые в них взрываются ($N_D/N_{крт} \approx 0,93$), и надежно выполняются для зарядов ВВ в водяной оболочке ($N_D/N_{крт} \approx 1,24$).

Учитывая полученные результаты, можно утверждать, что истинное значение $N_{крт}$ для МВС должно быть достаточно близким к расчетному $1,537785 \cdot 10^{10}$ Дж/с. На это указывает простой анализ физико-химических свойств материала оболочки для взрывааемых зарядов. Кварцевый песок для песчаной оболочки представляет сыпучий пористый материал, поэтому можно предположить, что та часть воздуха, которая находилась в оболочке, оказала неблагоприятное влияние на антигризутность таких зарядов. При этом нельзя забывать о пьезоэлектрических свойствах кварца, которые могут проявляться при ударных нагрузках на песчаную оболочку. Поэтому

экспериментальное значение $N_{крт}$ несколько занижено по сравнению с расчетным.

Противоположное влияние оказывает на продукты взрыва ВВ вода, которая находится в оболочке. Водяная оболочка является эффективным тепловым фильтром, который отделяет и охлаждает продукты детонации и практически не изменяет параметры ударной волны, образованной в окружающей заряд среде. Поэтому истинное значение $N_{крт}$ ближе к значению, полученному для водяной оболочки, нежели для песчаной, и в первом приближении его можно принять равным расчетному $N_{крт}=1,537785 \cdot 10^{10}$ Дж/с. Далее можно проанализировать выполнение критических условий инициирования взрыва МВС уже непосредственно открытыми зарядами ВВ, взрывающимися в опытном штреке в открытом виде без защитной оболочки. В этом случае преобразуем уравнения (3.66) и (3.75) к иному виду, выразив радиус заряда через предельную массу ВВ:

$$m_{ВВ} = \frac{6,0216 N_D^{1,5015}}{\rho_{ВВ}^{0,5015} D^{4,5045}}, \text{ кг.} \quad (3.76)$$

Подставив значение $N_D = N_{крт}$, окончательно получим:

$$M_{пр} = \frac{1,18942114 \cdot 10^{16}}{\rho_{ВВ}^{0,5015} D^{4,5045}}, \text{ кг.} \quad (3.77)$$

По этому уравнению рассчитали предельные открытые заряды ВВ в МВС без предохранительной оболочки (табл. 3.18). Расчетные предельные заряды ПВВ, применяемых в угольных шахтах Украины, России и Чехии, и предельные заряды этих ПВВ, полученные в опытном штреке, приведены в таблице 3.19. Эти результаты показывают, что, с одной стороны, имеется ряд ПВВ, у которых расчетные предельные заряды совпадают с предельными зарядами в МВС, а, с другой стороны, имеются ПВВ, у которых расчетные предельные заряды существенно отличаются от экспериментальных предельных зарядов в опытном штреке. Это может быть связано с тем, что в продуктах взрыва ВВ находятся эффективные ингибиторы окисления метана. Поэтому необходимо провести исследования по выявлению эффективных солей-ингибиторов для ПВВ и средств создания предохранительной среды.

Таблица 3.18

Предельные открытые заряды ВВ в МВС без предохранительной оболочки ($\delta = 0$)

ПВВ	$\rho_{ВВ}$, кг/м ³	D, м/с	Предельный заряд ПВВ, M_{np} , кг	
			расчетный	экспериментальный
Аммонит ПЖВ-20	1050	4000	0,0289	~0,020
Угленит Э-6	1220	2225	0,400	~0,300
Угленит № 5	1200	1750	1,164	~1,0
Угленит 7У	1200	1800	1,025	~1,0
Ионит	1170	1676	1,431	~1,4
Угленит 12ЦБ	1300	1925	0,728	>1,0
Угленит 10П	1250	1920	0,751	~1,0
Угленит 13П	1220	2380	0,289	0,20

Таблица 3.19

Предельные открытые заряды ПВВ во взрывоопасной МВС

ПВВ	Страна	Параметры ПВВ		M_{np} по уравн. (3.77), кг	Расчетный M_{np} , кг		Эксперим. M_{np} , кг	
		$\rho_{ВВ}$, кг/м ³	D, м/с		по уравн. (3.73), свободно подвешенный	по уравн. (3.74), в уголке морт. веш.	своб. подвеш.	в уголке морт.
Аммонит Г5	Украина	1050	4100	0,0194	0,008	-	0,02	-
Амм. ПЖВ-20	Россия	1050	4000	0,022	0,010	-	0,02	-
Угленит Э-6	Россия	1220	2224	0,285	0,265	0,155	0,25	-
Угленит 13П	Украина	1200	2320	0,235	0,213	0,113	-	0,10
Угленит М	Россия	1220	2200	0,296	0,282	0,169	0,30	-
Угленит № 5	Россия	1250	1750	0,82	0,99	0,560	-	0,50
Угленит 10П	Украина	1220	1948	0,512	0,571	0,352	-	0,40
Угленит 12ЦБ	Россия	1300	1925	0,524	0,541	0,335	-	0,60
Ионит	Россия, Украина	1170	1676	1,03	1,408	0,734	-	1,00
Ostravit	Чехия	1210	1960	0,50	1,1	0,61	-	0,60

Проведенные в разделе исследования позволяют сделать следующие выводы:

– ударные волны в МВС, газообразные продукты взрыва, имеющие высокую температуру и быстро летящие горящие частицы ВВ могут вызывать воспламенение МВС при взрыве заряда ПВВ;

– установили начальные параметры ударных волн на границе раздела «поверхность заряда ПВВ – взрывоопасная среда». Давление во фронте ударной волны в десятки раз превышает давление детонации МВС;

– установили критические параметры ударной волны при взрыве заряда ВВ, вызывающей воспламенение МВС. Критическое давление во фронте волны зависит от кислородного коэффициента ВВ, а для ПВВ – и от наличия в их составе солей-ингибиторов реакции окисления метана;

– раскрыт механизм воспламенения МВС газообразными продуктами взрыва ВВ, которое определяется температурой, составом продуктов взрыва и концентрацией в них активных центров-радикалов и солей-ингибиторов реакции окисления метана;

– установили влияние быстро летящих горящих частиц ПВВ на возможность воспламенения МВС открытым зарядом и зарядом, расположенным в канале мортиры. Установили критические условия воспламенения МВС горящими частицами в зависимости от дальности их полета и дисперсности частиц ВВ;

– установили влияние солей, не участвующих во взрывной реакции ВВ, на уровень предохранительных свойств ВВ. Если эти соли являются ингибиторами реакции окисления метана, то предохранительные свойства ПВВ повышаются и воспламенение МВС можно предотвратить;

– обосновали безопасные параметры ПВВ в МВС, которые позволяют предопределять предельный заряд ПВВ и его антигрязность. Установлены зависимости предельного заряда ПВВ от мощности детонации ВВ, причем скорость детонации имеет наибольшее влияние на его предохранительные свойства.

РАЗДЕЛ 4

ИССЛЕДОВАНИЕ ИНГИБИРУЮЩЕГО ДЕЙСТВИЯ НА МВС СОЛЕЙ, ВХОДЯЩИХ В СОСТАВ ПРЕДОХРАНИТЕЛЬНЫХ ВВ

4.1. Исследование принципов построения ПВВ и способов ввода в их состав солей-ингибиторов

Основы создания ПВВ базируются на научных принципах их построения. Эти принципы изложены в работах известных ученых: Малляра, Ле-Шателье и Одибера (Франция), Тейлора (Англия), Аренса и Бейлинга (Германия), Андреева и Дубнова (СССР) и заключаются в следующем.

1. ПВВ должны иметь ограниченную скорость детонации, удельную теплоту взрыва и температуру газообразных продуктов детонации.

2. Соотношение активных компонентов состава ПВВ – сенсibilизатора, окислителя и горючего должно соответствовать нулевому кислородному балансу.

3. ПВВ должны иметь низкую горючесть или поджигаемость, которая обеспечивает им устойчивость к выгоранию шпурового заряда.

4. В состав ПВВ целесообразно вводить соли, являющиеся ингибиторами поджигаемости ВВ и обладающие способностью ингибировать реакции окисления метана.

5. Предохранительные ВВ должны устойчиво детонировать в шпурах при короткозамедленном взрывании.

Реализация этих принципов на практике связана с вводом в состав ВВ инертных солей, снижающих взрывчатые и энергетические показатели ВВ. Однако практическое получение ПВВ с заданными свойствами вызывает значительные трудности. Они возникают из-за сложности выбора инертных солей в связи с противоречивостью роли, которую те могут выполнять в составе ПВВ. Например, увеличение в составе ПВВ содержания инертных солей повышает их предохранительные свойства и устойчивость против выгорания, однако снижает работоспособность и детонационную способность настолько, что применение ВВ может быть не целесообразно.

Противоречивость влияния инертных солей на свойства ПБВ состоит также в том, что одни и те же соли, например, хлориды щелочных металлов (NaCl и KCl), одновременно могут как повысить уровень предохранительных свойств ПБВ, так и увеличить его горючесть и тем самым снизить устойчивость ПБВ к выгоранию. Вопрос выбора солей-ингибиторов окисления метана для ПБВ до настоящего времени в полном объеме не исследован и не обоснован, так как встречается серьезные трудности экспериментального порядка. Кроме того, при создании предохранительных ВВ сложилось два подхода к оценке эффективности действия инертных солей на МВС. Одни ученые выдвигают требования к таким солям с позиций теплопоглощающей способности соли, а другие – по линии каталитической активности на реакцию окисления метана. Получается, что антигризутность зарядов ПБВ и их уровень предохранительных свойств зависят как от каталитической активности солей, так и от их теплопоглощающей способности за счет ограничения количества тепла, вносимого взрывом заряда во взрывоопасную среду. Неоднозначный подход в оценке влияния инертных солей на уровень предохранительных свойств ПБВ породил целый ряд способов введения их в состав как пламегасителей или ингибиторов. До настоящего времени исследованы и опробованы три способа:

1) непосредственный ввод инертной соли (пламегасителя или ингибитора) в состав предохранительного ВВ. Этот способ давно вошел в практику получения ПБВ, поэтому он получил название «классический»;

2) ввод в состав ПБВ так называемой ионообменной пары солей, в результате реакции между которыми образуется ингибитор, например, натриевая селитра и хлористый аммоний. Способ был предложен Бихелем в 1902 году, а в 50-е годы XX века теоретически и практически был обоснован Аренсом при создании селективно-детонирующих ионообменных ПБВ;

3) окружение патрона ВВ по боковой поверхности и с торцов предохранительной оболочкой из инертного материала, представляющего собой ингибитор или пламегаситель. Предложен Лемером (Бельгия) в 1912 г. В дальнейшем этот способ был усовершенствован применением активных предохранительных оболочек из бикарбита в Германии, а в СССР Ф.М. Галаджием – применением оболочек из вы-

сококонцентрированных растворов пламегасителей или ингибиторов.

Сравнительная оценка этих способов показала, что с точки зрения элементарного состава таких зарядов ПВВ все три способа в какой-то степени идентичны. Система из ионообменной пары солей идентична классической, так как реакция взаимодействия между NaNO_3 и NH_4Cl приводит к тем же продуктам, что и реакция между NH_4NO_3 и NaCl , используемыми в классической системе. Патроны ПВВ с предохранительными оболочками рассматриваются как системы с неравномерно распределенной по объему заряда инертной солью. В этом случае в ядре заряда ПВВ концентрация соли минимальна, а в периферийной области заряда – оболочке соль сконцентрирована. При равном массовом содержании инертной соли в зарядах из классического ПВВ и с предохранительной оболочкой считается, что сосредоточение соли в оболочке повышает уровень предохранительных свойств заряда. Предполагается, что это происходит за счет более интенсивного охлаждения продуктов взрыва солью из оболочки. Исследуя влияние инертных солей при взрыве ПВВ на их предохранительные свойства, можно сделать вывод, что ни в одном из способов не может быть явно выделен фактор пламегасящего действия соли на продукты детонации ПВВ путем теплоотбора за счет их теплоемкости. В свою очередь, фактор ингибирующей активности соли явно просматривается во всех трех способах.

Исследованиями А.И. Гольбиндера, К.К. Андреева и Л.В. Дубнова было установлено, что теплоемкость солей, введенных в состав ПВВ, не влияет на их предохранительные свойства. Отбор тепла солью у продуктов детонации ПВВ происходит не за счет их теплоемкости, а за счет затрат энергии на ударное сжатие и разгон частичек соли за фронтом детонационной волны до скорости продуктов детонации. В работе [229] было установлено, что только часть от общей энергии взрыва ВВ затрачивается на разгон и разброс инертной соли. Эту часть энергии можно определить, если известна массовая доля конденсированной фазы (соли) в составе и удельная теплота взрыва ПВВ. Затраты энергии взрыва ВВ на разгон и ударный нагрев частиц соли практически не оказывают влияние на безопасность взрывания и уровень предохранительных свойств ПВВ, но снижают его работоспособность. Вместе с тем, химическая природа введенных в состав солей и их концентрация в продуктах взры-

ва ПВВ определяют предохранительные свойства ВВ и влияют на кинетику химических реакций, протекающих при воспламенении и взрыве МВС. Известно, что реакция окисления метана имеет цепной механизм, поэтому эффект действия инертных солей на уровень предохранительных свойств ПВВ в МВС можно объяснить только с позиций подавления реакции окисления метана солью в силу ее ингибиторных свойств. Таким образом, соль является ингибитором окисления метана.

Следовательно, выбор солей-ингибиторов для ПВВ необходимо делать с учетом их химической активности по отношению к радикалам и необходимой концентрации в продуктах взрыва. До последнего времени при разработке ПВВ и вводе в их состав солей-ингибиторов свойства ВВ в полной мере не учитывали, поэтому в ряде случаев эффективность вновь созданных ПВВ была низкой. В работах [230, 231, 232] приведены принципы, на основе которых необходимо осуществлять выбор солей-ингибиторов для ПВВ и средств взрывопредупреждения и взрывозащиты для безопасности взрывных работ в угольных шахтах. В связи с этим проведены исследования ингибирующего действия солей на МВС при взрыве зарядов ПВВ.

4.2. Исследование ингибирующего действия солей на МВС при взрыве заряда ПВВ в канале мортиры

В разделе 3 настоящей работы показано влияние соли (пламегаситель) на уровень предохранительных свойств ВВ. Это влияние имеет существенно иной характер, чем влияние газообразных продуктов взрыва. Наличие в газообразных продуктах взрыва водорода и кислорода, а также оксидов азота и углерода снижают уровень предохранительных свойств ВВ, а наличие соли-ингибитора – хлористого натрия существенно его повышает. Этот факт не новый, на него впервые обратили внимание К.К. Андреев и А.И. Гольбиндер. В дальнейшем он исследован в работах Л.В. Дубнова [233], Ф.М. Галаджия и Б.И. Вайнштейна [234], В.М. Расторгуева [235] и некоторых зарубежных ученых [236]. Однако эти исследования так и не ответили на главные вопросы, каков же механизм действия соли на МВС при взрыве и как выбирать соли-ингибиторы для предохранительных ВВ. Поэтому дальнейшие

исследования были проведены с целью найти ответы на эти вопросы [237, 238].

В основу исследований положен тот факт, что ингибирование цепных реакций окисления метана характеризуется длительностью тормозящего действия на них ингибитора, которое зависит от его концентрации, коэффициента ингибирования, зависящего от химической природы ингибитора и скорости инициирования цепей реакции. Ингибитор (от лат. *inhibeo* – останавливаю, сдерживаю) – это вещество, тормозящее химическую реакцию. Тормозящее действие обусловлено тем, что ингибитор блокирует активные центры, с помощью которых развивается цепная реакция и переводит их в малоактивные продукты, не способные ее продолжать. Поэтому при введении ингибитора скорость реакции снижается и затем процесс длительное время протекает с малой скоростью или затухает. Ингибирование цепных реакций характеризуется длительностью тормозящего действия ингибитора τ_u . Число цепей, которые обрывает одна молекула соли-ингибитора, последовательно вступая в реакции обрыва, называют стехиометрическим коэффициентом ингибирования f_c . При исходной концентрации ингибитора – C_u и скорости инициирования цепей реакции – v_i время торможения равно:

$$\tau_u = \frac{f_c C_u}{v_i}. \quad (4.1)$$

Скорость инициирования цепей реакции зависит от концентрации радикалов – $[\dot{R}]$ и времени их «жизни» – t_R и определяется по формуле:

$$v_i = \frac{[\dot{R}]}{t_R}. \quad (4.2)$$

Следовательно:

$$\tau_u = t_R f_c \frac{C_u}{[\dot{R}]}. \quad (4.3)$$

Анализируем уравнение. Если $\frac{f_c C_u}{[\dot{R}]} \geq 1$, то происходит полное блокирование

активных центров ингибитором, то есть время торможения равно времени «жизни» радикалов в зоне реакции. Если при цепном воспламенении МВС $\tau_u \gg t_R$, то взрыва

не произойдет и прекращение реакции окисления метана будет обусловлено увеличением времени торможения вследствие достигнутой концентрации ингибитора в ПВВ и его химической активности.

Применяя эти выводы к предохранительным ВВ, можно предположить, что концентрация ингибитора в продуктах взрыва (ПВ) определяется его процентным содержанием в составе, а скорость инициирования цепей реакции в МВС – удельной теплотой взрыва ВВ Q_v . Учитывая это, выделим три фактора, характеризующих энергетическое и ингибирующее действия ПВВ и соли на МВС при взрыве заряда. Это H_2 – теплосодержание, приходящееся на 1 моль газообразных продуктов взрыва ($H_2 = Q_v / n_2$, где n_2 – число молей газообразных продуктов взрыва), n_u – число молей ингибитора и ε – удельное содержание ингибитора в ВВ. В опытном штреке в канале мортиры без забойки при прямом инициировании были определены предельные заряды классических ПВВ (табл. 4.1), а методами корреляционного анализа получили эмпирическое уравнение, связывающее предельный заряд ПВВ с вышеупомянутыми факторами:

$$M_{np} = 87509,92 \left[\frac{H_2(1-\varepsilon)^{0,5}}{n_u} \right]^{-1,7546}, \text{ г.} \quad (4.4)$$

Это уравнение получено для ПВВ, содержащих NaCl как ингибитор, что позволяет исследовать ингибирующее действие на МВС других солей. Введем в уравнение коэффициент – K_u , учитывающий изменение активности любой соли-ингибитора относительно NaCl. Приняв для NaCl $K_u = 1$, получим уравнение:

$$K_u = \frac{H_2(1-\varepsilon)^{0,5}}{n_u(87509,92 / M_{np})^{0,57}}. \quad (4.5)$$

Таким образом, рассчитав для любого ингибитора коэффициент K_u , можно сделать вывод: если $K_u > 1$, то соль обладает более сильным ингибирующим действием на МВС, чем NaCl, если $K_u < 1$ – она менее эффективна. Сначала были исследованы ионообменные ПВВ, которые, как и классические, в качестве соли-ингибитора в продуктах взрыва содержали хлористый натрий. Результаты испыта-

Таблица 4.1

Результаты испытаний классических ПВВ в опытном штреке при взрывании в канальной мортире

№ пп	ПВВ	Удельная теплота взрыва, Q_v , кДж/кг	Число га- зообраз- ных ПВ, n_g , моль/кг	Теплосо- держание, H_g , кДж/моль	Предельный заряд ПВВ в МВС, $M_{пр}$, г
1	2	3	4	5	6
1.	Аммонит АП-5ЖВ	3794,9	35,13	108,02	~ 95
2.	Аммонит ПЖВ-20	3426,7	32,00	107,05	~ 200
3.	Аммонит ПЖВ-30	2999,1	27,97	107,22	~ 400
4.	Аммонит ПЖВ-40	2570,6	23,97	107,22	~ 1000
5.	Аммосо́ль	2543,9	26,65	94,45	~ 1000
6.	ПВВ Одибера № 1	2669,4	24,46	109,11	~ 1000
7.	ПВВ Одибера № 2	2953,9	28,84	102,43	~ 879
8.	Опытн. обр. АНГ-16	2548,2	26,83	94,98	~ 1000
9.	Опытн. обр. АНГ-17	2574,8	26,85	95,9	~ 1000
10.	Опытн. обр. АНГ-18	2426,9	24,715	98,2	~ 1000
11.	Опытн. обр. 199с	2344,8	18,37	127,6	~ 800
12.	Опытн. обр. 177с	2077,3	22,9	90,7	~ 1400
13.	Славит (Чехия)	2861,2	28,4	100,75	~ 880
14.	Юнибел (Англия)	2726,8	26,24	103,92	~ 850
15.	Юнифракс (Англия)	2803,0	28,2	99,4	~ 795

ний этих ПВВ приведены в табл. 4.2. Из результатов видно, что соль NaCl, образующаяся в продуктах взрыва ионообменного ПВВ по реакции между солями $\text{NaNO}_3 - \text{NH}_4\text{Cl}$, по своему ингибирующему действию на МВС ($K_u \approx 1,511$) значительно отличается от поваренной соли, введенной в состав классического ПВВ. Ингибирующее действие более сильное, так как соль из ионообменной пары образуется при взрыве в ультрадисперсном виде. Затем исследовали классические ПВВ, содержащие добавки различных солей-ингибиторов: KCl, NaCl, NaBr, NH_4Cl , SiO_2 и CaCO_3 . Результаты испытаний этих ПВВ приведены в табл. 4.3.

В МВС испытали и ионообменные ПВВ, содержащие в составах разные обменные пары солей: $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 - \text{NH}_4\text{Cl}$, $\text{NaNO}_3 - (\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$, $\text{CaCO}_3 - \text{NH}_4\text{Cl}$, $\text{KNO}_3 - \text{NH}_4\text{Cl}$, у которых также определили предельные заряды (табл. 4.4).

Исследования показали, что ингибитор, образующийся по реакции между обменными солями, имеет химическую активность, отличающуюся от активности NaCl. Так, CaCl_2 активнее хлористого натрия в среднем в 2,18 раза, Na_3PO_4 – примерно в 3,626 раза, а активность KCl (1,003) и NaCl (1,0) практически равная. Установлено, что ингибирующее действие солей на МВС при взрыве ПВВ зависит от физико-химических свойств соли и ее химической природы. Влияние ингибитора на кинетику цепной реакции окисления метана обусловлено рекомбинацией радикалов на поверхности кристаллов соли. В результате увеличиваются общий период индукции цепной реакции и время торможения реакции в МВС. Критическое условие, определяющее ингибирующее действие соли на реакцию окисления метана при воспламенении, можно установить, приравняв возникающий период индукции МВС со временем «жизни» радикалов в реагирующей среде: $\tau_u = t_R$. Тогда:

$$\frac{\tau_u}{t_R} = \frac{f_c n_u}{[R]^\bullet} \quad (4.6)$$

Критическое условие (4.6) позволяет оценить ингибирующее действие солей-ингибиторов при взрыве заряда ПВВ в МВС по соотношению числа молей ингибитора и радикалов, участвующих в реакции. Так как это соотношение влияет на скорость двух конкурирующих процессов – образования активных центров в реагиру-

Таблица 4.2

Результаты исследований ионообменных ПВВ, содержащих в продуктах взрыва NaCl

№ ПП	ПВВ	Ионообменная пара солей	Ингибитор	Параметры ПВВ			Предельный заряд ПВВ, $M_{пр}$, г		K_u по уравнению (4.5)
				H_e , кДж/моль	ϵ , кг/кг	n_u , моль	эксперимент	расчет (4.4)	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	Оп. обр. АНГ-5	$\text{NaNO}_3 - \text{NH}_4\text{Cl}$	NaCl	93,21	0,216	3,551	1000,0	350,6	1,817
2	Оп. обр. АНГ-8	$\text{NaNO}_3 - \text{NH}_4\text{Cl}$	NaCl	97,57	0,321	5,474	1200,0	784,4	1,274
3	Оп. обр. АНГ-6	$\text{NaNO}_3 - \text{NH}_4\text{Cl}$	NaCl	94,65	0,212	3,599	900,0	347,86	1,718
4	Акванал ПХМ-5	NaClO ₄ -карбамид	NaCl	59,27	0,246	3,148	1000	647,68	1,281
5	Юнигекс (Англия)	$\text{NaNO}_3 - \text{NH}_4\text{Cl}$	NaCl	106,66	0,353	5,357	1200,0	673,88	1,389
6	Оп. обр. А1	$\text{NaNO}_3 - \text{NH}_4\text{Cl}$	NaCl	163,71	0,464	5,895	1000	443,34	1,589
7								Среднее	1,511

Таблица 4.3

Результаты исследований классических ПВВ, содержащих в составе различные соли

№ ПП	ПВВ	Инертная соль	Ингибитор	Параметры ПВВ			Предельный заряд ПВВ, $M_{пр}$, г		K_u по уравнению (4.5)
				H_e , кДж/моль	ϵ , кг/кг	n_u , моль	эксперимент	расчет (4.4)	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	ПЖВ-20	20% NH_4Cl	HCl	82,14	0,0	3,738	100,0	386,84	0,462
2	ПЖВ-30К	30% KCl	KCl	108,26	0,30	4,03	350,0	371,83	0,966
3	ПЖВ-40S	40% SiO ₂	SiO ₂	108,26	0,40	6,655	150,0	1026,37	0,334
4	ПЖВ-20S	20% SiO ₂	SiO ₂	108,26	0,2	3,327	~90,0	236,26	0,576
5	ПЖВ-20У	20% CaCO ₃	CaO	88,03	0,112	2,0	250,0	126,9	1,471
6	ПЖВ-20Б	20% NaBr	NaBr	108,26	0,2	1,944	100,0	92,03	1,048

ющей среде и их рекомбинацию на поверхности кристаллов ингибитора, то если отношение $f_c n_u / [\dot{R}] \geq 1$, тогда процесс рекомбинации радикалов преобладает над процессом их образования, а если меньше единицы, тогда наоборот. В первом случае при взрыве заряда ПВВ ингибирующее действие соли – преобладающее и процесс воспламенения МВС не возможен, а во втором случае – наоборот, развитие цепной реакции окисления метана более быстрое и вызывает воспламенение МВС. Эти теоретические выводы требовали экспериментальных исследований механизма воспламенения МВС. Были изготовлены оригинальные составы ПВВ, приведенные в табл. 4.5, которые испытывали в опытном штреке МакНИИ в канальной мортире без забойки при обратном способе инициирования заряда. Предохранительные свойства опытных составов ПВВ сравнивали с предохранительными свойствами аммонита Т-19. Результаты испытаний приведены в табл. 4.6.

Аммонит Т-19 и опытный образец № 3 по построению являются классическими ВВ, опытный образец № 2 – ионообменным, а № 1 – смешанным, то есть включает признаки как классических ПВВ, так и ионообменных. С помощью отношения $f_c n_u / [\dot{R}]$ критического условия (4.6) можно учитывать соотношение концентрации ингибитора и активных частиц-радикалов в реагирующей МВС. Все составы ПВВ содержат соль-ингибитор NaCl, следовательно, для нее химическая активность постоянна: $f = const$. В этом случае концентрация ингибитора в продуктах взрыва определяется отношением: n_u / N_c . Более сложно учитывать концентрацию радикалов $[\dot{R}]$ в реагирующей среде, образующейся при действии на МВС продуктов взрыва ПВВ и ударной волны с параметрами, достаточными для возбуждения реакции. В первом приближении общая концентрация радикалов в объеме МВС равна:

$$[\dot{R}] = [\dot{R}_1]_{yв} + [\dot{R}_2]_{ПВ}, \quad (4.7)$$

где $[\dot{R}_1]_{yв}$ – концентрация радикалов, образованных действием ударной волны;

$[\dot{R}_2]_{ПВ}$ – концентрация радикалов в продуктах взрыва ВВ.

Таблица 4.4

Результаты исследований ионообменных ПВВ с различными обменными солями

№ ПП	ПВВ	Обменная пара солей	Ингибитор	Параметры ПВВ			Пределный заряд, $M_{пр}$, Г		K_u по уравнению (4.5)
				H_2 , кДж/моль	ϵ , кг/кг	n_u , моль	эксперимент	расчет (4.4)	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	Оп. обр. 275	$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 - \text{NH}_4\text{Cl}$	CaCl	54,46	0,267	2,43	1400,0	490,75	1,817
2	Угленит 14Ф	$\text{NaNO}_3 - (\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$	Na_3PO_4	120,58	0,341	2,11	1000,0	104,26	3,626
3	Оп. обр. ПФ-6	$\text{CaCO}_3 - \text{NH}_4\text{Cl}$	CaCl_2	85,94	0,0999	0,85	150,0	29,2	2,543
4	Угленит 7у	$\text{KNO}_3 - \text{NH}_4\text{Cl}$	KCl	85,7	0,42	5,644	1200,0	1193,2	1,003

Таблица 4.5

Опытные составы для исследований критических условий воспламенения МВС

№ ПП	Состав ПВВ			Энергетические параметры ПВВ			Детонирующая способность ВВ		Работоспособность относительно аммонита Т-19	
	ТНТ*	АС*	ПХН*	Q_v , кДж/кг	N_{ϵ} , моль/кг	T , °К	D , м/с	$d_{кр}$, мм		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	30,9	-	44,1	25,0	4614,34	15,0	3581,5	3285	10,1	0,902
2	20,0	30,0	50,0	-	3518,6	26,35	2566,0	3682	9,0	0,945
3	40,0	40,0	-	20,0	2896,7	34,38	2038,7	4280	8,0	0,927

* ТНТ – тротил, АС – нитрат аммония, ПХН – перхлорат натрия, $d_{кр}$ – критический диаметр детонации ВВ

Таблица 4.6

Результаты испытаний опытных ПВВ в опытном штреке

№ п/п	ПВВ	Плот- ность ВВ, кг/м ³	Пока- затель полит- ропы	Ско- рость детона- ции, м/с	Давле- ние де- тонации, ГПа	Масса заряда в МВС, кг	
						не воспл.	воспл.
1	2	3	4	5	6	7	8
1.	Аммонит Т-19	1080	2,26	4164	5,573	0,1	0,2
2.	Оп. обр. № 3	1100	2,3	4280	6,106	0,1	0,2
3.	Оп. обр. № 2	1300	2,4	3682	5,184	0,1	0,2
4.	Оп. обр. № 1	1300	2,38	3285	4,150	0,5	0,6

Очевидно, что $[\dot{R}_1]_{\text{вз}}$ зависит от массы заряда и теплоты взрыва ПВВ, а $[\dot{R}_2]_{\text{ПВ}}$ – от состава и температуры продуктов взрыва. Результаты испытаний опытных ПВВ (см. табл. 4.5 и 4.6) показывают, что их детонационные параметры и работоспособность примерно одинаковые, то есть, они не сильно отличаются друг от друга по теплоте взрыва. Следовательно, можно предположить, что при взрыве зарядов этих ПВВ концентрации радикалов в объеме МВС, охваченном ударной волной, будут не сильно отличаться друг от друга, поэтому принимаем $[\dot{R}_1]_{\text{вз}} \approx \text{const}$ и уравнение (4.7) примет вид: $[\dot{R}] = [\dot{R}_2]_{\text{ПВ}} + \text{const}$. В этом случае становится очевидным, что уровень предохранительных свойств ПВВ будет зависеть от соотношения:

$$\frac{n_u}{[\dot{R}_2]_{\text{ПВ}} + \text{const}} \quad (4.8)$$

Понятно, что чем больше это соотношение, тем выше уровень предохранительных свойств ПВВ и больше его предельный заряд в МВС. Для того, чтобы подтвердить этот вывод, был сделан аналитический расчет состава продуктов взрыва

опытных ПВВ с учетом константы равновесия водяного газа и температуры продуктов взрыва (табл. 4.7) и проведены испытания в МВС.

Особую сложность вызывал расчет состава продуктов взрыва опытного образца № 1 с учетом сублимации и возгонки хлористого натрия при детонации. Дело в том, что при температуре выше 2500°K хлористый натрий начинает интенсивно сублимироваться и возгоняться [239], несмотря на высокое давление взрыва заряда ВВ. Для ряда химических соединений в работе [239] были приведены полученные методом Лангмюра экспериментальные данные давления насыщенного пара в зависимости от теплоты возгонки и энергии связи этих соединений. Давление насыщенного пара – P_n для хлористого натрия можно выразить функцией от температуры T :

$$\lg P_n = 4,71 \cdot 10^{-3} T - 8,95. \quad (4.9)$$

Результаты расчета по этому уравнению сведены в табл. 4.7. Оказалось, что энергетические параметры ПВВ № 1 такие, что NaCl при взрыве этого ПВВ полностью переходит в пар. Поэтому был сделан второй расчет параметров этого ПВВ с учетом того, что продукты взрыва содержат NaCl в виде пара. Для проверки надежности такого расчета были использованы результаты исследований по определению работоспособности ПВВ № 1 и № 2 на 10-тонном баллистическом маятнике МакНИИ. Известно, что работоспособность ПВВ на баллистическом маятнике [229] определяется длиной его отклонения, зависящей от удельной энергии взрыва ПВВ и наличия в продуктах взрыва конденсированной фазы, на разгон и выброс которой из канала мортиры затрачивается часть энергии взрыва. Взрывая на баллистическом маятнике заряды одинаковой массы, определяли работоспособность заряда ПВВ относительно эталона. В качестве эталонного ПВВ использовали аммонит Т-19. Поэтому относительная работоспособность опытного ПВВ № 1 рассчитывалась так:

$$A_{\text{отн}} = \frac{A_{\text{№1}}}{A_{\text{T-19}}} = \frac{2811,06}{3452,97(1-0,2)^{0,5}} = 0,91.$$

По экспериментальным данным для ПВВ № 1 $A_{\text{отн}} = 0,902$ (см. табл. 4.5), что очень хорошо согласуется с расчетом. Далее необходимо было сделать расчет давления насыщенного пара NaCl в зарядной полости канала мортиры, в которой взрывали заряды ПВВ № 1. Предполагали, что если давление пара P_n для NaCl будет

больше, чем давление газообразных продуктов взрыва ПВВ в зарядной камере, то пары NaCl будут равномерно смешаны с газообразными продуктами и в таком виде выброшены из канала мортиры. Давление продуктов взрыва – P_{BB} в канале мортиры для ПВВ № 1 определялось по формуле:

$$P_{BB} = P_n \left(\frac{\Delta_{зар}}{\rho_{BB}} \right)^n = 4,15 \cdot 10^9 \left(\frac{0,4284}{1,3} \right)^{2,38} \approx 2,9562 \cdot 10^8 \text{ (Па)},$$

где $\Delta_{зар}$ – плотность заряжения канала мортиры, г/см³.

По уравнению (4.9) находим:

$$\lg P_n = 4,71 \cdot 10^{-3} \cdot T - 8,95 = 4,71 \cdot 10^{-3} \cdot 2688 - 8,95 = 3,7105.$$

Следовательно, давление насыщенного пара NaCl при взрыве равно: $P_n = 5134,3 \text{ атм} = 5,237 \cdot 10^8 \text{ Па}$. Так как $P_n > P_{BB}$, то NaCl при взрыве – это пар. Таким образом, и данный расчет показывает, что NaCl при взрыве заряда ПВВ № 1 в канале мортиры находится в виде пара. Это позволяет конкретизировать дальнейшие исследования.

Переходим к анализу результатов определения предохранительных свойств ПВВ и изучению влияния ингибирующего действия соли-ингибитора на величину предельного заряда. Для обратного способа инициирования заряда ПВВ в канале мортиры получено расчетное уравнение предельного заряда:

$$M_{np} = \frac{87509,92}{\theta_{uo}} \left[\frac{H_z (1 - \varepsilon)^{0,5}}{K_u n_u} \right], \quad (4.10)$$

где θ – коэффициент, учитывающий изменение скорости истечения продуктов взрыва ВВ из канала мортиры при обратном инициировании заряда по сравнению со скоростью при прямом.

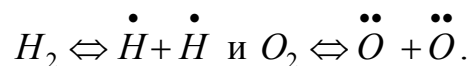
Ранее получено уравнение для расчета концентрации радикалов в продуктах взрыва ПВВ:

$$[R_2]_{ПВВ} = \frac{\left(-1 \pm \sqrt{1 + \frac{8[\mathcal{E}_o]}{K_p}} \right) K_p}{4}, \quad (4.11)$$

где K_p – константа реакции образования радикалов;

$[\mathcal{E}_o]$ – содержание в продуктах взрыва ПВВ кислорода и водорода.

Анализируя данные табл. 4.7, можно утверждать, что элементами, образующими радикалы в продуктах взрыва ПВВ, являются свободные кислород и водород. Молекулы этих элементов в свободном виде при высоких температурах взрыва начинают диссоциировать, образуя активные радикалы-атомы:



По известному составу продуктов взрыва ПВВ и их температуре по уравнению (4.11) определяем содержание радикалов в продуктах взрыва. С точностью до константы определим значение критических условий, определяющих ингибирующее действие соли-ингибитора при взрыве ПВВ. Уравнение (4.10) позволяет определить предельный заряд ПВВ для условий обратного инициирования заряда в канале mortarы. Результаты расчета приведены в табл. 4.8. Результаты исследований показывают, что рост критической величины $n_{ii} / [\dot{R}]$ приводит к возрастанию предельных зарядов ПВВ как при прямом, так и при обратном способе инициирования заряда. Это указывает на явную связь между ингибирующим действием соли NaCl и массой предельного заряда ПВВ. Также установлена четкая связь между количеством радикалов в продуктах взрыва ПВВ и его уровнем предохранительных свойств. Увеличение числа (концентрации) радикалов в продуктах взрыва ПВВ уменьшает его предельный заряд. В целом, соотношение между концентрацией соли-ингибитора и концентрацией радикалов в продуктах взрыва и определяет предельный заряд ПВВ в МВС. Это наглядно видно из табл. 4.8 при сравнении данных расчета и экспериментов. Таким образом, экспериментальным путем доказано влияние на массу предельного заряда ПВВ ингибирующего действия соли-ингибитора при детонации ВВ. Это позволяет аналитическим путем обосновать выбор ингибиторов для ПВВ и способ их ввода в состав.

4.3. Исследование ингибирующего действия солей на МВС при взрыве открытых зарядов ПВВ

Предложенные взгляды на механизм воспламенения МВС ударными волнами

Таблица 4.7

Результаты расчета состава продуктов взрыва ПВВ и их энергетические показатели

№ п/п	№ ПВВ	Кислор. коэфф., $A_{ВВ}$	Состав продуктов взрыва, моль/кг							Q_v , кДж/кг	$T_{ПВ}$, К	N_z , моль/кг	n_u , моль/кг	$\frac{n_u}{N_z}$
			CO ₂	CO	H ₂ O	H ₂	N ₂	O ₂	NaCl (кр)					
1	2	3	4	5	6	7	8	9	11	12	13	14	15	
1	Т-19	0,96	5,1336	0,7254	16,9044	0,4381	8,8805	-	3,419	2237,4	32,082	3,419	0,1066	
2	№ 1	1,005	9,529	-	3,403	-	2,042	0,0265	7,873	3581,5	15,0	7,873	0,525	
3	№ 1	1,005	9,529	-	3,403	-	2,042	0,0265	7,873 (пар)	2688,0	22,874	7,873	0,344	
4	№ 2	1,491	6,167	-	9,703	-	5,072	5,142	4,082	2566,0	26,354	4,082	0,155	
5	№ 3	0,6545	3,6411	8,6939	9,5969	4,8081	7,643	-	3,419	2038,7	34,383	3,419	0,0995	

Таблица 4.8

Результаты расчета критических условий ингибирования МВС и их взаимосвязь с предельным зарядом ПВВ

ПВВ	$\Theta_{ю}$	K_u	$T_{ПВ}$, К	K_p	Предельный заряд ПВВ, $M_{пр}$, кг, расчет по (4.10)		Радикалы в ПВ ПВВ, $[\dot{R}_2]$, г-атом		Значение условия критич. (4.8)	Масса заряда ВВ, кг (эксперимент)	
					прям. инци.	об-рагн. инци.	$[\dot{H}]$	$[\dot{O}]$		воспламеняет	предельный
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Т-19	2,587	1,0	2237,4	$4,375 \cdot 10^{-5}$	0,250	0,097	$3,085 \cdot 10^{-3}$	-	34,55	0,2	0,1
ПВВ № 3	2,587	1,0	2038,7	$5,33 \cdot 10^{-6}$	0,385	0,149	$3,578 \cdot 10^{-3}$	-	27,81	0,2	0,1
ПВВ № 2	2,4285	1,511	2566	$4,229 \cdot 10^{-4}$	0,505	0,208	-	0,0326	4,755	0,2	0,1
ПВВ № 1	2,449	1,511	2688	$1,196 \cdot 10^{-3}$	1,454	0,594	-	$3,693 \cdot 10^{-3}$	93,15	0,6	0,5

и продуктами взрыва заряда ВВ позволяют установить следующую последовательность поэтапного их взаимодействия с МВС (рис. 4.1) при взрыве открытого заряда ПВВ.

Действие на МВС продуктов взрыва заряда ПВВ в непосредственной к нему близости сводится к следующему. По окончании детонации ВВ при разлете продукты его взрыва на границе раздела начнут взаимодействовать со средой, окружающей заряд. Поскольку газообразная МВС является неплотной средой, то граница раздела между продуктами детонации и средой будет двигаться со скоростью (U), близкой к скорости детонации ВВ $U \approx D$ (см. I рис. 4.1), сжимая смесь. С самого начала процесса расширения давление в продуктах взрыва ВВ будет падать. По продуктам взрыва пойдет волна разрежения, а по МВС, сразу вовлекаемой в движение, пойдет ударная волна со скоростью D_y . Образованию ударной волны в МВС предшествует возникновение области ее ударного сжатия, которая появляется в результате огромного различия между величинами давлений продуктов взрыва и исходной среды. Область ударно-сжатой МВС ограничена с одной стороны границей раздела между продуктами взрыва ВВ и средой, а с другой – фронтом образованной в МВС ударной волны (см. II рис. 4.1 и фото рис.4.2). Если с начала разлета граница раздела между продуктами взрыва ВВ и МВС выражена явно, то с течением времени она становится все более размытой вследствие того, что ударная волна в МВС движется со скоростью, большей скорости расширения продуктов взрыва ВВ, то есть $D_y > U$. В результате за фронтом ударной волны возникает поток МВС со скоростью ω (массовая скорость ударно-сжатой МВС). Он «размывает» границу раздела между продуктами взрыва ВВ и средой, по которой движется ударная волна (см. III рис. 4.1). Поэтому в окрестностях границы раздела возникает турбулентная область, которая усиливается вихревым движением потока МВС, сжатого ударной волной. При этом происходит «диффузия» газообразных продуктов взрыва ВВ в МВС за фронтом ударной волны. В конце концов произойдет окончательное смешение расширяющихся газообразных продуктов взрыва ВВ с МВС (см. IV рис. 4.1).

Качественная модель действия ударной волны и продуктов взрыва ВВ на МВС при взрыве открытого заряда ПВВ, указывает на достаточно сложный механизм

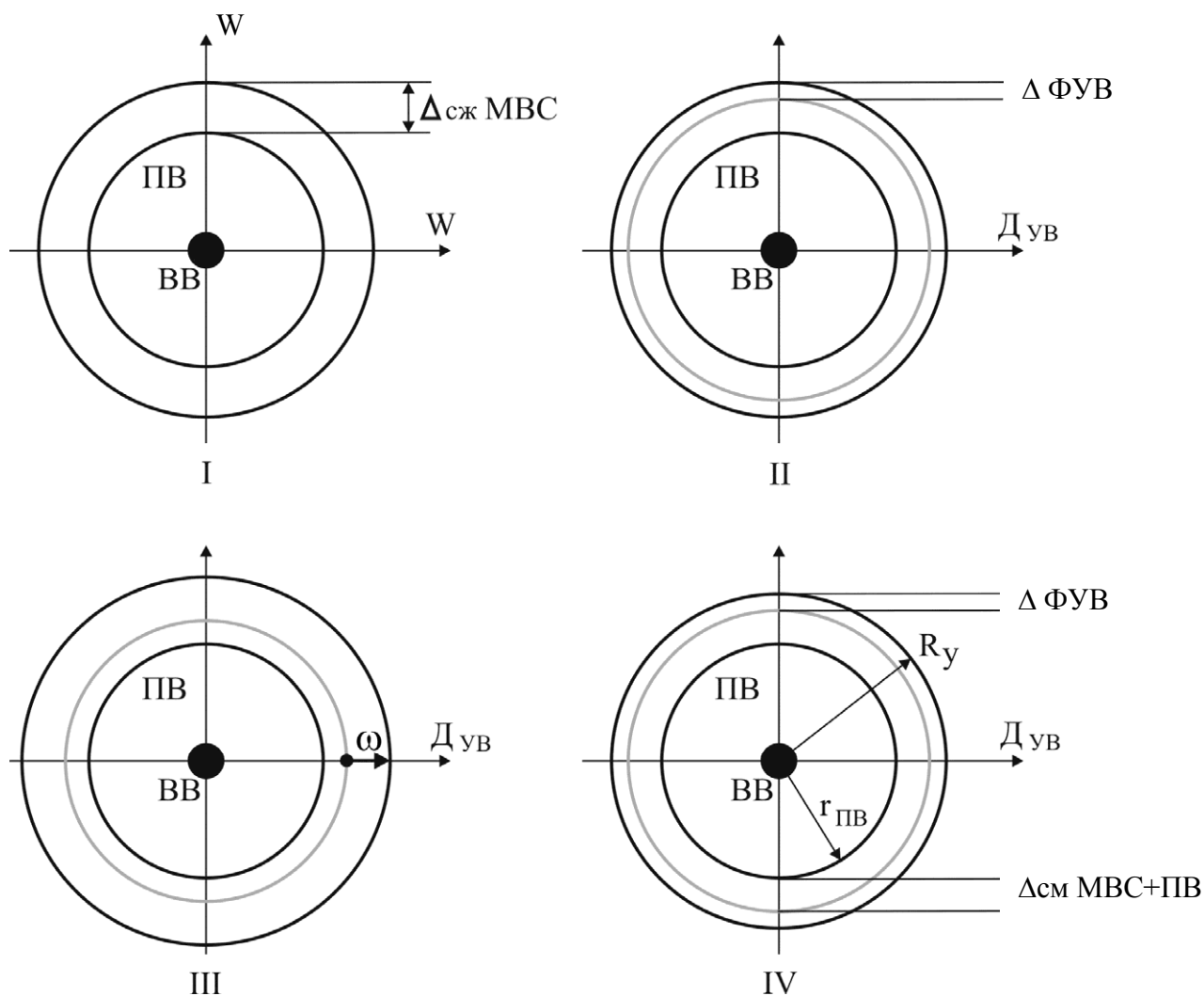


Рис. 4.1. Последовательность взаимодействия продуктов взрыва ВВ с МВС:
 I – первоначальный этап – сжатие МВС продуктами взрыва (ПВ);
 II – этап формирования фронта ударной волны (ФУВ);
 III – этап вовлечения в движение сжатого газового потока за ФУВ;
 IV – этап смешения ПВ и МВС за ФУВ.

Обозначения:

$\Delta_{см}$ – толщина слоя смешения ПВ и МВС;

$\Delta_{сж}$ – толщина слоя сжатия МВС;

$r_{ПВ}$ – радиус сферы, заполненной ПВ;

R_y – радиус действия ударной волны.

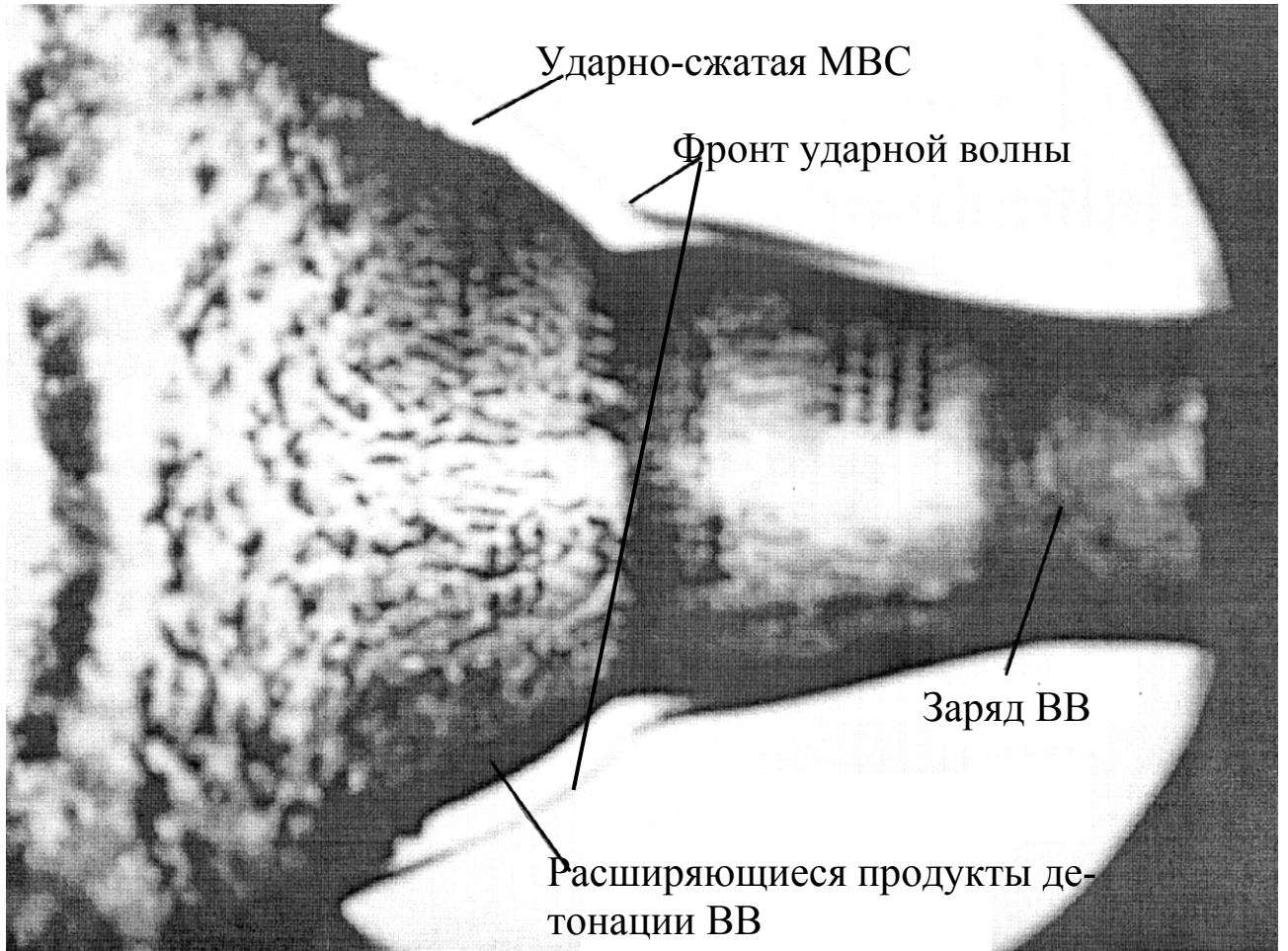


Рис. 4.2. Образование ударной волны и сжатие МВС при детонации открытого заряда ВВ

при взрыве открытого заряда ПВВ указывает на достаточно сложный механизм воспламенения, вызывающий трудности при аналитическом описании и моделировании этого процесса. Тем не менее, в разделе 3 приведены результаты экспериментальных исследований по изучению влияния на параметры воспламенения МВС скорости детонации заряда ПВВ. Они могут быть использованы при исследовании ингибирующего действия солей-ингибиторов на МВС при взрыве открытого заряда ПВВ. Учитывая, что основным видом испытаний открытых зарядов ПВВ при определении их уровня безопасности в МВС в опытном штреке является взрывание в уголковой мортире, будем рассматривать эти условия взрывания открытых зарядов. Принципиальным отличием испытаний открытых зарядов ПВВ в уголковой мортире от условий взрывания свободноподвешенных зарядов в опытном штреке является то, что заряд взрывается на металлическом уголке, расположенном на расстоянии 0,6 м от специальной отражательной стенки. Условия испытаний ограничивают разлет продуктов детонации ПВВ и делают его направленным в сторону отражательной стенки. В результате предельный заряд ПВВ в уголковой мортире существенно меньше, чем у свободно подвешенного заряда в камере штрека. Данные о различии в уровне предохранительных свойств ВВ были получены Б.И. Вайнштейном в опытном штреке МакНИИ [240]. Результаты этих исследований приведены в табл. 4.9. Они показывают, что величина предельного заряда ПВВ в уголковой мортире значительно меньше (в среднем в 2,3 раза), чем у свободно подвешенного в камере штрека заряда. Многие исследователи – Б.Н. Кукиб, В.М. Расторгуев, В.И. Зенин и другие этот факт объясняют действием на МВС отраженных от граней уголка и стенки ударных волн. При этом считают, что факт ингибирования МВС солями-ингибиторами при взрыве ПВВ просто отсутствует. Такой подход сложился в результате исследований В.М. Расторгуева и Б.И. Вайнштейна [241] при взрывании в МВС открытых зарядов модельных составов ПВВ с различными инертными солями в их составе. Результаты этих исследований обобщены и представлены в табл. 4.10.

Испытания свободно подвешенных зарядов ПВВ проводили в 12%-ной и 11%-ной МВС, так как в 9,5%-ной МВС заряды этих ПВВ массой менее 25,0 г вызывали ее воспламенение. Учитывая полученные результаты, был сделан вывод о том, что

Таблица 4.9

Результаты испытаний зарядов ВВ в опытном штреке при их взрывании в
уголковой мортире и в свободно подвешенном состоянии

ВВ	Условия взрыва- ния заряда	Воспламеняющий МВС заряд ВВ	Масса- заряда ВВ, кг	Отношение масс зарядов ВВ
Угленит Э-6	- своб. подвеш.	m_{50}	0,440	2,28
	- уголк. мортира	m_{50}	0,193	
Угленит 7У	- своб. подвеш.	предельный	1,0	2,26
	- уголк. мортира	предельный	0,442	
НИИТ-2	- своб. подвеш.	m_{50}	0,55	2,20
	- уголк. мортира	m_{50}	0,25	
Опытные об- разцы ПВВ:				
- ПЖВ-70	- своб. подвеш.	m_{50}	0,675	2,87
	- уголк. мортира	m_{50}	0,235	
- обр. № 1	- своб. подвеш.	m_{50}	1,6	1,60
	- уголк. мортира	m_{50}	1,0	
- обр. № 2	- своб. подвеш.	m_{50}	0,45	2,57
	- уголк. мортира	m_{50}	0,175	
- обр. № 3	- своб. подвеш.	m_{50}	0,925	2,64
	- уголк. мортира	m_{50}	0,350	
- обр. № 5	- своб. подвеш.	m_{50}	0,775	1,94
	- уголк. мортира	m_{50}	0,400	
				Среднее 2,3

Таблица 4.10

Результаты испытаний открытых зарядов ПВВ в МВС

Показатели ПВВ (смесь аммотола – 80%, пламегаситель – 20%)	Концентрация метана в опытном штреке					
	C = 12,0 %				C = 11,0 %	
	соли-пламегасители				соли-пламегасители	
	NH ₄ Cl	NaCl	SiO ₂	KCl	NH ₄ Cl	NaCl
m_{50} , г	170,0	156,0	146,0	140	110,0	120,0
D , м/с	~ 3600	3800	3800	3800	3600	3800
$\rho_{ВВ}$, кг/м ³	1050	1070	1050	1100	1050	1070

эти различные по химической природе соли не оказывают ингибирующего действия на МВС при испытаниях ПВВ. Если действие солей охарактеризовать массой заряда ВВ, которая дает 50% воспламенений МВС, то получается, что фактической разницы между зарядами ПВВ с различными солями-ингибиторами при взрыве ВВ не наблюдается. Поэтому при взрыве открытых зарядов ПВВ влияние ингибирующего действия соли на МВС решили не учитывать. Результатов более углубленных исследований ингибирующего действия солей-ингибиторов при взрыве открытых зарядов ПВВ на МВС приведено не было.

Возникает парадоксальная ситуация в отношении ингибирующего действия солей, входящих в состав ПВВ, при их взрыве в МВС. В одном случае при взрывании зарядов ПВВ в канале mortar соли-ингибиторы оказывают сильное ингибирующее действие на МВС и повышают уровень предохранительных свойств ВВ. В другом – при взрыве открытых зарядов ПВВ в угловой mortar ингибирующим действием солей можно пренебречь, так как уровень предохранительных свойств ВВ при этом не зависит от химической природы соли-ингибитора.

Такой вывод указывает на существование аномального эффекта при ингибировании МВС солями-ингибиторами при детонации открытых зарядов ВВ. Также необходимо отметить, что при взрывании открытых зарядов в угловой mortar наличие уголка и отражательной стенки может исказить результат ингибирования МВС продуктами взрыва ПВВ. В частности, высказывались предположения о силь-

ных отраженных от стенки уголковой мортиры ударных волнах.

В работе [242] установлен факт, что при взрыве открытого заряда ПВВ в уголковой мортире воспламенение МВС происходит раньше, чем ударная волна достигнет отражательной стенки. На воспламенение МВС при взрыве заряда ПВВ отражательная стенка может влиять только в том случае, если ее приблизить к уголку так, чтобы зона воспламенения метана совпадала с зоной регулярного отражения ударных волн от стенки. Для этого расстояние от уголка до стенки должно быть уменьшено до 0,4...0,5 м. Расстояние 0,6 м практически равно критическому радиусу сферической детонации МВС при ее иницировании ударной волной. Таким образом, чтобы установить влияние ингибирующего действия солей на МВС при взрыве заряда в уголковой мортире, необходимо установить, как сам уголок влияет на уровень предохранительных свойств ПВВ. Почему в уголковой мортире предельный заряд ПВВ снижается примерно в 2,3 раза по сравнению со свободно подвешенным зарядом. При исследовании этой проблемы были приняты во внимание условия детонации заряда ПВВ в стальном уголке и критические условия, которые должны выполняться при иницировании детонации МВС открытым зарядом ВВ. Было установлено [243], что скорость детонации ПВВ может изменяться в зависимости от условий взрывания зарядов. Так, исследования двух партий угленита Э-6 показали, что скорость детонации открытых зарядов угленита Э-6 вне металлического уголка составила 2144 м/с при плотности патронирования заряда ВВ 1250 кг/м³, а в уголке тот же угленит давал скорость детонации 2416 м/с, что существенно больше. Аналогичный результат был получен и для эталонного ПВВ аммонитного типа, состоящего из смеси 43% амматола 80/20 и 57% соли хлористого натрия. Это ПВВ имело скорость детонации открытых зарядов 2372 м/с при плотности патронирования ВВ 1350 кг/м³, а в уголке те же патроны имели скорость детонации 2829 м/с.

Таким образом, было доказано, что в металлическом уголке заряд ПВВ имеет существенно большую скорость детонации ВВ, чем у открытых и уложенных на поверхность зарядов. Этот эффект, по-видимому связан с тем, что при детонации заряда отраженные от граней уголка ударные волны воздействуют на процесс детонации

ВВ, увеличивая параметры детонационной волны. Увеличение скорости детонации заряда ПВВ в уголке, скорее всего, и приводит к снижению его предельного заряда в МВС. Этот вывод был проверен экспериментально в опытном штреке МакНИИ при испытании угленита Э-6 и эталонного ПВВ. Исследования ПВВ методом «вверх-вниз» в уголковой мортире проводил инж. В.С. Казачков. Результаты опытов представлены в табл. 4.11. По этим данным для уровня достоверности испытаний 95% были рассчитаны массы m_{50} и M_{np} зарядов ПВВ в МВС. Статистическая достоверность этих результатов не вызывает сомнений. Поэтому их можно использовать для сравнения предельных зарядов этих ПВВ с критическими зарядами, которые необходимы для инициирования детонации МВС.

В уравнении (3.74) установлен предельный заряд ПВВ:

$$M_{np} = \frac{5,4964 \cdot 10^9}{N_D} - 0,2471, \text{ кг}, \quad (4.12)$$

для инициирования же детонации МВС заряд ВВ должен иметь большую массу. Используя формулы (3.75), (3.76) и данные табл. 4.9, преобразуем уравнение (4.12) в уравнение для расчета предельного заряда ПВВ в МВС для уголковой мортиры:

$$M_{np} = \frac{5,1714 \cdot 10^{15}}{\rho_{ВВ}^{0,5015} D^{4,5045}}, \text{ кг}. \quad (4.13)$$

Сравним экспериментальные предельные заряды ПВВ в МВС с расчетными по уравнениям (4.12) и (4.13), отвечающими критическим условиям инициирования детонации в МВС (табл. 4.12). Результаты сравнения показывают, что эти предельные заряды практически равны. Относительная ошибка между ними не превышает 10%, что соответствует точности определения массы предельного заряда ПВВ в опытном штреке. Следовательно, металлический уголок влияет на скорость детонации ПВВ и повышает мощность детонационной волны, в результате чего предельный заряд ПВВ в МВС снижается. Соответственно, роль соли-ингибитора и ее ингибирующее действие на МВС при взрыве заряда в уголковой мортире наглядно не выявляются. Исследования в разделе 3 позволили установить зависимость массы предельного заряда ПВВ от мощности детонационной волны (уравнение 3.74). На рис. 4.3 приведен

Таблица 4.11

Результаты испытаний угленита Э-6 и опытного ПВВ в уголковой мортире

Масса заряда, $m_{BB,Г}$	$\lg m_{BB}$	Кол-во опытов с воспламенением МВС	Кол-во опытов без воспламенения МВС	Номер уровня, i	n_i	in_i	$i^2 n_i$
Угленит Э-6 ($m_{50} = 255,3$ г; $M_{np} = 153,2$ г)							
152	2,18184	0	1	$i = 0$	1	0	0
185	2,26717	1	6	$i = 1$	6	6	6
225	2,35218	6	7	$i = 2$	7	14	28
274	2,43775	6	11	$i = 3$	11	33	99
334	2,52375	11	16	$i = 4$	16	64	256
406	2,60853	16	5	$i = 5$	5	25	125
493	2,69285	8	1	$i = 6$	1	6	36
Эталонное ПВВ ($m_{50} = 172,6$ г; $M_{np} = 103,6$ г)							
103	2,01284	0	2	$i = 0$	2	0	0
125	2,09691	1	6	$i = 1$	6	6	6
152	2,18184	6	8	$i = 2$	8	16	32
185	2,26717	8	7	$i = 3$	7	21	63
225	2,35218	8	2	$i = 4$	2	8	16
274	2,43775	2	5	$i = 5$	5	25	125
334	2,52375	6	5	$i = 6$	5	30	180
406	2,60853	6	1	$i = 7$	1	7	7
Всего		37	36			113	429

Таблица 4.12

Результаты испытаний ПВВ в МВС в уголковогой мортире

ПВВ	$\rho_{ВВ}$, кг/м ³	D , м/с	M_{np} расчетн., кг		M_{np} экспе- рим., кг
			по (4.12)	по (4.13)	
Угленит Э-6	1250	2144	-	0,143	0,153
Угленит Э-6	1250	2461	0,176	-	0,153
Эталонное ПВВ	1350	2372	-	0,090	0,103
Эталонное ПВВ	1350	2829	0,091	-	0,103

график зависимости массы предельного заряда в уголковогой мортире от мощности детонационной волны ПВВ.

Характерная точка этой зависимости определяется пересечением графика с осью абсцисс, когда $M_{np} = 0$, а мощность детонационной волны достигает значения, при котором заряд ПВВ теряет антигризутность в МВС. Эту точку можно назвать критической, при которой ПВВ теряют свои предохранительные свойства. Получается, что при некоторой мощности детонационной волны, не меньшей, чем в критической точке зависимости (3.74), предохранительные свойства ПВВ, содержащих соль-ингибитор, отсутствуют. В свою очередь, при меньших значениях мощности детонационной волны предохранительные свойства ПВВ будут проявляться и чем ниже будет их мощность детонации, тем больше предельный заряд. Этот вывод требовал доказательства, так как возникли два принципиальных вопроса: проявляется ли в МВС ингибирующее действие солей-ингибиторов, входящих в состав ПВВ, при взрыве открытых зарядов в уголковогой мортире и влияет ли величина мощности детонационной волны заряда ПВВ на способность соли-ингибитора тормозить реакцию окисления метана.

Для исследований использовали известные промышленные ПВВ и изготовленные опытные образцы. Их технические показатели и результаты испытаний в опытном штреке МакНИИ приведены в табл. 4.13.

Найдем из уравнения (4.12), приравняв его нулю, критическое значение мощности детонационной волны в заряде ПВВ:

M_{np} , кг

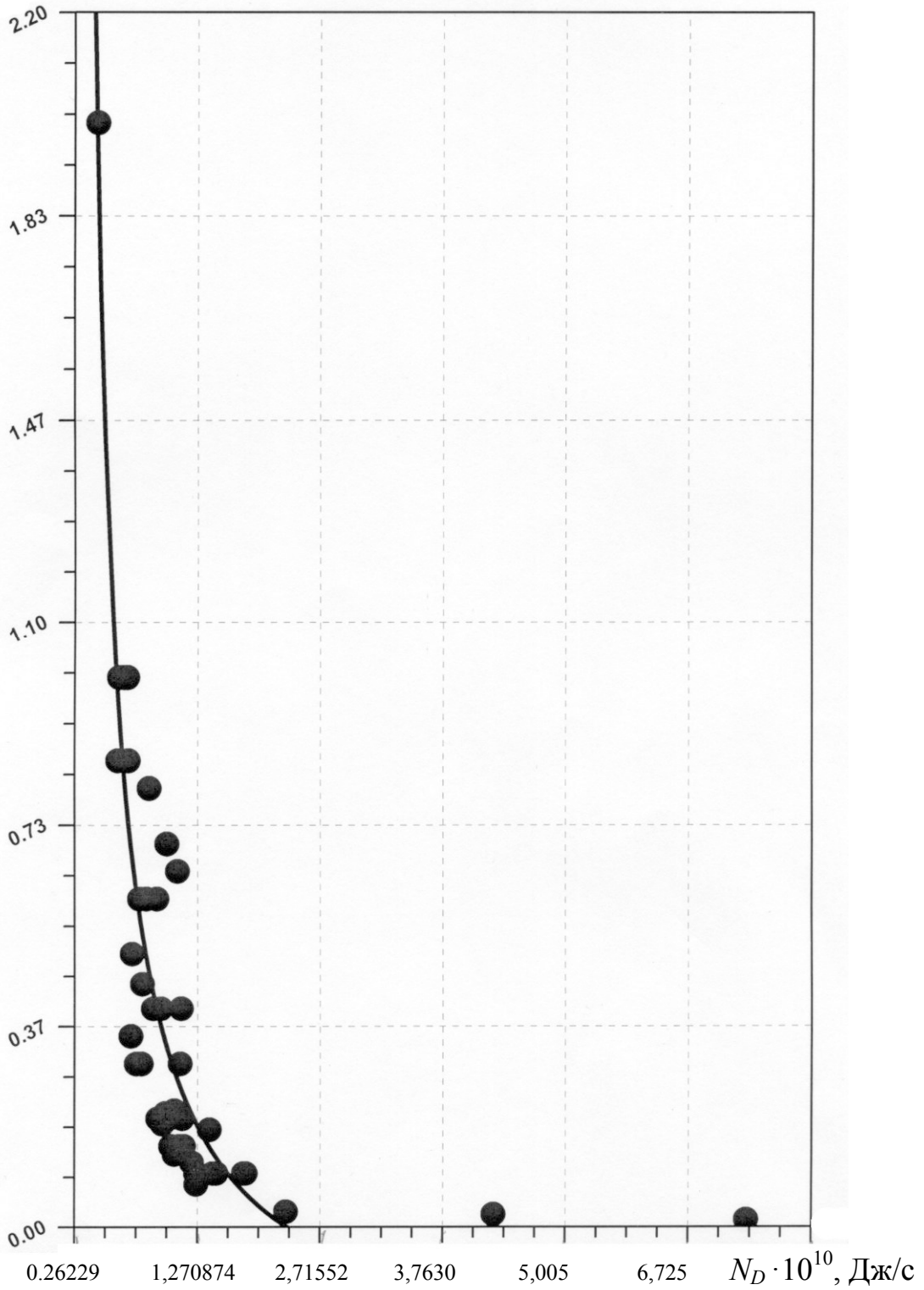


Рис. 4.3. Зависимость массы предельного заряда в уголковой мортире от мощности детонационной волны ПВВ: $M_{np} = \varphi(N_D)$

Таблица 4.13

Результаты испытаний зарядов ПВВ в МВС при взрывании в уголковой мортире

№ пп	ПВВ	Содержание ингибитора в ПВВ, %	Диаметр заряда, d_3 , мм	Плотность ВВ, $\rho_{ВВ}$, кг/м ³	Скорость детонации, D , м/с	Предельный заряд, $M_{пр}$, г		Мощность детонационной волны, $N_D \cdot 10^9$, Дж/с	Мощность ряда в МВС, $N_{зар} \cdot 10^9$, Дж/с	$\frac{N_D}{N_{зар}}$	$\frac{N_D}{N_{кр}}$	$\frac{N_{зар}}{N_{кр}}$
						экспериментальный	расчетный по (4.13)					
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	Аммонит -1	0,0	36	1186	2120	< 50	155,0	11,4965	4,168	2,758	0,517	0,187
2	Аммонит -2	0,0	36	1200	1860	< 50	280,0	7,856	2,826	2,780	0,353	0,127
3	НПЦ + SiO ₂	90,0	32	1214	1675	< 50	441,0	4,586	2,072	2,213	0,206	0,093
4	Аммонит + SiO ₂	58,0	36	1300	2874	< 75	37,5	31,396	14,03	2,238	1,412	0,631
5	Бикарбит (Германия)	85,0	30	1200	1890	1200,0	260,0	5,724	24,62	0,232	0,257	1,107
6	Угленит Н (СССР)	65,0	36	1300	1550	2000,0	604,0	4,925	19,6	0,251	0,221	0,881
7	Состав 1Г	20,0	36	1150	2301	110,0	108,0	14,25	8,919	1,598	0,641	0,401
8	ПЖВ-65	65,0	36	1200	2256	120,0	116,0	14,02	9,035	1,551	0,630	0,406
9	Угленит №5	75,0	36	1220	1760	500,0	352,0	6,766	11,16	0,606	0,304	0,502

$$N_{кр} = \frac{5,4964 \cdot 10^9}{0,2471} = 2,224 \cdot 10^{10} \text{ (Дж/с)},$$

а мощность заряда ПВВ при детонации определим по уравнению:

$$N_{зар} = 0,30249 m_{ВВ}^{0,666} \rho_{ВВ}^{0,334} D^3. \quad (4.14)$$

Мощность детонационной волны, движущейся по заряду ПВВ, найдем по уже известной формуле:

$$N_D = \frac{\pi}{4} \rho_{ВВ} d_3^2 D^3. \quad (4.15)$$

Анализ результатов исследований, приведенных в табл. 4.13, показал следующее. Отношение $N_D/N_{кр}$ характеризует, как изменяется уровень предохранительных свойств у зарядов ПВВ. С увеличением этого отношения масса предельного заряда ПВВ уменьшается, а при снижении возрастает. Методы статистического анализа данных параметров показывают сильную взаимосвязь: $r = 0,944$. Оценим связь

между отношениями. Если $\frac{N_D}{N_{кр}} > \frac{N_{зар}}{N_{кр}}$, то ПВВ имеет низкий уровень предохранительных свойств, а если наоборот, то уровень предохранительных свойств может быть высоким, несмотря на то, что $N_{зар} > N_D$. Этот факт иначе, как проявлением

ингибирования взрывной реакции в МВС солями-ингибиторами, находящимися в продуктах детонации зарядов ПВВ, объяснить нельзя.

Действительно, ПВВ под №№ 5, 6 и 9 (табл. 4.13) имеют высокий уровень предохранительных свойств только за счет содержания в каждом из них солей-ингибиторов – хлористого натрия и гидрокарбоната натрия. Другие ПВВ при равной детонационной способности имеют сравнительно невысокий уровень предохранительных свойств, так как в них нет солей-ингибиторов (составы №№ 1, 2, 3, 4). При более высокой детонационной способности ВВ в силу каких-то факторов действия на соль она неэффективно тормозит взрывную реакцию в МВС (составы № 7 и № 8). Таким образом, при взрыве открытых зарядов ПВВ в уголкового мортаре ингибирование МВС солью-ингибитором, содержащейся в составе ВВ, происходит только при определенных условиях, которые связаны с мощностью детонации, определяе-

мой параметрами во фронте детонационной волны. При определенной мощности детонации ВВ соль-ингибитор теряет способность тормозить химическую взрывную реакцию в МВС. Это явление получило название дезрекомбинационного эффекта и возникает у солей-ингибиторов при детонации ПВВ.

4.4. Исследование взаимодействия кристаллов соли-ингибитора с продуктами детонации ПВВ

Экспериментально установлено, что дезрекомбинационный эффект возникает у соли-ингибитора в тот момент, когда на ее кристаллы действует детонационная волна ПВВ. Следовательно, дезрекомбинационный эффект – это аномальное явление, когда ингибитор не может тормозить реакцию окисления метана при взрыве заряда ВВ и находится в экстремальном состоянии, вызванном действием на кристаллы соли мощной детонационной волны [244, 245, 246].

Экстремальное состояние ингибитора возникает в результате его сильного сжатия. При сильном сжатии конденсированного вещества в нем развивается колоссальное внутреннее давление за счет отталкивания атомов в молекулах вещества друг от друга. Существование этого давления нетеплового происхождения совершенно не свойственного газам и определяет основные особенности поведения твердых тел при сжатии их ударными волнами [247].

При сжатии тела преобладающую роль играют силы отталкивания, которые резко возрастают по мере сближения атомов в кристаллической решетке. Поэтому при сжатии вещества, когда его объем становится меньше нулевого (начального), его потенциальная энергия $E_x(V)$ быстро увеличивается [247]. Упругое давление холодного сжатия вещества – P_x связано с потенциальной энергией соотношением:

$$P_x = -\frac{dE_x(V)}{dV}, \quad (4.16)$$

которое имеет естественный механический смысл (приращение энергии равно работе сжатия) и может рассматриваться как уравнение адиабаты холодного сжатия вещества. Давление ударного сжатия – P_I можно представить в виде функции ударной

адиабаты конденсированного вещества:

$$P_1 = F(\rho_o, P_o, \rho_1),$$

где ρ_o и ρ_1 – начальная плотность и плотность ударно сжатого вещества;

P_o – давление вещества при начальных условиях.

Ударная адиабата может быть найдена в том случае, когда термодинамические связи системы определяются изменением энергии E по обе стороны разрыва, то есть $E = E(\rho, P)$. Запишем законы сохранения массы и импульса в веществе, по которому распространяется ударная волна со скоростью D , в виде [247]:

$$\frac{\rho_1}{\rho_o} = \frac{D}{D-U}, \quad (4.17)$$

$$P_1 = \rho_o D U \quad (4.18)$$

и исключим из этих уравнений массовую скорость потока вещества за фронтом ударной волны – U . Тогда получим:

$$\rho_1 = \rho_o D^2 (1 - \rho_o / \rho_1). \quad (4.19)$$

Запишем закон сохранения энергии в виде уравнения изменения кинетической энергии вещества по обе стороны разрыва:

$$E_1(P_1 V_1) - E_o(P_o V_o) = \frac{1}{2}(P_1 + P_o)(V_o - V_1), \quad (4.20)$$

где V_o и V_1 – начальный удельный объем и удельный объем ударно сжатого вещества.

По аналогии с соотношением, связывающим начальные и конечные давление и плотность при адиабатическом ударном сжатии вещества, выражение (4.20) носит название ударной адиабаты.

Поскольку даже в очень слабых ударных волнах, распространяющихся по конденсированному веществу, давление во фронте P_1 измеряется тысячами атмосфер, начальным атмосферным давлением всегда можно пренебречь ($P_o = 0$). Тогда уравнение ударной адиабаты для конденсированного вещества имеет вид:

$$E_1 - E_o = \frac{1}{2} P_1 (V_o - V_1). \quad (4.21)$$

Удобно выразить ударную адиабату конденсированного вещества в аналити-

ческом виде, воспользовавшись экспериментальными данными или эмпирической зависимостью. Установлено [247, 248], что в широком диапазоне амплитуд ударных волн в веществе зависимость между скоростью фронта и массовой скоростью вещества за фронтом (относительно невозмущенного вещества) является линейной:

$$D = A + BU, \quad (4.22)$$

где A и B – эмпирические коэффициенты, полученные в результате обработки опытных данных.

С помощью этой зависимости и уравнений (4.21) и (4.19) получено [247] уравнение ударной адиабаты конденсированного вещества, которое преобразовано к виду:

$$P_1 = \frac{A^2(\rho_1 - \rho_o)\rho_1^2}{\rho_1\rho_o(B-1)^2\left(\frac{B}{B-1} - \frac{\rho_1}{\rho_o}\right)^2}. \quad (4.23)$$

Эта формула позволяет сделать расчет давления ударного сжатия кристаллов ингибитора во фронте детонационной волны ПВВ. Однако значение ρ_1 не известно. Вместе с тем, ПВВ представляют собой смеси бризантных ВВ и солей-ингибиторов МВС и интенсивность их детонационного процесса определяется содержанием и детонационными свойствами сенсibilизатора – активного ВВ. Априори известно, что при детонации вещество (в данном случае ВВ) в детонационной волне сжимается. Поэтому и у ПВВ сжатие вещества во фронте детонации, несомненно, происходит. В этом случае сжатию подвергается как сенсibilизатор, так и находящийся в составе ПВВ ингибитор.

Предположим, что начальное давление сжатия соли-ингибитора – P_u при детонации ПВВ на границе контакта «соль – сенсibilизатор – продукты детонации» можно определить, исходя из соотношения акустической жесткости ВВ и кристалла соли-ингибитора [249]:

$$P_u = K_u P_n, \quad (4.24)$$

где K_u – коэффициент, учитывающий импеданс ВВ и соли-ингибитора, равный

$$K_u = \frac{2}{1 + \frac{\rho_{BB}D}{\rho_u D_u}}, \quad (4.25)$$

ρ_u – плотность соли-ингибитора;

D_u – скорость ударной волны в кристаллах соли-ингибитора.

Подставив K_u в уравнение (4.24), получим:

$$\frac{P_u}{P_n} = \frac{2\rho_u D_u}{\rho_u D_u + \rho_{BB} D}. \quad (4.26)$$

Так как P_u можно найти по уравнению (4.18), преобразуем уравнение (4.26) к виду, позволяющему определить массовую скорость вещества ингибитора за фронтом ударной волны:

$$U_u = \frac{2P_n}{\rho_u D_u + \rho_{BB} D}. \quad (4.27)$$

Подставляем D_u из уравнения (4.22): $U_u = \frac{2P_n}{A\rho_u + B\rho_u U_u + \rho_{BB} D}$ или

$$U_u^2(\rho_u B) + U_u(\rho_u A + \rho_{BB} D) - 2P_n = 0. \quad (4.28)$$

Следовательно,

$$U_u = \frac{-(\rho_u A + \rho_{BB} D) + \sqrt{(\rho_u A + \rho_{BB} D)^2 + 8 \cdot B \rho_u \cdot P_{BB}}}{2\rho_u B}, \text{ м/с}. \quad (4.29)$$

Давление во фронте ударной волны, распространяющейся по кристаллам соли-ингибитора, равно:

$$P_u = \rho_u (AU_u + BU_u^2), \text{ Па}. \quad (4.30)$$

Таким образом, если известно давление детонации ПВВ, содержащего соль-ингибитор с известной ударной адиабатой, то можно рассчитать давление динамического сжатия кристаллов соли во фронте детонационной волны. Поэтому для промышленных ВВ IV...VII классов методом «аквариума» определили их давление детонации P_n . В современных ПВВ в качестве ингибитора применяется, как правило, хлористый натрий NaCl. Ударная адиабата для кристаллов этой соли известна: $D = 3400 + 1,37 U_u$. В табл. 4.14 приведены результаты расчета давления динамического сжатия кристаллов соли-ингибитора во фронте детонационной волны ПВВ.

Необходимо доказать, что именно ударная сжимаемость вещества ингибитора во фронте детонационной волны оказывает влияние на предохранительные свойства

Таблица 4.14

Давление динамического сжатия кристаллов соли-ингибитора во фронте детонационной волны ПВВ

ВВ (класс)	Параметры ВВ и детонационного фронта			Параметры ударного сжатия соли-ингибитора	
	$\rho_{ВВ}$, кг/м ³	D , м/с	P_u , ГПа	U_u , м/с	P_u , ГПа
Аммонит Т-19 (IV)	1050,0	4164,0	5,58	795,67	7,681
Углениты: Э-6 (V),	1220	2224	1,98	357,52	2,990
13П (V),	1220	2350	2,1804	385,49	3,256
НИИТ-2 (V),	1200	2080	1,675	312,33	2,5705
12ЦБ (VI),	1350	1927	1,55	288,1	2,350
Н-12 (VI),	1250	1911	1,51	286,46	2,336
12П (VI),	1250	1948,9	1,348	256,71	2,07066
10П (VI),	1250	1985,0	1,589	297,88	2,439
ионит (VII)	1170	1676,0	1,02	206,5	1,635

ПВВ. Для этого воспользуемся уравнением (4.23) для ударной адиабаты конденсированного вещества, которое характеризует зависимость изменения давления ударно сжатого вещества – ингибитора от его плотности.

Для хлористого натрия закон изменения плотности вещества при ударном сжатии известен, он получен на основании данных работы [250]:

$$\frac{\rho_1}{\rho_0} = \frac{1 + 0,13991318P_1 + 0,0010913227P_1^2}{0,99989104 + 0,0988363702P_1}. \quad (4.31)$$

Подставив сюда величину давления P_1 , которое имеет соль-ингибитор во фронте детонационной волны, находим для ингибитора отношение конечной и начальной плотностей (для $NaCl$ $\rho_0 = 2150$ кг/м³). Далее, пользуясь этим отношением, по уравнению ударной адиабаты (4.23) находим давление ударного сжатия соли ($NaCl$) при детонации ВВ. Если величины P_1 и P_u совпадут, то получается, что сжатие соли-ингибитора при детонации ВВ происходит в детонационном фронте по

ударной адиабате. В табл. 4.15 приведены результаты расчета давления ударного сжатия соли-ингибитора при детонации ВВ и приращения энергии ее кристаллами в результате их сжатия ($E_1 - E_0$). Значения этого приращения сравнили со значениями массы предельных зарядов ПВВ IV...VII классов, которые характеризуют уровень их предохранительных свойств.

Таблица 4.15

Давление ударного сжатия соли-ингибитора во фронте детонации ВВ и приращение энергии ее кристаллами в результате их сжатия

ПВВ, его класс	Параметры ударного сжатия соли-ингибитора во фронте детонации ПВВ				$E_1 - E_0$, кДж/кг	$M_{пр}$, кг
	ρ_1 / ρ_0	$\rho_1 - \rho_0$, г/м ³	P_l , ГПа	P_u , ГПа		
Аммонит Т-19, IV	1,21603	464,46	7,713	7,681	317,34	0,010
Углениты:						
Э-6, V,	1,10243	220,22	3,03	2,99	64,607	0,125-0,15
12ЦБ, V,	1,0833	179,14	2,388	2,35	42,024	0,60-0,65
Ионит, VII	1,06043	129,92	1,666	1,635	21,668	1,20-1,40

Результаты, приведенные в табл. 4.15 показывают, что ударное сжатие вещества ингибитора при детонации ПВВ происходит под действием возникающей в нем ударной волны, которая сжимает кристаллы соли и создает в них огромное внутреннее давление: $P_l \approx P_u$. Величина этого давления, по-видимому, оказывает существенное влияние на уровень предохранительных свойств ПВВ, так как кристаллы соли-ингибитора под действием такого давления становятся не способными тормозить цепные реакции окисления метана кислородом воздуха. Эксперимент показывает, что чем меньше внутреннее давление в кристаллах соли-ингибитора, тем больше уровень предохранительных свойств ПВВ.

4.5. Исследование электромагнитного излучения продуктов детонации ПВВ

Установлено, что при детонации ПВВ на соль-ингибитор действует детонаци-

онная волна, приводящая к запредельному напряжению в кристаллах и временной потере ингибитором способности рекомбинировать радикалы на его поверхности (явление дезрекомбинационного эффекта). Исследование механизма возникновения этого явления и его продолжительности при взрыве заряда имеет большое значение при выборе эффективных солей-ингибиторов для ПВВ и обоснования безопасных параметров взрывных работ в угольных шахтах.

Для определения продолжительности колебания кристаллической решетки соли при динамическом процессе ударного сжатия ингибитора были проведены исследования электромагнитного излучения (ЭМИ) продуктов детонации предохранительных ВВ [251]. Известно, что при взрыве различных конденсированных ВВ возникает электромагнитный импульс [252, 253]. В работе [254] исследовалась зависимость характеристик электромагнитного сигнала при взрыве заряда из литой смеси тротил-гексоген ТГ-50/50 от способа инициирования этого ВВ, его высоты подвеса, массы и формы. В МакНИИ Зенин В.И. и Миц В.Н. первыми исследовали электромагнитное излучение при взрыве промышленных ВВ [255]. Они высказали предположение о том, что наблюдаемый электромагнитный импульс связан с продуктами детонации ВВ и возникающей в воздухе ударной волной. Указывались четыре возможные причины генерации электромагнитного поля при взрыве ВВ.

1. Поляризация проводящей области, возникающая при взрыве ВВ в геомагнитном поле Земли, а также перераспределение зарядов при касании этой области проводящей поверхности Земли.

2. Ударная поляризация конденсированных частиц ВВ, возникающая в процессе детонации ВВ и изменяющаяся за время ее развития.

3. Механизм, связанный с разлетающимися с большой скоростью твердыми частицами, которые образуются при взрыве. Причина эффекта – возникновение зарядов на частицах, так как при их движении относительно газообразных продуктов взрыва ВВ они заряжаются вследствие электрокинетического эффекта.

4. За фронтом ударной волны в воздухе образуется ионизированный слой, в котором наблюдается различная подвижность электронов и ионов, приводящая к их разделению в пространстве. Если в расширении электрических зарядов присутству-

ет асимметрия, то система зарядов эквивалентна эффективному электрическому диполю. Дипольный момент меняется во времени из-за расширения ударной волны и процессов релаксации электрических зарядов. Все это ведет к появлению переменного электрического поля.

Все перечисленные выше гипотезы генерации электромагнитных полей при взрыве ВВ не позволяют в полной мере объяснить особенности электромагнитного импульса, возникающего при взрыве заряда ВВ в воздухе. В результате исследования импульсов электромагнитного излучения, возникающих при взрыве бризантных ВВ (тротил, гексоген), предохранительных ВВ (аммонит № 6ЖВ, детонит, скальный аммонал № 1 и др.) и предохранительных ВВ (аммонит ПЖВ-20, угленит Э-6 и др.), Зенин В.И. и Миц В.Н. [255] установили следующее:

- каждое ВВ имеет свой характерный электромагнитный импульс, возникающий при взрыве, воспроизводимый в параллельных опытах;
- для различных типов ВВ эти импульсы сильно отличаются друг от друга.

Было также установлено, что при взрыве ВВ, в состав которых вводились соли щелочных металлов, используемые в предохранительных ВВ как пламегасители или горючие добавки (алюминий, древесная мука), сигнал ЭМИ резко увеличивается. Так же резко увеличивает ЭМИ при взрыве песчаная оболочка вокруг заряда. Это указывает на то, что не только продукты взрыва ВВ и ударная волна в воздухе способны генерировать электромагнитные импульсы при взрыве.

Невзрывчатые добавки, введенные в состав ВВ, приводят при взрыве к появлению электромагнитных эффектов, не связанных с расширением продуктов взрыва и ударной волны. Известно появление электромагнитного поля радиодиапазона, возникающего при разрушении диэлектрических материалов [256], при распространении волн напряжений в диэлектрических материалах [257] и металлах [258]. Таким образом, при взрыве заряда ВВ возникающее электромагнитное излучение может быть индикатором динамических процессов, происходящих, например, в кристаллах соли-ингибитора, находящейся в продуктах детонации ПВВ. Интерес к изучению электромагнитного излучения кристаллами соли-ингибитора при взрыве ПВВ обусловлен тем, что потеря ингибитором способности рекомбинировать радикалы в

МВС связана с экстремальным состоянием кристаллов соли. При взрыве ПВВ в результате ударной нагрузки подвижность дислокаций в кристаллах соли резко возрастает, они начинают двигаться и переводят кристалл в гидродинамический режим, создающий поверхностные волны Релея или Лява (рис. 4.4). Скорость движения дислокаций определяется действующим напряжением сдвига и силой трения в кристалле. Смещение атомов в узлах решетки и возникновение поверхностных волн делает невозможным протекание реакции рекомбинации радикалов на поверхности кристалла ингибитора, возникает дезрекомбинационный эффект.

Результаты, полученные в работе [259] показывают, что любые перемещения дислокаций в ионных кристаллах (ингибиторы NaCl и KCl) должны сопровождаться электромагнитной эмиссией, интенсивность которой может быть велика даже при умеренной плотности дислокаций на поверхности кристалла. При детонации ПВВ у кристаллов соли происходит возбуждение большого числа дислокационных сегментов, что должно дать значительное электромагнитное излучение. Исследование амплитуды и интенсивности электромагнитного излучения позволит судить о возбужденном состоянии кристаллов соли-ингибитора и, тем самым, установить период времени, при котором рекомбинация радикалов на поверхности кристалла не возможна. С этой целью были использованы результаты исследований, ранее проведенных в МакНИИ В.И. Зениным (техотчет № 22/25, 1962). Схема и методика проведения опытов по изучению сигналов ЭМИ при взрыве промышленных ВВ опубликованы в работе [255]. Рецептуры ВВ, используемых в опытах, были восстановлены, проанализированы по составу ингредиентов и по ним был сделан расчет взрывчатых показателей ВВ. Результаты измерений сигналов ЭМИ при взрыве ВВ и взрывчатые характеристики ВВ приведены в табл. 4.16. Сигналы ЭМИ, полученные в опытах, характеризуются амплитудой – A_u и продолжительностью – τ_3 , которая складывается из времени нарастания сигнала до максимального значения амплитуды – τ_1 и времени затухания сигнала τ_2 . В качестве параметра, характеризующего сигнал ЭМИ при взрыве открытого заряда ВВ, принят импульс излучения: $I_u = A_u(\tau_1 + \tau_2)$, В·мс. Для выяснения влияния на параметры ЭМИ факторов, связанных с взрывом ВВ, был проведен корреляционный анализ, который позволил установить зави-

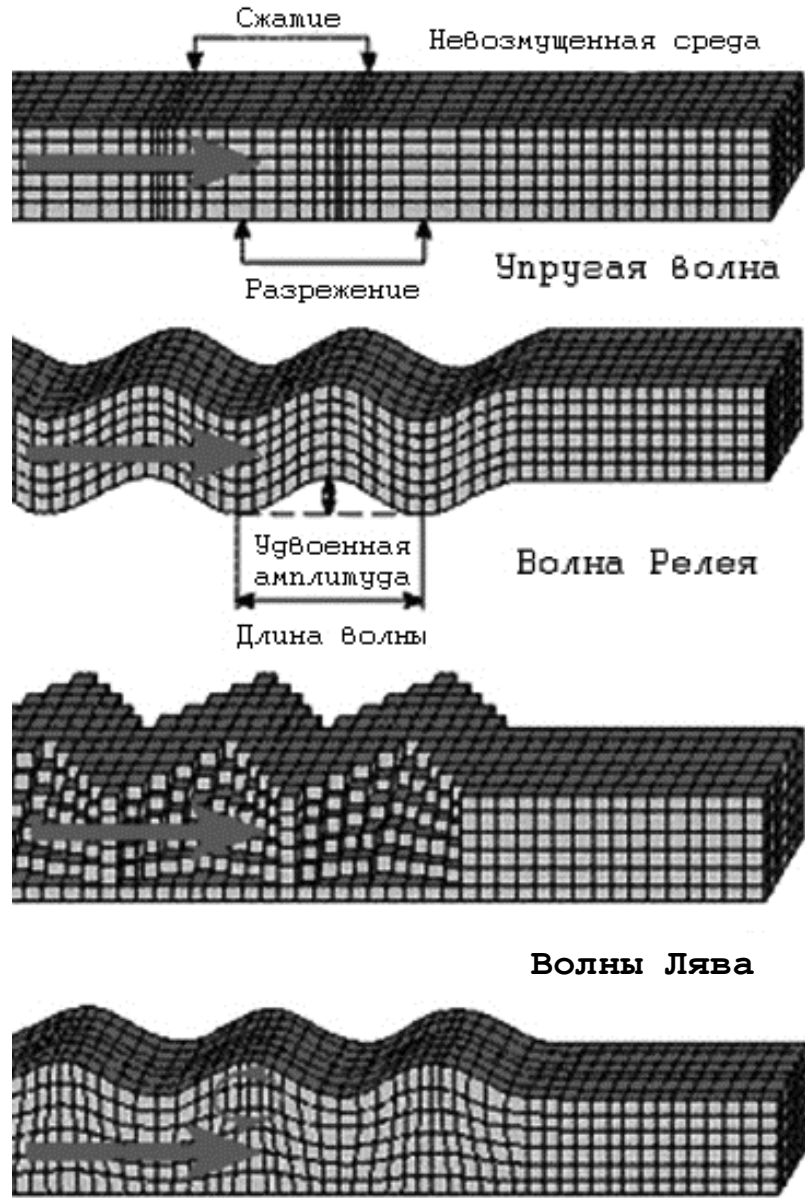


Рис. 4.4. Упругая волна, поверхностные волны Релея и Лява в кристалле

Таблица 4.16

Результаты измерений сигналов ЭМИ при взрыве открытых зарядов ВВ

№ пп	Взрывчатое вещество	d_3 , мм, $\rho_{ВВ}$, г/см ³	Q_v , кДж/кг	Число молей про- дуктов взрыва, моль/кг		ϵ , кг/кг	$T_{ПВ}$, К	A_u , В	τ_9 , мс	I_u , В·мс
				$N_{ПВ}$	n_u					
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	Аммонит № 6ЖВ	Ø 32	4344,3	39,881	-	0,0	2554,8	0,498	1,69	0,842
2	Аммонит ПЖВ-20	Ø 36	3369,4	32,05	3,419	0,2	2181,0	1,202	1,44	1,731
3	Метаниты в предохранительных оболочках зарядов (58,8% ВВ, 41,2% оболочка): № 4 - ядро [*] , - заряд ^{**} , № 5, 6 - заряд ^{**}	Ø 36 Ø 36	3184,34 1872,4 2554,45	31,37 18,444 23,45	3,111 7,352 5,523	0,2 0,5485 0,412	- 2124,0 2555,0	- 7,88 7,65	- 2,22 2,15	- 17,34 16,45
4	Предохранительный динамит Д-3	$\rho = 1,45$ Ø 32	3105,0	27,02	3,7534	0,28	2241,5	26,8	0,42	11,256
5	Угленит Э-6	$\rho = 1,2$ Ø 36	2616,97	24,666	6,661	0,39	1829,2	8,9	1,36	11,57
6	62% аммондинамит	$\rho = 1,45$ Ø 32	5365,3	37,055	-	0,0	3211,2	0,244	1,32	0,27
7	Скальный аммонал № 1	$\rho = 1,5$ Ø 36	5373,33	37,457	0,937	0,0956	3072,6	1,32	1,4	1,85
8	Предохранительный скальный № 10	$\rho = 1,35$ Ø 32	3754,0	31,618	2,681	0,2	2480,4	1,05	1,86	1,953
9	Предохранительный скальный № 11	$\rho = 1,35$ Ø 32	3395,4	29,813	3,3512	0,25	2321,0	3,54	1,85	6,55
10	Детонит 10А	$\rho = 1,1$ Ø 32	5072,3	37,324	0,9745	0,0994	2864,8	0,77	1,92	1,48
11	ТНТ	$\rho = 1,0$ Ø 32	3097,6	41,92	6,537 (графит)	0,078	2336,0	0,17	1,04	0,177
12	Гексоген	$\rho = 1,1$ Ø 32	5563,2	37,113	3,045 (графит)	0,0365	3760,0	0,29	0,95	0,276

* - расчет параметров для ядра заряда; ** - расчет параметров для заряда в оболочке

симости импульса излучения от взрывчатых характеристик ВВ. Были получены эмпирические зависимости

– от энергии q_m взрыва ВВ на моль продуктов взрыва:

$$I_u = I_0 \exp\left[122,2 - \frac{1602,97}{q_m} - 22,7 \ln(q_m)\right], \text{ В}\cdot\text{мс}, \quad /r/ = 0,759, \quad (4.32)$$

$$I_0 = 1 \text{ В}\cdot\text{мс}, \quad q_m = \frac{\rho_{\text{ВВ}} Q_v}{\rho_u n_u + \rho_{\text{ВВ}} N_{\text{ПВ}}}, \text{ кДж/моль};$$

– от среднего давления продуктов взрыва ВВ P_{cp} :

$$I_u = I_0 \exp\left[49,3 - \frac{8664,3}{P_{cp}} - 5,55 \ln(P_{cp})\right], \text{ В}\cdot\text{мс}, \quad /r/ = 0,864, \quad (4.33)$$

$$P_{cp} = \frac{\sum N}{N_{\text{ПВ}}} \rho_{\text{ВВ}} Q_v (1 - \varepsilon), \text{ МПа};$$

– от мощности детонации ВВ N_D :

$$I_u = I_0 \exp\left[58,3 - \frac{34662,92}{N_D} - 4,52 \ln(N_D)\right], \text{ В}\cdot\text{мс}, \quad /r/ = 0,873, \quad (4.34)$$

$$N_D = d_3^2 \rho_{\text{ВВ}} (1 - \varepsilon) Q_v^{1,5}, \text{ кДж/с};$$

– от числа молей ингибитора в 1 кг ВВ n_u :

$$I_u = \frac{15,03153}{1 + 22925,061 \exp(-2,792 n_u)}, \text{ В}\cdot\text{мс}, \quad /r/ = 0,949, \quad (4.35)$$

где $\sum N = N_{\text{ПВ}} + n_u$, моль/кг.

Таким образом, наибольшее влияние на импульс излучения при взрыве заряда ВВ оказывает число молей ингибитора в составе ПВВ. Меньшее влияние оказывают давление взрыва и мощность детонации ВВ. Характерным является то, что именно эти три фактора определяют величину предельного заряда ВВ в МВС, то есть его предохранительные свойства. Это указывает на определенную связь между импульсом излучения при взрыве ПВВ и его уровнем предохранительных свойств. Однако если проанализировать зависимости (4.32), (4.33) и (4.34), показанные на рис. 4.5, то видно, что они имеют характерный максимум излучения. Эти экстремальные значения ЭМИ имеют только те ПВВ, в составе которых достаточно большое содержание соли-ингибитора. Поэтому можно сделать вывод, что наибольшие импульсы из-

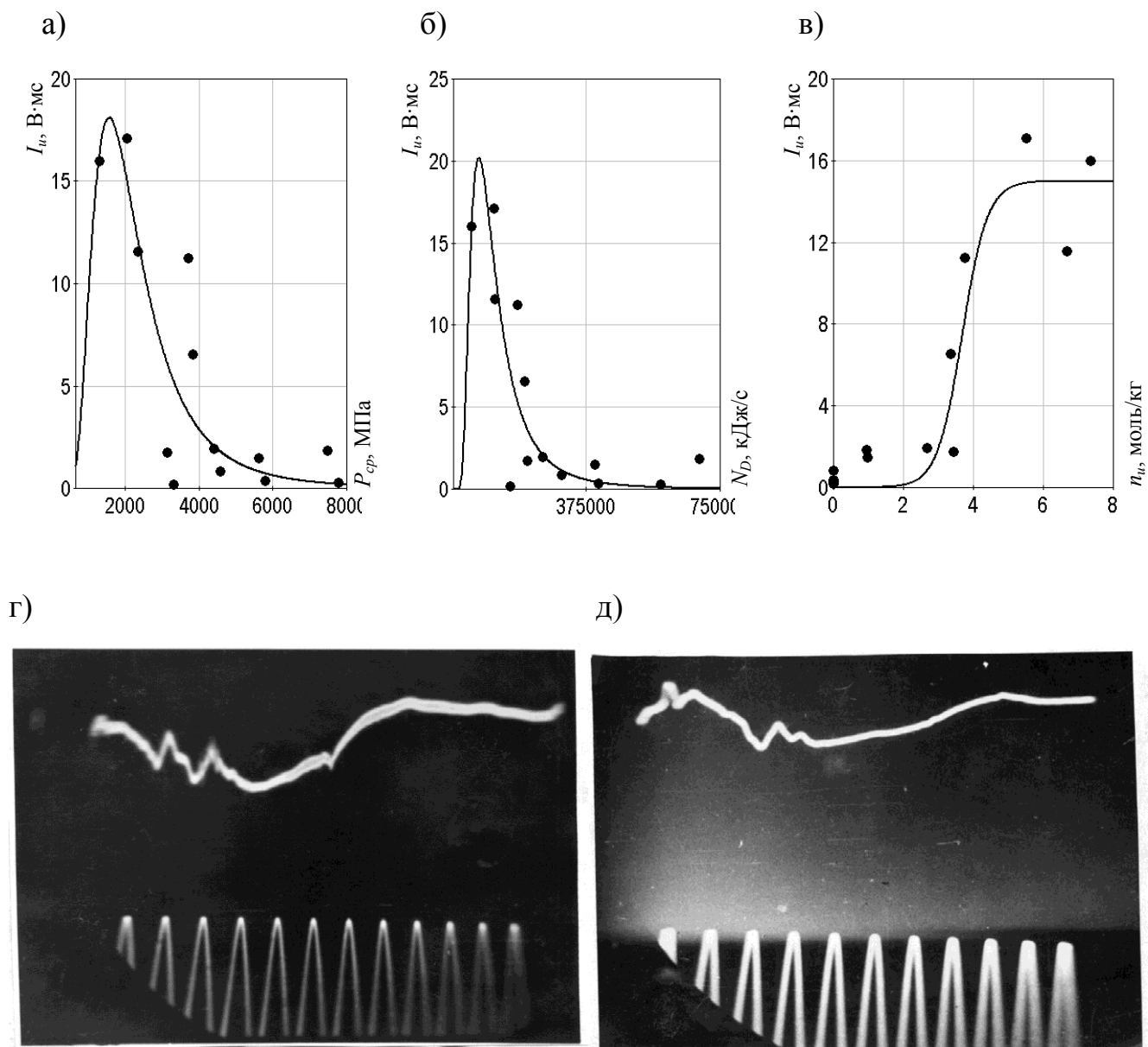


Рис. 4.5. I. Зависимости электромагнитного излучения продуктов детонации (ПД):

- а) – от давления ПД;
- б) – от мощности детонации ВВ;
- в) – от числа молей соли-ингибитора в ПД.

II. Импульс электромагнитного излучения продуктов детонации при взрыве:

- г) аммонита ПЖВ-20 (с солью NaCl);
- д) аммонита №6ЖВ (без соли).

лучения при взрыве заряда дают ВВ, содержащие в продуктах взрыва соли-ингибиторы. Действительно, зависимость (4.35) имеет наиболее сильную корреляционную связь между сигналом излучения и числом молей ингибитора в составе ВВ. При взрыве ВВ именно кристаллы соли-ингибитора возбуждаются и излучают большой импульс электромагнитного излучения, чем ионизированные газообразные продукты взрыва ВВ. Тогда возникает вопрос, как долго кристаллы соли-ингибитора находятся в возбужденном состоянии, способном излучать ЭМИ. Измерения сигналов ЭМИ при взрыве показали, что время нарастания сигнала составляет в среднем $0,3 \dots 0,6$ мс, а время затухания сигнала гораздо больше, примерно в $2 \dots 2,5$ раза. Это позволяет определить период времени, когда ингибитор при взрыве ПВВ находится в возбужденном состоянии. Действительно, известно, что газообразные продукты взрыва ВВ имеют максимальный радиус расширения порядка $12 \dots 13$ радиусов заряда ВВ, а параметры во фронте воздушной ударной волны, способные термически ионизировать газ, сохраняются на расстоянии до $20 \dots 21 r_3$. Тогда время возможного действия ЭМИ, создаваемого продуктами взрыва ВВ и ударной волной, можно определить по формуле:

$$\tau_3 = \frac{(13 \dots 21)r_3}{W_u}, \text{ мс, } W_u \approx D/2.$$

В опытах были использованы заряды различных ВВ массой $0,2$ кг. Если принять $W_u \approx 1500$ м/с, то для предельных значений расширения $13 \dots 21 r_3$ получим время $0,3 \dots 0,5$ мс, то есть величину, очень близкую к значению времени нарастания сигнала ЭМИ, полученного в эксперименте. Следовательно, первая фаза сигнала ($\approx 0,3$ мс) связана с расширением продуктов взрыва ВВ и ударной волны. Вторая же фаза ($\approx 0,5$ мс) связана с попаданием твердых частиц ВВ, обгоняющих холодные газообразные продукты взрыва, в нагретый ударной волной воздух. В этом случае частицы ВВ или горючих компонентов его состава вызывают вторичные реакции в воздухе (образование при взрыве ВВ «вторичного пламени»), которые также способны вызывать ЭМИ. Однако, если это частицы соли-ингибитора, то в какие-либо химические реакции с воздухом они не могут ни вступать, ни, тем более, их инициировать. Поэтому вторая фаза излучения может быть связана только с определен-

ным возбуждением кристаллической решетки соли-ингибитора при детонации ВВ.

Для исследований ВВ разделили на две группы: ПВВ, в составе которых имеется соль-ингибитор (в оболочках и без них) и ВВ, в которых она отсутствует. Далее для каждого ВВ определили $\Delta\tau$ – время, определяющее, на сколько вторая фаза сигнала ЭМИ больше первой. Оказалось (табл. 4.17), что для ПВВ с ингибитором (без оболочек) время второй фазы сигнала больше времени первой в среднем на 0,691 мс, для ПВВ в предохранительных оболочках – на 1,825 мс, для предохранительных ВВ (без ингибитора) – всего на 0,398 мс. Таким образом, получилось, что возбужденное состояние соли-ингибитора у открытых зарядов ПВВ сохраняется в среднем еще примерно 0,3 мс (0,691 – 0,398) после расширения продуктов взрыва, а у зарядов в предохранительных оболочках – примерно 1,4 мс. В этот период времени сигнал ЭМИ у данных ПВВ существует только за счет возбужденного состояния кристаллов соли. В то же время, вследствие колебаний кристаллической решетки при взрыве ВВ, способность соли-ингибитора рекомбинировать радикалы на поверхности кристаллов отсутствует. Поэтому ингибирование МВС при взрыве открытых зарядов ПВВ возможно только через определенный промежуток времени (0,3...1,4 мс), определяемый временем релаксации смещений атомов в решетке кристаллов и затухания поверхностных волн.

Таблица 4.17

Результаты исследований сигнала ЭМИ при взрыве ВВ

	ПВВ с ингибитором						ВВ без ингибитора, мс					
	аммо- нит ПЖВ- 20	дина- на- мит Д-3	угле- нит Э-6	аммо- нит скаль- ный № 10	аммо- нит скаль- ный № 11	метаниты в предохр. оболочках			аммо- нит №6ЖВ	62%-ный аммонди- намит	аммонал скаль- ный № 1	гек- соген
						№ 4	№ 5	№ 6				
$\Delta\tau$, мс	0,625	0,3	0,98	1,05	0,5	1,78	1,88	1,81	0,59	0,18	-0,7	0,425
	среднее 0,691					среднее 1,825			среднее 0,398			

4.6. Исследование физической сущности дезрекомбинационного эффекта у соли-ингибитора при детонации ВВ

Явление возникновения дезрекомбинационного эффекта у соли-ингибитора, введенной в состав ПВВ, установлено экспериментально путем сравнения уровня предохранительных свойств ВВ в МВС в зависимости от условий взрывания зарядов. Масса предельного заряда ПВВ имеет более сильную корреляционную связь с мощностью ПВВ, чем зависимость $M_{np} = \varphi(P_n)$ с давлением детонации ВВ. Почему это так, становится понятным после аналитических исследований взаимосвязи параметров детонации и мощности детонации заряда ПВВ. Действительно, мощность заряда ВВ можно представить в следующем виде:

$$N_D = F_D D, \quad (4.36)$$

силу – через площадь контакта и давление детонации:

$$F_D = P_n S = \frac{\rho_{ВВ} D^2}{n+1} \pi r_3^2 \quad (4.37)$$

и при $n = 3$

$$N_D = \frac{\rho_{ВВ} D^3}{4} \pi r_3^2. \quad (4.38)$$

Это уравнение показывает сильное влияние скорости детонации на мощность ВВ и, следовательно, на величину предельного открытого заряда. Проведенные исследования позволили получить уравнение состояния продуктов детонации ПВВ. По нему удалось определить давление ударного сжатия кристалла соли-ингибитора NaCl продуктами детонации ВВ. Установлена зависимость между массой предельного заряда ПВВ, содержащего соль-ингибитор NaCl и величиной давления ее ударного сжатия. На рис. 4.6 показан график этой зависимости. Способность соли-ингибитора ингибировать МВС при взрыве открытого заряда ПВВ определяется, прежде всего, величиной давления ударного сжатия соли продуктами детонации ПВВ. При определенном значении давления ударного сжатия NaCl не ингибирует МВС и предельный заряд $M_{np} \rightarrow 0$.

Дальнейшие исследования были направлены на изучение физической сущнос-

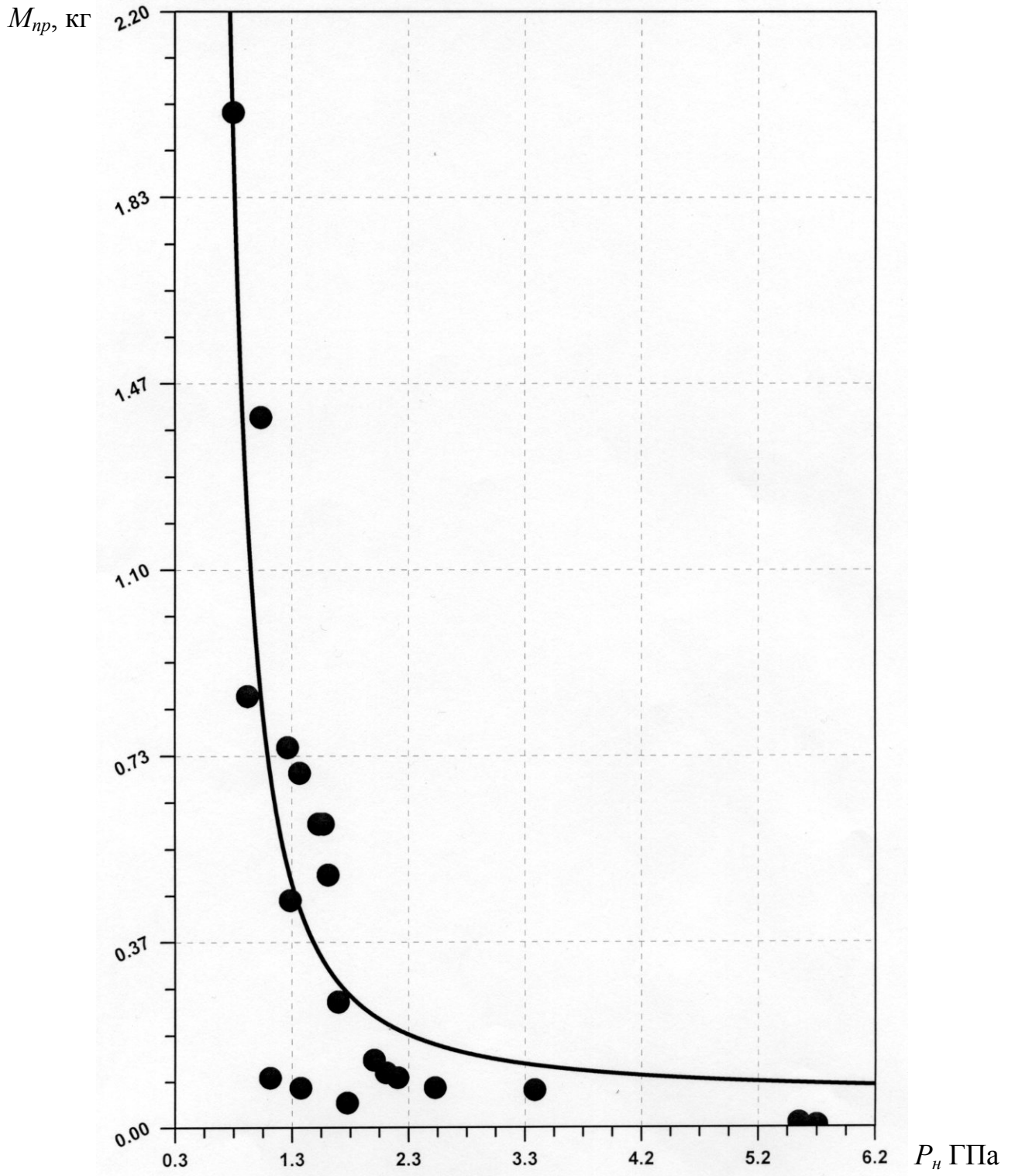


Рис. 4.6. Зависимость $M_{np} = \varphi(P_n)$

ти неизвестного явления возникновения у соли-ингибитора дезрекомбинационного эффекта – потери способности рекомбинировать активные центры (радикалы) при воспламенении МВС. Для этого были проведены исследования влияния давления ударно-сжатого ингибитора на предохранительные свойства зарядов ПВВ, содержащих различные соли. Опытные составы ВВ и промышленные ПВВ III...VII классов, в том числе и зарубежные, приведены в табл. 4.18. Здесь же приведены результаты их испытаний в уголковогой мортире во взрывной камере опытного штрека, заполненной 9...10%-ной МВС. Опытные составы ПВВ содержали соли-ингибиторы (NaCl, KCl), просто конденсированную фазу в виде кварцевого песка или представляли собой селективно-детонирующие ВВ в виде смеси сенсibilизатора, аммонита, граммонита или гранулированной аммиачной селитры без соли-ингибитора.

Результаты испытаний опытных и промышленных ВВ обработаны методами корреляционного анализа. Были получены эмпирические зависимости массы предельного заряда ПВВ в уголковогой мортире от давления детонации ВВ и давления ударно-сжатой соли ингибитора. Эти зависимости в виде графиков показаны на рис. 4.7. Их анализ показал следующее. Селективно-детонирующие ПВВ, которые не содержат в составе ВВ соли-ингибитора, имеют крайне низкий уровень предохранительных свойств. Он весьма незначительно отличается от уровня неприехохранительного аммонита № 6 ЖВ. Аналогичная картина наблюдается и для тех ВВ, в составе которых имеется конденсированная фаза, как и у ПВВ, но она является не солью-ингибитором, а балластом (кварцевый песок SiO₂). И, наконец, ПВВ, содержащие соли-ингибиторы NaCl и KCl. В отличие от предыдущих ВВ, у этих ПВВ уровень предохранительных свойств подчиняется такой закономерности: с увеличением давления ударного сжатия соли-ингибитора происходит падение предохранительных свойств, а с уменьшением – их возрастание. Для этих ПВВ имеется критическое значение давления ударного сжатия соли, при котором ВВ теряет способность ингибировать МВС и становится аналогичным неприехохранительному ВВ типа аммонит № 6ЖВ. Проанализируем зависимости предельного заряда ПВВ от давления ударного сжатия кристаллов соли-ингибитора, полученные по данным табл. 4.18. (их графики представлены на рис. 4.7). Для ПВВ, содержащих ингибитор NaCl:

Таблица 4.18

Влияние давления детонации ВВ и ударно-сжатого ингибитора на уровень предохранительных свойств ПВВ

ВВ	$\rho_{ВВ}$, кг/м ³	D , м/с	P_n , ГПа	Соль	P_u , ГПа	M_{np} , кг
Аммонит № 6ЖВ	1050	4204	5,73	-	-	0,005
Оп. обр. аммонита	1186	2120	1,751	-	-	0,050
Оп. обр. аммонита	1200	1860	1,357	-	-	0,050
Нитроглицерин+SiO ₂	1214	1675	1,098	SiO ₂	1,846	<0,100
Аммотол + SiO ₂	1300	2874	3,342	- // -	5,110	0,075
70% аммотола 80/20 + 30% KCl	1100	3600	4,230	KCl	5,250	≈0,025
Тротил + NaCl	1000	2780	2,497	NaCl	3,774	0,080...0,100
Аммонит Т-19	1050	4164	5,580	- // -	7,681	≈0,010
Углениты:						
Э-6	1220	2224	1,980	- // -	2,990	0,125...0,175
13П	1220	2350	2,180	- // -	3,256	0,100...0,125
НИИТ-2	1200	2080	1,675	- // -	2,570	0,175...0,275
12ЦБ	1350	1927	1,550	- // -	2,350	0,600...0,650
Н-12	1250	1911	1,510	- // -	2,336	0,600...0,700
12П	1250	1948	1,348	- // -	2,070	0,700...0,800
10П	1250	1985	1,589	- // -	2,439	0,500...0,550
№8	1150	1580	0,907	KCl	1,300	0,800...0,900
№5	1250	1750	1,246	NaCl	1,958	0,600...0,750
7У	1200	1800	1,267	KCl	1,753	0,400...0,450
ионит	1170	1676	1,020	NaCl	1,635	1,200...1,400
Ostravit С (Чехия)	1260	1960	1,020	- // -	2,440	0,500...0,600
Шарбрит 4/50 (Бельгия)	1100	1520	0,787	- // -	1,296	1,800...2,000

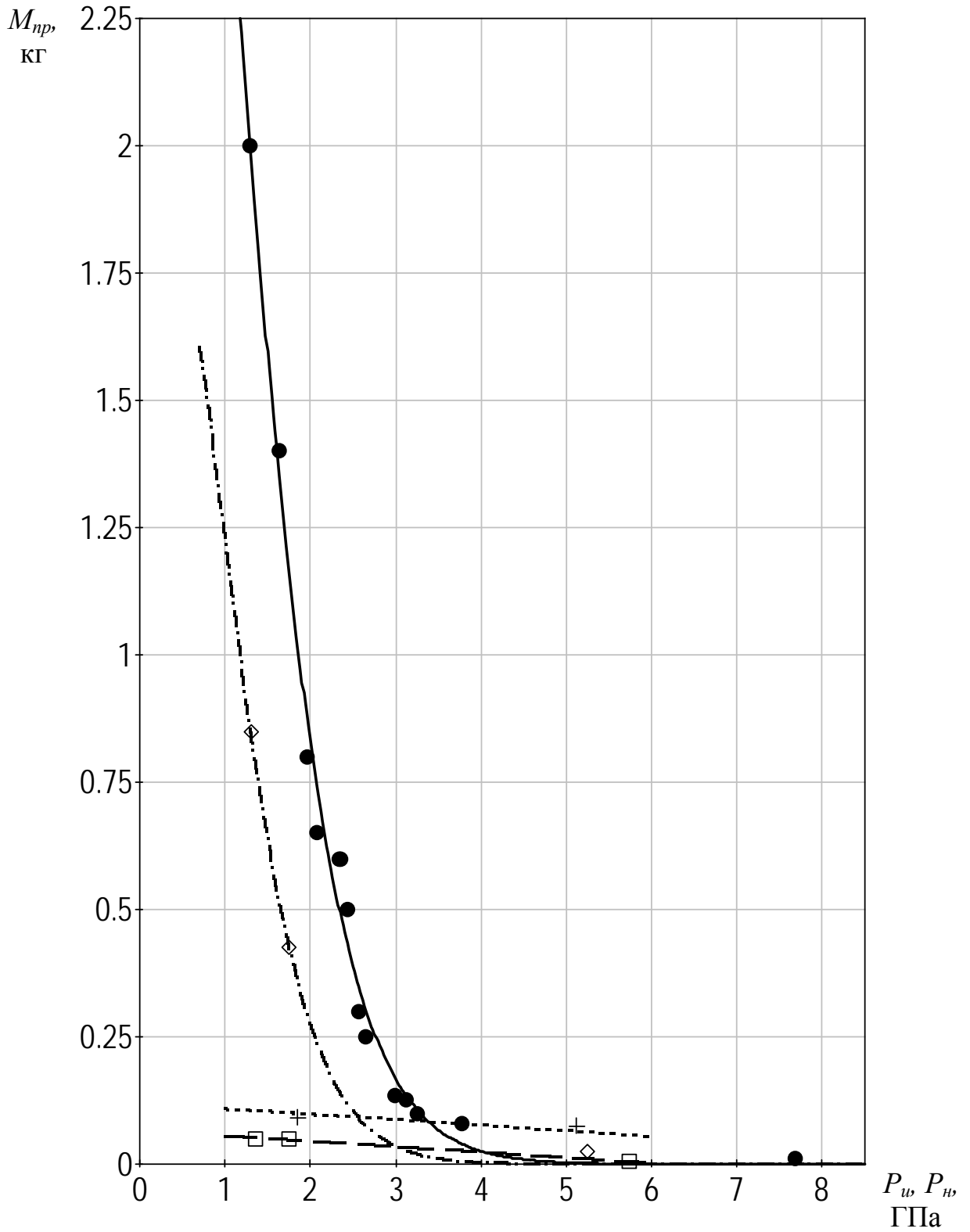


Рис. 4.7. Графики зависимости M_{np} от P_u и P_n для ПВХ:

- – содержащих NaCl;
- ◇ – содержащих KCl;
- + – содержащих SiO₂;
- – без ингибитора.

$$M_{np} = 2,642P_u^{-0,837332P_u}, \text{ кг}, \quad (4.39)$$

для ПВВ, содержащих ингибитор KCl

$$M_{np} = 1,384P_u^{-1,261205P_u}, \text{ кг}. \quad (4.40)$$

Известно, что аммонит № 6ЖВ имеет очень низкий уровень предохранительных свойств. Было установлено [263], что ПВВ, содержащие соль-ингибитор NaCl, будут иметь аналогичные свойства, если кристаллы соли будут ударно сжаты продуктами детонации ВВ до давления $P_u \geq 4,5$ ГПа, а для ПВВ, содержащих соль-ингибитор KCl – до давления $P_u \geq 3,0$ ГПа. Аналогично можно установить давление ударного сжатия кристаллов соли-ингибитора, ниже которого у ПВВ, содержащих соли NaCl и KCl, резко возрастают предохранительные свойства (до уровня ПВВ V класса). Для ПВВ, содержащих NaCl, это давление $P_u \approx 3,0$ ГПа, а для ПВВ, содержащих KCl, $P_u \approx 1,9$ ГПа. Таким образом, обработка экспериментальных данных, полученных для ПВВ, взрывааемых в угловой мортире, позволила установить одно значение давления ударного сжатия соли-ингибитора, при котором уровень предохранительных свойств ПВВ начинает резко снижаться, и второе, при котором у ПВВ предохранительные свойства отсутствуют (у соли-ингибитора возникает дезрекомбинационный эффект). В свою очередь, знание параметров ударного сжатия кристаллов соли-ингибитора позволяет раскрыть природу дезрекомбинационного эффекта и наметить пути борьбы с ним.

При сильном сжатии кристаллов соли-ингибитора в нем развивается давление, приводящее к деформации кристаллической решетки. При детонации ПВВ создается давление, при котором кристаллы соли-ингибитора переходят из режима упругой деформации в режим пластической. Из-за небольшого времени воздействия детонационной волны появляющаяся текучесть материала ингибитора не успевает нарушить кристаллическую упорядоченность его решетки, однако приводит к ее всестороннему сжатию. Существование пластической фазы материала – результат наличия в нем дислокаций. Подвижность дислокаций в ионных кристаллах ингибиторов очень большая, поэтому в них режим пластической деформации может успеть начаться за несколько наносекунд, то есть за время прохождения импульса сжатия через кристалл. В результате ударной нагрузки дислокации начинают двигаться,

взаимодействовать, породить новые дислокации и переводят кристалл в гидродинамический режим, создающий поверхностные волны, подобные волнам жидкости, как в направлении распространения ударной волны, так и в перпендикулярной ей плоскости. Уравнение, связывающее скорость движения дислокации – U_d с действующим напряжением сдвига – τ_c и силами трения, имеет следующий вид [260]:

$$bU_d = \bar{u} \tau_c, \quad (4.41)$$

где b – коэффициент трения;

\bar{u} – вектор Бюргера.

В левой части уравнения стоит сила трения, а в правой – проекция внешней нагрузки на направление вектора скольжения, отнесенная к единичной длине дислокации.

Понятие теоретической прочности кристалла в условиях ударно-волновой нагрузки дано в работе [261], согласно которой можно установить зависимость между напряжением сдвига и упругой прочностью материала. При отколе, в зависимости от скорости деформирования, откольная прочность – σ_u монокристаллов оценивается как давление в минимуме ударной адиабаты вещества, экстраполированной в область растяжения [260], по уравнению:

$$\sigma_u = \frac{\rho_u A^2}{4B}, \quad (4.42)$$

где A, B – коэффициенты ударной адиабаты ($D_u = A + BU_u$, D_u – скорость фронта ударной волны в кристалле, U_u – массовая скорость вещества за фронтом УВ).

Тогда зависимость между напряжением сдвига, определяющим критическую скорость движения дислокаций в кристалле ингибитора (рис. 4.8), и параметрами кристалла определяем по формуле:

$$\tau_c(U_u) = \frac{\rho_u A^2 r_a}{4Bh}, \quad (4.43)$$

где r_a – межатомное расстояние в решетке кристалла ингибитора;

h – расстояние между рядами атомов в решетке.

Для кристаллов ингибиторов с кубической структурой $r_a / h = 1 / \sqrt{2}$. В этом случае уравнение (4.43) примет окончательный вид:

$$\tau_c(U_d) = \rho_u A^2 / 4\sqrt{2} B. \quad (4.44)$$

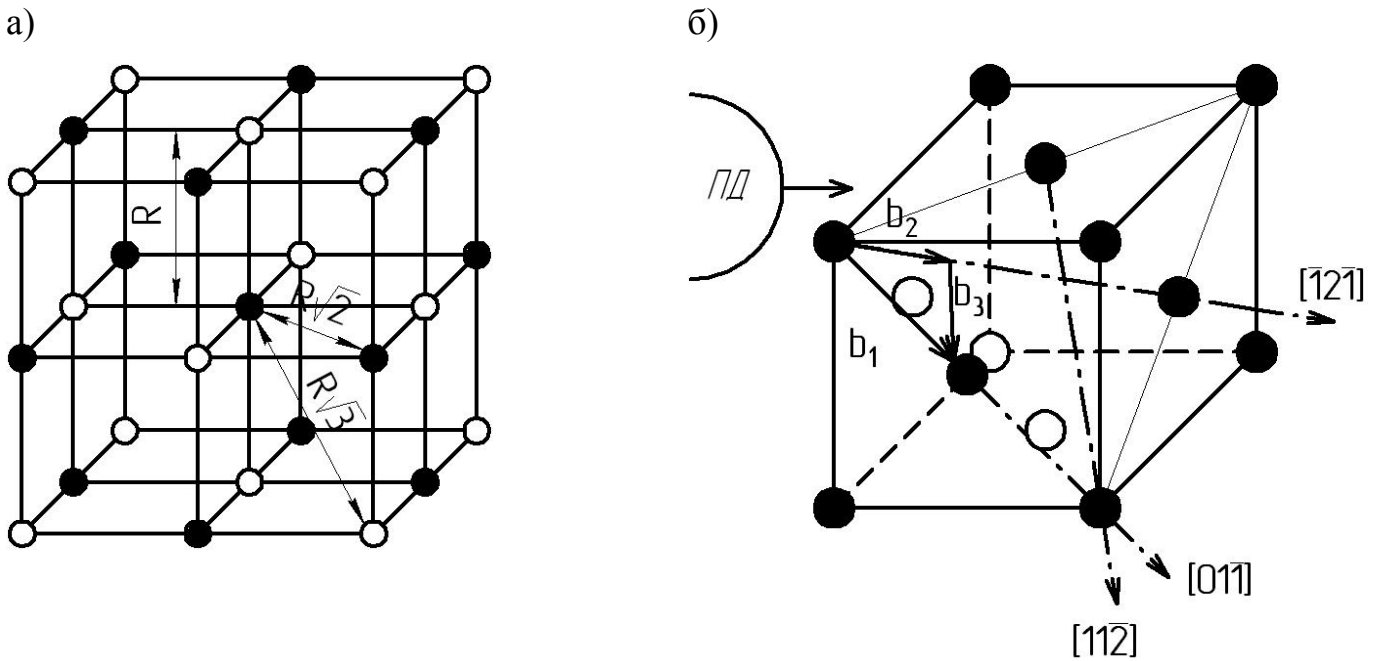


Рис. 4.8. Движение дислокаций в кристалле при взаимодействии с продуктами детонации ВВ:

а) кристаллическая решетка соли-ингибитора;

б) движение дислокаций в направлении векторов Бюргерса.

Известны уравнения ударных адиабат для хлоридов натрия и калия. По уравнению (4.44) для них определены критические значения напряжения сдвига в кристаллах, при которых скорость движения дислокаций достигает значений, приводящих к образованию волн Релея или Лява на поверхности кристалла. Для NaCl $\tau_c(U_\delta) = 3,190$ ГПа, для KCl $\tau_c(U_\delta) = 1,935$ ГПа.

Аналогично, по уравнению (4.42) для кристаллов определены значения откольной прочности при их ударном сжатии: для NaCl $\sigma_u = 4,50$ ГПа, для KCl $\sigma_u = 2,74$ ГПа. Если сравнить критические значения напряжения сдвига в кристаллах и откольной прочности для них с давлением ударного сжатия солей-ингибиторов, приводящего к изменению уровня предохранительных свойств ПВВ (предельный заряд), то оказывается, что между ними имеется характерная связь. Предельный заряд ПВВ начинает резко уменьшаться, как только давление ударного сжатия соли-ингибитора достигает значения критического напряжения сдвига в кристаллах: $\tau_c(U_\delta) = P_u$, а при $\sigma_u = P_u$ предохранительные свойства у ПВВ практически отсут-

ствуют ($M_{np} \rightarrow 0$). Рассмотрим, как этот вывод согласуется с рекомбинационным механизмом ингибирования радикалов кристаллом соли. В работе [262] показано, что вероятность реакции рекомбинации радикалов на поверхности кристалла соли-ингибитора определяется следующим уравнением:

$$P_w = n_s S P \exp(-E_a / RT), \quad (4.45)$$

где n_s – число активных участков на поверхности кристалла;

S – участок площади активной поверхности кристалла соли;

P – вероятность взаимодействия радикалов.

Согласно уравнению (4.45), произведение $n_s S$ определяет общую площадь активной поверхности кристалла соли-ингибитора, на которой происходит реакция рекомбинации. Если пояснить физическую природу активной поверхности кристалла соли-ингибитора наличием на ней дислокаций определенной плотности, то становится очевидным, что число дислокаций и их перемещение при сдвиговой деформации кристалла определяются действием на него нагрузки. При чрезмерной нагрузке, выше критической, наблюдается сильное искажение поверхности кристалла и его кристаллической решетки. Это приводит к интенсивному движению дислокаций, что порождает смещение частиц (молекул и атомов в узлах решетки) на поверхности кристалла и возникновению поверхностных волн Релея и Лява. В результате активная площадь для рекомбинации радикалов на поверхности кристалла резко уменьшается. Дальнейшее увеличение нагрузки на кристалл приводит к тому, что на его поверхности возникают откольные явления, связанные с отделением поверхностного слоя от кристаллической решетки (частичное разрушение кристаллической решетки). В этом случае у кристалла не может быть активной поверхности для реакции рекомбинации радикалов. Данное объяснение [263] дает четкую взаимосвязь между вероятностью реакции рекомбинации радикалов и состоянием поверхности кристаллов соли-ингибитора. При значительных ударных нагрузках, приводящих сначала к сдвиговым деформациям, а потом к откольным явлениям на поверхности кристалла соли, вероятность реакции рекомбинации радикалов резко уменьшается и возникает дезрекомбинационный эффект.

В качестве основного доказательства изменения состояния поверхности крис-

таллов соли-ингибитора при детонации можно привести экспериментальные исследования по электромагнитному излучению продуктов детонации ВВ. При взрыве заряда ВВ возникающее электромагнитное излучение может быть индикатором динамических процессов, происходящих в кристаллах соли-ингибитора, находящегося в продуктах детонации ПВВ. Известно, что смещение атомов и молекул в кристаллической решетке твердого тела приводит к ее колебанию. При ударных нагрузках на кристалл соли-ингибитора происходит смещение его частиц на поверхности, образуются волны, которые движутся и вызывают интенсивные колебания кристаллической решетки. Колебания атомов в кристаллической решетке приводит к изменению электрического поля и возникновению электромагнитного излучения. Исследование амплитуды и интенсивности электромагнитного излучения при детонации ПВВ позволило судить о возбужденном состоянии кристалла соли-ингибитора и, тем самым, установить период времени, при котором рекомбинация радикалов на поверхности кристалла не возможна. Исследованиями установлено, что возбужденное состояние соли-ингибитора у открытых зарядов ПВВ сохраняется в среднем до 0,3 мс после расширения продуктов взрыва, а у зарядов в предохранительных оболочках – примерно до 1,4 мс.

Таким образом, явление дезрекомбинационного эффекта у кристаллов соли-ингибитора при детонации заряда возникает в результате действия продуктов детонации ПВВ на кристаллы.

Проведенные в разделе исследования позволяют сделать следующие выводы:

– установили, что основные принципы построения ПВВ базируются на вводе в их состав солей-ингибиторов метана и поджигаемости ВВ. Способы ввода ингибитора в состав ПВВ различные и нет единого подхода в обосновании того или иного способа;

– исследованиями установили, что наиболее высоким ингибирующим действием на МВС обладают соли, образующиеся в результате реакции между ионообменными парами солей, так как их эффективность в 1,51 раза больше, чем у солей, введенных непосредственно в состав;

– эффективность ингибирования МВС при взрыве заряда ПВВ в канальной

мортире зависит от химической природы ингибитора. Установили, что хлористый кальций и фосфат натрия при прочих равных параметрах ингибирования имеют эффективность соответственно в 2,2 и 3,6 раза выше, чем хлорид натрия;

– при взрывании открытых зарядов ПВВ в уголковогой-mortире при определенной мощности детонации ВВ соль-ингибитор теряет способность к торможению в МВС химической взрывной реакции. Это явление получило название дезрекомбинационный эффект, возникающий у солей-ингибиторов при детонации ПВВ;

– исследование условий взаимодействия кристаллов соли с продуктами детонации ПВВ и электромагнитного излучения, возникающего при взрыве, позволили установить, что при ударных нагрузках на кристаллы соли-ингибитора происходит смещение их частиц на поверхности и образуются волны, которые движутся, переводят кристаллы в возбужденное состояние и вызывают интенсивные колебания кристаллической решетки;

– дано объяснение физической сущности явления, заключающегося в возникновении напряжения сдвига в кристаллах и образовании на их поверхности волн Релея или Лява и откольных явлений, вызывающих колебание кристаллической решетки в течение времени 0,3...1,4 мс, соответствующего периоду возбужденного состояния соли-ингибитора и потери ею рекомбинационной способности.

РАЗДЕЛ 5

РАЗВИТИЕ КОНЦЕПЦИИ БЕЗОПАСНОГО ПРОИЗВОДСТВА ВЗРЫВНЫХ РАБОТ ПРИ РАЗРУШЕНИИ ГАЗОНОСНЫХ ГОРНЫХ МАССИВОВ

5.1. Определение стратегии достижения безопасного производства взрывных работ при разрушении газоносного горного массива

При разрушении газоносных горных массивов происходит образование взрывоопасной смеси в трещинах массива на границе контакта с горной выработкой. В результате пересечения трещинами шпуров и чрезмерного выделения в них горючих газов происходит образование взрывоопасной среды за контуром выработки в выработанном пространстве (рис. 5.1). Осуществить в этих условиях специальную взрывозащиту в забое и предотвращение взрывов газо-пылевоздушной смеси в выработке не возможно. Уголь является сложным химическим соединением. Поэтому в результате объемного приложения нагрузки на пласт и различных его деформаций, приводящих к изменению состава угля, возникают неконтролируемые зоны метастабильного состояния системы из угольного вещества и метана, характеризующиеся спонтанным саморазложением.

В последние годы в ИГТМ НАН Украины [264] и в ИПКОН РАН России [265] проводятся исследования, посвященные изучению особенностей атомной структуры ископаемых углей и изменения микроструктуры деформируемого угля выбросоопасных пластов. Анализ результатов этих работ позволил уточнить механизм выхода растворенного метана из твердого угольного вещества и условия перехода стабильной системы «угольное вещество – метан» в метастабильное состояние. В зонах метастабильного состояния образуется высокодисперсный крайне реакционный уголь и происходит изменение его физико-химического состояния и состава. В результате высокодисперсные частицы разрушаемого угля, включая наночастицы, могут образовываться в угольном пласте при изменении его напряженно-деформированного состояния в процессе разработки. Зоны высокодисперсного угля являются зонами нестабильности, в которых происходит переход метана из связанного со-

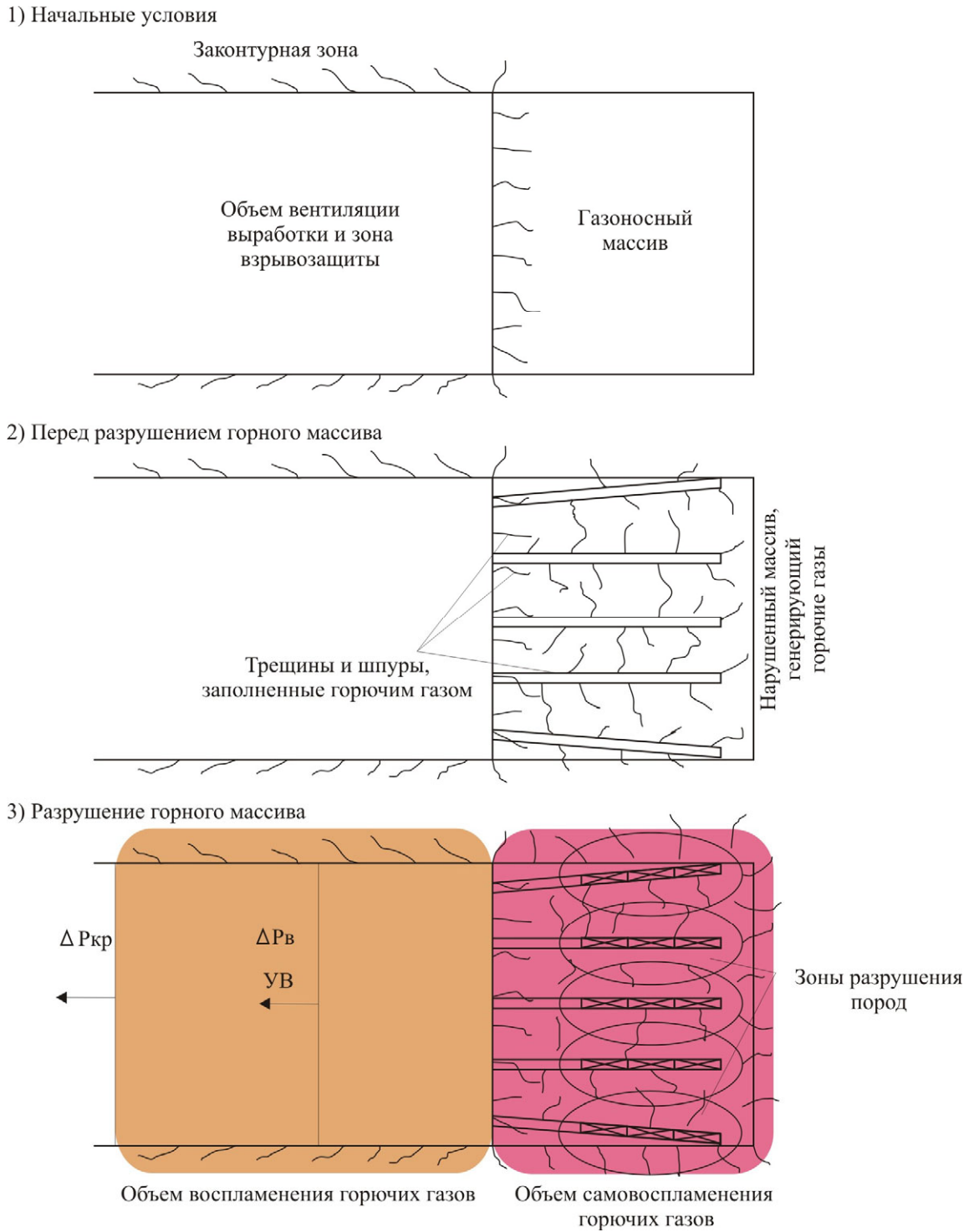


Рис. 5.1. Ситуации, при которых происходит образование взрывоопасной среды в трещинах массива

стояния в свободное при разгрузке или разрушении угольного пласта. Не менее важные исследования проведены ИФГП НАН Украины [266] и ВостНИИ [267]. Уг-лехимическими исследованиями установлено, что мостиковые связи между атомами в составе органической массы угля представляют собой связи пониженной прочности. При разрушении пласта происходит повышение дефектности углеродо-кислородных и углеродо-водородных мостиков, которое приводит к образованию активных фрагментов структуры угля, отличающихся нестабильностью. При их разрушении относительное выделение метана из угля возрастает в 1,5...3 раза. Это приводит к резкому увеличению выделения метана при разрушении угля, которое в несколько раз превышает его природную метаноносность. Начальное состояние макромолекул угля определено его составом, химическим строением и энергией образования. Конечное состояние, в которое могут перейти макромолекулы угля, связано с изменением параметров его состояния, разрывом связей в молекулах и образованием новых связей, сопровождающихся выделением или поглощением энергии и изменением состава. Предельный случай изменения структуры макромолекулы угля при генерации углеводородов можно описать уравнением реакции его разложения [268] с образованием химически активных наночастиц углерода (C_a) и метана (CH_4):



которые в дальнейшем образуют метилен по следующей реакции:



Радикал $\ddot{C}H_2$ образует взрывоопасный ацетилен и горючий водород:



Ацетилен $H-C\equiv C-H$ самовоспламеняется без кислорода при температуре $T=330^{\circ}C$ или давлении $P=0,2$ МПа и концентрации чуть выше 2,0%, а водород легко воспламеняется под действием ударных волн. Таким образом, можно оценить уровень взрывобезопасности в забое при взрывных работах и сотрясательном взрывании с учетом возникновения такой газовой обстановки в выработках. При сотрясательном взрывании разрешается применять неперехранительные ВВ II класса и

ПВВ III и IV классов. Получается, что в наиболее опасной газовой обстановке разрешено применение ВВ, обладающих крайне низким уровнем предохранительных свойств и не разрешено применение высокопредохранительных ВВ V и VI классов. Исследованиями, выполненными в МакНИИ Ф.М. Галаджием, В.И. Зениным, Б.И. Вайнштейном и В.М. Расторгуевым, было установлено, что ПВВ с низким уровнем предохранительных свойств воспламеняют МВС во всем интервале взрываемости метана. Ранее А.И. Селезнев и А.И. Гольбиндер установили, что добавление к МВС водорода резко повышает взрывчатость этой смеси, а предохранительные свойства ВВ в ней снижаются в несколько раз. Последние исследования [269] показали, что присутствие в МВС ацетилена и метилена делает ее самовоспламеняющейся и способной к детонации при минимальном содержании кислорода в смеси. В связи с этим некоторые специалисты считают, что снижение вероятности взрывов и вспышек метана или угольной пыли при взрывных работах возможно только за счет применения средств дополнительной защиты, а они, как отмечалось выше, являются не надежными. Производственный опыт взрывных работ показывает, что обеспечить необходимый уровень их взрывобезопасности можно тогда, когда удастся создать предохранительные ВВ, детонирующие заряды которых не воспламеняли бы взрывоопасную среду, а их шпуровые заряды не давали бы выгораний ВВ, то есть имели бы необходимую устойчивость к выгоранию. В этом случае безопасность производства взрывных работ в опасных условиях угольных шахт была бы достигнута автоматически без дополнительных средств взрывозащиты. Поэтому решение этой проблемы определяет стратегию обеспечения безопасного производства взрывных работ при разрушении газоносных горных массивов в шахтах. В ее основе – модернизация ПВВ и выбор для них эффективных ингибиторов, предотвращающих воспламенение горючих газов. Этот выбор базируется на основных положениях теории цепных реакций. Из этой теории известен способ химического регулирования скорости и полноты реакции окисления метана путем ее ингибирования при детонации МВС. Реализуется такой способ применением специальных веществ, тормозящих скорость химических реакций. Тормозящее действие обусловлено блокированием активных центров-радикалов с помощью ингибиторов, которые переводят

радикалы в малоактивные продукты. В этом случае при взрыве шпуровых зарядов ПВВ образующаяся газодисперсная ингибиторная среда в виде системы, состоящей из продуктов взрыва ВВ и соли, предотвращает воспламенение взрывоопасной смеси газа и пыли, выделяющихся из трещин и разрушенного угля. Для реализации этого способа и основанного на нем стратегического направления обеспечения безопасности взрывных работ необходимо исследовать и выбрать основные пути модернизации ПВВ и их зарядов и осуществить эффективный отбор ингибиторов для ВВ и систем взрывозащиты.

5.2. Исследование путей модернизации ПВВ и их шпуровых зарядов

В результате выполненных исследований [270, 271] было установлено, что при взрывании зарядов ВВ в МВС из зоны возникновения реакции окисления метана необходимо вывести радикалы путем их рекомбинации на поверхности частиц соли-ингибитора. Доставка частиц соли-ингибитора в эти зоны осуществляется продуктами детонации ПВВ. Согласно схеме гетерогенной рекомбинации радикалов солью-ингибитором необходимо учитывать, что на поверхности соли идут реакции с участием многих активных центров-радикалов: водорода – \dot{H} , кислорода – \ddot{O} , гидроксила – \dot{OH} и метилена $\ddot{C}H_2$. Поэтому активность соли-ингибитора должна быть такой, чтобы она могла эффективно рекомбинировать эти радикалы. Однако нет таких солей-ингибиторов, которые при воспламенении МВС обладали бы широким химическим спектром одновременного ингибирования всех возможных реакций и комбинаций активных центров. Кроме того, при детонации заряда ПВВ ингибитор подвергается действию мощной детонационной волны, в результате чего у него возникает дезрекомбинационный эффект. Поэтому выбор ингибиторов и их содержание в составе ПВВ должны быть такими, чтобы одновременно достигались необходимые предохранительные свойства ВВ и детонационная способность заряда. Раньше эти задачи решались только экспериментальным путем – опытные образцы ПВВ проходили испытания в опытном штреке. В настоящее время развитие научных

принципов построения ПВВ и ингибирования взрывоопасных смесей при взрыве заряда ВВ позволяют решать многие технические задачи при модернизации ПВВ аналитически.

Одна из таких задач – выбор соли-ингибитора, основанный на трех положениях, отвечающих за эффективное ингибирование МВС при взрыве в ней заряда ПВВ. Первое положение определяет критические условия для предотвращения воспламенения метана: концентрация соли-ингибитора в продуктах взрыва ПВВ должна быть не меньше концентрации ингибитора, флегматизирующей МВС:

$$C_u \geq C_{\phi}. \quad (5.4)$$

Второе положение основано на избирательном рекомбинационном действии соли-ингибитора на различные виды радикалов, участвующие в реакции окисления метана при воспламенении и взрыве МВС. Это положение реализуется применением в составе ПВВ комбинации из солей-ингибиторов, способной утилизировать радикалы атомарного кислорода – \ddot{O} и образовывать продукты реакции, которые затем рекомбинируют радикалы водорода – \dot{H} и гидроксила – \dot{OH} . Третье положение определяет ударную стойкость солей-ингибиторов при детонации ПВВ, предотвращающую возникновение у них дезрекомбинационного эффекта. Для солей-ингибиторов с кубической структурой кристаллов установлено критическое напряжение сдвига – $[\tau_{кр}]$, приводящее к возникновению дезрекомбинационного эффекта. При детонации ПВВ должно выполняться условие, при котором давление ударного сжатия кристаллов соли-ингибитора не должно превышать критического напряжения сдвига, возникающего в них:

$$P_u \leq [\tau_{кр}]. \quad (5.5)$$

Другая задача – ввод соли-ингибитора в состав ПВВ. В настоящее время исследованы и опробованы три способа введения в состав ПВВ соли-ингибитора, о них говорилось выше. Наибольшим ингибирующим свойством при взрыве МВС обладают соли ионообменных ПВВ, менее эффективны соли в классических ПВВ и зарядах ПВВ в предохранительных оболочках. Влияние соли-ингибитора на детонационную способность ПВВ также различно. Согласно работе [272], детонационная

способность ПВВ существенно снижается при увеличении содержания такой соли в составе. Для зарядов ПВВ в предохранительных оболочках детонационная способность не ухудшается только в том случае, когда торцы патронов не покрыты оболочкой. Поэтому выбор способа получения ПВВ очень труден, так как нужно достичь необходимого уровня предохранительных свойств ВВ и его детонационной способности при производстве ПВВ с минимальными затратами. Опыт показывает, что наиболее простым является производство классических и ионообменных ПВВ, а изготовление зарядов в предохранительных оболочках – наиболее сложным и дорогостоящим. Следовательно, при модернизации ПВВ необходимо ориентироваться, прежде всего, на классический или ионообменный способ ввода ингибитора и получения его при взрыве.

Для безопасного и эффективного производства взрывных работ на пластах, опасных по внезапным выбросам угля, породы и газа и для сотрясательного взрывания необходимо также усовершенствовать конструкцию шпуровых зарядов. Для этого есть несколько причин:

- при сотрясательном взрывании происходит более 50% выбросов угля и газа в очистных выработках и около 90% в подготовительных. Это приводит к серьезным последствиям, так как возрастает травматизм, опасность взрыва МВС, снижаются темпы проведения выработок, увеличивается их стоимость и т.д.;

- конструкция заряда ВВ в шпурах не всегда обеспечивает полноту детонации заряда, что влияет на безопасность и эффективность взрывных работ;

- прямой способ инициирования колонкового шпурового заряда не обеспечивает безопасность его взрывания;

- конструкция забойки шпуров, её размеры и свойства забоечного материала не эффективны при наличии газовой среды в трещинах массива во время короткозамедленного взрывания зарядов ПВВ.

Рассмотрим, как могут быть улучшены элементы конструкции шпурового заряда. В работах [273, 274] представлены результаты исследований по влиянию места расположения патрона-боевика в заряде и направления инициирования заряда ВВ на предохранительные свойства ПВВ при взрывании в МВС. Показано, что об-

ратное инициирование для ПВВ V и VI классов более предпочтительно, чем прямое, так как оно обеспечивает высокий уровень безопасности зарядов ВВ при взрывании в МВС. Для условий сотрясательного взрывания этот способ инициирования шпуровых зарядов также более предпочтителен. При его применении происходит перераспределение импульса взрыва заряда ВВ, в результате чего большая часть импульса приходится на разрушаемую часть забоя, а не на массив, находящийся в напряженном состоянии. Поэтому можно предположить, что при обратном инициировании заряда ВВ при сотрясательном взрывании вероятность возникновения и развития внезапного выброса будет существенно меньше. Однако при этом способе инициирования в момент досылки патрона-боевика в шпур возможен преждевременный взрыв электродетонатора в результате его удара о дно шпура. Устраняется эта опасность смягчающей механическое воздействие на детонатор амортизационной «подушкой», находящейся в донной части шпура. Ее изготавливают из забоечного пластичного негорючего материала и называют донной забойкой. Теоретическими и лабораторными исследованиями установлено, что по сравнению с зарядом ВВ сплошной конструкции применение заряда с донной забойкой позволяет при взрыве значительно изменить распределение динамических напряжений по объему горного массива. В результате эффективность взрывания таких зарядов в горных породах может быть увеличена [275].

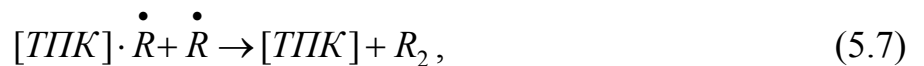
Полученные результаты исследований позволяют утверждать, что донная забойка шпуров оказывает существенное влияние как на улучшение результата взрывания, связанного с разрушением горных пород, так и на уменьшение вероятности развития выброса угля и газа при сотрясательном взрывании.

Известно, что взрывной способ разрушения угля более перспективный, по эффективности он превосходит механический. Учитывая это, была предложена технология гидровзрывания зарядов ВВ в горных породах [276, 277, 278], которая обеспечивает воздействие водных растворов поверхностно и химически активных веществ на уголь и позволяет переводить его в состояние, позволяющее контролировать выбросоопасность угля и газовыделение из пласта. Согласно этой технологии, заряд ВВ со всех сторон должен быть окружен водой или водным раствором соответствующим

ющей соли. При гидровзрывании заряда одновременно с разрушением пород происходит импульсная закачка воды или водного раствора в пласт, его предварительное рыхление и дегазация. В призабойной части выработки идет распыление воды, снижение пылеобразования и интенсивности ударных волн и создается предохранительная среда из тумана и пара с параметрами, обеспечивающими взрывозащиту в горной выработке. При гидровзрывании заряда энергия продуктов детонации ВВ идет на ударное сжатие воды и образование ударных волн в среде, окружающей заряд. За счет энергии, передаваемой в массив ударными волнами, в нем образуется система трещин, которые заполняет и расширяет движущаяся потоком ударно-сжатая вода (как рабочее тело процесса разрушения). При взрывании в угле образование в нем трещин и разрушение структурных атомных связей ведут к его дегазации и снятию напряженного состояния. Роль воды существенно возрастает при гидровзрывании на опасных угольных пластах в зонах метастабильного состояния, так как она активно взаимодействует с метиленом (карбен), превращая его в простейший спирт, что полностью исключает вероятность возникновения процессов самовоспламенения МВС и образования взрывоопасного ацетилена. Таким образом, при технологии гидровзрывания зарядов ВВ в газоносных горных породах безопасность взрывных работ резко возрастает и обеспечиваются в забое необходимые условия по охране труда шахтеров.

5.3. Выбор солей-ингибиторов для ПВВ, обоснование конструкции шпурового заряда ПВВ и способа его взрывания

Химический фактор активности соли-ингибитора определяет ее способность рекомбинировать радикалы и ингибировать цепную реакцию окисления метана в зависимости от природы элементов, образующих соль. Сам химический процесс рекомбинации радикалов, который происходит на поверхности кристалла соли-ингибитора, согласно механизму Или-Ридила или Лэнгмюра-Хиншельвуда можно представить в виде следующей схемы:



где \dot{R} – активный центр (радикал, атом), участвующий в химической реакции;
 R_2 – конечный продукт реакции рекомбинации радикалов на поверхности кристалла соли-ингибитора;
 $[ТПК]$ – зона активного участка твердой поверхности кристалла соли.

Таким образом, процесс рекомбинации радикалов при ингибировании представляет собой протекание тримолекулярной реакции, которую можно рассматривать состоящей из двух стадий бимолекулярных реакций. На первой стадии радикал образует с солью-ингибитором промежуточный продукт по реакции (5.6). Далее этот радикал реагирует с еще одним радикалом на поверхности кристалла соли с образованием малоактивных продуктов реакции (5.7). Тогда можно предположить, что химический фактор активности соли является функцией поверхностной скорости реакции рекомбинации радикалов на поверхности кристаллов соли-ингибитора – ω_p :

$$F_a = \varphi(\omega_p). \quad (5.8)$$

Для осуществления рекомбинации радикалов на поверхности кристалла необходимо их взаимодействие с твердой частицей соли. Согласно [279], число взаимодействий радикалов с единицей поверхности кристалла за время dt равно:

$$dZ_R = \left(\frac{m_p}{2\pi kT}\right)^{0,5} n_p u_p e^{-\frac{m_p u_p^2}{2kT}} du_p dt, \quad (5.9)$$

где n_p – число радикалов, участвующих в процессе рекомбинации;
 u_p – скорость движения радикала;
 m_p – масса радикала;
 \bar{k} – константа Больцмана.

Интегрируя это уравнение по u_p от 0 до ∞ и отнеся число соударений к единице времени, получаем следующее уравнение:

$$Z_R = \left(\frac{\bar{k}T}{2\pi m_p}\right)^{0,5} n_p.$$

Согласно [279], средняя скорость радикала зависит от температуры и может быть определена по формуле:

$$u_p = \left(\frac{8kT}{\pi m_p} \right)^{0,5}.$$

Тогда нетрудно получить Z_R – число соударений радикалов с единицей поверхности кристалла соли за единицу времени:

$$Z_R = \frac{u_p n_p}{4}. \quad (5.10)$$

Вероятность реакции рекомбинации – P зависит от числа соударений и ориентации движущихся радикалов в зоне активного сечения реакции на поверхности кристалла соли – σ_p ; число таких зон на поверхности – n_s , а их общая площадь на поверхности кристалла составляет $n_s \sigma_p$. При этом вероятность взаимодействия радикалов на активном участке поверхности равна $P n_s \sigma_p$. Тогда вероятность реакции рекомбинации радикалов на поверхности кристалла соли ингибитора будет равна:

$$P_w = n_s \sigma_p P \exp(-E_a/RT). \quad (5.11)$$

Скорость реакции на поверхности кристалла будет равна: $\omega_p = u_p n_p P_w / 4$, а для общей поверхности частицы соли – S , находящейся в объеме газовой среды – V , в котором движутся радикалы в направлении этой поверхности,

$$\omega_p = \frac{u_p n_p P_w}{4} \cdot \frac{S}{V}. \quad (5.12)$$

Для прекращения цепной реакции окисления метана необходимо вывести активные центры из зоны реакции путем их рекомбинации на поверхности частиц соли-ингибитора. Этому условию соответствует значение P_w , максимально приближающееся к единице. В этом случае скорость реакции рекомбинации на поверхности кристалла соли приобретает максимальное значение, а химический фактор активности соли-ингибитора определяется следующим выражением:

$$F_a = \varphi(\omega_p) = n_p S const, \quad const = u_p P_w / 4V. \quad (5.13)$$

Вместе с тем, согласно предложенной схеме химического процесса рекомбинации, необходимо учитывать, что в реакции окисления метана кислородом воздуха разви-

тие цепи превращений происходит при участии трех видов активных центров. Это – атомы водорода H и кислорода O и радикал гидроксила OH . В связи с этим химический фактор активности соли-ингибитора должен зависеть от преобладающего вида радикалов, участвующих в процессе развития воспламенения МВС. Поэтому с точностью до константы уравнение (5.13) можно записать в виде:

$$F_a = n_i \cdot S, \quad (5.14)$$

где n_i – количество преобладающего из участвующих в процессе рекомбинации вида радикалов.

Вопрос идентификации вида радикала при рекомбинации очень важен. Гидроксильные радикалы и атомы водорода имеют одну валентно ненасыщенную связь, атомы кислорода две. Поэтому для рекомбинации атомарного кислорода необходимо задействовать вдвое больше центров поверхности кристаллов соли-ингибитора. В настоящее время считается общепризнанным, что наилучшими ингибиторами воспламенения метана являются галогениды щелочных металлов, а механизм их действия, в частности, при применении в ПВВ, сводится к обрыву цепей солью, в которой ответственными за каталитическое ингибирующее действие является металл [278]. Исходя из этого, можно оценить значение n_i при рекомбинации радикалов солями, содержащими металл, по следующему уравнению:

$$n_i = \frac{B_M N_a}{B_R}, \quad (5.15)$$

где B_M – валентность металла;

N_a – количество атомов металла в соли;

B_R – количество валентно ненасыщенных связей у радикала.

Ингибирующая активность соли – I с молекулярной массой – M_B может быть оценена по уравнению (5.7) с учетом уравнений (5.14) и (5.15):

$$I = \frac{F_a S}{M_B} = \frac{B_M N_a}{B_R M_B} S. \quad (5.16)$$

В таблице 5.1 дана оценка ингибирующей активности солей, представленных галогенидами щелочных, земельно-щелочных и других металлов при условии, что у их солей $S = \text{const}$. Результаты расчета показывают, что ингибирующая активность со-

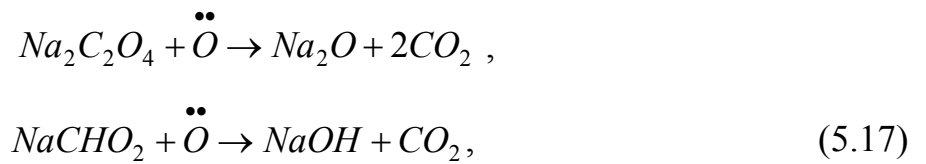
Таблица 5.1

Оценка ингибирующей активности солей

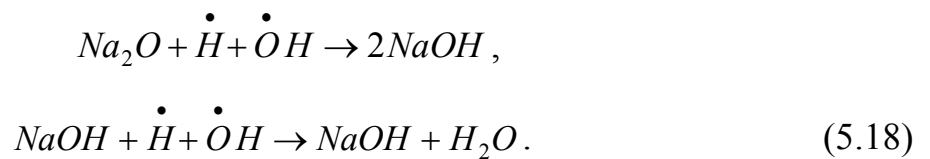
Соль-ингибитор МВС	Молекулярная масса, M_B	Кол-во атомов металла в молекуле соли, N_a	Валентность металла, V_M	Активность радикалов относительно			
				водорода (H) и гидроксила (OH)		атомарного кислорода (O)	
				F_a	$I \cdot 10^2$	F_a	$I \cdot 10^2$
<i>LiF</i>	25,94	1,0	1,0	1,0	3,855	0,5	1,927
<i>LiCl</i>	42,39	1,0	1,0	1,0	2,359	0,5	1,180
<i>NaF</i>	41,99	1,0	1,0	1,0	2,382	0,5	1,191
<i>NaCl</i>	58,44	1,0	1,0	1,0	1,711	0,5	0,8555
<i>KCl</i>	74,56	1,0	1,0	1,0	1,341	0,5	0,670
<i>KF</i>	58,1	1,0	1,0	1,0	1,721	0,5	0,860
<i>CaF₂</i>	78,0	1,0	2,0	2,0	2,564	1,0	1,282
<i>CaCl₂</i>	111,0	1,0	2,0	2,0	1,802	1,0	0,901
<i>MgF₂</i>	62,31	1,0	2,0	2,0	3,209	1,0	1,604
<i>MgCl₂</i>	95,22	1,0	2,0	2,0	2,10	1,0	1,05
<i>AlF₃</i>	83,98	1,0	3,0	3,0	3,5723	1,5	1,786
<i>AlCl₃</i>	133,34	1,0	3,0	3,0	2,2499	1,5	1,125
<i>TiF₄</i>	123,89	1,0	4,0	4,0	3,229	2,0	1,6145
<i>TiCl₄</i>	189,71	1,0	4,0	4,0	2,101	2,0	1,05

лей находится в достаточно хорошем соответствии с результатами экспериментальных работ, которые обобщены в отчете [281]. Отметим, что хлориды натрия или калия, наиболее широко используемые ингибиторы в составах современных ПВВ, являются не достаточно эффективными ингибиторами и уступают по ингибирующей активности солям лития, магния, кальция, титана и алюминия более чем в 2 раза. Ингибирующая же активность этих солей резко снижается в тех случаях, когда атомарный кислород является преобладающим активным центром в зоне реакции окис-

ления метана. Поэтому применение одной соли-ингибитора в ПВВ может быть не эффективно, так как она не может рекомбинировать все радикалы реагирующей газовой среды. Следовательно, в составе ПВВ необходимо использовать комбинации из нескольких солей-ингибиторов, имеющих химическую способность рекомбинировать все виды радикалов. Например, ввод в состав ПВВ оксалата и формиата натрия позволяет рекомбинировать все радикалы, участвующие во взрывной реакции окисления метана. На первой стадии происходит утилизация радикалов кислорода из зоны реакции:



а на второй – утилизация и рекомбинация радикалов водорода и гидроксила образовавшимися оксидом и гидроксидом натрия:



Таким образом, комбинация оксалатов и формиатов щелочных металлов крайне эффективна для ПВВ как ингибитор окисления метана. Кроме того, обе эти соли являются и эффективными ингибиторами поджигаемости ПВВ. Поэтому комплексный подход к выбору солей-ингибиторов для ПВВ дает возможность решить две основные задачи: обеспечение безопасного применения ПВВ в опасных условиях шахт и его устойчивости к выгоранию.

Критерий безопасности применения ПВВ во взрывоопасной МВС позволяет получить критическое значение концентрации соли-ингибитора в продуктах взрыва:

$$C_u = \frac{1007,72\varepsilon}{E_n a_y}, \text{ кг/м}^3 \quad (5.19)$$

и концентрацию соли-ингибитора, флегматизирующую МВС:

$$C_\phi = \frac{0,013378M_B}{F_a S_y}, \text{ кг/м}^3, \quad (5.20)$$

где S_y – удельная поверхность кристалла (частицы) соли, м²/кг.

Приравняв их, можно определить минимально необходимое содержание соли-ингибитора в составе ПВВ:

$$\varepsilon = 1,32755 \cdot 10^{-5} \frac{M_B E_H a_y}{F_a S_y}, a_y = \frac{0,99793587}{[1 + \exp(7,115188 - 0,0016776307D)]^{0,1817}}. \quad (5.21)$$

При детонации ПВВ должно выполняться условие, при котором давление ударного сжатия кристалла соли-ингибитора не должно превышать критическое напряжение сдвига, возникающее в соли при детонации ПВВ:

$$P_u \leq [\tau_{кр}]. \quad (5.22)$$

Это давление определяется по уравнению:

$$P_u = \rho_u (AU_u + BU_u^2), \text{ Па}; U_u = \frac{-(\rho_u A + \rho_{BB} D) + \sqrt{(\rho_u A + \rho_{BB} D)^2 + 8B\rho_u P_H}}{2\rho_u B}, \text{ м/с.}$$

Для определения P_H было получено уравнение состояния продуктов детонации предохранительных ПВВ путем функциональной аппроксимации параметра $\rho_{BB} D^2$ как коэффициента подгонки под известные экспериментальные данные [163, 187, 189, 282, 283]. По этим данным (более 200 экспериментальных определений давления детонации ВВ, в составе которых содержалась конденсированная фаза) была установлена зависимость давления во фронте детонационной волны от параметра $\rho_{BB} D^2$ в виде полинома, где $y = P_H$ и $x = \rho_{BB} D^2$:

$$y = a + vx + cx^2 + dx^3 + ex^4 + fx^5. \quad (5.23)$$

Коэффициенты этой полиномиальной зависимости можно получить с помощью компьютерной программы Curve Expert 1.3 ($[P_H] = \text{кбар}$, $[\rho_{BB}] = \text{кг/м}^3$, $[D] = \text{м/с}$). Они представлены в табл. 5.2, $r = 0,9924$, $S = 9,367$.

Таблица 5.2

Коэффициенты уравнения состояния ПВВ

a	v	c	d	e	f
-1,9935	$4,1050054 \cdot 10^{-9}$	$-9,270549 \cdot 10^{-20}$	$1,78948 \cdot 10^{-30}$	$-1,4595643 \cdot 10^{-41}$	$4,3311319 \cdot 10^{-53}$

Вместе с тем, подгонка коэффициентов предложенного уравнения состояния ПВВ во фронте детонационной волны еще не гарантировала его применимости для

предохранительных ПВВ. Поэтому методом «аквариума» было экспериментально определено давление во фронте детонационной волны у ПВВ IV...VII классов, а также промышленного ВВ II класса – аммонита № 6ЖВ. Результаты этих опытов и расчетное давление по уравнению состояния (5.23) представлены в табл. 5.3.

Таблица 5.3

Давление детонации ПВВ

ВВ	d_3 , мм	$\rho_{ВВ}$, кг/м ³	D , м/с	Эксперим. P_H , кбар	Расчетн. P_H , кбар	Относит. ошибка, %
Аммонит № 6ЖВ	0,032	1060	4204	57,3	52,44	8,5
Аммонит Т-19	0,036	1050	4164	55,8	51,30	8,0
Угленит Э-6	0,036	1220	2224	19,8	19,78	0,101
Угленит 12ЦБ	0,036	1350	1927	15,5	16,47	6,2
Угленит Н-12	0,036	1250	1911	15,1	14,98	0,8
Ионит	0,036	1170	1676	10,2	10,49	2,8

Проведенные опыты позволили получить давление детонации для разных ПВВ. Сравнение этих данных с результатами расчета по зависимости (5.23) дает ошибку, не превышающую 8%. Точность такой ошибки достаточная и позволяет принять решение по выбору ингибиторов для разрабатываемых ПВВ. Для ингибиторов с кубической структурой кристаллов критическое напряжение сдвига, приводящее к возникновению дезрекомбинационного эффекта при детонации ПВВ, определяется по такой формуле:

$$[\tau_{кр}] = \frac{\rho_u A^2}{4\sqrt{2}B}, \text{ ГПа.}$$

Результаты расчета этого напряжения по известным ударным адиабатам солей-ингибиторов приведены в таблице 5.4. Анализ результатов показывает, что существуют соли-ингибиторы, обладающие высокой сопротивляемостью напряжению сдвига при ударных нагрузках кристалла: доломит, фториды магния, лития и натрия и криолит. Если эти соли использовать в составах ПВВ, то можно ожидать, что они будут эффективно рекомбинировать радикалы при взрыве зарядов ВВ в МВС.

Важную роль в вопросах безопасности взрывных работ играет конструкция шпуровых зарядов применяемых ПВВ. Обоснование конструкции шпурового заряда

Таблица 5.4

Результаты расчета критического напряжения сдвига в кристаллах солей-ингибиторов

№ п/п	Соль-ингибитор	Химическая формула соли	Плотность кристалла соли, кг/м ³	Коэффициенты уравнения ударной адиабаты соли		[$\tau_{кр}$], ГПа
				A, м/с	B	
1	Хлористый натрий	NaCl	2165	3449,40	1,4281	3,1887
2	Хлористый калий	KCl	1990	2703,01	1,3547	1,900
3	Фтористый калий	KF	2485	2324,40	1,6496	1,439
4	Фтористый натрий	NaF	2805	4121,99	1,222	6,894
5	Фтористый литий	LiF	2650	5192,00	1,305	9,677
6	Хлористый литий	LiCl	2076	3935,30	1,3826	4,111
7	Фтористый кальций	CaF ₂	3180	3923,40	1,4869	5,820
8	Фтористый магний	MgF ₂	3190	5284,70	1,124	14,012
9	Фтористый барий	BaF ₂	4830	2440,65	1,4526	3,501
10	Сульфат бария	BaSO ₄	4375	3436,35	1,4629	6,243
11	Криолит	Na ₃ AlF ₆	2960	4233,40	1,2799	7,327
12	Доломит	CaMgC ₂ O ₆	2840	5732,0	1,049	15,725

сводится к следующему. Необходимо разработать конструкцию патронов ВВ, стыкующихся между собой и образующих сплошной монозаряд. Эти патроны должны быть герметичные и устойчиво детонировать в воде при гидровзрывании. Длина донной забойки должна быть достаточной для торможения продуктов взрыва ВВ и обеспечения безопасности взрывания при применении ПВВ V и VI классов. Основная масса донной забойки при взрыве шпурового заряда ПВВ загоняется расширяющимися продуктами взрыва ВВ в трещины массива. Это позволяет флегматизиро-

вать МВС в трещинах и насыщать газоносный массив ингибиторами окисления метана. На основании данных работ [284, 285] рассчитана необходимая длина донной забойки для торможения продуктов детонации шпуровых зарядов ПВВ. Результаты расчета приведены в табл. 5.5.

Таблица 5.5

Длина донной забойки шпурового заряда ПВВ

Масса заряда, кг	Угленит 13П				Угленит 10П			
	Прямое инициирование		Обратное инициирование		Прямое инициирование		Обратное инициирование	
	Длина забойки, м		Длина забойки, м		Длина забойки, м		Длина забойки, м	
	из воды	из ИПЗ	из воды	из ИПЗ	из воды	из ИПЗ	из воды	из ИПЗ
1	2	3	4	5	6	7	8	9
0,6	0,152	0,129	0,123	0,107	0,137	0,118	0,113	0,099
0,8	0,171	0,144	0,137	0,118	0,153	0,130	0,124	0,108
1,0	0,189	0,158	0,150	0,127	0,166	0,140	0,134	0,115
1,2	0,206	0,170	0,161	0,136	0,179	0,150	0,143	0,122
1,4	0,221	0,182	0,172	0,145	0,191	0,159	0,151	0,128

Проверка и обоснование параметров патронов ПВВ в герметичных стыкующихся в монозаряд полиэтиленовых оболочках были проведены в МакНИИ, где они испытывались на соответствие показателям, предусмотренным техническими требованиями к патронированным ВВ V и VI классов с повышенной устойчивостью против выгорания. Предохранительные нитроэфиросодержащие ВВ – углениты 13П (V класс) и 10П (VI класс) патронировали в полиэтиленовые оболочки диаметром 37...38 мм, имеющие узлы стыковки патронов в монозаряд, герметичность которых достигалась с помощью туго посаженной крышечки из полиэтилена (рис. 5.2). Изготавливали эти ПВВ на химическом объединении имени Г.И. Петровского, единственном производителе угленитов 13П и 10П. Для этих патронов установили безопасные параметры шпурового заряда при гидровзрывании (критические условия):

$$\frac{M_{np}}{m_{BB}} \geq 1, \quad \frac{\delta_{эф}}{\delta_{кр}} \geq 1, \quad (5.24)$$

где $\delta_{эф}$ и $\delta_{кр}$ – соответственно эффективная толщина водяной оболочки заряда ВВ и толщина безопасной предохранительной оболочки заряда.

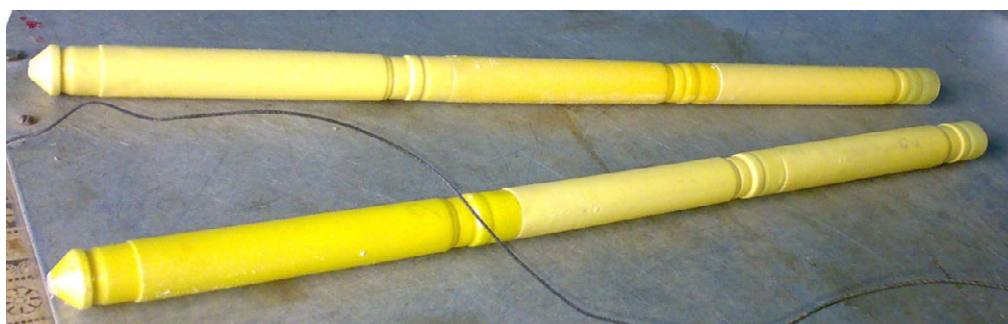


Рис. 5.2. Предохранительные водоустойчивые монозаряды ПВВ

Экспериментальные исследования позволили установить эмпирическую зависимость толщины предохранительной водяной (гидрогелевой) оболочки вокруг цилиндрического заряда от величины мощности детонационной волны ВВ:

$$\delta_{кр} = 5,2921933 \ln N_D - 125,29539, \text{ мм}, \quad /r/ = 0,9786. \quad (5.25)$$

График зависимости представлен на рис. 5.3. Таким образом, можно сделать вывод, что выбор солей-ингибиторов для модернизации ПВВ, разработка конструкции шпурового заряда и способ гидровзрывания решают проблему безопасности производства взрывных работ в газоносных горных массивах шахт. Применение же эффективных ингибиторов метана в составе ПВВ позволяет при их взрыве создать еще предохранительную среду на время взрывных работ и обеспечить взрывозащиту в забое выработки. Это было доказано экспериментально, хотя ранее считалось, что создание предохранительной среды зарядами ПВВ IV класса не возможно [286, 287].

5.4. Исследование создания предохранительной среды взрывом заряда ПВВ

Применение предохранительных ВВ во взрывоопасной среде будет безопас-

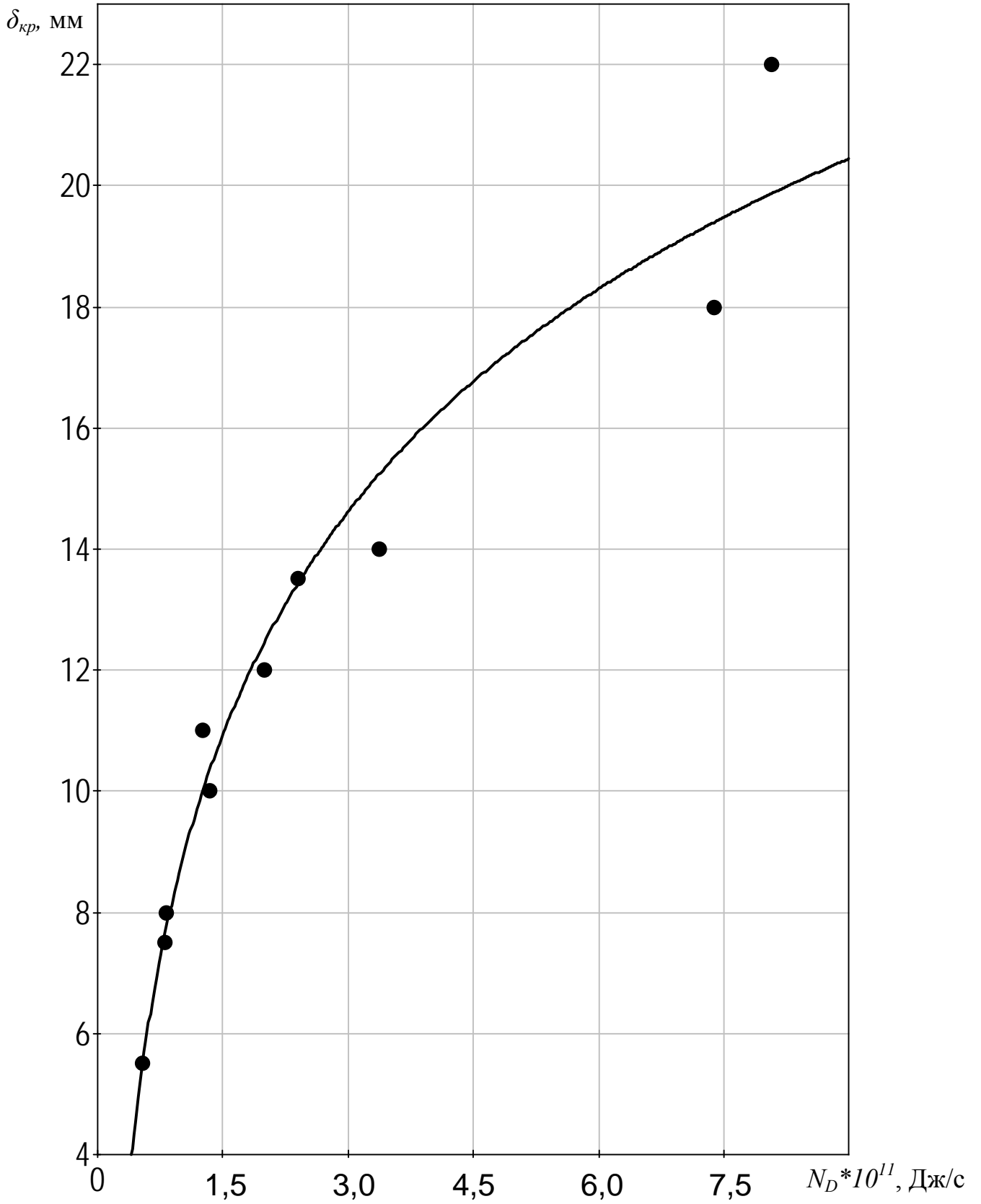


Рис. 5.3. График зависимости безопасной толщины оболочки из воды при гидро-взрывании от мощности детонации ПВВ

ным только тогда, когда при взрыве заряда в МВС будут выполняться условия:

$$C_u(t) \geq C_\phi, \quad (5.26)$$

$$C_u(t) = C_{BB} \left(\frac{r_3}{R_{yB}} \right)^3, \quad (5.27)$$

где C_{BB} – концентрация ингибитора в составе ВВ.

Было получено уравнение, с помощью которого можно определить радиус воспламеняющего действия ударной волны заряда ВВ на смесь метана и воздуха при давлении детонации МВС $\Delta P = 1,53 \cdot 10^6$ Па:

$$\frac{r_3}{R_{yB}} = \frac{10,0257}{(\rho_{BB} E_{BB} a_y)^{0,333}}. \quad (5.28)$$

Так как $C_{BB} = \rho_{BB} \varepsilon$, окончательно получим:

$$C_u(t) = \frac{1007,72 \varepsilon}{E_{BB} a_y}, \text{ кг/м}^3. \quad (5.29)$$

Получается, что при взрыве заряда ВВ можно определить объем МВС критического радиуса действия ударной волны и такую концентрацию в нем ингибитора, при которой в забое при взрыве заряда ПВВ автоматически достигаются параметры взрывозащиты путем создания продуктами взрыва ВВ предохранительной среды.

Поэтому вопрос определения концентрации ингибитора, флегматизирующей МВС, является очень важным. До настоящего времени ее определяли исключительно экспериментальным путем в опытном штреке по специальной методике, разработанной проф. Н.Р. Шевцовым. C_ϕ была определена для порошкообразных солей и их растворов [288]. Эти результаты приведены в табл. 5.6.

При проведении испытаний была дана оценка степени влияния дисперсности солей на концентрацию ингибиторов, флегматизирующих МВС. Дисперсность соли определяли путем рассева. Делая предположение, что форма частичек соли приближается к сферической, удельную поверхность частицы соли нашли по формуле:

$$S_y = \frac{6000000}{d_c \rho_u}, \text{ м}^2/\text{кг},$$

где d_c – диаметр частицы соли.

Таблица 5.6

Результаты определения концентрации ингибитора, флегматизирующей МВС

Ингибитор	Средний диаметр частиц, $d_{\text{ч}}$, мкм	Плотность кристаллов, $\rho_{\text{к}}$, кг/м ³	Средняя удельная поверхность частицы соли, $S_{\text{у}}$, м ² /кг	Концентрация ингибитора, $C_{\text{ф}}$, г/м ³	Примечание
NaCl	~ 2500	2160	1,11	~ 550,0	
NaCl	~ 500	2160	5,55	200...250	
NaCl	~ 40-50	2160	61,73	13,3	
NaCl	~ 32,2	2160	86,00	9,096	по уравн. (5.30)
KCl	~ 200	1990	15,07	61,0	
KCl	50-70	1990	40,2	36,3	
KCl	~ 40	1990	75,38	10,3	
Na ₂ SO ₄	600-800	2698	3,18	290,0	
NaHCO ₃	300-500	2200	7,8	150,0	
CaF ₂ (флюорит)	~ 100	3180	18,87	26,9	
Na ₂ CO ₃	200-300	2533	11,844	~ 55,0	
Вода	-	1000	-	360,0	
25%-ный раствор NaCl	-	-	-	36,3	
17%-ный раствор KCl	-	-	-	68,0	
Пыль инертная сланцевая	~ 70	-	~ 40,0	788,0	

Для порошкообразных солей были получены эмпирические зависимости для NaCl

$$C_{\phi} = 0,16337(0,99962)^{d_{\text{ч}}} d_{\text{ч}}^{1,1603}, \text{ г/м}^3, \quad /r/ = 0,9999 \quad (5.30)$$

и для всех остальных порошкообразных ингибиторов

$$C_{\phi} = 8913,624(S_y + 4,125)^{-1,6862}, \text{ г/м}^3, \quad /r/ = 0,994. \quad (5.31)$$

Обе эмпирические зависимости имеют высокий коэффициент корреляции. Однако значения C_{ϕ} по уравнению (5.31) имеют значительно больший разброс, чем по уравнению (5.30). Это значит, что результаты расчета для хлористого натрия более точные, чем для всех солей, отличающихся между собой химической природой. Поэтому возникла необходимость учитывать химическую природу соли-ингибитора при флегматизации МВС.

Влияние химической природы ингибитора на антигрязность предохранительного ВВ исследовано в работе [289]. Ингибирующая способность соли определяется по уравнению:

$$И = \frac{F_a S_y}{M_B}. \quad (5.32)$$

Учитывая это, можно предположить, что концентрация ингибитора, флегматизирующая МВС, определяется ингибирующей способностью соли:

$$C_{\phi} = \varphi(И). \quad (5.33)$$

Тогда для всех ингибиторов, флегматизирующих МВС, должно выполняться равенство между концентрацией ингибитора и ингибирующей способностью соли в следующем виде:

$$\frac{C_{\phi_1} F_{a_1} S_{y_1}}{M_{B_1}} = \frac{C_{\phi_2} F_{a_2} S_{y_2}}{M_{B_2}} = \dots = \frac{C_{\phi_n} F_{a_n} S_{y_n}}{M_{B_n}}. \quad (5.34)$$

Из этого тождества следует, что

$$\frac{C_{\phi_1}}{C_{\phi_2}} = \frac{F_{a_2} S_{y_2} M_{B_1}}{F_{a_1} S_{y_1} M_{B_2}}. \quad (5.35)$$

Для проверки этого утверждения были использованы экспериментальные и расчетные данные, приведенные в табл. 5.7. Их сравнение показало правомерность

равенства отношений (5.35).

Таблица 5.7

Экспериментальные значения $\frac{C_{\phi 1}}{C_{\phi 2}}$ и расчетные значения $\frac{F_{a_2} S_{y_2} M_{B_1}}{F_{a_1} S_{y_1} M_{B_2}}$

Ингибитор	M_B	F_a	S_y , м ² /кг	C_{ϕ} , г/м ³	$C_{\phi 1}/C_{\phi 2}$ экспер.	$\frac{F_{a_2} S_{y_2} M_{B_1}}{F_{a_1} S_{y_1} M_{B_2}}$ расчетн.
NaCl	58,5	1,0	86,0	9,1	1,0	1,0
NaCl	58,5	1,0	61,73	13,3	1,461	1,393
NaCl	58,5	1,0	5,55	~ 200	21,978	15,495
NaCl	58,5	1,0	1,11	550	60,439	77,477
KCl	74,5	1,0	75,38	10,3	1,132	1,452
KCl	74,5	1,0	40,2	36,3	3,989	2,724
KCl	74,5	1,0	15,07	61,0	6,703	7,267
Na ₂ SO ₄	142,0	2,0	3,18	290,0	31,868	32,823
NaHCO ₃	84,0	1,0	7,80	150,0	16,483	15,832
CaF ₂ (флюорит)	78,0	2,0	18,87	26,9	2,956	3,038
Na ₂ CO ₃ (сода)	106	2,0	11,844	55,0	6,044	6,578

Результаты расчетов, сделанных для солей-ингибиторов относительно эталонной – хлористого натрия, показывают достаточно хорошее соответствие (коэффициент парной корреляции $r=0,995$) концентраций солей, флегматизирующих МВС благодаря своей ингибирующей способности. Это позволяет использовать полученное тождество (5.35) для расчета концентрации соли-ингибитора. Для этого подставим известные величины C_{ϕ} , F_a , S_y и M_B хлористого натрия и, сделав необходимые преобразования, получим уравнение для расчета флегматизирующей МВС концентрации любой соли-ингибитора:

$$C_{\phi} = \frac{13,37773 M_B}{F_a S_y}, \text{ г/м}^3. \quad (5.36)$$

Следующими важными факторами при взаимодействии ингибитора с ударно-сжатой МВС являются скорость разлета частиц соли и время индукции МВС. Если за время индукции МВС частицы соли пролетают расстояние $R_u = U_u \tau_u$, большее радиуса ударно-сжатой МВС – R_{yc} , то они будут с ней взаимодействовать и ингибировать цепные реакции окисления метана.

Для определения скорости разлета частиц соли-ингибитора в расширяющемся потоке газообразных продуктов взрыва ПВВ воспользуемся решением подобной задачи, полученным Ф.А. Баумом [290]. Согласно закону Ньютона, запишем дифференциальное уравнение движения двухфазного потока (смесь газа и конденсированных частиц соли):

$$m_u \frac{dU_o}{dt} = C_x S_y \rho_{ПВ} \frac{U_o^2}{2}, \quad (5.37)$$

где m_u – масса частицы соли, кг;

U_o – скорость потока продуктов взрыва ПВВ относительно частицы соли, определяется по формуле: $U = W - U_u$,

t – время, сек.;

C_x – коэффициент сопротивления;

$\rho_{ПВ}$ – плотность продуктов взрыва, кг/м³.

Решение уравнения, где R – радиальная координата частицы соли при полете и a – параметр для сферической частицы, имеет вид:

$$\frac{R}{a} = \left[\frac{U_u}{W - U_u} - \ln \left(1 + \frac{U_o}{W - U_u} \right) \right], \quad a = \frac{3 \rho_{ПВ} C_x}{8 \rho_u r_u}, \text{ м}^{-1}. \quad (5.38)$$

Коэффициент сопротивления безразмерен и в идеальном случае зависит только от геометрии обтекаемого тела. Сопротивление обтекания шара зависит от числа Рейнольдса Re и для расширяющихся продуктов взрыва ПВВ, у которых число Рейнольдса значительно больше критического, для частиц шарообразной формы можно принять коэффициент сопротивления, равный коэффициенту сопротивления шара: $C_x \approx 0,47$. Примем $U_u \approx U_o$, тогда уравнение (5.38) можно представить так:

$$\bar{R} = \bar{U} - \ln(1 + \bar{U}), \quad (5.39)$$

где $\bar{R} = \frac{R}{a}$, а $\bar{U} = \frac{U_c}{W - U_c}$.

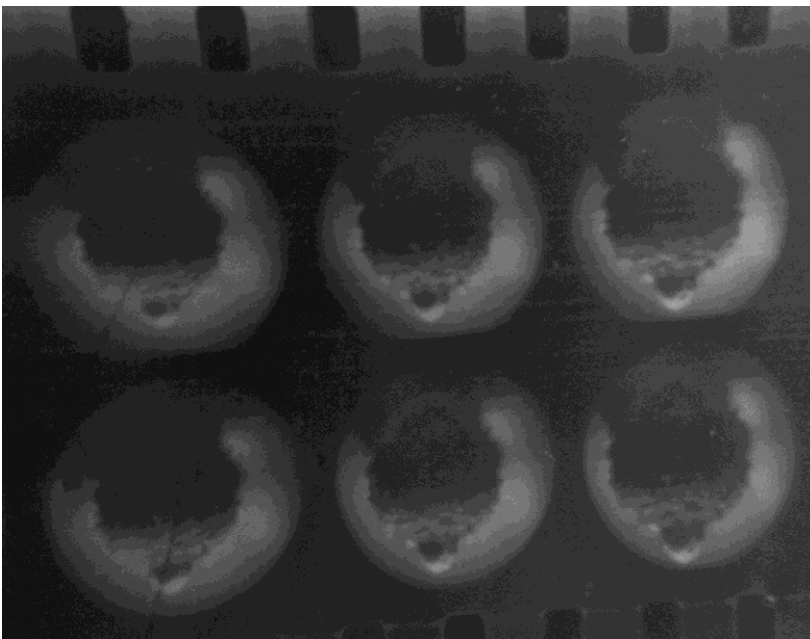
Аналитическое решение уравнения (5.39) имеет следующий вид:

$$\bar{U} = \exp \left[0,018 + \frac{2,7866}{\bar{R}} + 0,99804 \ln(\bar{R}) \right]. \quad (5.40)$$

Очевидно, что если будут известны значения скорости двухфазного потока, радиальной координаты частиц соли и их параметра a , то можно установить абсолютную скорость частиц соли-ингибитора.

При помощи скоростного фоторегистра СФР-2М методом силуэтной съемки был исследован характер расширения продуктов взрыва зарядов ПВВ аммонита Т-19 (IV класс) и угленита Э-6 (V класс) массой 0,2 кг и диаметром 36 мм (рис. 5.4).

а)



б)

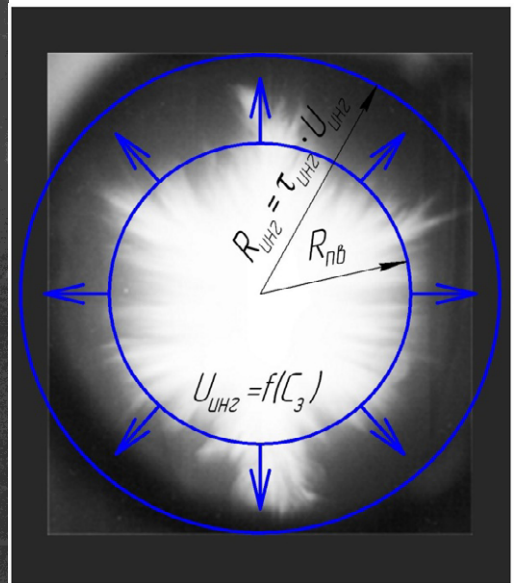


Рис. 5.4. Силуэтная съемка СФР-2М взрыва аммонита Т-19:

а) разлет продуктов детонации;

б) зона разлета ингибитора и свечение пламени продуктов взрыва:

$R_{инг}$ – радиус разлета частиц ингибитора,

$\tau_{инг}$ – время движения частиц ингибитора,

$U_{инг}$ – скорость разлета частиц ингибитора,

$V_{инг}$ – объем зоны ингибирования взрывных реакций.

Методом сверхбыстрой импульсной съемки заснят разлет продуктов взрыва высокопредохранительного ионообменного ВВ [291] (рис. 4.2). На рис. 5.4 показан разлет продуктов взрыва ПВВ аммонита Т-19. Для исследований разлета продуктов взрыва были выбраны классическое предохранительное ПВВ – аммонит Т-19 и ионообменное ПВВ угленит Э-6. По фоторегистрограммам определили скорость бокового расширения продуктов взрыва ВВ. За начало отсчета времени был принят кадр, на котором был виден выход детонационной волны на боковую поверхность заряда. Далее через определенные промежутки времени определяли приращение радиуса сферы $\Delta R = R_{n+1} - R_n$. Скорость расширения продуктов взрыва на этом участке равна: $W = \Delta R / \Delta t$, где Δt – интервал времени между экспозицией кадров $n+1$ и n , для которых определялось приращение ΔR .

Зависимости от времени скорости расширения продуктов взрыва при взрыве зарядов аммонита Т-19 и угленита Э-6 открытых и в канальной мортире при обратном инициировании показаны на графиках (рис. 5.5), (рис. 5.6). Эмпирические зависимости для открытых зарядов аммонита Т-19 и угленита Э-6 соответственно такие:

$$W = W_n \exp[8,6066 + 6,404636/t - 0,2022 \ln t], \text{ м/с}, W_n = 1 \text{ м/с}, \quad (5.41)$$

$$W = 3032,2 \exp(-0,0057451235t), \text{ м/с}, \quad (5.42)$$

для зарядов в канале мортиры аммонита Т-19 и угленита Э-6 соответственно такие:

$$W = 5177,3 - 3978,042 \exp[-36,718(t)^{-0,9176}], \text{ м/с}, \quad (5.43)$$

$$W = 1307,56[1 - 0,67 \exp(-0,00732t)]^{-1}, \text{ м/с}. \quad (5.44)$$

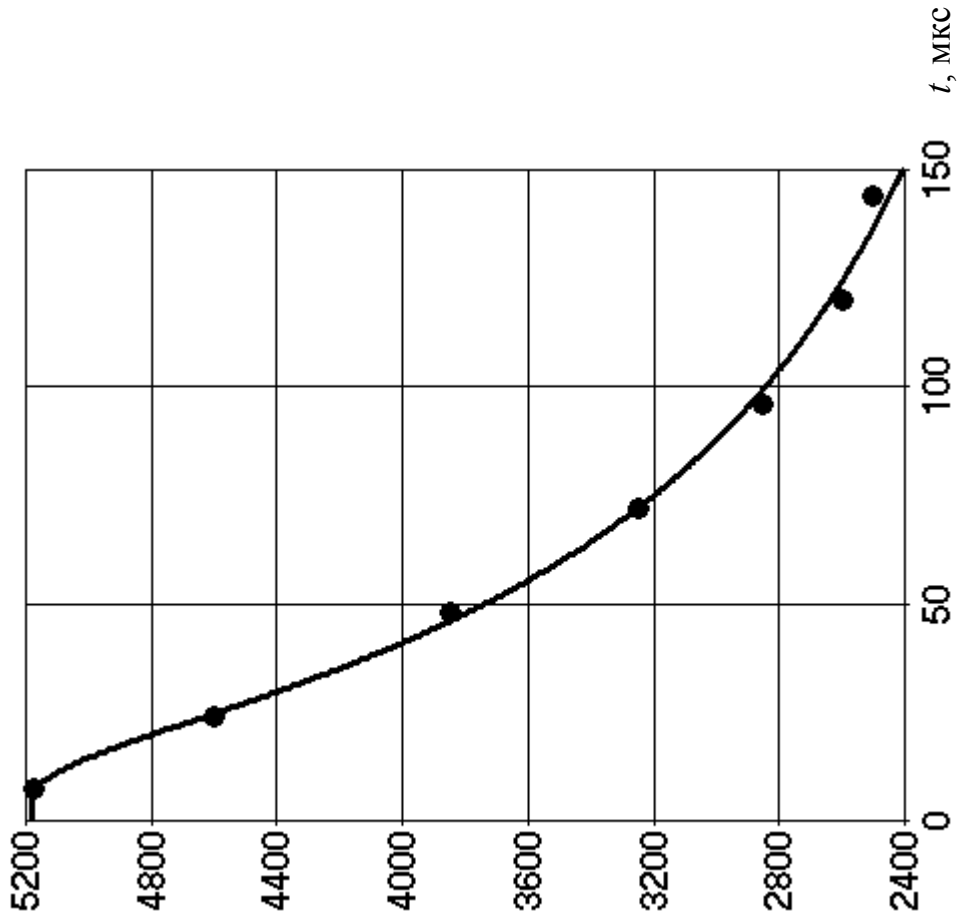
Для открытых зарядов зависимости (5.41) и (5.42) преобразованы с учетом отношения радиуса к приведенному сферическому радиусу заряда ВВ соответственно:

$$W = 5656,82 - 3514,806 \exp[-10,9181(R/r_{BB})^{-2,94611}], \text{ м/с}, \quad (5.45)$$

$$W = 3866,1 \exp[-0,17255(R/r_{BB})], \text{ м/с}. \quad (5.46)$$

Обработка результатов исследований и расчет по уравнениям (5.40) – (5.46) позволили сделать вывод, что частицы ингибитора имеют несколько меньшую скорость, чем газообразные продукты взрыва ПВВ. Установлено, что у ПВВ ионообменного типа частицы ингибитора очень малы, приближаются по размерам к наночастицам и, значит, для ингибитора по уравнению (5.40) можно найти скорость час-

а)



б)

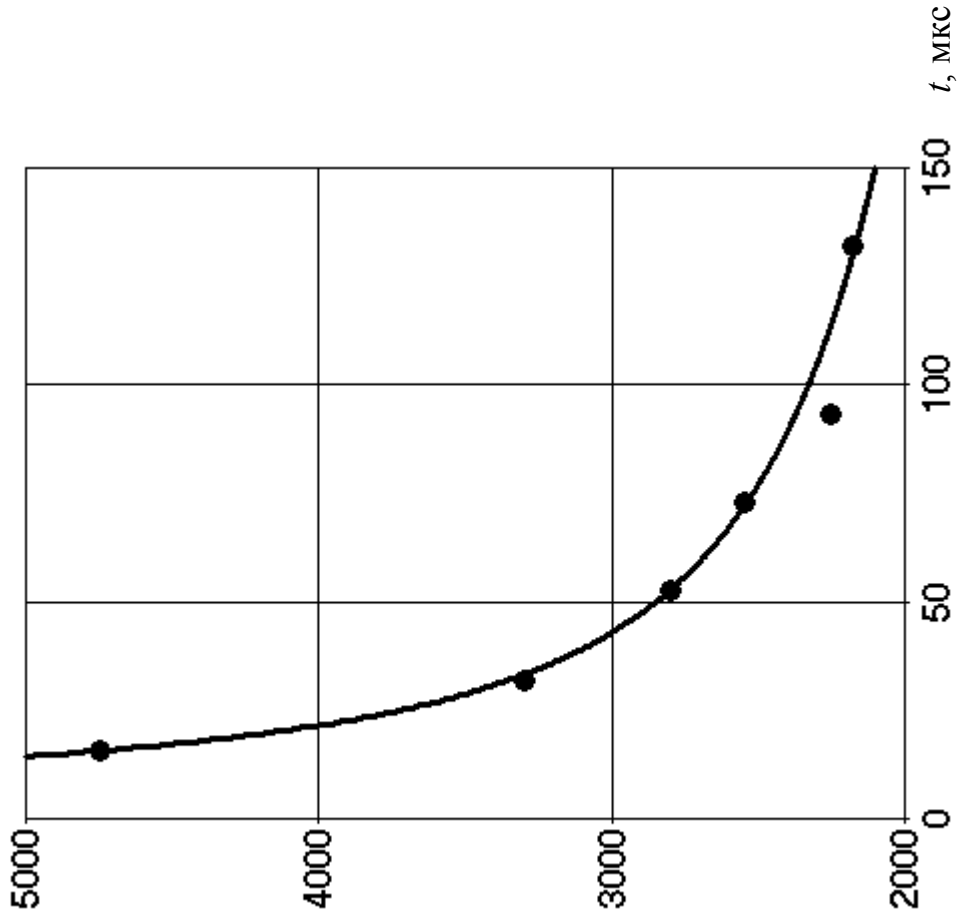
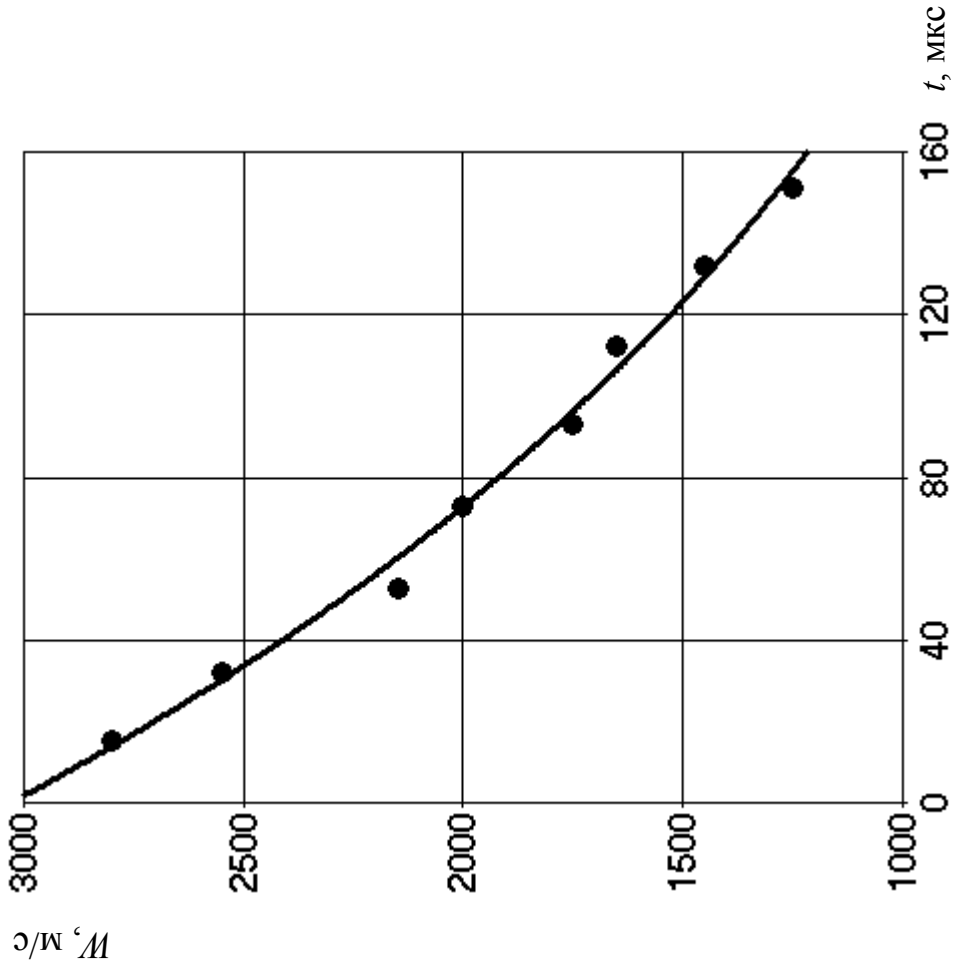


Рис. 5.5. Графики зависимости скорости потока продуктов детонации ВВ от времени при взрыве зарядов

а) аммонита Т-19 в канальной мортире,

б) аммонита Т-19 открытых свободно подвешенных

б)



а)

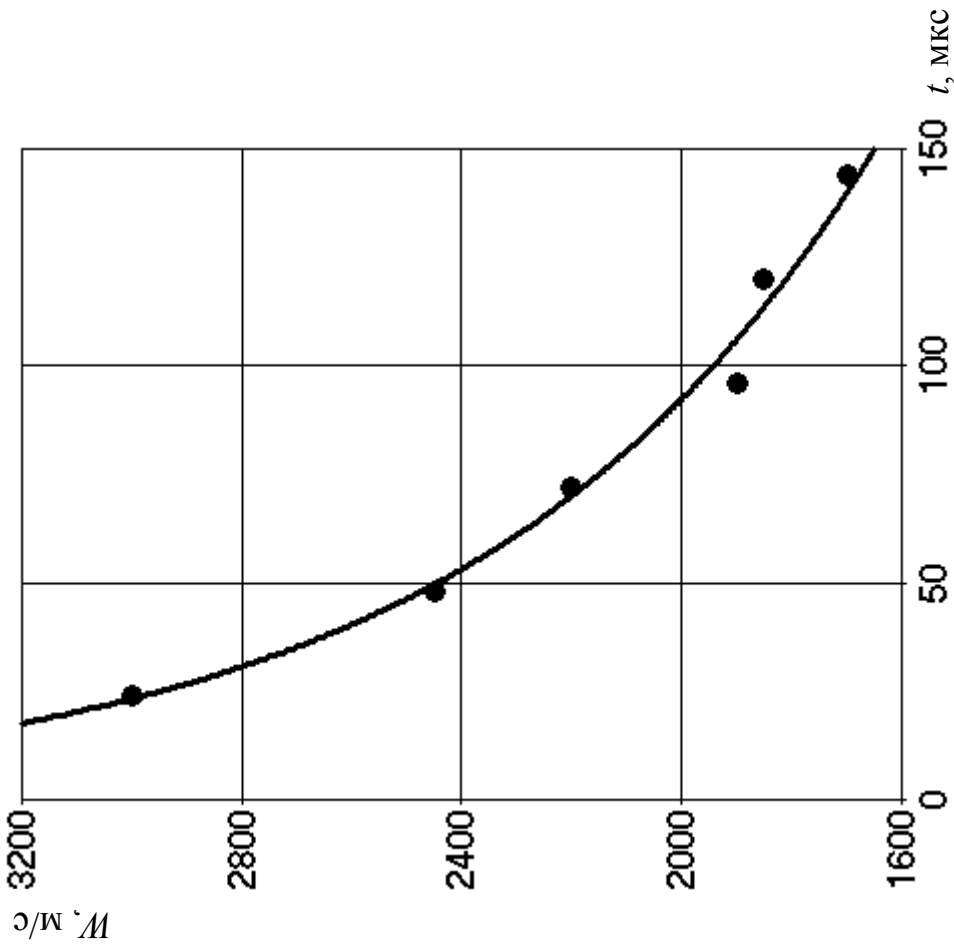


Рис. 5.6. Графики зависимости скорости потока продуктов детонации ВВ от времени при взрыве зарядов

а) угленита Э-6 в канальной мортире,

б) угленита Э-6 открытых свободно подвешенных

тиц размером $r_u = 10^{-6} \dots 10^{-8}$ м. Расчет показал, что она равна примерно 96...98% от скорости потока продуктов детонации ПВВ при их расширении. Тогда средняя скорость частиц ингибитора ионообменных ПВВ составляет не менее половины скорости детонации ВВ. По мере расширения продуктов взрыва и движения ударной волны их параметры снижаются, соответственно, и способность воспламенить МВС уменьшается, а период индукции самовоспламенения МВС возрастает. Из расчета периода индукции МВС было установлено, что на расстоянии $6 \dots 8 r_z$ от заряда ПВВ частицы соли-ингибитора начинают попадать в зону ударно-сжатой МВС и увеличивать период ее индукции за счет торможения реакции окисления метана. Это, в свою очередь, приводит к затуханию взрывной реакции и образованию невзрывчатой среды. График зависимости произведения периода индукции МВС на давление от температуры во фронте ударной волны [292] показан на рис. 5.7. Также установили [293] и расстояние, зависящее от времени и скорости полета частиц ингибитора при взрыве открытого заряда ПВВ (рис. 5.8). Эти зависимости позволили определить условия взаимодействия соли-ингибитора с ударно-сжатой МВС: $\tau_u U_u \geq R_{yc}$, $R_{yc} = Wt$ и критическое условие взаимодействия с МВС ингибитора: $\tau_u \geq t$.

Теперь рассмотрим условие создания предохранительной среды в МВС при взрыве заряда ионообменного ПВВ [294]. Концентрация пламегасителя в предохранительной среде определяется по формуле:

$$C_n = m_\phi / Sl_{nc}, \text{ кг/м}^3. \quad (5.47)$$

Если предохранительная среда создается взрывом ВВ, в результате которого расширяющийся газодисперсный поток из образовавшихся при взрыве газообразных продуктов и ингибитора взаимодействует с горючей средой, то длина предохранительной среды согласно уравнению (5.47) будет равна:

$$l_{nc} = \frac{\varepsilon m_{BB}}{SC_n}. \quad (5.48)$$

Так как предохранительная среда создается расширяющимися продуктами взрыва ВВ, уравнение (5.48) запишем следующим образом:

$$\frac{dl_{nc}}{dt} dt = \frac{\varepsilon m_{BB}}{SK_p C_n}; \quad (5.49)$$

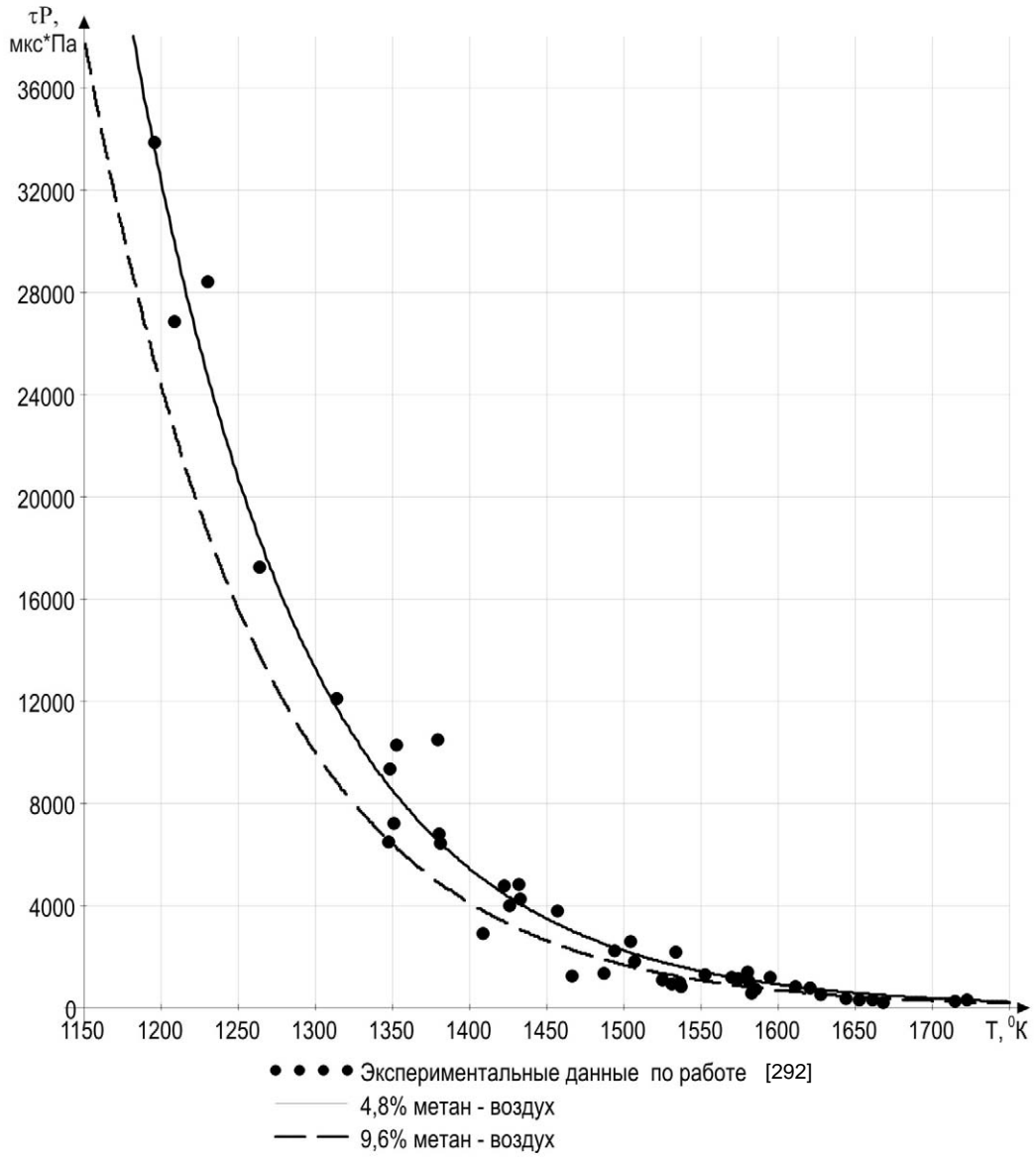


Рис. 5.7. График зависимости произведения периода индукции МВС на ее давление от температуры смеси во фронте ударной волны

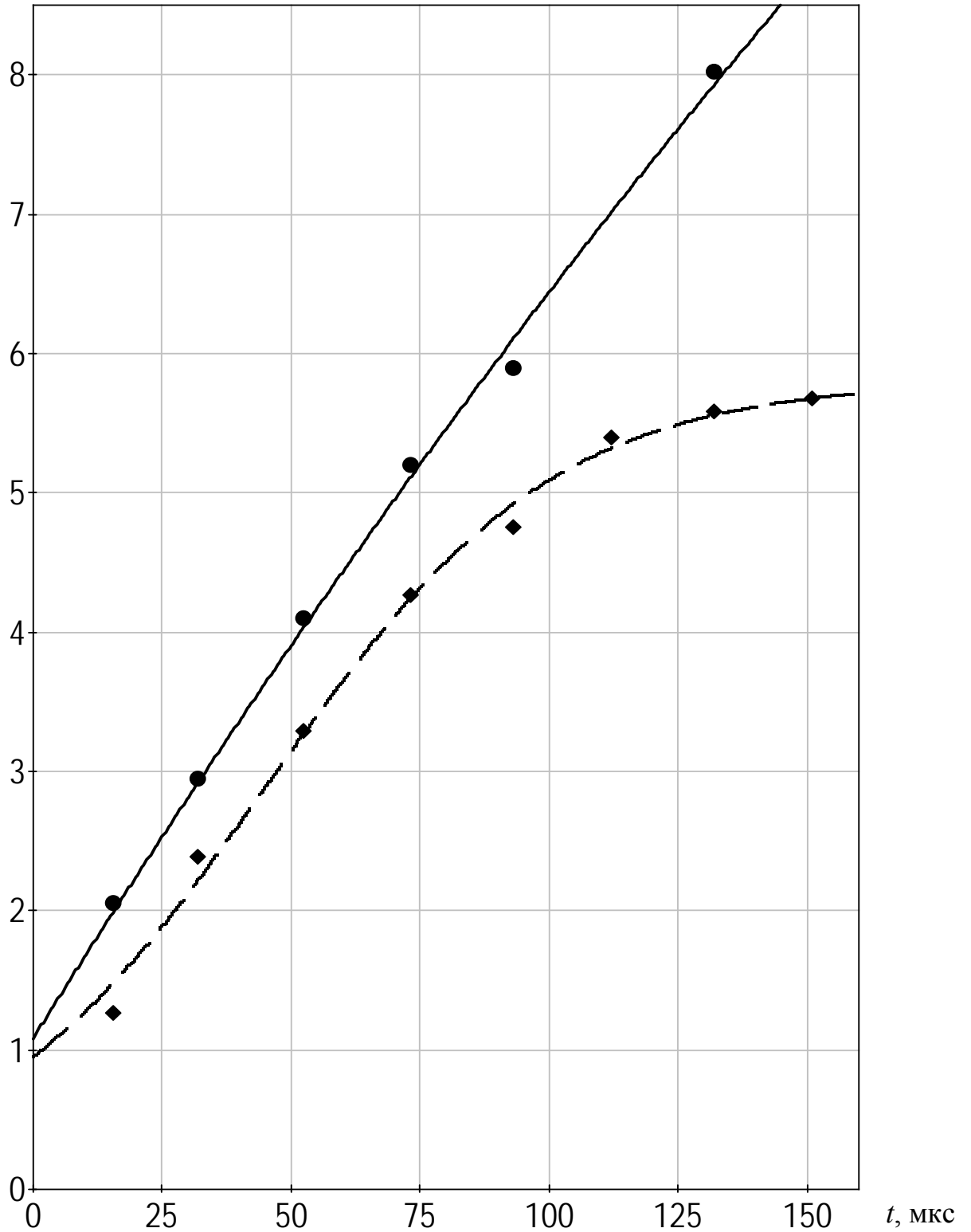
R/r_3 

Рис. 5.8. График зависимости относительного расстояния разлета частиц R/r_3 от времени t :

————— для аммонита Т-19,

- - - - для угленита Э-6

Учитывая, что $dl_{nc}/dt = U_q$ – это скорость движения частиц ингибитора при формировании предохранительной среды, изменяющаяся за интервал времени dt от начального значения скорости продуктов детонации $U = D/(n+1)$ до конечного значения $U_q = 0$, при окончательном торможении частиц ингибитора в МВС из уравнения (5.49) получим:

$$\frac{D}{2(n+1)} \Delta t_m = \frac{\varepsilon m_{BB}}{SK_p C_n}, \quad (5.50)$$

где Δt_m – интервал времени торможения частиц ингибитора во взрывоопасной среде, с.

Из этого уравнения легко получить условие предотвращения воспламенения МВС, при котором взрыв ПВВ создает в ней предохранительную среду:

$$K_p = \frac{C_n}{C_\phi} \geq 1 \quad (5.51)$$

Концентрация ингибитора в предохранительной среде равна:

$$C_n = K_p C_\phi \quad (5.52)$$

Тогда уравнение (5.47) примет следующий вид:

$$K_p = \frac{2\varepsilon m_{BB}(n+1)}{SC_n D \Delta t_m} = 1.$$

При $C_n = C_\phi$ получим уравнение для расчета массы заряда ВВ, создающего при его взрыве в забое предохранительную среду:

$$m_{BB} = \frac{SC_\phi D \Delta t_m}{2\varepsilon(n+1)}, \text{ кг.} \quad (5.53)$$

С помощью этого уравнения рассчитаем массы зарядов ВВ, создающие в забое выработки предохранительную среду (табл. 5.8). Полученные результаты были проверены в условиях опытного штрека МакНИИ. Испытывали свободно подвешенные заряды ПВВ III...VII классов во взрывной камере в МВС.

В качестве воспламеняющего МВС использовали заряд ВВ IV класса аммонита Т-19 массой 0,15 кг. Подтвердили, что создание предохранительной среды зарядами ПВВ возможно. Однако ПВВ III и IV класса не могут ее создать, так как их

Таблица 5.8

Масса зарядов ПВВ, создающих предохранительную среду (ПС) при взрыве в опытном штреке

ПВВ, класс	ε , кг/кг	C_{ϕ}^* , г/м ³	D , м/с	Предельные заряды ПВВ в МВС, M_{np} , кг		Масса заряда ВВ, создаю- щая ПС, $m_{ВВ}$, кг
				открыт. заряд	канальная мортира	
Аммониты: АП-5ЖВ,III	0,12	32,9	4250	0,010	0,110	6,42
Т-19 (ПЖВ-20), IV	0,2	32,9	4100	0,020	0,200	3,72
Углениты: Э-6, V	0,39	13,3	2224	0,2...0,3	1,5	0,683
13П, V	0,292	13,3	2320	0,2	1,0	1,077
10П, VI	0,336	13,3	1958	0,6...0,8	1,5	0,687
Ионит, VII	0,374	13,3	1676	1,0	1,5	0,513

* C_{ϕ} для ингибитора NaCl получены Н.Р. Шевцовым

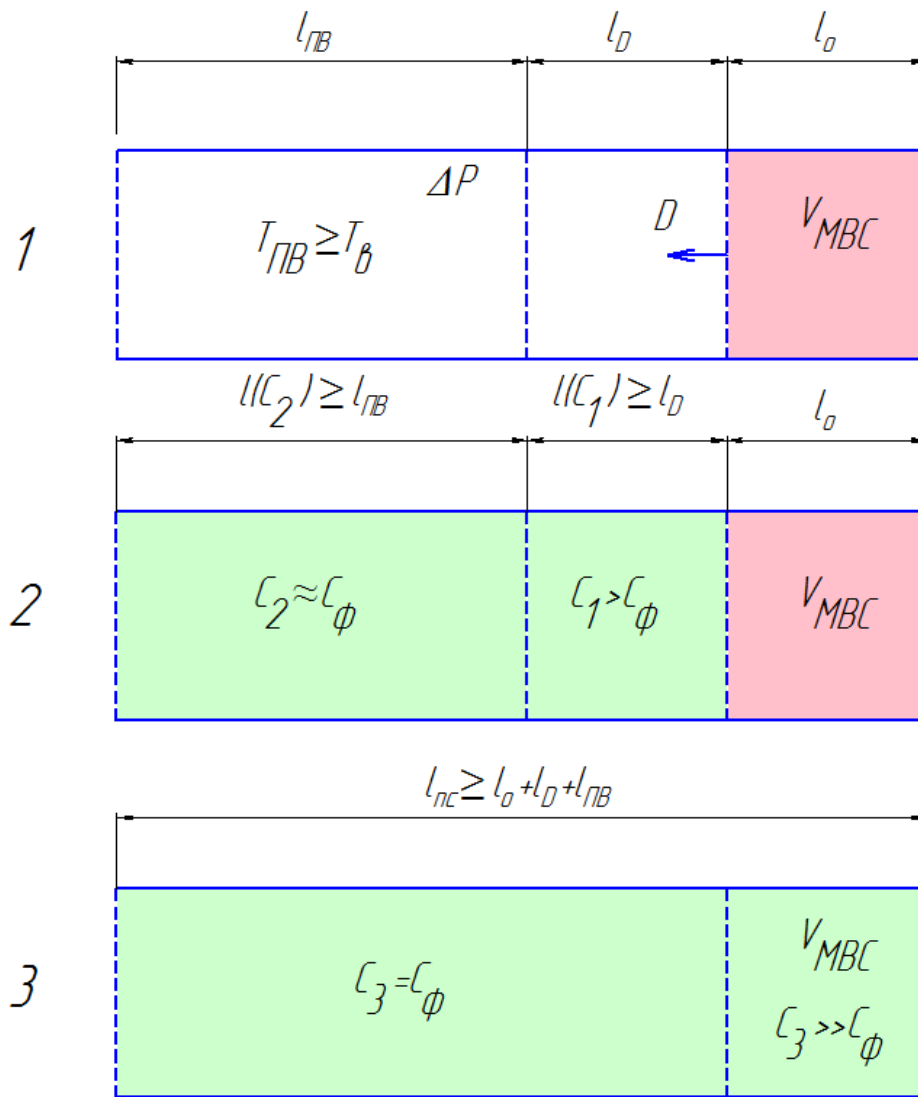
масса их предельных зарядов гораздо меньше массы зарядов ВВ, которые создают газодисперсную невзрывчатую смесь из продуктов взрыва, ингибитора, метана и воздуха. Заряды ПВВ V класса, взрывающиеся в канальной мортире, могут создать предохранительную среду только в том случае, если нет их обнажения. ПВВ же VI и VII классов могут успешно создавать предохранительную среду, так как они имеют предельные заряды, в том числе и обнаженные, гораздо большие по массе, чем заряды, необходимые для создания ингибиторной газодисперсной среды из смеси продуктов взрыва ВВ и МВС.

5.5. Обоснование параметров взрывозащиты при взрывных работах

Основы теории взрывозащиты горных выработок с помощью дисперсной предохранительной среды развиты в работах [295, 296]. Основные положения взрывозащиты сводятся к необходимости охлаждения продуктов горения взорвавшейся

смеси до температуры, которая меньше минимально необходимой для инициирования реакции окисления метана и угольной пыли в еще не взорвавшейся среде. Наиболее сложным вариантом предотвращения взрыва является его локализация в загазированной горной выработке в условиях, когда в качестве газовой фазы дисперсной системы выступает взрывчатая МВС, в том числе, находящаяся в трещинах массива. В таких выработках эффективность создания предохранительной среды заслонами зависит, в основном, от соответствия их этим техническим условиям. В работах [297, 298] выявлены закономерности взаимодействия факторов локализующей взрыв предохранительной среды определенной длины, обеспечивающей охлаждение продуктов взрыва МВС до безопасной (критической) температуры. Доказано, что положительный результат может быть достигнут только при обязательном выполнении основного условия: в пределах предохранительной среды взрывчатая МВС должна быть превращена в невзрывчатую систему с помощью пламегасителя, концентрация которого (C_n) в смеси должна быть не ниже взрывопредотвращающей (C_ϕ) в течение всего периода времени, необходимого для гашения пламени взрыва.

Однако эта теория не учитывает механизм воспламенения МВС ударной волной и влияния на параметры этой волны ингибиторов. Не выявлены также и факторы, которые в той или иной степени могут оказывать влияние на эффективность действия предохранительной среды в МВС. Тем не менее, доказано, что механизм взрывоподавления во многом зависит от концентрации пламегасителя в этой среде и процесса его взаимодействия с реагирующей взрывоопасной МВС. При взрывных работах взрывозащита в выработке связана с наличием двух характерных областей возможного воспламенения метана. Первая образуется в забое под действием ударных волн и горящих частиц ВВ, а вторая – в трещинах горного массива под действием продуктов детонации заряда ПВВ (рис. 5.9, поз. 1). Объемы воспламеняемой МВС в обоих случаях определяются параметрами ударных волн, горящих частиц и продуктов детонации, поэтому могут быть определены. В первой области взрывозащиту при взрывных работах можно обеспечить заслонами, параметры которых учитывают воспламеняющее действие ударных волн и горящих частиц на МВС (рис. 5.9, поз. 2). Во второй области воспламенение в выработке взрывоопасной сре-



C_ϕ – концентрация ингибиторных продуктов взрыва реакции МВС

Рис. 5.9. Области воспламенения и ингибирования МВС при взрывных работах:

C_1 – концентрация соли-ингибитора, предотвращающая передачу детонации от заряда ПВВ МВС;

C_2 – концентрация соли, ингибирующая взрывные реакции в МВС;

C_3 – концентрация соли в двухфазном потоке продуктов взрыва ПВВ;

l_0 – длина зоны с МВС объемом V_{MBC} ;

l_D – длина зоны воспламеняющего действия УВ на МВС;

l_{nc} – длина зоны с температурой ПВ выше температуры вспышки МВС;

$l(C_1)$, $l(C_2)$ – параметры взрывозащиты в выработке: ударной волны и продуктов взрыва или горения соответственно.

ды может быть вызвано выходом пламени из трещин массива в местах, где действие заслона не эффективно. Поэтому при взрывных работах необходимо предотвратить воспламенение МВС в трещинах массива за контуром выработки и обеспечить взрывозащиту на расстоянии отброса продуктов взрыва в выработке на все время проведения взрывных работ (рис. 5.9 поз. 3).

Рассмотрим условия создания в выработке взрывозащиты для обеспечения безопасности взрывных работ. Будем считать, что в объеме горной выработки создается взрывопредотвращающая концентрация ингибитора (C_ϕ), при которой происходит прекращение взрывной реакции МВС на длине выработки – $L_{кр}$, вдоль которой сохраняется концентрация $C(L_{кр}) = C_\phi$. Взрывопредотвращающая концентрация ингибитора является функцией от ряда факторов:

$$C_\phi = \varphi_1(F_a, \lambda, S_y).$$

Если в некотором объеме предохранительной среды выделить участок с источником воспламенения МВС, то данный участок выработки также характеризуется рядом факторов:

$$L_1 = \varphi_2(V_{MBC}, E_v), \quad (5.54)$$

где E_v – энергия, выделяющаяся в единице объема МВС с ингибитором окисления метана кислородом воздуха.

Энергия E_v является функцией следующего вида:

$$E_v = \varphi_3[\lambda, Q_v, C(L_{кр})]. \quad (5.55)$$

Тогда распространение взрыва по участку выработки с предохранительной средой длиной L_1 определяется функцией:

$$L_1 = \varphi_4[\lambda, Q_v, C(L_{кр}), V_{MBC}].$$

Ее анализ показывает следующее. Если $C(L_{кр}) \geq C_\phi$, $Q_v = 0$, $E_v = 0$ и $L_1 \leq L_{кр}$, то взрыв предотвращается, в противном случае, если $C(L_{кр}) < C_\phi$, $Q_v > 0$, $E_v > 0$ и $L_1 > L_{кр}$, то происходит воспламенение МВС и взрыв распространяется по выработке. Иницирование взрывной реакции в МВС осуществляется, как правило, ударной волной.

Рассмотрим действие ударных волн, образовавшихся при детонации МВС, на взрывоопасную смесь, которую необходимо превратить в невзрывчатую систему с

помощью дисперсной ингибиторной среды. Для одномерного случая распределения продуктов детонации МВС в горной выработке могут быть использованы ризмановские решения основных уравнений гидродинамики [188].

Решение основано на предположении, что $U_2 = f(V_2)$, где U_2 – скорость газа, V_2 – удельный объем газа. Тогда получается, что:

$$dU_2 = -\sqrt{-dP_2 dV_2}, \quad (5.56)$$

где P_2 – давление газа.

Для идеального газа, интегрируя это уравнение, получаем:

$$U_2 = U_n + \frac{2}{\gamma - 1} (C_n - C), \quad (5.57)$$

где U_n – скорость газа за фронтом детонационной волны;

C_n – скорость звука в продуктах детонации ВВ.

Гидродинамическая теория детонации [299] позволяет определить:

$$U_n = \frac{D}{\gamma + 1} \quad \text{и} \quad (5.58)$$

$$C_n = \frac{\gamma D}{\gamma + 1}. \quad (5.59)$$

Тогда можно записать:

$$U_2 = \frac{3\gamma - 1}{\gamma^2 - 1} D - \frac{2C}{\gamma - 1}. \quad (5.60)$$

При истечении газа в пустоту (вакуум) $C = 0$, в атмосферу – значение C может быть найдено из условия:

$$C = C_n \left(\frac{P_0}{P_n} \right)^{\left(\frac{\gamma - 1}{2\gamma} \right)}. \quad (5.61)$$

Величина P_n определяет давление детонации взрывоопасной смеси:

$$P_n = \frac{\rho_{BB} D^2}{\gamma + 1}. \quad (5.62)$$

Подставляя уравнения (5.59) и (5.62) в уравнение (5.61), получим:

$$C = \frac{\gamma D}{\gamma + 1} \left[\frac{P_0(\gamma + 1)}{\rho_{BB} D^2} \right]^{(\gamma - 1)/2\gamma}. \quad (5.63)$$

Давление P_2 определяется из условия его равенства давлению в ударной волне, образованной при истечении продуктов детонации в окружающую среду со скоростью U_2 :

$$U_2 = \frac{D}{\gamma^2 - 1} \left[3\gamma - 1 - 2\gamma \left(\frac{P_0(\gamma + 1)}{\rho_{BB} D^2} \right)^{(\gamma - 1)/2\gamma} \right]. \quad (5.64)$$

Анализ уравнений (5.63) и (5.64) показывает следующее. Если детонационная волна распространяется по однородной МВС, то $P_2 = P_n$ и уравнение (5.63) примет вид уравнения (5.59). Тогда скорость истечения $U_2 = U_n = D/(\gamma + 1)$.

Когда впереди детонационного фронта в МВС создается буферная предохранительная среда, нарушающая её однородность путем распыления порошка ингибитора, то условия стационарного распространения волны детонации в смеси нарушаются. Это нарушение обусловлено тем, что создается концентрация ингибитора, при которой происходит рекомбинация радикалов в зоне химической реакции и достичь полноты реакции окисления метана и выделения энергии в МВС не возможно. Как только детонационная волна входит в предохранительную среду из МВС и ингибитора, она вырождается в ударную волну вследствие отрыва зоны замедленной химической реакции от фронта детонации. В этом случае давление в ударной волне не равно давлению детонации исходной МВС и зависит от многих факторов.

Распространение ударных воздушных волн в горных выработках достаточно фундаментально изучалось А.А. Гуриным [300]. На основании многочисленных экспериментов он получил зависимость давления во фронте ударной воздушной волны от расстояния до места взрыва в горной выработке при взрывах открытых зарядов аммонита № 6ЖВ. Эта зависимость имеет вид:

$$\Delta P = \left[29,0 \frac{m_{BB}}{RS} + 7,6 \left(\frac{m_{BB}}{RS} \right)^{0,5} \right] e^{-\bar{\beta} R/d}, \text{ кг/см}^2, \quad (5.65)$$

где d – приведенный диаметр выработки, м;

$\bar{\beta}$ – коэффициент, учитывающий шероховатость поверхности выработки.

Массу взрывающегося заряда ВВ выразим через энергию, выделяющуюся при взрыве и его удельную теплоту взрыва:

$$m_{ВВ} = E/Q_v. \quad (5.66)$$

Используем закон энергетического подобия при взрывных процессах. Для этого уравнение (5.66) запишем так, чтобы его можно было применить при расчете параметров взрыва газообразной МВС:

$$\frac{E}{Q_v} = \frac{\rho_{МВС} l_0 q_{МВС} a_{y_{МВС}}}{Q_v a_{y_{ВВ}}}. \quad (5.67)$$

В монографии Ф.А. Баума [163] дано аналитическое решение задачи по определению коэффициента передачи энергии взрыва ВВ в ударную волну:

$$a_{y_{МВС}} = \frac{E}{q_{МВС}} = 1 - \frac{P_0}{(\gamma - 1)\rho_{МВС} q_{МВС}} \left[\frac{(\gamma - 1)\rho_{МВС} q_{МВС}}{P_0} \right]^{1/\gamma}. \quad (5.68)$$

Плотность МВС определяем в выработке на глубине $H = 1000$ м с температурой $T = 303^{\circ}\text{K}$ по уравнению Клапейрона-Менделеева: $\rho_{МВС} = 1,253$ кг/м³. Остальные значения подставляем в уравнение (5.68) для 9,1%-ной МВС [$\gamma = 1,264$; $q_{МВС} = 2641,095$ кДж/кг; $P_0 = 1,02 \cdot 10^5 + g\rho_{возд}H = 1,142 \cdot 10^5$ (Па)]. Получим:

$$a_{y_{МВС}} = 1 - \frac{1,142 \cdot 10^5}{0,264 \cdot 1,253 \cdot 2641035,5} \left[\frac{0,264 \cdot 1,253 \cdot 2641035,5}{1,142 \cdot 10^5} \right]^{0,79114} = 0,3462. \quad (5.69)$$

Получается, что в ударную волну при взрыве МВС передается около 35% энергии. Коэффициент $a_{y_{ВВ}}$ для аммонита № 6ЖВ равен 0,885. Подставляя известные величины в уравнение (5.65), получим давление во фронте ударной волны при взрыве МВС в горной выработке [301]:

$$\Delta P = \left[8,9375 \cdot 10^5 \left(\frac{l_{МВС}}{l_{МВС} + l_{nc}} \right) + 4,2611 \cdot 10^5 \left(\frac{l_{МВС}}{l_{МВС} + l_{nc}} \right)^{0,5} \right] e^{-\beta \frac{l_{nc}}{d}}, \text{ Па}, \quad (5.70)$$

где $l_{МВС}$ – участок выработки, заполненный взрывчатой МВС, м.

Проанализируем полученное уравнение. Отсутствие в выработке предохранительной буферной среды ($l_{nc} = 0$) характеризует условия, когда взрывается запол-

ненный МВС участок выработки. В этом случае, согласно уравнению (5.70), начальные параметры ударной волны после взрыва МВС определяются величиной ΔP :

$$\Delta P = [9,9375 \cdot 10^5 + 4,2611 \cdot 10^5] \cdot 1 = 1,32 \cdot 10^6 \text{ (Па)}.$$

Подставив величину давления $\Delta P = P_n$ в уравнение (5.62), получим скорость потока $U = 871$ м/с и скорость ударной волны в начальный момент времени:

$$D = \frac{\Delta P}{\rho_{MBC} U} = 1210 \text{ м/с}.$$

Как только ударная волна начнет свое движение в буферной среде, её параметры начнут изменяться в зависимости от расстояния и наличия в МВС порошкообразного ингибитора с концентрацией C_n . Выразим относительный показатель содержания порошка ингибитора в смеси через концентрацию ингибитора в МВС:

$$\varepsilon = \frac{\rho_{MBC}}{C_n + \rho_{MBC}}. \quad (5.71)$$

Тогда скорость и давление ударной волны в предохранительной среде будут определяться уравнениями: $D_y = D\sqrt{1-\varepsilon}$ и $\Delta P_{nc} = \Delta P(1-\varepsilon)$. Следовательно:

$$\Delta P_{nc} = \left[8,9375 \cdot 10^5 \left(\frac{l_{MBC}}{l_{MBC} + l_{nc}} \right) + 4,2611 \cdot 10^5 \left(\frac{l_{MBC}}{l_{MBC} + l_{nc}} \right)^{0,5} \right] e^{-\bar{\beta} \frac{l_{nc}}{d}} (1-\varepsilon). \quad (5.72)$$

Находим из этого уравнения ε :

$$\varepsilon = 1 - \frac{\Delta P_{nc}}{\left[8,9375 \cdot 10^5 \left(\frac{l_{MBC}}{l_{MBC} + l_{nc}} \right) + 4,2611 \cdot 10^5 \left(\frac{l_{MBC}}{l_{MBC} + l_{nc}} \right)^{0,5} \right] e^{-\bar{\beta} \frac{l_{nc}}{d}}}. \quad (5.73)$$

Величина ε может быть только положительным числом. При $\varepsilon = 0$ $l_{nc} = 0$ и $\Delta P = 1,32 \cdot 10^6$ Па. Вместе с тем, при $\varepsilon \rightarrow 1$ давление $\Delta P \rightarrow 0$. Этот случай может быть реализован только тогда, когда весь участок выработки перекрыт забойкой из ингибитора. Содержание порошка ингибитора в предохранительной среде соответствует неравенству $1 > \varepsilon > 0$. Из условий предотвращения взрыва МВС следует, что длина предохранительной среды с ингибитором должна была такой, чтобы параметры предотвращения взрыва МВС обеспечивались и на ее противоположном конце. А это будет в том случае, когда параметры ударной волны на конце участка с буфер-

ной средой будут меньше ее критических параметров, необходимых для воспламенения МВС. Известно, что при определенном давлении во фронте ударной волны в МВС – критическом давлении $\Delta P_{кр}$ воспламенение МВС произойти уже не может. Это условие можно записать в следующем виде:

$$\Delta P_{nc} / \Delta P_{кр} < 1. \quad (5.74)$$

Если разделить уравнение (5.72) на $\Delta P_{кр}$, то получим условие для предотвращения взрыва МВС от ударной волны в предохранительной среде:

$$\frac{\left[8,9375 \cdot 10^5 \left(\frac{l_{MBC}}{l_{MBC} + l_{nc}} \right) + 4,2611 \cdot 10^5 \left(\frac{l_{MBC}}{l_{MBC} + l_{nc}} \right)^{0,5} \right] e^{-\bar{\beta} \frac{l_{nc}}{d}} (1 - \varepsilon)}{\Delta P_{кр}} \leq 1. \quad (5.75)$$

Отношение $l_{MBC} / (l_{MBC} + l_{nc})$ характеризует степень расширения продуктов взрыва МВС. При этом их температура уменьшается от начальной – $T_{ПВ}$ до конечной:

$$T = T_{ПВ} \left(\frac{l_{MBC}}{l_{MBC} + l_{nc}} \right)^{\gamma - 1}. \quad (5.76)$$

Если температура продуктов взрыва МВС при их расширении и прохождении через предохранительную буферную среду остается достаточно высокой, то расширяющиеся продукты взрыва могут вызвать воспламенение метана, при котором $T_{ПВ} \geq T_{всп}$. Поэтому необходимо учитывать степень расширения продуктов взрыва МВС – K до тех пор, пока их температура не примет безопасное значение и не окажется меньше температуры вспышки МВС. Решив задачу адиабатического расширения продуктов взрыва МВС в предохранительной среде от начального объема до конечного, установили их безопасную температуру – T_6 и степень расширения:

$$K = \frac{l_{MBC} + l_{nc}}{l_{MBC}} = 53,34 \quad \text{при } T_6 = 770 \text{ } ^\circ\text{K}.$$

Для этих условий необходимая взрывопредотвращающая концентрация соли ингибитора в предохранительной среде должна быть равной:

$$C_n = KC_\phi = 53,34C_\phi.$$

Таким образом, для предотвращения взрыва МВС в горной выработке необходимо, чтобы выполнялись следующие условия.

1. Длина заслона, предотвращающего взрыв МВС, как функция параметров ударной волны, должна быть не менее длины участка с предохранительной средой:

$$L_{засл} = l_{нс.}(\Delta P_{кр}, T_0), \text{ м.} \quad (5.77)$$

2. Расход соли-ингибитора на создание заслона, предотвращающего взрыв МВС, определяется по формуле:

$$M_{инг} = L_{засл} \cdot S \cdot K \cdot C_{\phi}, \text{ кг.} \quad (5.78)$$

3. Быстродействие заслона должно быть таким, чтобы к моменту подхода к нему ударной волны по всей его длине была создана предохранительная буферная среда с параметрами, удовлетворяющими условиям (5.77) и (5.78).

Исследования Песоцкого М.К. [302] показали, что в забоях выработок образуются трещины, пересекающие шпуров до начала взрывных работ. Особенно часто они возникают при подрывке боковых пород и в нарушенных клеважом угольных пластах. Ширина трещин – 0,5...30 мм, длина до открытой поверхности забоя – 0,2...1,8 м. Они заполнены МВС с концентрацией метана в смеси 2,5 % и выше. Исследования в работе [303] показали, что шпуровые заряды ПВВ контактируют боковой и торцевой поверхностью заряда с взрывоопасной средой, находящейся в трещинах, в которых при взрыве ПВВ она может воспламениться (рис. 5.10). При взрывании ПВВ IV класса (ПЖВ-20) воспламенение МВС происходит в трещине шириной около 2,5 мм, при взрывании ПВВ V класса (угленит Э-6) – шириной более 14 мм. При этом пламя горения МВС распространяется по трещине на расстояние 1,4...2,5 м в зависимости от ее ширины. Следовательно, при короткозамедленном взрывании шпуровых зарядов ПВВ МВС может воспламениться в трещинах массива, а пламя может распространяться по трещинам на большие расстояния в выработанное пространство и забой выработки.

Пространственно-временные характеристики распространения пламени горения МВС в трещинах не известны. Поэтому выход горящего потока МВС из трещины в выработанное пространство или забой выработки не предсказуем. В настоящее время для борьбы с подобным явлением при производстве взрывных работ предложено создавать в забое выработки предохранительную среду, которая создает взры-

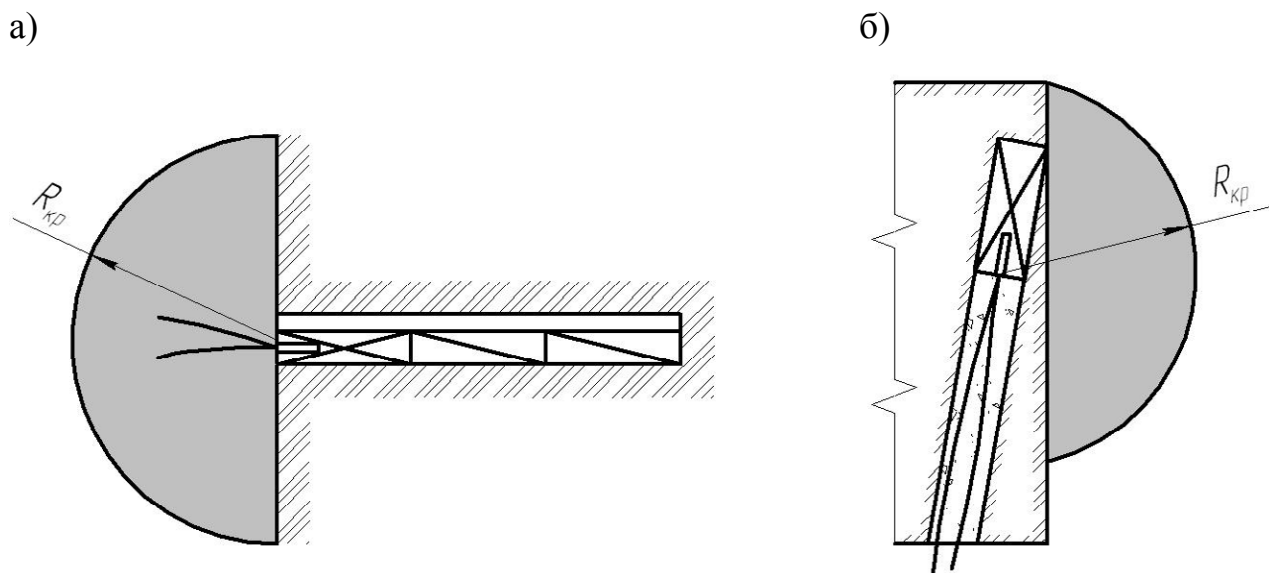


Рис. 5.10. Воспламенение МВС при торцевом – а) и боковом – б) обнажении заряда ПВВ ($R_{кр}$ – критический радиус ударной волны)

возащиту в случае выхода пламени в полость выработки. Для определения параметров предохранительной среды, создаваемой взрывом заряда ПВВ, и оценки надежности взрывозащиты при взрывных работах были проведены исследования в опытном штреке МакНИИ. В качестве источников воспламенения МВС использовались открытые заряды ПВВ IV...VI классов и объем МВС диаметром около 1,3 м, взрыв в котором метана инициировался взрывом двух электровоспламенителей от стандартных электродетонаторов ЭДКЗ-0ПМ. Для взрывозащиты во взрывной камере опытного штрека создавали предохранительную среду взрыванием открытых зарядов ПВВ V и VI классов – угленитов 13П и 10П. Заряды ПВВ, как создающие предохранительную среду, взрывали в первую очередь, а как источники воспламенения – во вторую, через промежуток времени, равный времени замедления стандартных электродетонаторов короткозамедленного действия. Воспламенение МВС фиксировали визуально. В качестве параметров, характеризующих взрывозащиту, были приняты концентрация ингибитора в опытном штреке, интервал времени между взрывами зарядов ПВВ – Δt и мощность источника воспламенения МВС. Содержание ингибитора в продуктах взрыва ПВВ определяли по уравнению реакции взрывного разложения угленитов 13П и 10П: угленит 13П (V класс) – $C_{5,718}H_{33,874}N_{14,292}O_{25,662}Na_{4,365}Ca_{0,5132}Cl_{4,673} \rightarrow 4,365NaCl + 7,146N_2 + 4,1463CO_2 +$

+15,4385H₂O+1,5717CO+1,4985H₂+0,154CaCl₂+0,3592CaO,
 угленит 10П (VI класс) – C_{4,45}H_{29,528}N_{12,906}O_{23,422}Na_{5,7533}Ca_{0,508}Cl_{5,888} → 5,7533NaCl +
 +6,453N₂+4,1CO₂+14,4313H₂O+0,35CO+0,3327H₂+0,0674CaCl₂+0,4406CaO.

В продуктах взрыва угленита 13П содержатся соли-ингибиторы (моль/кг): 4,365NaCl; 0,154CaCl₂; 0,359CaO, их удельное содержание 0,293 кг/кг. Для угленита 10П – 5,7533NaCl; 0,06735CaCl₂; 0,4406CaO, их удельное содержание 0,3687. Мощность зарядов ВВ, как источников воспламенения МВС, определяли по формулам:

$$- \text{ для заряда из МВС } N_D = 0,785d_{MBC}^2 \rho_{MBC} D_{MBC}^3, \text{ Дж/с,}$$

$$- \text{ для заряда из ПВВ } N_D = 0,30249m_{BB}^{0,666} \rho_{BB}^{0,333} D_{BB}^3, \text{ Дж/с.}$$

Результаты исследований по созданию предохранительной среды в опытном штреке взрывами зарядов ПВВ [304] приведены в табл. 5.9. Полученные результаты были подвергнуты корреляционному анализу для выявления парного взаимодействия ряда факторов, влияющих на параметры взрывозащиты. Было установлено, что основной фактор – это концентрация ингибитора в опытном штреке, которая зависит от мощности источника воспламенения МВС и интервала времени между взрывами зарядов, один из которых создает предохранительную среду, а второй является источником воспламенения МВС:

$$C_\phi = \varphi(C_n, N_D / \Delta t) = [2,236 + 0,0732(N_D / \Delta t)^{0,7645}]^{-1}, \text{ г/м}^3 \cdot \text{мс.} \quad (5.79)$$

Зависимость (5.79) показывает, что увеличение мощности источника воспламенения МВС приводит к увеличению концентрации ингибитора в предохранительной среде и, наоборот, увеличение интервала времени между взрывами смежных зарядов уменьшает концентрацию. Натурное моделирование в комбинированной мортире условий взрывов обнаженных шпуровых зарядов показало, что при взрывании таких зарядов массой, не превышающей массу предельного заряда ПВВ VI класса, создается предохранительная среда. Эта среда обеспечит взрывозащиту при взрывных работах даже в том случае, если в ней взорвется заряд ПВВ, масса которого больше массы предельного заряда. Например, взрыв предельного заряда угленита 10П массой 0,6 кг создает предохранительную среду, которая в течение 30 мс обеспечивает взрывозащиту при взрывании заряда ПВВ, вызывающего в опытном штре-

Таблица 5.9

Результаты исследований по созданию предохранительной среды в опытном штреке

№	Параметры источника воспламенения МВС			Параметры заряда ПВВ, обеспечивающего взрывозащиту			Начальная конц-ция ингибитора в штреке, $C_{ис}$, г/м ³	Время замедления, Δt , мс (серия ЭД)					
	ВВ	масса заряда, кг	мощность, $N_D, \frac{kJ}{с}$	ВВ	масса заряда, кг	масса ингибитора, г		0-2 (1)	15 (2)	23 (3)	30 (4)	46 (5)	60 (6)
п	Флегматизирующая МВС концентрация ингибитора, г/м ³ мс												
п							$C_\phi(V, \Delta t_1)$	$C_\phi(V, \Delta t_2)$	$C_\phi(V, \Delta t_3)$	$C_\phi(V, \Delta t_4)$	$C_\phi(V, \Delta t_5)$	$C_\phi(V, \Delta t_6)$	
1	МВС	сфера d=1,3м	$7,898 \cdot 10^9$	13П	0,2	58,6	5,86	-	-	-	-	-	-
2	Т-19	0,15	$6,304 \cdot 10^{10}$	10П	0,4	147,49	14,75	0,983	-	-	-	-	-
3	Т-19	0,21	$7,832 \cdot 10^{10}$	10П	0,6	221,23	22,12	-	0,962	-	-	-	-
4	13П	0,5	$2,538 \cdot 10^{10}$	10П	0,4	147,49	14,75	-	-	-	0,492	-	0,246
5	Т-19	0,21	$7,832 \cdot 10^{10}$	10П	0,8	294,98	29,5	-	-	-	-	0,641	-
6	10П	0,7	$1,924 \cdot 10^{10}$	10П	0,6	221,23	22,12	-	-	-	0,737	-	-
7	10П	0,7	$1,924 \cdot 10^{10}$	10П	0,8	294,98	29,5	-	-	-	-	-	0,492
Среднее значение:							5,86	0,983	0,962	0,615	0,641	0,396	

ке воспламенение МВС. Поэтому при производстве взрывных работ с применением ПВВ VI класса – угленита 10П достигаются такие параметры взрывозащиты, которые при короткозамедленном взрывании шпуровых зарядов предотвращают взрыв МВС. Эти параметры зависят от начальной концентрации соли-ингибитора в продуктах взрыва угленита 10П и времени замедления при взрывании смежных зарядов. Эмпирическая зависимость концентрации ингибитора в предохранительной среде, создаваемой взрывом угленита 10П при замедленном взрывании, имеет вид:

$$C_{\phi}(t) = \left(0,17065 + 0,1309\Delta t^{0,66345}\right)^{-1}, \text{ г/м}^3 \cdot \text{мс.} \quad (5.80)$$

Графики зависимостей (5.79) и (5.80) показаны на рис. 5.11. Таким образом, проведенные исследования позволили сформулировать основные принципы создания взрывозащиты в горной выработке при производстве взрывных работ:

- использование шпуровых зарядов ПВВ VI класса, которые при взрыве формируют в забое газодинамическую двухфазную ингибиторную среду, флегматизирующую МВС на время короткозамедленного взрывания;

- концентрация соли-ингибитора в двухфазной ингибиторной среде должна быть такой, чтобы концентрация соли-ингибитора в газовой среде (C_{ϕ}) на момент действия источника воспламенения МВС была не меньше концентрации ингибитора ($C_{\phi}(\Delta t)$), предотвращающей взрыв МВС.

Эти принципы позволяют дать оценку взрывозащиты в забое горной выработки при производстве взрывных работ ПВВ VI класса угленитом 10П, например, при проведении вентиляционного ходка 1-й западной лавы УПЦП шахты им. А.А. Скочинского по выбросоопасному угольному пласту h_6^1 «Смоляниновский». Глубина разработки равна 1200...1300 м. Сечение выработки вчерне $S_g = 13,0 \text{ м}^2$, крепость пород по шкале проф. Протодяконова $f = 4 \dots 6$. Глубина заходки на цикл $l_{зах} = 1,55$ м, расход угленита 10П $m_{ВВ} = 27,0$ кг. Принимаем максимальное время короткозамедленного взрывания шпуровых зарядов (согласно «ЕПБ при ВР») $\Delta t = 320$ мс. Длина выработки, в которой должна быть создана предохранительная среда для взрывозащиты во время производства взрывных работ, равна:

$$L = l_{зах} + l_{отб},$$

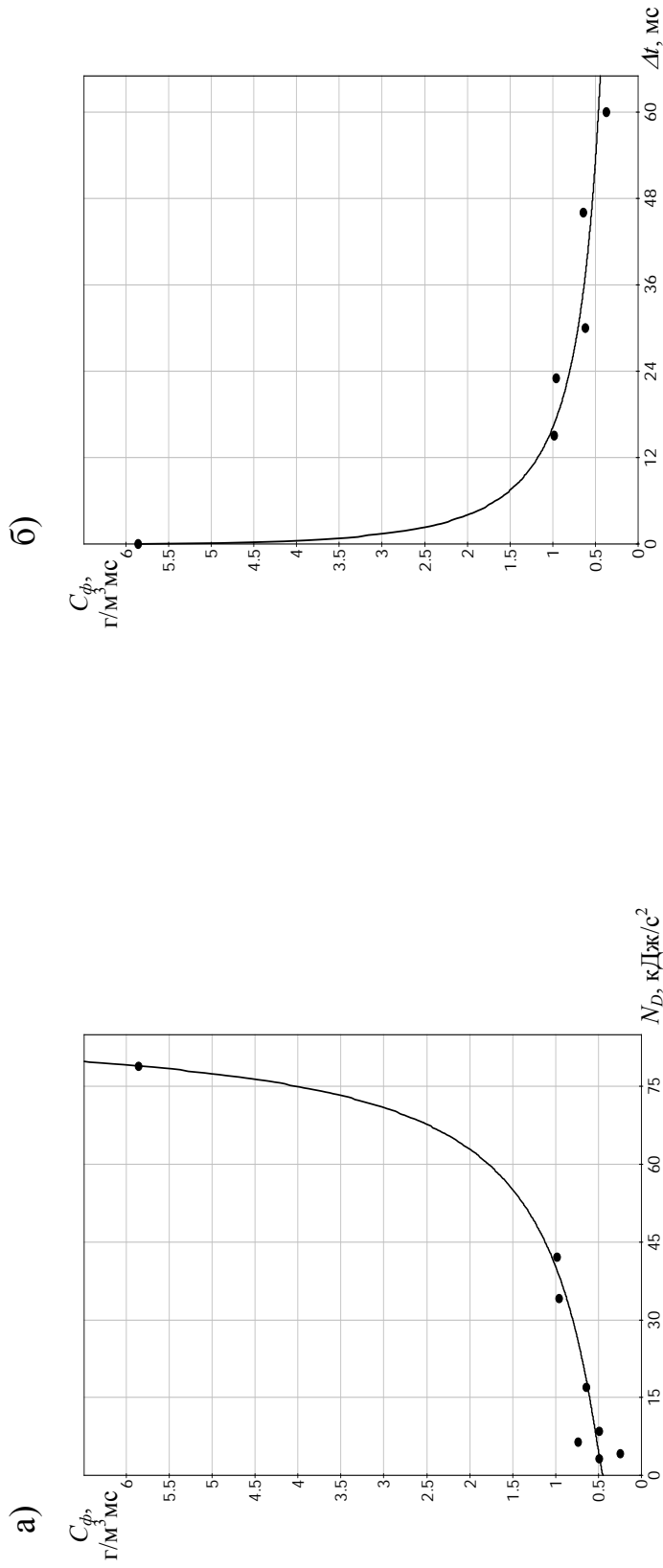


Рис. 5.11. Зависимость концентрации ингибитора от мощности источника воспламенения МВС – а) и времени замедления между взрывами смежных зарядов б)

где $l_{отб}$ – длина отброса продуктов взрыва шпуровых зарядов ПВВ [305], определяемая по формуле: $l_{отб} = 3,4 \cdot 10^{-4} m_{BB} D / a_{ш}^2 \sqrt{fS_6}$, м.

Объем предохранительной среды в выработке равен:

$$V_n = S_6 (L - \kappa l_{зак}), \text{ м}^3,$$

где κ – коэффициент рыхления горной породы.

Концентрация соли-ингибитора в предохранительной среде: $C_\phi = \varepsilon m_{BB} / V_n$, г/м³.

Условие взрывозащиты имеет вид:

$$C_\phi \geq C_\phi(\Delta t). \quad (5.81)$$

Для принятых параметров БВР получим такие значения параметров взрывозащиты:

$$C_\phi(\Delta t) = C_\phi(t) \Delta t = 0,162 \cdot 320 = 51,76 \text{ (г/м}^3\text{)};$$

$$L = 1,55 + 3,4 \cdot 10^{-4} \cdot 27,0 \cdot 1950 / 0,45^2 \cdot \sqrt{5 \cdot 13} = 12,55 \text{ (м)};$$

$$V_n = 12,55 \cdot 3,0 - 1,55 \cdot 13,0 \cdot 1,3 = 136,96 \text{ (м}^3\text{)};$$

$$C_\phi = 368,7 \cdot 27 / 136,96 = 72,68 \text{ (г/м}^3\text{)}.$$

Имеем: $72,68 > 51,76$, то есть $C_\phi > C_\phi(\Delta t)$ и, следовательно, концентрация соли-ингибитора в предохранительной среде достаточна для взрывозащиты выработки при взрывных работах.

Полученный результат показал, что в разрушаемом газоносном горном массиве и в призабойной части выработки можно обеспечить взрывозащиту при взрывании ПВВ ионообменного типа с уровнем предохранительных свойств как у ВВ VI класса. Данные ПВВ содержат до 90% ионообменной пары солей, образующих при взрывной реакции за фронтом детонационной волны до 40% ультрадисперсной соли-ингибитора в виде наночастиц. Соль-ингибитор в виде наночастиц при расширении продуктов взрыва ПВВ движется со скоростью около 1000 м/с. Поэтому в течение всего нескольких миллисекунд продукты взрыва и наночастицы соли-ингибитора флегматизируют большие объемы взрывоопасных газоздушных смесей. Значит, исходя из критических условий инициирования детонации МВС зарядами ПВВ, можно устанавливать объем призабойной части выработки, в котором при взрывных работах можно обеспечить взрывозащиту ингибиторами. В табл. 5.10 приведены

Таблица 5.10

Подавление взрывов МВС с помощью зарядов детонирующих ПВВ

Характеристика и состав ПВВ			$\rho_{ВВ}$, г/м ³	D , м/с	$M_{пр}$, кг	$C_{ф}$, г/м ³	$V_{МВС}$, м ³
сенсibili- затор	ионообменная пара	ингиби- тор					
Нитроэфир	NaNO ₃ - NH ₄ Cl	NaCl	1,17	1676	1,03	5,83	65,2
--/--	NaNO ₃ - (NH ₄) ₂ HPO ₄	Na ₃ PO ₄	1,22	1550	1,43	5,45	95,0
--/--	Ca(NO ₃) ₂ ·4H ₂ O-NH ₄ Cl	CaCl ₂	1,20	1700	0,954	5,53	62,3
--/--	KNO ₃ -NH ₄ Cl	KCl	1,20	1800	0,737	7,42	41,7
--/--	LiNO ₃ -NH ₄ F	LiF	1,25	1600	1,230	2,60	101,8

данные по подавлению взрывов МВС и обеспечению взрывозащиты в выработке с помощью детонирующих зарядов ПВВ различного ионообменного типа, исходя из химической активности соли-ингибитора и ее концентрации, флегматизирующей МВС. Эти результаты показывают, что детонирующие заряды ионообменных ПВВ массой 1,2...1,4 кг надежно предотвращают воспламенение достаточно больших объемов МВС (до 100 м³). При этом наиболее эффективными являются ПВВ, содержащие ионообменные пары солей, образующие соли-ингибиторы Na₃PO₄, CaCl₂ и LiF. Следовательно, такие ПВВ еще эффективнее, чем угленит 10П, могут ингибировать в забоях выработок при взрывных работах еще большие объемы взрывоопасных смесей метана и угольной пыли с воздухом и обеспечивать взрывозащиту при взрывных работах практически по всей длине выработки до момента восстановления в ней вентиляции.

5.6. Разработка концепции обеспечения безопасности взрывных работ в угольных шахтах

Было установлено, что критерии антигизутности (2.101) и (2.102) позволяют выбирать ПВВ с необходимым уровнем предохранительных свойств для обеспечения взрывопредупреждения при взрывных работах. Критерий (5.53) дает возмож-

ность установить массу заряда ПВВ, который создает при его взрыве предохранительную среду, а условие (5.81) – обеспечивается ли взрывозащита в забое выработки при короткозамедленном взрывании шпуровых зарядов. Выполнение этих критических условий отвечает требованиям концепции безопасного производства взрывных работ в угольных шахтах [306]. Достижение безопасности взрывных работ и выполнение требований предложенной концепции может быть достигнуто еще и специальными способами взрывания шпуровых зарядов. Поэтому предложена технология гидровзрывания шпуровых зарядов ВВ в газоносных и выбросоопасных горных массивах, для которого разработана конструкция заряда и способ взрывания ПВВ.

Развитие концепции обеспечения безопасности взрывных работ в угольных шахтах [307, 308] можно схематически представить в виде системы обеспечения взрывобезопасности разрушения газоносных горных массивов «человек – техника – среда». Схема данной системы показана на рис. 5.12. В верхней части схемы показаны элементы системы обеспечения безопасности взрывных работ на базе требований «ЕПБ при ВР». Эти элементы подразделяются на три группы. Первая – технические средства, используемые при взрывных работах. Вторая – организационные мероприятия, необходимые для безопасного проведения взрывных работ. Третья – технология проведения взрывных работ и мероприятия по обеспечению их безопасности. Основная цель данной системы – исключить контакт источников воспламенения ударных волн (УВ), газообразных продуктов детонации (ГПД), горящих частиц ВВ (ГЧ) и пламени выгорающего заряда с взрывоопасной средой МВС и ПВС. Достигается цель благодаря действиям человека, который оценивает состояние газоносного массива, выбирает соответствующие технические средства для ведения взрывных работ (ПВВ, ЭД, забойку, конструкцию шпурового заряда и т.д.), технологию их проведения и разрабатывает соответствующие организационно-технические мероприятия для обеспечения безопасности работ. Видно, что такая система безопасности труда при взрывных работах полностью зависит от человеческого фактора. Соответственно, чем больше удельный вес ошибок и нарушений при выполнении работ, тем менее надежна эта система, так как технические средства и

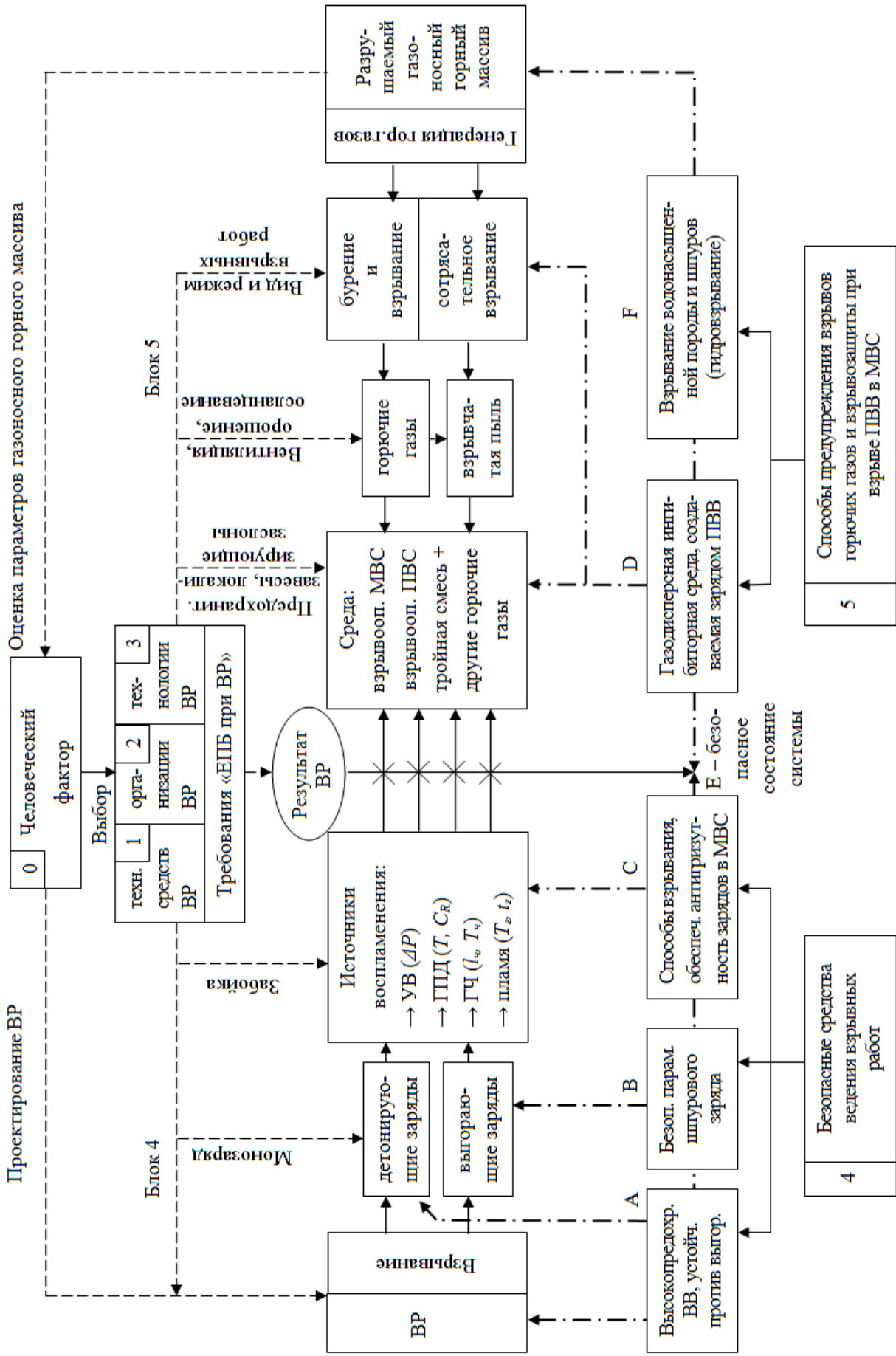


Рис. 5.12. Концепция обеспечения безопасности взрывных работ в системе безопасности труда «человек – техника – среда»

способы взрывания не могут исправить ошибочные действия людей. Технические средства и способы взрывания имеют не достаточный уровень безопасности при взрывных работах и могут образовывать или способствовать образованию как источников воспламенения, так и взрывоопасной среды. Поэтому обеспечить безопасность взрывных работ при наличии взрывоопасной среды практически не возможно.

В нижней части схемы системы обеспечения безопасного производства взрывных работ дано развитие новой концепции на базе применения безопасных средств ведения взрывных работ, способов взрывания и предупреждения взрывов горючих газов. В этом случае человеческий фактор не является определяющим в обеспечении безопасности взрывных работ. Безопасные средства ведения взрывных работ (блок 4) состоят из высокопредохранительных ВВ, устойчивых к выгоранию (А), безопасных параметров шпурового заряда (В) и способов взрывания, обеспечивающих антигризутность зарядов при взрыве в МВС (С). Способы предупреждения взрывов горючих газов и взрывозащиты в горной выработке составляют блок 5. Они обеспечивают газодисперсную ингибиторную среду при взрыве заряда ПВВ (D) и с помощью гидровзрывания ВВ (F) создают взрывопреупреждение и взрывозащиту в горной выработке на все время производства взрывных работ. Таким образом, безопасность взрывных работ достигается автоматически, без участия человека, за счет взрывания шпуровых зарядов ПВВ. При этом высокопредохранительные ВВ при детонации заряда не создают опасных источников воспламенения МВС, а заряды ПВВ, устойчивые к выгоранию, не образуют горящие частицы и пламя от выгорающего заряда. Безопасные параметры шпурового заряда ПВВ исключают его неполные детонации, обеспечивают устойчивость детонации ВВ, эффективность взрывания и формирование при взрыве заряда предохранительной среды. Способы предупреждения взрывов горючих газов реализуются одновременно с взрывом шпуровых зарядов или с гидровзрыванием ВВ. Этому способствует образование ингибиторной газодисперсной среды в забое, которая заполняет выработанное пространство и трещины массива и исключает воспламенение МВС. Применение ингибиторной донной забойки и гидровзрывания ВВ позволяет превентивно обеспечить взрывозащиту в забое путем заполнения трещин массива водой или раствором ингибитора и

оттеснения метана от места взрыва шпуровых зарядов ПВВ. Следовательно, безопасность взрывных работ обеспечивается без участия человека и это является основной концепцией достижения безопасности взрывных работ в шахтах.

Проведенные в разделе исследования позволяют сделать следующие выводы:

– определена стратегия обеспечения безопасности взрывных работ при разрушении газоносного массива, заключающаяся в применении предохранительных ВВ, детонирующие заряды которых не воспламеняли бы взрывоопасную среду, а их шпуровые заряды не давали бы выгораний ВВ, то есть имели бы необходимую устойчивость к выгоранию;

– установили пути модернизации ПВВ и их шпуровых зарядов, базирующиеся на выборе соли-ингибитора, способе ввода ее в состав ВВ, создании сплошного монозаряда и шпурового заряда с опережающей донной забойкой, и гидровзрывания;

– установили, что выбор солей-ингибиторов для ПВВ зависит от ингибирующей активности солей и их сопротивления ударному сжатию кристаллов, а шпуровой заряд должен представлять собой монозаряд из стыкующихся патронов, герметичность которых достаточна для способа гидровзрывания;

– экспериментально доказали, что ПВВ III и IV класса не могут образовать в забое предохранительную среду, так как имеют небольшие предельные заряды, а ПВВ V и VI классов создают предохранительную среду, так как их предельные заряды больше зарядов, необходимых для ее создания;

– для ПВВ VI класса (угленит 10П) установили принципы создания взрывозащиты в горной выработке и концентрацию соли-ингибитора в предохранительной среде, обеспечивающую взрывозащиту в забое при взрывных работах;

– дано развитие концепции обеспечения безопасности взрывных работ в угольных шахтах без участия человека, базирующейся на применении безопасных средств ведения взрывных работ и способов взрывания зарядов ПВВ и предупреждении взрывов горючих газов.

РАЗДЕЛ 6

МОДЕРНИЗАЦИЯ ПВВ И РАЗРАБОТКА БЕЗОПАСНЫХ СПОСОБОВ ПРОИЗВОДСТВА ВЗРЫВНЫХ РАБОТ

6.1. Модернизация предохранительных ВВ IV класса

При применении в шахтах при взрывных работах предохранительного аммонита IV класса Т-19 были случаи воспламенения метана, выгорания шпуровых зарядов и слеживаемости патронов ВВ при их хранении. В результате слеживаемости изменяются физико-химические свойства ВВ, их взрывчатые показатели, вследствие чего снижается безопасность взрывных работ.

В связи с изложенным и учитывая, что для угольных шахт важнейшим ВВ IV класса является аммонит Т-19, было предложено его модернизировать: часть пламегасителя в составе заменить добавкой, снижающей его поджигаемость и препятствующей слеживаемости порошкообразного аммонита. На основании проведенных исследований в качестве таких добавок были отобраны наиболее перспективные – фосфаты натрия, природный графит марки ГТ-1, доломит и криолит. Эти добавки одновременно должны были повысить недостаточный уровень предохранительных свойств аммонита по газу и устойчивость к выгоранию.

При введении графита в массу ПВВ в процессе ее перемешивания происходит равномерное распределение частиц графита по поверхности частиц аммиачной селитры и хлористого натрия, имеющих склонность к слеживанию. В результате этого достигается «экранирование» поверхности частиц аммиачной селитры и хлористого натрия между собой. Кроме того, гидрофобный характер поверхности частиц графита препятствует проникновению воды в объем взрывчатого вещества. Улучшение взрыво-технических характеристик предохранительного аммонита с введением в его состав графита установили экспериментально.

С целью определения возможности и реальной перспективы промышленного изготовления предохранительного аммонита IV класса с повышенной устойчивостью к выгоранию и меньшей слеживаемостью ВВ были проведены исследования.

Исследовались составы с аммонитными массами, идентичными по рецептуре аммониту Т-19. Содержание в составе аммонитной массы – 80%, хлористого натрия и графита в сумме 20%. Дисперсность хлористого натрия соответствовала дисперсности аммонита Т-19. Графит вводили без дополнительной обработки. Использовали следующие образцы графита: коллоидно-графитовый препарат марки С-1 (ТУ 113-08-48-63-90), модифицированный вспучивающийся крупночешуйчатый графит, приготовленный в стеклянном реакторе (условно графит №1), модифицированный вспучивающийся графит с более мелкой чешуйкой (ОГ-1), модифицированный мало вспучивающийся графит (ЗП-22), опытный коллоидный графит и природный графит ГТ-1 (ГОСТ 4596-75). Влияние графита на поджигаемость ВВ показано на рис. 6.1.

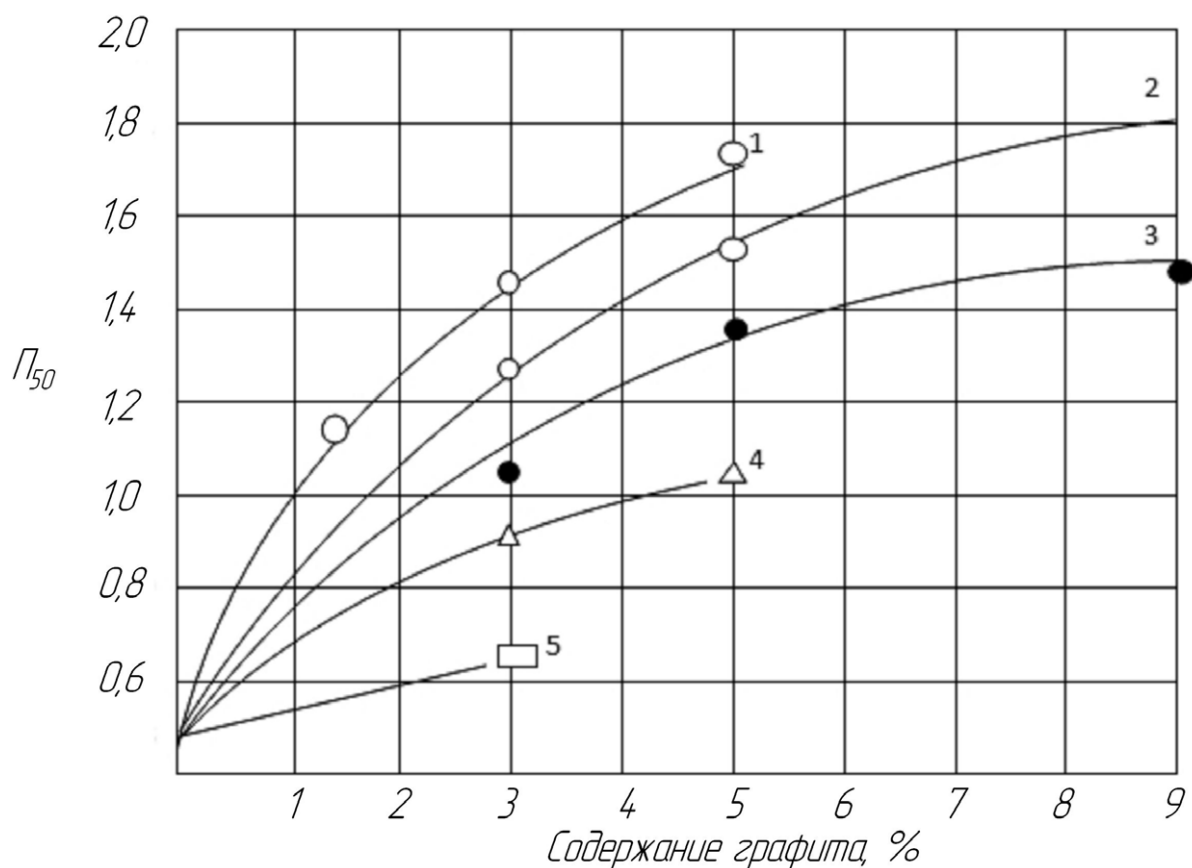


Рис. 6.1. Влияние графита на поджигаемость ВВ:

- 1 – коллоидно-графитовый препарат С-1;
- 2 – графит ОГ-1;
- 3 – графит образец №1;
- 4 – графит ГТ-1;
- 5 – сажа

Как видно из рисунка, наиболее эффективно снижает поджигаемость ВВ коллоидно-графитовый препарат С-1. Далее идут графиты ОГ-1, №1, ГТ-1. Наименее эффективен аморфный углерод-сажа (ГОСТ 7885-86). Среди исследованных графитов С-1 намного мельче остальных. Его остаток на сите № 0063 составил не более 0,3%, тогда как у ГТ-1 остаток на сите № 02 – не менее 75%. Известно влияние инертных добавок на детонационную способность ВВ, которая зависит от отношения удельного веса добавки к ее плотности. Исходя из приведенных выше данных, можно предположить, что влияние различных марок графита на поджигаемость ВВ также зависит от их плотности и удельной поверхности частиц графита.

Для проверки сделанного предположения были определены поджигаемость и детонационная способность (критический диаметр детонации при плотности ВВ 1,7 г/см³) ряда модельных образцов. Образцы содержали 80% амматолы, 15% хлористого натрия и 5% графита различных марок, который вводился в состав без измельчения. Полученные данные приведены в табл. 6.1.

Таблица 6.1

Поджигаемость и детонационная способность ПВВ с графитом

Тип аммонита	Тип графита	P_{50} , Г	Насыпная плотность, г/см ³		Критический диаметр при $\rho = 1,7$ г/см ³
			без утруски	с утруской	
Лаборат.	С-1	1,93	0,15	0,23	22
Заводск.	коллоидн.	1,76	0,28	0,37	20
Заводск.	ОГ-1	1,82	0,34	0,45	17,5
Лабор.	ОГ-1	1,72	0,34	0,45	18,0
Лабор.	№1	1,58	0,37	0,60	18
Лабор.	ЗП-22	1,35	0,44	0,62	18,5
Заводск.	ЗП-22	1,35	0,44	0,62	17
Лабор.	ГТ-1	1,25	0,54	0,69	17

Как видно из таблицы, между показателем P_{50} и плотностью графита действительно существует определенная зависимость: чем выше плотность, тем ниже P_{50} . Это дает основание сделать вывод, что основным фактором, влияющим на эффек-

тивность графита как ингибитора поджигаемости, является его плотность или удельная поверхность. Способность графита снижать поджигаемость ВВ связана с его кристаллическим строением, поскольку сажа (аморфный углерод), как видно из рис. 6.1, почти не влияет на P_{50} , несмотря на то, что она является самой мелкой (остаток на сите № 0045 не более 0,1%).

Для определения влияния графита на детонационную способность в лабораторной шаровой мельнице был приготовлен состав, содержащий 20,9% тротила, 65,9% аммиачной селитры ЖВ и 13,2% соли. Рецептúra была подобрана таким образом, что допускалось введение в состав 9% добавки различных графитов. Как видно из таблицы, влияние крупного графита (марки ОГ-1, обр. № 1) такое же, как и влияние соли. Мелкий графит (коллоидно-графитовый препарат С-1) флегматизирует аммонит сильнее, чем соль. Исходя из полученных данных, в лабораторной шаровой мельнице был изготовлен модельный образец аммонита Т-19, у которого 5 из 20% соли было заменено графитом ГТ-1 (далее – образец Г-5). Этот образец по показателям соответствовал аммониту Т-19: критический диаметр детонации при плотности $1,7 \text{ г/см}^3$ был равен 17 мм, поджигаемость составила около 1,7 г, что существенно превышало минимально необходимую норму. Предохранительные свойства Г-5 определялись в канальной мортире опытного штрека в сравнении с Т-19 (табл. 6.2). По результатам видно, что они примерно одинаковы. Работоспособность Г-5 на 10-ти тонном маятнике составила 1,01 от работоспособности аммонита Т-19. Передача детонации после выдержки в воде – 6 см, скорость детонации – 4,09 км/с, то есть на уровне аммонитов IV класса.

Очень важным является состав продуктов взрыва образцов ВВ с графитом. Если графит при взрывчатом разложении будет сгорать, то состав продуктов взрыва может стать неприемлемым по содержанию токсичных и горючих газов. Экспериментально было установлено, что при взрывании зарядов аммонита Г-5 и ГТ-5 в стальных трубах, моделирующих условия взрывания зарядов в породном массиве, количество образованных этими ВВ газов (ядовитых и горючих) примерно одинаковое. Результаты испытаний приведены в табл. 6.3 и 6.4.

На основании полученных результатов Донецкому заводу ДКЗХИ было пред-

Таблица 6.2

Предохранительные свойства состава Г-5 в канальной мортире без забойки

Аммонит Т-19		Аммонит Г-5	
масса заряда, г	число воспл./ число опытов	масса заряда, г	число воспл./ число опытов
400	0/1	300	0/2
500	3/5	400	2/3
600	2/2	500	2/3

Таблица 6.3

Содержание газов в продуктах взрыва ВВ

ВВ	Содержание ингредиентов, %			Содержание ядовитых и горючих газов в продуктах взрыва, л/кг						
	аммо- тол 61/19	NaCl	до- бав- ка	CO	NO+ NO ₂	NH ₃	усло вн. CO	H ₂	CH ₄	общее коли- чество го- рючих газов
Т-19	80	20	-	34	2,5	-	51	19	7	60
ГТ-5	80	15	5	36	2,5	-	53	19	5	60

Таблица 6.4

Результаты испытаний опытных образцов с графитом

Показатели	Опытные образцы		
	Г-5	ГТ-5	ГТ-5/1,5
Критический диаметр ($\rho=1,7 \text{ г/см}^3$), мм	17	21	22
Поджигаемость $И_{50}$, г	1,7	1,49	1,58
Предохранительные свойства	удовл. IV кл.	-	-
Передача детонации, см	6	-	-
Состав продуктов взрыва	аналог. Т-19	аналог. Т-19	-

ложено изготовить модернизированный аммонит IV класса с добавкой графит (патенты Украины № 28213 А от 16.10.2000 г., № 23550 от 17.03.2003 г.) [309, 310]. Были изготовлены опытные партии аммонита Г-5 для проведения предварительных и промышленных испытаний в угольных шахтах. Образцы ПВВ от опытных партий успешно прошли контрольные испытания на заводе-изготовителе и в контролирующей организации – МакНИИ и были допущены к промышленным испытаниям в шахтах. Результаты этих испытаний на соответствие ТУ У 3.50-14311844-112-2000 приведены в табл. 6.5.

С 2003 г. в угольных шахтах, опасных по газу и угольной пыли, вместо аммонита Т-19 допущен к применению аммонит Г5. Это ПВВ IV класса, по сравнению с аммонитом Т-19, обладает более высокой устойчивостью против выгорания шпуровых зарядов. Однако было установлено [311], что при взрыве зарядов ВВ вместе с газообразными продуктами взрыва, температура которых достигает $T_{взр} \approx 2000$ °К, в атмосферу забоя горной выработки попадают и частички графита, которые начинают окисляться по следующим реакциям:



В результате этих реакций продукты взрыва ВВ обогащаются оксидом углерода – угарным газом, который попадает в атмосферу горных выработок после проведения взрывных работ. Оксид углерода является весьма токсичным для человека газом, а также хорошо сорбируется разрушенной взрывом горной массой. Поэтому даже в случае надежной вентиляции забоя при погрузке горной массы оксид углерода десорбируется из пород в атмосферу и представляет опасность для человека.

В МакНИИ были проведены специальные исследования по установлению возможности образования оксида углерода в продуктах взрыва аммонита Г5 сверх нормы. Работы проводились в специальной герметичной камере объемом около 20 м³, оборудованной системой отбора проб воздуха после взрыва зарядов ВВ [312]. Оказалось, что аммонит Г5 при взрывании в канальной мортире с забойкой образует в среднем на 28 % больше угарного газа, чем аммонит Т-19, то есть в условиях замкнутости шпуров при взрыве аммонита Г5 возможно образование дополнительного

Таблица 6.5

Результаты контрольных испытаний аммонита Г-5

Состав ВВ и наименование показателей	Значения показателей		
	требования ТУ	данные завода	данные МакНИИ
Селитра аммиачная водостойчивая, %	62,7±1,5	62,9	60,4
Тротил, %	16,8±1,0	16,5	18,6
Соль поваренная, %	16,0±1,0	16,1	16,7
Графит, %	4,5 (+0,5;-2,5)	4,2	4,3
Массовая доля веществ, не растворимых в бензоле (или толуоле), %, не более	0,5		
Массовая доля влаги и летучих веществ, %, не более	0,5	0,04	0,05
Диаметр патрона, мм	36-37	36-37	36-37
Масса аммонита в патроне, г	300±15	301,4	302,4
Плотность аммонита в патроне, г/см ³	1,05-1,20	1,11	1,08
Передача детонации на расстояние между патронами, см, не менее: – сухими – после выдержки в воде	4	8	7
	2	4	5
Полнота детонации после выдержки в воде	полная	полная	полная
Предохранительные свойства: частота воспламенений в – МВС, не более – ПВС, не более	10/20	8/20	10/20
	0/5	0/5	0/5

количества оксида углерода. Поэтому было предложено в аммоните Г5 заменить графит на более эффективный ингибитор поджигаемости ВВ и окисления метана.

Ранее проведенные исследования позволили установить, что в качестве такого ингибитора могут быть использованы: фосфат натрия – Na_3PO_4 , доломит – $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ и криолит Na_3AlF_6 . Так как фосфат натрия дает сильнощелочную среду, что не желательно для тротилосодержащих аммонитов (резко снижается их химстойкость), то он был заменен на гексаметафосфат натрия, образующий в водном растворе нейтральную среду. Его показатели приведены в таблице 6.6. Следующий ингибитор – доломит. Он представляет собой муку, полученную путем дробления породы доломита, добываемой на Еленовском и Стыльском карьерах. Доломитная мука содержит 3...6 % песка и глины. В связи с этим, были проведены исследования ВВ, содержащих доломит, на чувствительность к удару по ГОСТ 4545-80 [313]. Испытания проводили на копре Каста с роликовым прибором № 1. Груз массой 2 кг сбрасывали с высоты 1,25 м и ударяли по верхнему ролику прибора. Испытывали составы типа аммонита Т-19 и Г5, содержащие до 5 % соответственно полифосфата натрия и доломитной муки (два образца с доломитной мукой из обоих карьеров).

Испытания показали следующее. Аммонит, содержащий 5% полифосфата натрия, при испытаниях показал наименьшую чувствительность к удару – 1/24 (4,2%). В этих же условиях эталон – перекристаллизованный тетрил дал 48% взрывов (12/25), а аммониты, содержащие доломитную муку, соответственно 20% (5/25) с мукой Еленовского карьера и 32% (8/25) с мукой Стыльского карьера. В связи с более высокой чувствительностью к удару аммонита с доломитной мукой по сравнению с аммонитом, содержащим полифосфат натрия, использование доломитной муки было отклонено. Дальнейшие работы проводили с ПВВ, содержащими полифосфат натрия и криолит. Результаты исследований этих ПВВ сведены в табл. 6.7.

Анализ результатов исследований показал следующее. Ввод в состав предохранительных аммонитов типа Г5 и Т-19 криолита или полифосфата натрия резко повышает их уровень предохранительности в МВС. Так аммонит, содержащий 6% криолита вместо хлорида натрия, не вызывал воспламенений МВС при испытании заряда массой 300 г в канальной мортуре. Аммонит, содержащий 5 % полифосфата

Таблица 6.6

Показатели гексаметафосфата натрия

Наименование показателей	Требования по ГОСТ 20291-80	Фактич. данные
Внешний вид	Стекловидное прозрачное вещество в виде кусков бесцветных или желтовато-зеленоватого оттенка	Порошок белого цвета
Химическая формула	$\text{Na}_n\text{H}_2\text{P}_n\text{O}_{3n+1}$	-
Массовая доля полифосфата натрия в пересчете на P_2O_5 , %, не менее	61,5	63,0
Массовая доля неактивных фосфатов в пересчете на P_2O_5 , %, не более	7,0	7,0
Массовая доля не растворимых в воде веществ, %, не более	0,07	0,05
Молекулярная масса колеблется в зависимости от числа полимеризации и составляет	1500...1900	1500
Степень полимеризации, n	15...22	16
Плотность при 20 ⁰ С, г/см ³	2,484	соотв.
Растворимость в воде при 20 ⁰ С, г/л	973	соотв.
Плотность раствора при 20 ⁰ С, г/см ³	1,5277	соотв.
Поверхностное натяжение, дн/см	150...300	200
Температура плавления, ⁰ С	630	соотв.
Плотность расплавов, г/мл	2,1...2,3	2,25
Потеря массы при прокаливании до 1200 ⁰ С, %	до 0,4	0,4
РН 1%-ного раствора (нейтрален)	6...6,5	6,6
Пожаровзрывобезопасен	+	+
Продукт не токсичен, биологически разлагаем	+	+

Таблица 6.7

Результаты исследования образцов ПВВ IV класса с криолитом и полифосфатом натрия

№ п/п	Рецептура ПВВ	Патроны диаметром 36 мм и массой 300г		Критический диаметр, мм, ($\rho = 1,7 \text{ г/см}^3$)	Предохранительные свойства – частота воспламенений в канальной мортуре			Поджигаемость, г	Фугасность, см ³	Бризантность, мм		
		Передача, см			МВС масса зарядов, г	ПВС масса зарядов, г						
		сухие	мокрые			175	300				700	900
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	Аммонит № 6ЖВ - 88%, соль - 6%, криолит - 6%	6	2	24	0/10	-	-	-	-	0,98	355	16,2
2	Аммонит № 6ЖВ - 87,5%, криолит - 2,5%, соль - 7,5%, графит - 2,5%	-	-	-	1/10	3/5	-	-	-	1,52	-	-
3	Тротил марки Б - 17,4%, селитра ЖВК - 67,6%, криолит - 4%, графит - 1,5%, соль - 9,5%	7	6	22,0	0/10	6/20	-	0/5	0/2	1,47	-	-
4	Тротил - 16,8%, селитра - 66,2%, криолит - 5%, графит - 1%, соль - 11%	9	6	22,1	-	2/20	0/5	-	-	1,27 1,13	-	16,3
5	Тротил - 17,1±1%, селитра - 64,6±1,5%, графит - 1,3 ±0,3%, криолит - 6±0,1%, соль - 12±0,5%	8	5	22	-	1/20	-	-	-	-	-	16,8
6	Тротил - 16,8±1%, селитра - 64,4±1,5%, графит - 1,8±0,2%, криолит - 6±1%, соль - 11±1%	7	4,6	-	0/10	0/10	-	-	-	1,39	-	-
7	Тротил - 16,8%(факт. - 16,6%), селитра - 62,7%(факт. - 62,5%), полифосфат - 4,5%(факт. - 4,9%), соль - 16%(факт. - 15,6%)	8	4	22...24	-	10/39	-	-	-	1,29	-	17,6
8	Тротил - 14,9%, селитра - 62,9%, соль - 16,4%, полифосфат - 5,0% графит - 0,5%	8	7	21,0	-	4/20	0/5	-	-	1,77	276	16,1
9	Тротил - 16,5%(факт. - 16,4%), селитра - 62,5%(ф.- 62%), поли-фосфат - 4,8%(ф. - 5%), соль - 15,7%(ф. - 16%), графит - 0,5%	7	5	22	-	8/20	-	-	-	-	1,0 от Г5	15
10	Тротил - 14,7%(факт. - 15,2%), селитра - 64%(ф.- 63,9%), поли-фосфат - 4,8%(ф.- 4,3%), графит - 0,5%, соль - 16%(ф.- 15,6%)	7	4	23...24	-	3/20	-	-	-	1,73	-	14,9

натрия, дал при испытании заряда 300 г примерно в 2 раза меньше воспламенений МВС, чем аммонит Г5. Таким образом, оказалось, что обе добавки гораздо лучше графита в составах ПВВ IV класса как в отношении влияния на предохранительные свойства ВВ, так и в отношении его поджигаемости. В связи с тем, что стояла задача исследований и модернизации ПВВ для снижения токсичности продуктов взрыва, был выбран полифосфат натрия, так как он абсолютно не токсичен. В свою очередь, криолит показал себя как эффективный ингибитор МВС, но является токсичным соединением, отнесенным к I классу токсичности. Поэтому предпочтение было отдано полифосфату натрия. Аммонит с его содержанием в составе получил название П5 (патенты Украины № 75851 от 15.06. 2006 г. и № 38055 U от 25.12.2008 г.) [314, 315]. Этот состав был испытан на газовую вредность по методике МакНИИ в сравнении с аммонитом Г5 и оказался менее газовым ВВ. Таким образом, предложенный аммонит П5 – это малогазовое ПВВ IV класса, которое вместо графита содержит в составе принципиально новый ингибитор поджигаемости, не реагирующий с газообразными продуктами взрыва. В результате при взрывных работах не образуется дополнительного количества угарного газа. Опытные образцы этого ПВВ успешно прошли испытания в МакНИИ на соответствие техническим требованиям, предъявляемым к ПВВ IV класса для угольных шахт. При этом испытания ВВ в герметичной камере на газовую вредность показали, что образование оксида углерода при взрыве аммонита П5 примерно в 1,6 раза меньше, чем у Г5. В табл. 6.8 даны сравнительные взрывчатые показатели этих аммонитов.

В результате модернизация аммонитов Т-19Г и Г5 привела к созданию более предохранительного ВВ IV класса – аммонита П5, содержащего эффективный ингибитор поджигаемости ВВ и окисления метана – полифосфат натрия. При взрыве П5 образуется гораздо меньше оксида углерода, чем при взрыве аммонитов Т-19Г и Г5.

6.2. Модернизация предохранительных ВВ V класса

В результате проведенных работ были созданы ПВВ V класса – углениты 13П и 13П/1 [316]. Они предназначены для ведения взрывных работ шпуровым методом

Таблица 6.8

Взрывотехнические показатели ВВ IV класса – аммонитов Г5 и П5

№ п/п	Взрывотехнические показатели ПВВ	Ед. изм.	Аммониты	
			Г5	П5
1	Работоспособность ПВВ относительно Т-19	–	1,0	1,0
2	Бризантность, Δh	мм	16,0	16,0
3	Плотность патронов, $\rho_{ВВ}$	г/см ³	1,0...1,15	1,0...1,15
4	Диаметр патрона, d_n	мм	36,0	36,0
5	Скорость детонации, D	м/с	4000...4200	4000...4200
6	Предохранительные свойства: – по газу	–	удовл. ПВВ IV кл.	удовл. ПВВ IV кл.
	– по пыли	–	удовл. ПВВ IV кл.	удовл. ПВВ IV кл.
7	Поджигаемость, $П_{50}$	г	1,35...1,61	1,43...1,78
8	Расстояние передачи детонации между: – сухими патронами	см	6...8	5...8
	– патронами после выдержки их в воде на глубине 1м в течение 60 мин.	см	3...5	3...5
9	Критический диаметр детонации при плотности 1,7 г/см ³	мм	22...24	22...24
10	Количество условной окиси углерода, образованной при взрыве ПВВ	л/кг	48,9...49,2	29,8...35,3
11	Гарантийный срок хранения	мес.	6	6

в забоях горных выработок шахт, опасных по газу и разрабатывающих пласты, опасные по пыли, в условиях, где «ЕПБ при ВР» разрешено применение ВВ V класса. Эти углениты в процессе их создания прошли в МакНИИ лабораторно-полигонные испытания на соответствие требованиям технических условий и в производственных условиях угольных шахт Украины предварительные и приемочные испытания в объемах и порядке, предусмотренных действующей НТД. На основании положительных результатов всех видов испытаний эти углениты допущены Госнадзором охраны труда к постоянному применению для взрывных работ в угольных шахтах. В отличие от угленита Э-6, новые углениты 13П и 13П/1 соответствуют действующим техническим требованиям на ВВ V класса по всем показателям [317], они обладают пониженной поджигаемостью и одновременно улучшенной детонационной способностью, что, в свою очередь, обеспечивает более высокую устойчивость против выгорания шпуровых зарядов ВВ. Как показывают расчеты, устойчивость против выгорания у этих угленитов на порядок выше, чем у угленита Э-6. Наряду с этим, углениты 13П и 13П/1 образуют меньшее количество ядовитых газов в продуктах взрыва. Таким образом, они являются безопасными при применении в угольных шахтах, опасных по газу и пыли. Кроме того, угленит 13П имеет еще и большую работоспособность по сравнению с угленитом Э-6 (13П/1 по этому показателю находится на уровне Э-6). Гарантийный срок хранения угленитов 13П и 13П/1 составляет 9 месяцев, что в 1,5 раза больше, чем у применяемых в настоящее время предохранительных ВВ.

Опыт применения ПВВ V класса угленитов 13П и 13П/1 показал, что за счет более высокой работоспособности 13П был более востребованным. Поэтому с 1996 г. выпуск угленита 13П/1 был прекращен и до настоящего времени применяется только угленит 13П. Вместе с тем, можно сделать вывод, что такой уровень предохранительных свойств угленита 13П, какой при испытании в опытном штреке имеют его открытые заряды, не отвечает необходимой антигризунтности шпуровых частично обнаженных зарядов при взрывных работах. Обнаженные заряды угленита 13П опасны для взрывоопасной МВС, образующейся при разрушении горного массива. Однако, было установлено, что обнаженные заряды угленита 13П/1 в анало-

гичных условиях взрывания не опасны, так как уровень предохранительных свойств этого ВВ гораздо выше, чем уровень 13П (предельный заряд в уголкевой мортире 0,2 кг против 0,1 кг). Таким образом, была поставлена задача усовершенствовать и модернизировать ПВВ V класса за счет ввода ингибиторов, повышающих предохранительные свойства ВВ в уголкевой мортире. При этом необходимо было учитывать, что работоспособность и детонационные свойства у модернизированного ПВВ должны быть не хуже, чем у угленита 13П. Для достижения поставленной цели были проведены специальные исследования по установлению предохранительных свойств образцов ПВВ в опытном штреке и определению их детонационной способности. Основные результаты этих исследований приведены в табл. 6.9. За основу нового ПВВ V класса был взят угленит 13П известного компонентного состава: нитроэфиры – 13,0%, нитрат натрия – 36,4%, хлористый аммоний – 25,0%, кальций углекислый – 5,0%, натриевая соль карбоксиметилцеллюлозы – 2,0%, селитра аммиачная – 15,0%, полистирол – 2,5%, стеарат кальция или цинка – 0,8%, хлопок коллоидный – 0,3%. Хорошая изученность свойств этого состава ВВ позволяет обратить внимание на два важных момента. Первый – содержание в составе нитроэфиров, аммиачной селитры и полистирола определяет уровень его энергетических свойств и предохранительных свойств в уголкевой мортире. Второй – содержание в составе тройной смеси солей нитрата натрия, хлористого аммония и карбоната кальция определяет содержание в продуктах взрыва ингибиторов окисления метана (NaCl , CaCl_2) и ингибиторов поджигаемости ВВ (CaCl_2 и $\text{Ca}(\text{OH})_2$). Эти соли-ингибиторы позволяют обеспечить необходимый уровень предохранительных свойств ПВВ в канальной мортире и устойчивость шпурового заряда к выгоранию за счет низкой поджигаемости ВВ. Стеарат кальция и натриевая соль карбоксиметилцеллюлозы обеспечивают составу ВВ необходимую водоустойчивость. Таким образом, все это позволило выделить для исследований основной фактор – соотношение компонентов ПВВ: нитроэфиров (НЭ), аммиачной селитры (АС) и полистирола (ПС), от которого зависят как энергетические показатели, так и предохранительные свойства ВВ. Были проведены исследования по изучению влияния на работоспособность, предохранительные и детонационные свойства ПВВ соотношения НЭ:АС:ПС

Таблица 6.9

Взрывотехнические показатели образцов ПВВ V класса типа угленита 13П

Состав ПВВ Показатели взрыва ПВВ	Соотношение НЭ:АС:ПС в опытных образцах, %				
	оп. обр.1 13:15:2,5	оп. обр.2 11:16:3,0	оп. обр. 3 9:17:3,0	оп. обр. 4 7:18:3,0	оп. обр. 5 5:19:3,0
Скорость детонации ВВ, м/с (при ρ , г/см ³)	2380 (1,22)	2015,3 (1,194)	1854,1 (1,19)	1682,4 (1,195)	1504,5 (1,19)
Предельный заряд в угловой мортире, кг	0,1	0,2	0,4	0,8	~1,0
Расчетная масса предель- ного заряда по уравне- нию (4.13), кг	0,092	0,195	0,300	0,45	0,75
Работоспособность на 10- ти тонном баллистиче- ском маятнике относи- тельно угленита Э-6	1,11... 1,18	1,102... 1,178	1,07... 1,138	1,0... 1,01	0,95... 0,97
Передача детонации между патронами, см:					
– сухими	13,0	8,0	5,0	3,0	3,0
– после выдержки в воде	8,0	6,0	3,0	1,0	-

при постоянном содержании других компонентов. Кроме того, для системного анализа результатов, полученных при испытании ПВВ в угловой мортире, была использована зависимость массы предельного заряда (4.13) от плотности и скорости детонации ВВ, полученная в разделе 4 настоящей работы.

Анализ результатов испытаний, приведенных в табл. 6.9, позволил установить следующее. Соотношение компонентов НЭ:АС:ПС оказывает заметное влияние на предохранительные свойства, работоспособность и детонационные свойства ВВ. Снижение содержания нитроэфиров в составе приводит к уменьшению скорости де-

тонации ВВ и передачи детонации между его патронами. При этом предельный заряд ПВВ в уголковой мортире возрастает. Работоспособность ПВВ при выбранном соотношении АС:ПС со снижением нитроэфиров с 13 до 9 % изменяется слабо, оставаясь на достаточно высоком уровне, как у угленита 13П. Это позволяет утверждать, что если выбрать в ПВВ содержание нитроэфиров 11,5...10,0 %, то при достаточно высокой работоспособности ПВВ можно значительно увеличить его предельный заряд в уголковой мортире (более чем в 2 раза по сравнению с угленитом 13П). При содержании нитроэфиров 9% и менее у ВВ резко падает передача детонации, особенно у патронов после выдержки их в воде. При таком содержании нитроэфиров ПВВ имеет низкую восприимчивость к детонации, что не позволит обеспечить ему устойчивую детонацию шпуровых зарядов при взрывных работах.

Таким образом, в результате исследований был рекомендован улучшенный угленит 13П со скорректированной в пределах допуска рецептурой компонентов состава, а так же предложен вариант модернизированного угленита, который содержит несколько больше ингибитора МВС. Он имеет оптимальное содержание нитроэфиров в составе и большую концентрацию солей-ингибиторов в продуктах взрыва ПВВ (патенты Украины №19772 U от 15.12.2006г., №20005 U от 15.01.2007г. и №25384 U от 10.08.2007г.) [318, 319, 320]. На модернизированный образец угленита, получивший название угленит П52, ХКО им. Г.И. Петровского разработало ТУ У 24.6 – 14312683 – 009 - 2006 009:2006. Согласно этим ТУ, установлено следующее содержание ингредиентов в составе ПВВ, в %: нитроэфиры – $11,5 \pm 0,7$, натрий азотнокислый – $38,0 \pm 1,0$, аммоний хлористый – $26,0 \pm 1,0$, аммоний азотнокислый – $15,0 \pm 0,7$, стеарат кальция или цинка – $0,7 \dots 0,9$, хлопок коллодионный или коллоксилин – $0,3 \pm 0,05$, полистирол – $1,5 \pm 0,2$, кальций углекислый – $5,0 \pm 0,5$, натриевая соль карбоксиметилцеллюлозы – $2,0 \pm 0,2$. Угленит П52 был изготовлен на заводе по указанным техническим условиям и направлен на контрольные испытания в МакНИИ. Результаты этих испытаний приведены в табл. 6.10.

В результате проведенных контрольных испытаний было установлено, что угленит П52 имеет практически те же детонационные свойства и работоспособность, что и угленит 13П, однако его предельный заряд в уголковой мортире больше в 2 ра-

Таблица 6.10

Результаты контрольных испытаний угленита П52

Наименование показателей ВВ и компонентов в его составе	Требования проекта ТУ У 24.6 – 14312683 – 009 - 2006	Результаты испытаний
1	2	3
Масса ВВ в патроне, г	200±10	191,8
Диаметр патрона, мм	36-37	соответств.
Плотность ВВ в патроне, г/см ³	1,1 – 1,35	1,26
Масса бумажной гильзы на 100г ВВ, г, не более	3,0	1,6
Масса влагоизолирующего состава на 100г ВВ, не менее / не более	1,3 / 2,5	- / 1,5
Нитроэфиры	11,5 ± 1,0	12,2
Полистирол	1,5 ± 0,5	1,5
Натрий азотнокислый	37,5 ± 1,0	39,5
Натриевая соль карбокси- метилцеллюлозы	2,0 ± 0,5	присутств.
Аммоний хлористый	25,5 ± 2,0	25,7
Стеарат кальция	0,7 ± 0,5	1,2
Коллоксилин	0,3 ± 0,1	присутств.
Кальций углекислый	6,0 ± 0,5	6,0
Селитра аммиачная	15,0 ± 2,0	14,64
Содержание влаги и летучих веществ, %, не более	0,5	0,4
Фугасность в свинцовой бомбе, см ³ , не менее	145	158
Бризантность, мм, не менее	7,5	9,9

Продолжение табл. 6.10

1	2	3
Бризантность, мм, не менее	7,5	9,9
Полнота детонации заряда из 5 патронов после выдержки в воде:	полная	полная
Передача детонации на расстояние между двумя патронами, см, не менее: – сухие / мокрые	5 / 3	10 / 6
Предохранительные свойства: предельный заряд, не воспламеняющий МВС (20 опытов), г: – в уголковой мортире – в канальной мортире при прямом инициировании	100, 200 1000	не воспл. не воспл.

за и равен 0,2 кг. Значит, уровень предохранительных свойств угленита П52 достаточен для того, чтобы обеспечить антигризутность частично обнаженных шпуровых зарядов при взрывных работах.

6.3. Модернизация предохранительных ВВ VI класса

В угольных шахтах Советского Союза и Украины единственным ПВВ VI класса являлся угленит 12ЦБ и его предохранительные патроны типа П12ЦБ-2/2. Это ПВВ имело существенные недостатки: низкую устойчивость против выгорания, вследствие чего имели место аварии на угольных шахтах, в том числе, с человеческими жертвами; в продуктах взрыва содержалось повышенное количество аммиака, который, помимо токсического действия на людей, оказывал еще и острое раздражающее действие на их слизистую оболочку глаз и носа. В связи с этим, угленит 12ЦБ был запрещен для применения в шахтах, а после аварии на шахте «Карагай-

линская» ПО «Киселевскуголь» Госгортехнадзор Украины запретил в угольных шахтах и применение патронов П12ЦБ-2/2.

В августе 1992г. Госнадзорохрантруда Украины для ведения взрывных работ в угольных шахтах, опасных по газу и взрывам угольной пыли, допускает к постоянному применению углениты 13П и 13П/1 – предохранительные ВВ V класса (ТУ 12.0174086-002-92). Применение этих угленитов в шахтах показало, что угленит 13П обладает работоспособностью, с которой угленит 13П/1 не может конкурировать. Однако уровень предохранительных свойств у этого угленита гораздо выше, чем у угленита 13П. Поэтому он может служить основой для модернизации ПВВ VI класса. Исследования показали, что в уголковой мортире предельный заряд угленита 13П/1 резко возрастает при снижении в составе содержания нитроэфиров (норма 13%). Это наглядно показывают результаты испытаний различных образцов ПВВ угленита 13П/1, имеющих уменьшенное содержание нитроэфиров (табл. 6.11).

Таблица 6.11

Результаты испытаний угленита 13П/1 с разным содержанием нитроэфиров

Показатели ПВВ	Содержание нитроэфиров в составе ПВВ		
	13,0 %	12,0 %	11,0 %
Работоспособность относительно угленита Э-6 на 10-ти тонном маятнике	0,99	0,95...0,96	0,94...0,95
Скорость детонации ВВ, м/с (при плотности, г/см ³)	2060 (1,215)	1923 (1,22)	1884,5 (1,235)
Предельный заряд в уголковой мортире, кг	0,2	0,5	0,7...0,8

Таким образом, оказалось, что угленит 13П/1 может быть преобразован в ПВВ VI класса при соответствующей корректировке его рецептуры. При этом, оставив основу рецептуры угленита 13П/1, необходимо было установить такое содержание нитроэфиров и полистирола в составе ВВ, чтобы оно удовлетворяло требованиям,

предъявляемым к ПВВ VI класса по детонационным свойствам, работоспособности и передаче детонации между патронами, а содержание солей-ингибиторов таким, чтобы ПВВ имело необходимые предохранительные свойства и поджигаемость.

При решении вопроса о количественном содержании нитроэфиров и полистирола в составе ВВ исходили из уже установленного выше факта, что предохранительные свойства тем выше, чем меньше содержание нитроэфиров в составе и больше концентрация ингибитора в продуктах взрыва ВВ.

Проведенные исследования показали, что оптимальное содержание нитроэфиров в составе ВВ должно быть примерно 12%. Опыт использования полистирола ограничивается только практикой, связанной с разработкой угленита 13П, в составе которого он содержится в количестве до 3 % и для него имеется достаточно эффективный окислитель аммиачная селитра.

Определенное соотношение нитроэфиров, аммиачной селитры и полистирола обеспечило повышение работоспособности угленита 13П на 10...15% по сравнению с угленитом Э-6. Однако в процессе лабораторных исследований и шахтных испытаний было установлено, что не весь полистирол принимает участие во взрывчатом превращении: в виде вспененных шариков его находят на месте проведения работ. Значит, содержание полистирола в ВВ VI класса, где аммиачной селитры не будет, необходимо уменьшить.

Ионообменную пару солей и углекислый кальций целесообразно использовать в таком соотношении, чтобы иметь высокую концентрацию солей-ингибиторов в продуктах взрыва ПВВ, а также приемлемые показатели по работоспособности ВВ и передаче детонации между патронами. Если же в этом соотношении увеличить содержание хлористого аммония, что нужно для повышения устойчивости к выгоранию ВВ, то в процессе взрывчатого превращения тогда образуется достаточное количество хлористого водорода, который необходимо нейтрализовать введением дополнительного количества пламегасителя, например, углекислого кальция. Более высокое содержание последнего в составе ВВ приводит к повышению устойчивости к выгоранию и предохранительных свойств. С учетом такого подхода на заводе были изготовлены пять образцов ПВВ VI класса (У-10П, У-11П, У-12П, У-13П, и У-

14П), близких по расчетным энергетическим показателям к углениту 12ЦБ. Однако, в отличие от него, эти образцы имели большую концентрацию солей-ингибиторов в продуктах взрыва, которые одновременно являлись ингибиторами окисления метана и поджигаемости ВВ. Химический и компонентный состав опытных образцов приведен в табл. 6.12, в табл. 6.13 приведены их расчетные взрывчатые показатели и для сравнения показатели угленита Э-6.

Из табл. 6.13 следует, что образцы ВВ с полистиролом отличаются друг от друга по энергетическим показателям и по предохранительности, но это отличие не значительное. В сравнении же с угленитом Э-6 различие в показателях существенное. Все образцы с полистиролом превосходят угленит Э-6 по энергетическим показателям ($Q, V, Q \cdot V$), но уступают ему по предохранительности ($\varepsilon, C_u, (m/QV) \cdot 10^3$).

Однако более объективные результаты были получены при определении взрывотехнических показателей образцов (табл. 6.14). Видно, что образцы с полистиролом оказались лучше угленита Э-6 по предохранительным свойствам, но уступают ему по работоспособности. В ходе испытаний выявились существенные различия в предохранительных свойствах и между самими образцами ВВ. Образцы У-10П, У-11П и У-12П не воспламеняли МВС при взрывании в уголковой мортире зарядов массой 0,6...0,8 кг, то есть их уровень предохранительных свойств был как у угленита 12ЦБ. Предельный заряд у образцов У-13П и У-14П практически такой же, как и у угленита Э-6 (0,2 кг). Для первых трех образцов предельные заряды были определены с точностью 0,2 кг, для последних двух – с точностью 0,1 кг.

Таким образом, образцы ПВВ с содержанием нитроэфиров до 12% могут послужить основой модернизированного ПВВ VI класса. У всех образцов с полистиролом относительно высокие работоспособность (0,94...0,97 от Э-6) и передача детонации между сухими и выдержанными в воде патронами и, что особенно важно, более низкая поджигаемость по сравнению с угленитом 12ЦБ (чем выше значение показателя P_{50} , тем ВВ более устойчиво к поджиганию и выгоранию в шпурах).

Если же говорить более конкретно, то как ПВВ VI класса должен рассматриваться, скорее всего, образец У-11П, содержащий 11% нитроэфиров, так как образец У-12П с 12% нитроэфиров находится на границе довольно резкого перехода коли-

Таблица 6.12

Химический состав образцов ПВВ VI класса с полистиролом

Наименование компонентов	Образцы ПВВ				
	У-10П	У-11П	У-12П	У-13П	У-14П
Нитроэфиры, %	10,0	11,0	12,0	13,0	14,0
Нитрат натрия, %	50,0	49,2	48,3	47,1	46,0
Аммоний хлористый, %	31,5	30,8	30,2	29,6	29,0
Кальций углекислый, %	4,5	5,0	5,5	6,3	7,0
Полистирол, %	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7
Натриевая соль КМЦ, %	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
Кальция стеарат, %	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Хлопок коллоидонный, %	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3

Таблица 6.13

Расчетные показатели образцов ПВВ VI класса с полистиролом

Показатели	Образцы ПВВ					Угл. Э-6
	У-10П	У-11П	У-12П	У-13П	У-14П	
Теплота взрыва, Q , кДж/кг	2212,3	2482,3	2492,8	2471,4	2462,2	2406,8
Объем газов, V , м ³ /кг	0,561	0,568	0,570	0,572	0,548	0,547
Количество ингибитора в продуктах взрыва, ε , кг/кг	0,373	0,367	0,365	0,362	0,358	0,389
Работоспособность в виде показателя QV	1369,6	1409,8	1420,7	1413,6	1349,2	1316,1
Предохранительность ВВ в виде показателя $(m/QV) \cdot 10^3$	1,138	1,090	1,075	1,072	1,111	1,237
Кислородный баланс, %	-0,12	-0,42	-0,72	-1,15	-1,54	0,51
Концентрация ингибитора, C_u , кг/м ³	0,663	0,648	0,640	0,633	0,624	0,712

Таблица 6.14

Экспериментальные данные образцов ПВВ VI класса с полистиролом

Показатели	Образцы ПВВ					Угл. Э-6
	У-10П	У-11П	У-12П	У-13П	У-14П	
Работоспособность по отношению к углениту Э-6	0,94	0,95	0,96	0,97	0,97	1,00
Предохр. свойства в МВС: M_{np} в уголковой мортире, кг	0,80	0,80	0,60	0,20	0,20	0,15
Передача детонации между патронами: – сухими, см	12	12	20	18	21	8-12
– после выдержки в воде, см	5	8	12	12	14	3-5
Поджигаемость, P_{50} , г	1,46	1,70	1,64	1,56	1,67	0,70
Скорость детонации, км/с	-	1,9	1,9	-	2,1	2,2
Плотность ВВ в патроне, г/см ³	1,24	1,19	1,23	1,20	1,27	1,25

чества в качество (имеются в виду предохранительные свойства ВВ), а образцы с содержанием нитроэфиров менее 10% имеют низкую передачу детонации выдержанных в воде патронов (водоустойчивость). Образец У-11П имеет небольшой отрицательный кислородный баланс (- 0,419 %) и, как и все исследованные ВВ, содержит 1,7% полистирола. Если учесть, что в процессе взрыва сгорает не весь полистирол, а, допустим, половина, то кислородный баланс состава будет положительный (около +2,2 %). Это вполне приемлемо, так как попытка приведения его к нулю за счет большего содержания полистирола не привела к ожидаемому повышению работоспособности, а стоимость ПВВ даже несколько увеличилась. Поэтому содержание полистирола в количестве 1,7 % является оптимальным.

Далее необходимо решить вопрос, связанный с допусками по каждому из компонентов состава, которые определяются, прежде всего, возможностями технологического производства ПВВ. Чтобы был понятен подход к решению этого вопроса, в табл. 6.15 приведен химический состав образца У-11П и принятые в отрасли, производящей ПВВ, допуски по каждому компоненту.

Таблица 6.15

Химический состав опытных образцов и допуски по компонентам

Компоненты ПВВ	Содержание компонентов в образцах, %			Значение допусков, %
	У-11П	У-11/10П	У-11/12П	
Нитроэфиры	11,0	10,0	12,0	±1,0
Нитрат натрия	49,2	47,7	50,7	±1,5
Аммоний хлористый	30,8	33,6	29,0	±1,5
Кальций углекислый	5,0	5,0	4,5	±0,5
Полистирол	1,7	2,2	2,3	±0,5
Натриевая соль КМЦ	1,5	1,0	1,0	±0,5
Кальция стеарат	0,5	0,3	0,3	±0,2
Хлопок коллодионный	0,3	0,2	0,2	±0,1

При изготовлении ПВВ возможны различные неблагоприятные варианты соотношения компонентов. Это всегда приходится учитывать, а тем более в случае с образцом ПВВ У-11П, когда у него сразу же за пределами плюсового допуска по нитроэфирам находится зона их концентрации, опасная для такого показателя, как предохранительные свойства. С позиции предохранительных свойств и содержания солей-ингибиторов в продуктах взрыва опасно пониженное содержание хлористого аммония и углекислого кальция. Изменение других компонентов состава менее значимо.

С учетом вышесказанного и принятых для ВВ допусков на заводе-изготовителе были сделаны два образца У-11/10П и У-11/12П, рецептура которых приведена в той же табл. 6.15. При этом в образце У-11/10П, чтобы оценить влияние компонентов на водостойчивость и предохранительные свойства, содержание хлористого аммония было завышено сверх принятого допуска, а содержание других компонентов выведено на уровень нижнего (нитроэфиры, натриевая соль КМЦ, стеарат кальция и коллодионный хлопок) и верхнего (углекислый кальций) пределов допуска.

Результаты испытаний этих образцов приведены в табл. 6.16. Оба образца были испытаны через месяц после изготовления, а образец У-11/10П еще через 6 месяцев и год. Из табл. 6.16 следует, что, за исключением передачи детонации «мокрых» патронов, значения показателей у обоих образцов были такими же, как и у образца У-11П с номинальным значением компонентов. Расстояние по передаче детонации выдержанных в воде патронов у обоих образцов, и особенно у образца У-11/10П, было меньшим и еще уменьшалось со временем хранения, хотя и оставалось к концу гарантийного срока хранения в пределах нормы, предусмотренной техническими требованиями к ПВВ VI класса.

Анализ вводимых в состав предохранительных ВВ горючих добавок и механизма их влияния на показатели безопасности и эффективности взрывчатых веществ, а также результаты специально проведенных исследований позволили установить, что в качестве такой добавки целесообразно использовать вспенивающийся полистирол марки 5, у которого не более 50% частиц размером менее 0,5 мм.

Таким образом, в составе ПВВ VI класса установили оптимальное содержание нитроэфиров и полистирола: $11,0 \pm 1,0\%$ и $1,5 \pm 0,5$. Этот образец был назван угленитом 10П. Экспериментальный образец угленита 10П (маркировка 1-Э) был испытан на заводе и в МакНИИ в соответствии с действующей нормативно-технической документацией. Был выполнен химический анализ образца, определены значения его взрывчатых и технических показателей, предохранительные свойства и количество ядовитых газов в продуктах взрыва. Результаты химического анализа приведены в табл. 6.17, данные испытаний по взрывотехническим показателям – в табл. 6.18, по количеству ядовитых газов в продуктах взрыва – в табл. 6.19.

По данным количества ядовитых газов, приведенным отдельно по каждому газу (CO , NO , NH_3), по известной формуле [200] определяли условную окись углерода в продуктах взрыва ПВВ:

$$\text{CO}_{\text{усл}} = A_{\text{CO}} + 6,5 B_{\text{NO}} + 0,6 C_{\text{NH}_3},$$

где A_{CO} , B_{NO} , C_{NH_3} – количество оксида углерода, оксидов азота и аммиака в продуктах взрыва, л/кг.

Обобщая результаты испытаний образца 1-Э, можно отметить, что он по всем

Таблица 6.16

Результаты испытаний образцов У-11/10П и У-11/12П

Показатели	Образцы ПВВ, срок хранения			
	У-11/10П, 1 мес.	У-11/12П, 1 мес.	У-11/10П, 6 мес.	У-11/10П, 12 мес.
Работоспособность по отношению к углениту Э-6	0,92	0,97	0,92	0,90
Предохр. свойства, M_{np} , кг, в				
– уголковой мортире	0,8	0,6	0,8	1,0
– канальной мортире с обр. иниц.	1,0	1,0	1,0	1,0
Передача детонации, см:				
сухие патроны/выдерж. в воде	12/3	18/5	12/2	10/1
Поджигаемость, P_{50} , г	1,71	1,64	-	-
Скорость детонации, км/с	1,91	2,05	1,85	1,80
Плотность ВВ в патроне, г/см ³	1,25	1,20	-	-

Таблица 6.17

Результаты химического анализа образца 1-Э угленита 10П

Компоненты	треб. НТД	рез-ты завода	рез-ты МакНИИ
Нитроэфиры, %	11,0±0,7	10,86	11,7
Нитрат натрия, %	48,2±2,0	50,60	50,3
Натриевая соль КМЦ, %	2,0±0,5	-	31,9
Аммоний хлористый, %	31,5±1,5	30,55	
Кальций углекислый, %	5,0±0,5	6,49	6,1
Стеарат кальция, %	0,5±0,1		
Хлопок коллодионный, %	0,3±0,1		
Полистирол, %	1,5±0,5	1,50	0,43
Влага и летучие вещ-ва, %	0,5	0,15	

Таблица 6.18

Взрывотехнические показатели образца 1-Э углянита 10П

Показатели	Норма по НТД	Данные завода	Данные МакНИИ
Масса ВВ в патроне, г	200	197,8	199,3
Плотность ВВ в патроне, г/см ³	1,15...1,35	1,26	1,20
Масса влагоизолирующего покрытия на 100 г ВВ, г	1,3...2,5	1,13	1,40
Масса бумажной оболочки на 100 г ВВ, г	3	2,2	2,2
Работоспособность по отношению к угляниту Э-6	0,80	-	0,94
Предохранительные свойства*, кг:			
– МВС	1,0/1,0/0,6	-	1,0/1,0/0,6
– угольная пыль	- /- /1,0	-	- /- /1,0
Передача детонации, см:			
– сухие патоны	4	13	15
– после выдержки их в воде	2	8	8
Поджигаемость, P_{50} , г	1,2	-	1,62
Скорость детонации, км/с	-	-	1,95
Бризантность, мм	-	6,1	5,3

* – первое значение относится к испытанию в канальной мортире при прямом инициировании заряда, второе – то же, но при обратном инициировании, третье – к испытанию в уголковой мортире.

Таблица 6.19

Количество ядовитых газов в продуктах взрыва образца 1-Э

ПВВ	A_{CO} , л/кг	B_{NO} , л/кг	C_{NH_3} , л/кг	$CO_{усл}$, л/кг
Угленит 10П	6,12	4,53	2,34	37,9
Угленит Э-6	7,62	4,14	1,88	36,4
Угленит 12ЦБ	5,73	4,17	8,12	40,9

показателям удовлетворяет действующим техническим требованиям на предохранительные взрывчатые вещества VI класса. При этом этот образец угленита 10П VI класса незначительно уступает по работоспособности эталонному ВВ V класса углениту Э-6, но превосходит его по детонационной способности и значительно труднее (более чем в 2 раза) поджигается от навески воспламенителя (P_{50} у угленита 10П 1,62 г, а у Э-6 0,7 г). По количеству ядовитых газов образец 1-Э находится на уровне угленитов Э-6 и 12ЦБ и тоже удовлетворяет техническим требованиям, согласно которым норма по условной окиси углерода не должна превышать 80 л/кг. Очень важно, что в продуктах взрыва образца угленита аммиака содержится почти в 4 раза меньше, чем у угленита 12ЦБ, на который поступали жалобы от шахтеров.

Образец 1-Э получил название угленит 10П. По ряду технических показателей он превосходит ПВВ VI класса угленит 12ЦБ и патроны предохранительные П12ЦБ: его поджигаемость в 2...3 раза меньше и работоспособность на 10...15% больше. За последние годы некоторые показатели угленита 10П улучшены (патенты Украины № 10493 А от 25.12.96 г. и № 11978 U от 16.01.2006 г.) [321, 322].

6.4. Модернизация конструкции шпурового заряда ПВВ

Большое влияние на безопасность взрывных работ оказывают время замедления при короткозамедленном взрывании зарядов ВВ и конструкция шпурового заряда. Величина оптимального интервала времени замедления между взрывами зарядов ВВ определяется, главным образом, временем образования новой свободной по-

верхности обнажения пород. Оптимальным интервалом времени замедления при короткозамедленном взрывании зарядов ВВ в забое выработки следует считать интервал, при котором достигается наибольший эффект разрушения горных пород, к.и.ш. максимален и взрывоопасная среда не успевает образовываться.

Выбор оптимального интервала замедления между взрывами зарядов ВВ при сотрясательном взрывании, наиболее опасном виде взрывных работ при разрушении газоносных массивов, основан на учете напряженного состояния горных пород, их свойств, линии наименьшего сопротивления действия взрыва и работоспособности ПВВ. Исследованиями установили [323, 324] оптимальные интервалы замедления – $\tau_{всп}$ для вспомогательных и – τ_k для контурных шпуровых зарядов при взрывании. Для ПВВ V класса они должны быть такими: по углю $\tau_{всп} = 26$ мс, $\tau_k = 8$ мс; по породе $\tau_{всп} = 32,3$ мс, $\tau_k = 10$ мс. Оптимальные интервалы замедления для ПВВ VI класса, которые должны иметь вспомогательные и контурные шпуровые заряды при взрывании: по углю $\tau_{всп} = 37$ мс, $\tau_k = 11,3$ мс; по породе $\tau_{всп} = 49$ мс, $\tau_k = 15$ мс. Общее максимальное время замедления при взрывных работах в угольных шахтах с применением ПВВ V или VI классов может быть 320 мс.

Также установили, какие элементы конструкции шпурового заряда могут оказывать влияние на его эффективность и безопасность. Способ обратного инициирования (патрон-боевик расположен у дна шпура или канала мортиры) для ПВВ V и VI классов более предпочтителен, чем способ прямого, так как он обеспечивает безопасность взрываемых в опытном штреке с МВС в комбинированной мортире [325] (патент Украины № 83618 от 11.08.2008 г.) зарядов ВВ, имеющих большую работу взрыва, чем у зарядов при прямом инициировании. Кроме того, при обратном инициировании происходит перераспределение импульса взрыва заряда ВВ, в результате чего его большая часть приходится на разрушаемую поверхность забоя, меньшая – на законтурный массив, находящийся в напряженном состоянии. Поэтому можно предположить, что при обратном инициировании заряда ВВ во время сотрясательного взрывания вероятность возникновения и развития внезапного выброса будет существенно меньше.

Теоретическими и лабораторными исследованиями было установлено, что по

сравнению с зарядом ВВ сплошной конструкции применение заряда, у которого в донной части шпура расположена забойка, позволяет при взрыве значительно изменить плотность распределения динамического напряжения в объеме горного массива. В результате этого можно увеличить эффективность взрывания таких зарядов в горных породах за счет перераспределения в массиве импульса взрыва [326]. При этом оптимальная длина донной забойки при применении обратного способа инициирования шпуровых зарядов ПВВ V и VI классов находится в пределах 0,1...0,15 м, а масса ингибиторной донной пластичной забойки на шпур достигает 0,3 кг. Это очень важно, так как ингибиторная донная забойка играет значительную роль при флегматизации взрывоопасной среды, находящейся в трещинах горного массива. Взрывом шпурового заряда ПВВ она не выбрасывается из шпура, как устьева забойка, а загоняется продуктами детонации ВВ вглубь массива по открытым трещинам. В результате при взрыве заряда ВВ МВС в трещинах массива не воспламеняются. Новые конструкции шпурового заряда ПВВ V и VI классов (угленитов 13П и 10П) с донной забойкой при обратном способе инициирования (рис. 6.1) были предложены для испытания в угольных шахтах, опасных по газу и пыли. Для их применения разработан и новый способ сотрясательного взрывания. Его принципиальными отличиями от существующих являются применение шпурового заряда с запирающей устьева и донной забойками и изменение традиционной очередности взрывания шпуровых зарядов ПВВ (патент Украины № 78078 С2 от 15.02.2007 г.), то есть от контура к врубу [327].

Ранее отмечалось, что основными причинами отказов и неполных детонаций шпуровых зарядов являются снижение детонационной способности ВВ в результате их переуплотнения под действием внешних динамических нагрузок от взрыва заряда в смежных шпурах и раздвижка патронов с образованием между их торцами пересыпок из буровой мелочи, воды или угольного штыба. Для устранения раздвижки между патронами ПВВ в шпурах предложены монозаряды. Известно техническое решение получения монозаряда ПВВ путем стыковки его отдельных патронов, оно устраняет раздвижки между отдельными патронами и возможные породные пересыпки, чем обеспечивается надежная детонация всего заряда. Это – конструкция

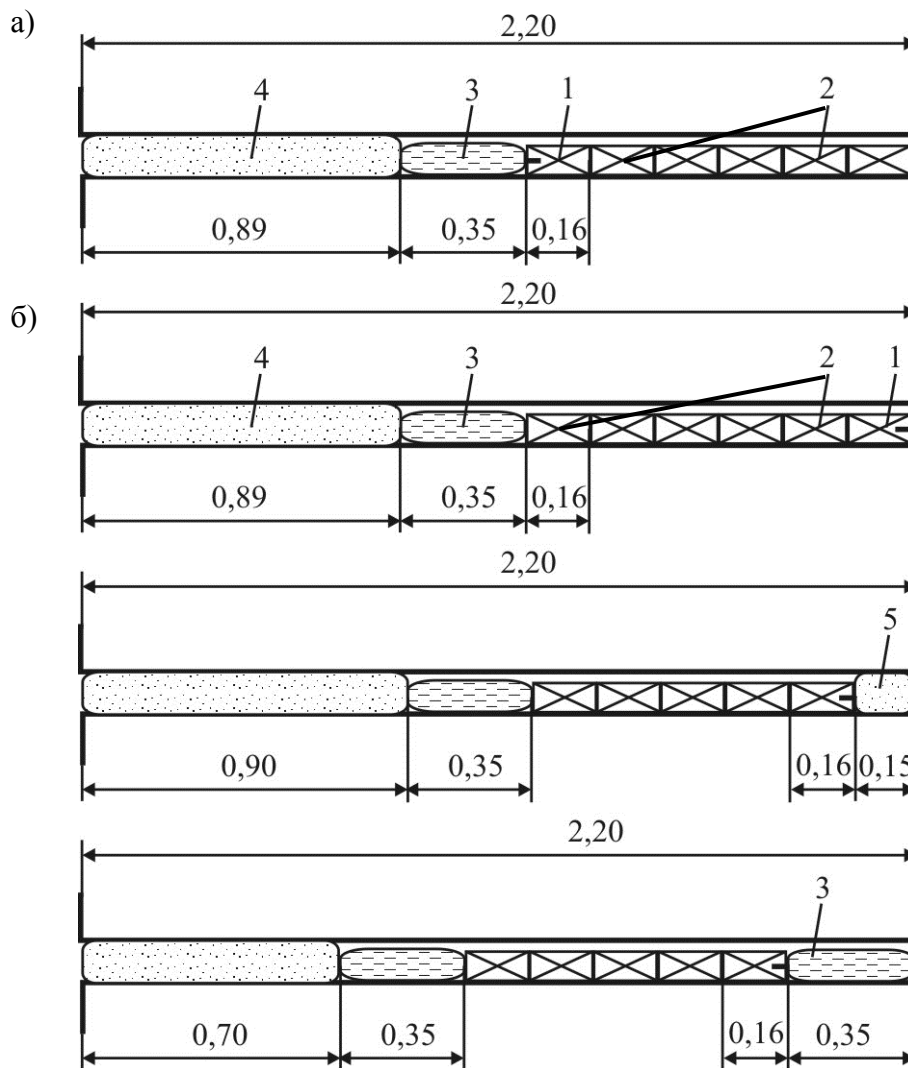


Рис. 6.1. Конструкции шпурового заряда ПВВ

- а – прямое инициирование;
- б – обратное инициирование;
- 1 – патрон-боевик;
- 2 – пассивные патроны;
- 3 – гидрозабойка;
- 4 – устьевая глиняная забойка;
- 5 – донная забойка ИПЗ

предохранительных патронов П-12ЦБ-2М. Она представляет собой цилиндрическую полиэтиленовую оболочку с глухим дном, вход которой снабжен крышкой и кольцевыми гофрами для стыковки с другим патроном. Донная часть оболочки снабжена размещенными на цилиндрической поверхности концевыми гофрами, выполненными соответствующими кольцевым гофрам на входе оболочки, и цилиндрической проточкой на толщину стенки оболочки. Вход оболочки до первой гофры снабжен концевой обечайкой, внутренний диаметр и длина которой равны соответственно наружному диаметру и длине проточки в донной части оболочки (конструкция патрона показана на рис. 6.2). Исследования этой конструкции патронов показали надежность соединения отдельных патронов в монозаряд и его прочность на разрыв. Однако установили, что герметичность конструкции и водоустойчивость монозаряда ПВВ достигались не всегда. Поэтому было предложено модернизировать монозаряд из этих патронов для условий гидровзрывания ПВВ. При тугей посадке крышки в патрон, заполненный ВВ, с целью герметизации полиэтиленовых оболочек патронов предложили наносить на внутреннюю поверхность кольцевых гофр влагоизолирующий состав из легкоплавкой смеси парафина и петролатума. Это, с одной стороны, облегчало изготовление и сборку патронов, а с другой – создавало в зазоре препятствие для проникновения воды вовнутрь оболочки. Обоснование параметров герметизации патронов ВВ в полиэтиленовых оболочках было проведено опытным путем при испытании в МакНИИ [328]. Высокопредохранительные нитроэфирсодержащие ВВ – углениты 13П (V класс) и 10П (VI класс) патронировали в полиэтиленовые оболочки диаметром 37...38 мм, герметичность которых достигалась с помощью туго посаженной крышечки из полиэтилена. На испытания были представлены экспериментальные патроны, а также образцы от валовых партий угленитов 13П и 10П. Испытания угленитов в герметичных полиэтиленовых оболочках показали следующее. Патронирование угленитов 13П и 10П в такие оболочки технологических трудностей не вызывало, выделения нитроэфиров при хранении и транспортировании не наблюдалось. Взрывотехнические показатели угленитов значительно улучшились: скорость детонации 13П возросла на 15,5%, 10П – на 3,7% по сравнению с угленитами в бумажных оболочках, работоспособность увеличилась в

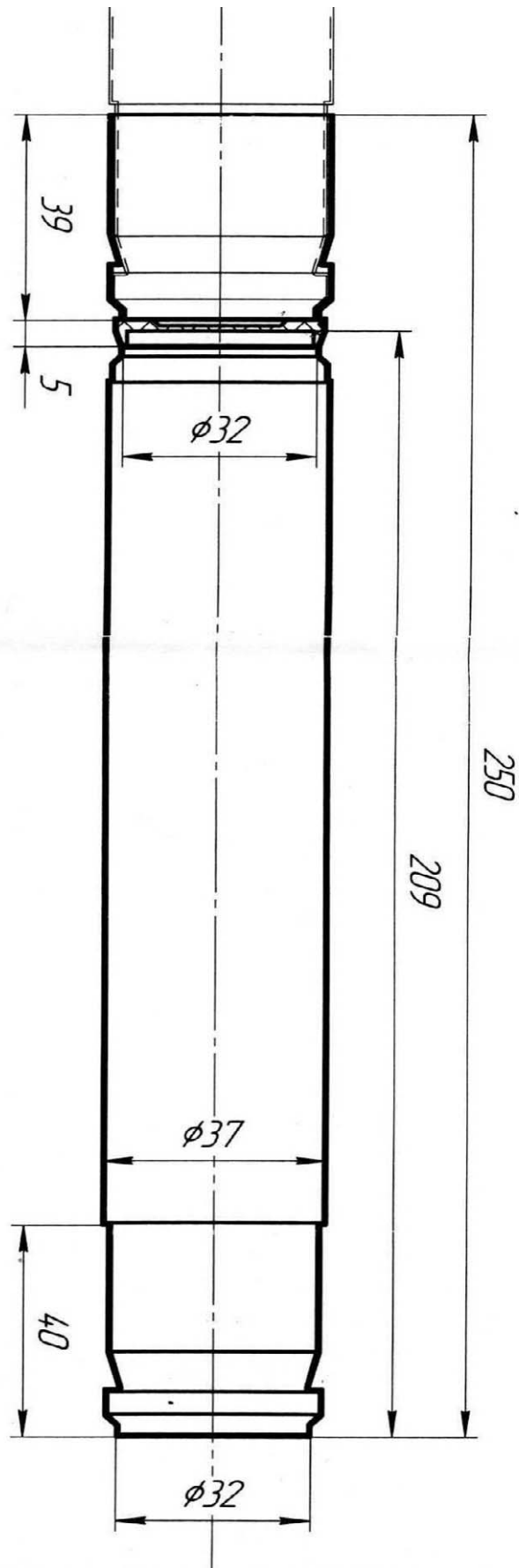


Рис. 6.2. Конструкция стыкующегося патрона ВВ для монозаряда

среднем на 10...15%. Особенно необходимо отметить увеличение водоустойчивости патронов угленитов в полиэтиленовых оболочках. Их герметизация позволила добиться высокой детонационной способности после выдержки в воде при ее избыточном давлении 5...10 атм.

Таким образом, для гидровзрывания ПВВ в угольных шахтах разработаны предохранительные водоустойчивые монозаряды ПВВ (патент Украины № 22936 U от 24.07.2007 г.) [329], которые устойчиво детонируют в шпурах.

6.5. Обоснование параметров шпурового заряда ПВВ при гидровзрывании

При гидровзрывании антигризутность шпурового заряда ВВ, окруженного водяной оболочкой, определяется не только предохранительными свойствами ПВВ, но и толщиной оболочки (δ). Если при взрыве заряд ВВ в такой оболочке не воспламеняет МВС, то антигризутность шпурового заряда достаточна для безопасного производства взрывных работ. Для выяснения этого вопроса были проанализированы экспериментальные данные, полученные при испытании в МВС зарядов ВВ в водяной и гидрогелевой оболочках. Оболочка из гидрогеля имеет, в отличие от водяной, жесткую структуру, которая предотвращает вытекание воды и обеспечивает оболочке заряда более высокую надежность. При этом существенных физико-химических отличий между водой и гидрогелем нет. Чтобы подтвердить, что гидровзрывание зарядов ВВ является неопасным и надежным способом обеспечения безопасности взрывных работ [330], нужно иметь данные об антигризутности таких зарядов. Полученные при испытании зарядов ВВ в гидрооболочках экспериментальные данные, приведенные в разделе 3 (табл. 3.17), позволили установить эмпирическую зависимость толщины предохранительной водяной (гидрогелевой) оболочки вокруг цилиндрического открытого заряда ВВ от мощности его детонационной волны:

$$\delta = 5,2921933 \ln N_D - 125,29539, \text{ мм.} \quad (6.6)$$

Это уравнение показывает, что мощность детонационной волны ВВ оказывает сильное влияние на безопасную толщину предохранительной оболочки.

Массу заряда ВВ выразим через приведенный радиус заряда – r_{np} и плотность патронирования ВВ. Для сосредоточенного (сферического) заряда получим:

$$r_{np} = (3m_{BB}/4\pi\rho_{BB})^{0,333}. \quad (6.7)$$

После преобразований будем иметь:

$$N_D = 0,30249 m_{BB}^{0,666} \rho_{BB}^{0,334} D^3. \quad (6.8)$$

Подставим это выражение в уравнение (6.6):

$$\delta = 5,2921933 \ln(0,30249 m_{BB}^{0,666} \rho_{BB}^{0,334} D^3) - 125,29539, \text{ мм.} \quad (6.9)$$

Рассчитаем безопасную в МВС толщину предохранительной водяной оболочки заряда для некоторых ВВ и сравним ее с экспериментальными данными, полученными в опытном штреке (табл. 6.20). Сравнение показывает хорошее их совпадение. Это позволяет рассчитывать толщину предохранительной оболочки шпурового заряда в МВС с учетом массы ВВ в заряде.

Таблица 6.20

Толщина предохранительной оболочки вокруг зарядов ВВ

ВВ	Плотность патронов ВВ, ρ_{BB} , кг/м ³	Скорость детонации, D , м/с	Масса ВВ, m_{BB} , кг	Мощность детонационной волны, N_D , Дж/с	Толщина предохранительной оболочки, δ , мм	
					расчет по (6.9)	средняя из табл. 3.17, эксперим.
1	2	3	4	5	6	7
Аммонит Т-19	1180	4050	0,3	$9,568572 \cdot 10^{10}$	8,50	7,5
Аммонит Т-19	980	4470	0,9	$2,51321 \cdot 10^{11}$	13,6	14,0
Аммонит 6ЖВ	1040	4000	0,2	$6,746307 \cdot 10^{10}$	6,6	5,5
Аммонит 6ЖВ	1070	4200	0,3	$1,03285 \cdot 10^{11}$	8,9	8,0
Аммонит 6ЖВ	1090	4580	0,9	$2,801131 \cdot 10^{11}$	14,2	13,5
Детонит 10А	1090	4840	0,3	$1,5904134 \cdot 10^{11}$	11,2	11,0
Детонит 10А	1170	5640	0,9	$5,3560907 \cdot 10^{11}$	17,6	22,0
Тротил	1570	6660	0,3	$4,6808 \cdot 10^{11}$	16,9	18,0
Аммонит Т-19	1200	4120	0,5	$1,42352 \cdot 10^{11}$	10,6	10,0
Аммонит Т-19	1120	4270	0,9	$2,29065 \cdot 10^{11}$	13,1	12,0

Предохранительная оболочка при взрыве заряда снижает интенсивность действия ударной волны на МВС, охлаждает продукты взрыва ВВ и исключает попадание горящих частиц ВВ в МВС. Начальную скорость движения оболочки при взрыве заряда ВВ – $U_{об}$ можно определить из закона сохранения импульса:

$$U_{об} = 0,3m_{ВВ}D/M_{об}. \quad (6.10)$$

Зная начальную скорость движения оболочки, можно определить начальное давление во фронте ударной волны в МВС по известному уравнению газодинамики:

$$P_x = \Delta P = \rho_g(\gamma + 1)U_{об}^2/2. \quad (6.11)$$

Скорость ударной волны при давлении во фронте ударной волны $P_x = \Delta P$ равна:

$$D_y = 315,38(1,46245\Delta P/P_a)^{0,49305}, \text{ м/с.}$$

Используя известный закон расширения продуктов взрыва ВВ, определим максимальный радиус их расширения в оболочке:

$$a_r = \frac{r_\kappa}{r_3} = \left[\left(\frac{P_n}{P_\kappa} \right)^{\frac{1}{n}} \cdot \left(\frac{P_\kappa}{P_x} \right)^{\frac{1}{k}} \right]^{0,333}. \quad (6.12)$$

Время, за которое продукты взрыва расширяются от начального радиуса ВВ (r_3) до конечного (r_κ), это время, в течение которого продукты взрыва ВВ отделены оболочкой от фронта ударной волны в МВС. Назовем его временем «запирания» продуктов взрыва ВВ оболочкой. Его можно определить по формуле:

$$t_3 = r_3(a_r - 1)/U_{об}, \text{ с.} \quad (6.13)$$

Определим P_n и P_κ и рассчитаем параметры ударных волн, образующихся в МВС при взрыве заряда с гидрооболочкой. Результаты приведены в табл. 6.21. Из них видно, что наличие оболочки вокруг заряда ВВ оказывает существенное влияние на начальные параметры ударных волн, образующихся в окружающей заряд среде, температуру продуктов взрыва и степень их расширения. Так, давление во фронте ударной волны, образованной в газообразной среде при взрыве заряда ВВ с предохранительной гидрооболочкой, более чем в 20 раз меньше начального давления при взрыве открытого заряда. Температура продуктов взрыва при их расширении уменьшается уже на начальной стадии примерно в 2 раза по сравнению с перво-

Таблица 6.21

Параметры открытых зарядов с предохранительной водяной и гидрогелевой оболочкой

ВВ	Состав оболочек; ее толщина, δ , мм	Масса оболочки, $M_{об}$, кг	Масса ВВ в заряде, $m_{ВВ}$, кг	Давление взрыва, Па		Скорость оболочки, $U_{об}$, м/с	Давление УВ, $\Delta P \cdot 10^{-6}$, Па	Радиус, м		$a_r = \frac{r_k}{r_3}$	Скорость УВ в воздухе (МВС), D_y , м/с	Время записания ПВ, t_3 , мс
				$P_n \cdot 10^{-9}$	$P_k \cdot 10^{-8}$			$r_3 \cdot 10^{-2}$	r_k			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Амм. Т-19	вода; 7	0,2496	0,3	5,33	1,023	1460,3	3,135	3,943	0,1791	4,543	1746,9	0,096
Амм. Т-19	вода; 15	1,0815	0,9	5,59	0,531	1115,9	1,830	6,050	0,2900	4,794	1360,9	0,206
Амм. № 6ЖВ	вода; 5	0,1453	0,2	4,75	2,256	1651,7	4,010	3,593	0,1654	4,602	1962,6	0,078
Амм. № 6ЖВ	вода; 8	0,3163	0,3	5,49	2,010	1195,0	2,100	4,050	0,2220	5,494	1449,5	0,152
Амм. № 6ЖВ	вода; 15	1,2680	0,9	6,53	1,440	975,2	1,398	5,840	0,3481	5,961	1205,3	0,297
Детонит 10А	вода; 11	0,4743	0,3	6,42	2,330	861,5	1,091	4,050	0,2770	6,843	1080,8	0,275
Детонит 10А	вода; 22	1,5515	0,9	10,60	1,090	981,5	1,416	5,700	0,342	6,000	1212,2	0,290
ТНТ	вода; 18	1,1644	0,9	18,52	1,119	1593,0	3,730	5,170	0,2273	4,396	1896,4	0,110
Амм. Т-19	гидрогель; 8	0,2940	0,3	5,53	1,023	1239,8	2,260	3,943	0,1970	4,996	1499,4	0,127
Амм. Т-19	гидрогель; 10	0,4840	0,5	5,82	0,968	1276,8	2,400	4,648	0,2280	4,906	1541,8	0,142
Амм. Т-19	гидрогель; 12	0,93060	0,9	5,83	0,768	1238,9	2,260	5,784	0,2785	4,816	1499,4	0,178
Амм. № 6ЖВ	гидрогель; 6	0,1805	0,2	4,75	2,256	1329,6	2,600	3,593	0,1860	5,176	1600,3	0,113
Амм. № 6ЖВ	гидрогель; 8	0,3160	0,3	5,49	2,010	1196,2	2,103	4,050	0,2220	5,492	1450,4	0,152
Амм. № 6ЖВ	гидрогель; 10	0,4320	0,4	6,03	1,700	1222,2	2,196	4,455	0,2390	5,364	1479,6	0,159
Амм. № 6ЖВ	гидрогель; 10	0,4840	0,5	6,64	1,870	1363,6	2,733	4,648	0,2415	5,195	1638,0	0,143
Амм. № 6ЖВ	гидрогель; 12	0,6320	0,6	6,83	1,509	1304,4	2,500	5,024	0,2600	5,176	1571,3	0,161

начальной. Сделанные расчеты позволяют также установить влияние различных факторов взрыва заряда ВВ на время «запирания» продуктов взрыва предохранительной оболочкой заряда. Корреляционный анализ позволил установить связь между толщиной предохранительной оболочки заряда и произведением скорости расширения оболочки или скорости детонации ВВ на время запирания. Эмпирические зависимости имеют следующий вид:

$$\delta = 0,00221(U_{об}t_3)^{1,60365}, \text{ мм, } /r/=0,929, \quad (6.14)$$

$$\delta = 0,04685(Dt_3)^{0,8239}, \text{ мм, } /r/=0,947. \quad (6.15)$$

Эти зависимости показывают, что не только время «запирания» продуктов взрыва оболочкой определяет уровень предохранительных свойств заряда с гидрооболочкой, но и сама скорость оболочки, которая создает в МВС ударную волну. Используя закон сохранения импульса, преобразуем уравнение (6.14) к следующему виду:

$$\delta = 0,00221 \left(\frac{0,3m_{BB}D}{M_{об}} t_3 \right)^{1,60365}, \text{ мм.} \quad (6.16)$$

Для условий взрывания ВВ в угловой мортире, когда его предельный заряд уменьшается примерно в 2,3 раза по сравнению со свободно подвешенным зарядом, уравнение (6.16) примет вид:

$$\delta = 1,2189 \cdot 10^{-3} \left(\frac{m_{BB}D}{M_{об}} t_3 \right)^{1,60365}, \text{ мм.} \quad (6.17)$$

По уравнению (6.17) можно определить толщину предохранительной оболочки заряда ВВ, взрываемого в угловой мортире. В соответствии с табл. 6.21, среднее время «запирания» продуктов взрыва ВВ гидрооболочкой, обеспечивающей антигризутность заряда ВВ в МВС, составляет для воды $t_3 = 0,17$ мс, а для гидрогеля $t_3 = 0,15$ мс. Принимаем для этих оболочек среднее значение времени запирания $t_3 = 0,16$ мс. Для условий гидровзрывания зарядов ВВ, имеющих сравнительно низкий уровень предохранительных свойств (ПВВ II...IV класса), получим уравнение для расчета безопасной толщины предохранительной оболочки заряда:

$$\delta_{кр} = 6,45142 \cdot 10^{-5} (m_{BB}D/M_{об})^{1,60365}, \text{ мм.} \quad (6.18)$$

Для зарядов ПВВ V и VI классов расчет предохранительной оболочки по этому уравнению дает завышенный результат, так как уровень предохранительных свойств этих ВВ гораздо выше, чем у испытанных ПВВ II...IV классов. С учетом предельного заряда ПВВ V и VI классов уравнение (6.9) примет несколько иной вид. При гидровзрывании шпуровых зарядов ПВВ V и VI классов в газоносных горных массивах необходимо использовать уравнение для расчета безопасной толщины предохранительной оболочки с учетом открытого предельного заряда в уголковой мортире:

$$\delta_{кр} = 5,2921933 \cdot \ln[0,527(m_{ВВ} - M_{пр})^{0,66} \rho_{ВВ}^{0,334} D^3] - 125,29539, \text{ мм.} \quad (6.19)$$

Для зарядов аммонита Т-19 массой 0,6 кг $\delta_{кр} = 14$ мм, для угленита 13П массой 0,8 кг $\delta_{кр} = 5,3$ мм. Полученные величины безопасной предохранительной оболочки зарядов этих ПВВ хорошо согласуются с экспериментальными данными, полученными в опытном штреке при испытании накладных зарядов в уголковой мортире. Кроме того, по этому уравнению можно рассчитать массы шпуровых зарядов для гидровзрывания ВВ с толщиной гидрооболочки, обеспечивающей им безопасность при разрушении газоносных массивов. На рис. 6.3 показаны графики зависимости безопасной толщины гидрооболочки при гидровзрывании от массы шпуровых зарядов ПВВ IV...VI классов. Результаты показывают, что при применении ПВВ V и VI классов можно получить такие параметры гидровзрывания, которые обеспечивают как безопасность взрывных работ, так и высокую их эффективность. Основные характеристики штатных и новых ВВ IV...VI классов для безопасного производства взрывных работ в угольных шахтах и гидровзрывания приведены в табл. 6.22.

Проведенные в разделе исследования и полученные результаты следующие:

- проведена модернизация ПВВ IV класса путем замены в составе штатного аммонита Т-19 части поваренной соли (до 5%) на эффективные ингибиторы поджигаемости ВВ (графит) и реакции окисления метана (криолит, полифосфат натрия и доломит). В результате оптимизированы составы ПВВ IV класса: с графитом – ам-

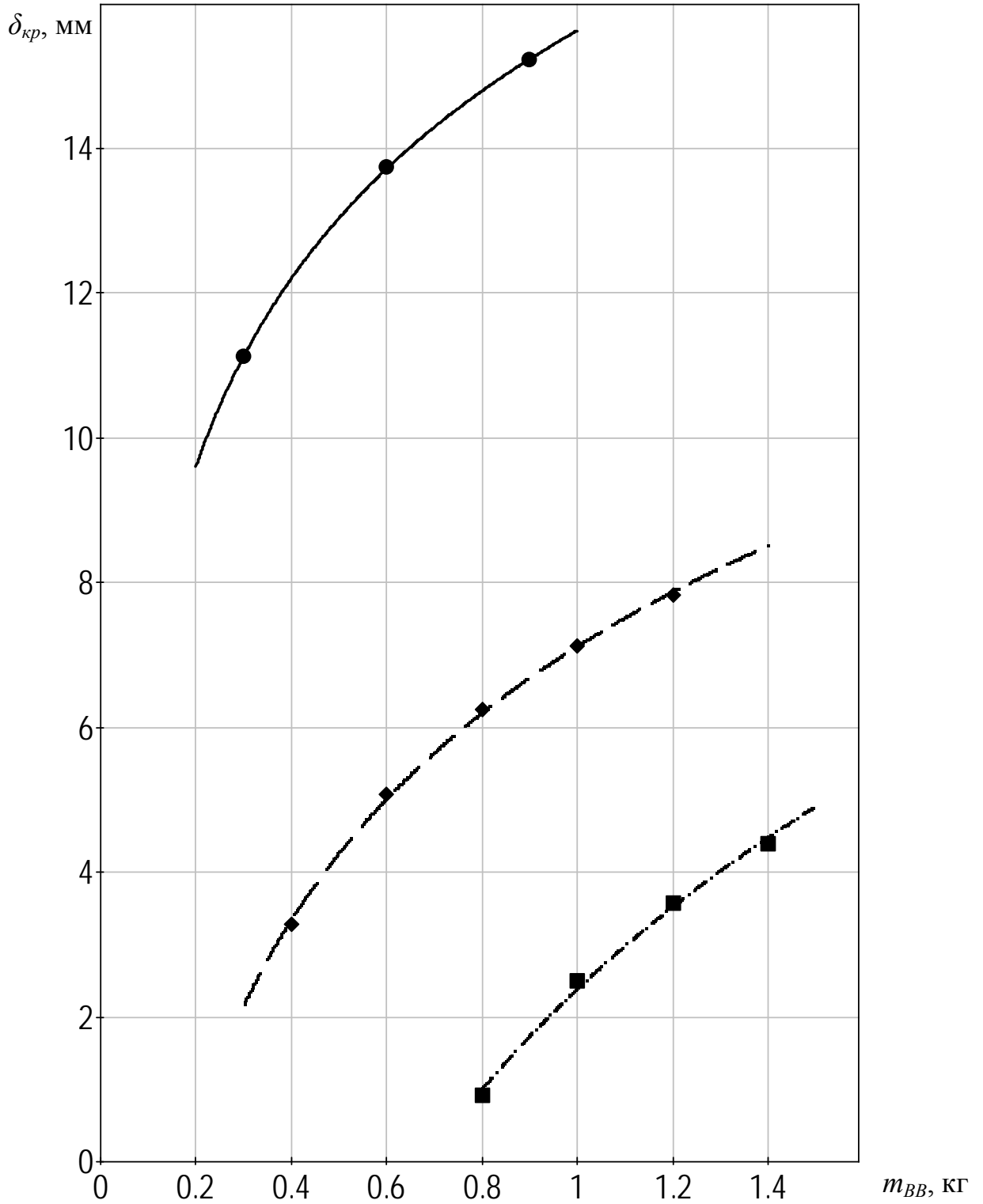


Рис. 6.3. График зависимости безопасной толщины гидрооболочки при гидровзрывании от массы шпурового заряда ПБВ:

- - IV класс;
- - - - - V класс;
- · - · - VI класс.

Таблица 6.22

Основные характеристики новых и штатных ПВВ IV...VI классов

Взрывотехнические показатели ВВ	ПВВ IV класса			ПВВ V класса		ПВВ VI класса	
	аммониты			углениты		углениты	
	Т-19	Г5	П5	13П	П52	12ЦБ	10П
1	2	3	4	5	6	7	8
Удельная теплота взрыва, кДж/кг	3452,97	3469,7	3428,3	2658,4	2755,3	2077,4	2507,0
Удельный объем продуктов взрыва, л/кг	718,7	710,0	712,3	667,5	639,3	577,3	574,9
Удельное содержание ингибитора, кг/кг	0,2	0,205	0,202	0,293	0,303	0,288	0,369
Идеальная работа взрыва, кДж/кг	3088,4	3093,7	3066,3	2235,3	2300,0	1752,9	1991,4
Бризантность, мм	14...15	14...15	13...15	7...9	6...7,5	6...7	6...7
Диаметр патронов, мм	36,0	36,0	36,0	36,0	36,0	36,0	36,0
Плотность патронирования, кг/м ³	1050	1050	1050	1250	1220	1330	1280
Скорость детонации, км/с	4,1...4,2	4,0...4,1	4,0...4,1	2,3...2,5	2,2...2,3	1,85...1,95	1,9...1,98
Поджигаемость, <i>I</i> 50, г	0,89	1,44...1,62	1,6...1,72	1,27...1,62	1,45...1,62	0,8...0,9	1,62...1,81
Предохранительные свойства	удовлетворяют ПВВ IV класса			удовлетворяют ПВВ V класса		удовлетворяют ПВВ VI класса	
Образование ядовитых газов при взрыве, л/кг	40-60	50-70	20-30	< 25	< 25	40-60	< 20
Гарантийный срок хранения, мес.	6	6	6	12	12	6	9

монит Г5 и полифосфатом натрия – аммонит П5, которые в настоящее время применяются в угольных шахтах при взрывных работах;

– модернизирован угленит 13П V класса путем оптимизации содержания в его составе нитроэфиров. Снижение нитроэфиров с 13 до 11...12 % позволило повысить предохранительные свойства угленита и обеспечить антигризутность частично обнаженных шпуровых зарядов. Модернизированный угленит V класса допущен к применению и используется в угольных шахтах;

– установлено, что модернизация угленита 13П/1 позволила создать высокопредохранительное ВВ VI класса – угленит 10П, который испытан и допущен к применению в угольных шахтах;

– разработана конструкция шпурового монозаряда ПВВ с донной ингибиторной забойкой с применением обратного способа инициирования шпурового заряда, разрешенный в угольных шахтах;

– обоснованы безопасные параметры гидровзрывания шпуровых зарядов ПВВ IV... VI классов (масса заряда ВВ и толщина его гидрооболочки).

РАЗДЕЛ 7

ПРОВЕДЕНИЕ ПРОМЫШЛЕННЫХ ИСПЫТАНИЙ МОДЕРНИЗИРОВАННЫХ СРЕДСТВ И СПОСОБОВ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОГО ПРОИЗВОДСТВА ВЗРЫВНЫХ РАБОТ В УГОЛЬНЫХ ШАХТАХ

7.1. Испытания в угольных шахтах ПВВ IV класса

На основании «Программы и методики приемочных межведомственных испытаний...», разрешения Госнадзорхрантруда № 5.2-08/294 от 21.01.2003 г. и в соответствии с требованиями «Единых правил безопасности при взрывных работах», испытания аммонита Т-19-Г5 были проведены при взрывных работах в породных, угольных и смешанных забоях угольных шахт «Щегловская-Глубокая», АП «Шахта им. А.Ф. Засядько», ГХК «Жовтеньвугілля», ПО «Артемуголь», ШУ «Снежноеантрацит», ГХК «Шахтерскантрацит», ПО «Донецкуголь», которые отнесены к опасным по газу и взрывам угольной пыли. Забои выработок отнесены к опасным по метану и внезапным выбросам угля, породы и газа. Породы имели крепость (f) 4...10 по шкале Протодяконова, угольные забои – уголь с сопротивлением резанию до 300 кг/см², обводненность – в пределах, требуемых правилами взрывания. За время испытаний израсходовано 50,0 т аммонита Т-19-Г5. Испытывались опытные партии аммонита Т-19-Г5 №№ 400 и 401, изготовленные Донецким казенным заводом химических изделий. Приемочные межведомственные испытания аммонита Т-19-Г5 проводились с целью установления возможности его постоянного применения при производстве взрывных работ. В ходе испытаний:

- проверена устойчивость детонации аммонита в производственных условиях;
- проверено соответствие аммонита Т-19-Г5 требованиям ТУ У 3.50-14311844-112-2000 с проектом изменений;
- установлены безопасность применения аммонита Т-19-Г5 и его техническая эффективность, которую сравнили с эффективностью аммонита Т-19.

В результате испытаний были установлены технико-экономические показатели опытного аммонита Т-19-Г5 в сравнении с серийными аммонитом Т-19. В период

испытаний аммонита Т-19-Г5 выгораний аммонита, его невзорвавшихся патронов и неполных детонаций, а также воспламенений метана не было.

Определение количества токсичных газов в рудничной атмосфере, проведенное по стандартной методике, показало, что превышения их содержания не было. По работоспособности в производственных условиях опытный аммонит Т-19-Г5 был идентичен штатному аммониту Т-19. Таким образом, аммонит Т-19-Г5 выдержал приемочные межведомственные испытания и был рекомендован для использования в угольных шахтах Донбасса в условиях, где допущено применение предохранительных ВВ IV класса, устойчивых к выгоранию. Для удобства было решено заменить наименование аммонита Т-19-Г5 на аммонит Г5.

Госнадзорхрантруда Украины письмом № 23-45 от 06.03.2003г. допустил аммонит Г5 к постоянному применению в условиях угольных шахт, где разрешено применение ПВВ IV класса.

Приемочные межведомственные испытания опытной партии № 2 патронированного аммонита IV класса марки П5 проводились в соответствии с «Программой и методикой проведения приемочных межведомственных испытаний...», разрешением Госнадзорхрантруда Украины № 5.2/4840 от 21.09.2005 г. и требованиями «Единых правил безопасности при взрывных работах» в породных, угольных и смешанных забоях угольных шахт ГОАО ш/у «Донбасс» и АП «Шахта им. А.Ф. Засядько», которые отнесены к опасным по метану и внезапным выбросам угля, породы и газа. Породы имели крепость 4...9 по шкале Протодяконова, угольные забои – уголь с сопротивлением резанию до 300 кг/см², обводненность – в пределах, требуемых правилами взрывания. За время испытаний израсходовано 50,976 т аммонита П5. Приемочные межведомственные испытания аммонита П5 проводились с целью определения возможности постоянного его применения при производстве взрывных работ. В ходе испытаний:

- проверена устойчивость детонации аммонита П5 при взрывных работах в производственных условиях шахт;

- проверено соответствие аммонита П5 требованиям ТУ У 3.50-14311844-112-2000 с проектом изменений № 3;

– выявлена техническая эффективность и безопасность применения аммонита П5 и сравнена с эффективностью и безопасностью аммонита Г5;

– оценена стабильность физико-химических и взрывчатых показателей аммонита в течение гарантийного срока хранения.

Технико-экономические показатели опытного аммонита П5 и серийного аммонита Г5 при взрывных работах практически одинаковые. В процессе приемочных испытаний аммонита П5 комиссия установила, что случаев отказа зарядов, их выгорания, воспламенения метана и других аномальных явлений не было. По технической эффективности в производственных условиях опытный аммонит П5 идентичен аммониту Г5, при этом фактическая газовая вредность П5 ниже, чем у аммонита Г5. Количество токсичных газов в рудничной атмосфере по данным взрывников, проводивших работы, при использовании аммонита П5 меньше, чем при использовании аммонита Г5. Аммонит П5 обладает повышенной стойкостью к выгоранию (не менее 1,4 г) по сравнению с аммонитом Г5 (не менее 1,2 г). Аммонит П5 выдержал приемочные межведомственные испытания в производственных условиях и был рекомендован для использования в угольных шахтах Донбасса в условиях, где допущено применение предохранительных ВВ IV класса. Госнадзорхрантруда Украины письмом № 23-110 от 18.08.2006 г. допустил аммонит П5 к постоянному применению в условиях угольных шахт, где разрешено применение ПВВ IV класса.

7.2. Испытания в угольных шахтах ПВВ V класса

Приемочные испытания промышленного взрывчатого вещества V класса угленита П52 (проект ТУ У 24.6.-14312683-009:2006) проводились согласно разрешениям Госпромнадзора от 25.01.08 г. № 01/03-06-08/637 и от 03.07.2008 г. №01/03-06-08/5833 в период с мая по 24 декабря 2008 г. в горно-геологических условиях угольных шахт: ГП «Луганскуголь» - шахты «Вергелевская» и «Никанор-Новая», АО «Павлоградуголь» – шахта «Степная», ГП «Первомайскуголь» – шахта «Карбонит» и «Тошковская», ГП ДУЭК – «шахта им. А.А. Скочинского» в соответствии с «Едиными правилами безопасности при взрывных работах» и «Программой и мето-

дикой приемных испытаний угленита П52». Взрывные работы с использованием угленита П52 проводились при проведении подготовительных выработок в угольных и смешанных забоях, подготовке комбайновых ниш, ремонте горных выработок и др. Забои, в которых применяли угленит П52, были опасные по газу и угольной пыли. Крепость пород по шкале проф. Протодяконова была следующей:

- крепость угля колебалась от 1,3 до 4;
- крепость вмещающих пласт пород – от 2 до 10.

В результате проведения приемочных испытаний установлено следующее. Промышленное взрывчатое вещество угленит П52 (ТУ У 24.6-14312683-009:2006) предназначено для проведения взрывных работ по углю и (или) породе в горных выработках с повышенным выделением горючих газов в условиях, где согласно § 223 НПАОП 0.00-1.17-92 «Единые правила безопасности при взрывных работах» разрешено использование взрывчатых веществ V класса.

Угленит П52 представляет нитроэфиросодержащее порошкообразное взрывчатое вещество, запатронированное в бумажные гильзы с последующей их влагоизоляции. Проведенные приемочные испытания промышленного взрывчатого вещества V класса угленита П52 показали, что при производстве взрывных работ в угольных шахтах, опасных по газу и пыли нештатных ситуаций, таких, как отказы шпуровых зарядов, выгорания и других аномальных явлений не выявлено.

От штатного ПВВ V класса, допущенного к применению, – угленита 13П угленит П52 отличается повышенными предохранительными свойствами по газу метану. Поэтому он рекомендован к применению в шахтах в тех условиях, где применяется угленит 13П.

Использование и обращение с угленитом П52 не отличается от использования штатного взрывчатого вещества угленита 13П. Техничко-экономические показатели буровзрывных работ при использовании угленита П52 не хуже, чем у угленита 13П.

На основании удовлетворительных результатов приемочных испытаний, а также учитывая то, что предохранительные свойства угленита П52 выше, чем у угленита 13П, принято решение допустить новое взрывчатое вещество угленит П52 к

постоянному применению для проведения взрывных работ в угольных шахтах, опасных по газу и пыли в тех условиях, где разрешено использование ВВ V класса.

Госгорпромнадзор Украины письмом № 01/02-06-09/6700 от 02.10.2009 г. допустил угленит П52 к постоянному применению в условиях угольных шахт, где разрешено применение ПВВ V класса.

7.3. Промышленные испытания ПВВ VI класса

На основании разрешения Госнадзорохрантруда Украины № 05-9/976 от 16.05.1994 г. и программы и методики, утвержденной Госуглепромом Украины, приемочные испытания угленита 10П проведены в шахтах производственных объединений «Макеевуголь», «Донецкуголь», «Октябрьуголь» и «Шахтерскуголь» в забоях горных выработок, где разрешено применение, в основном, ВВ VI класса. Кроме того, часть угленита 10П израсходована при взрывных работах в условиях, где разрешены менее предохранительные ВВ V класса.

Приемочные испытания проведены в различных горно-геологических и горно-технических условиях шахт «Бутовская», № 10-бис. им. А. Б. Батова, № 3 шахтоуправления «Холодная Балка», им. С. Орджоникидзе, ш/у им. С.М. Кирова и др. (ПО «Макеевуголь»), им. Челюскинцев, им. Петровского, «Глубокая» и др. (ПО «Донецкуголь»), «Рассвет» (ПО «Октябрьуголь»), им. XVII Партсъезда, ш/у им. 1 Мая и др. (ПО «Шахтерскуголь»). Эти шахты отнесены к сверхкатегорным по газу и опасным по пыли, имеют высокую газообильность (22-140 м³ на 1 тонну суточной добычи), а ряд из них – опасные по внезапным выбросам угля и газа.

В процессе приемочных испытаний угленит 10П применялся для взрывной отбойки угля и породы при проведении подготовительных, нарезных и очистных забоев выработок с одной и двумя обнаженными поверхностями (откаточные, конвейерные, вентиляционные и бутовые штреки, уклоны, ходки, квершлагги, комбайновые ниши, разрезы новых лав и др. типы выработок) по угольным пластам мощностью 0,60...1,45 м с крепостью угля по шкале проф. М.М. Протодьяконова $f = 1,5...2,7$ с

подрывкой боковых пород крепостью $f = 3 \dots 7$ и более (в отдельных случаях $f = 8 \dots 9$) с различной газоносностью разрушаемого горного массива.

Угленит 10П при испытании использовался для взрывных работ в сухих и обводненных забоях выработок, а так же для создания водяных завес взрывным распылением воды из полиэтиленовых сосудов в призабойной части выработки.

Оценка эффективности и безопасности проводилась в соответствии с требованиями «Программы и методики проведения приемочных испытаний угленита 10П», согласованной с производственными объединениями по добыче угля и утвержденной Госуглепромом Украины 03.05.94 г.

Технико-экономические и взрывчатые показатели опытного угленита 10П сравнивались с этими же показателями патронов ПП2ЦБ-2/2 (VI класс), угленитов 13П, 13П/1, Э-6 (V класс) и в отдельных условиях с Т-19 (IV класс) в идентичных условиях ведения взрывных работ.

С целью установления эффективности и устойчивости детонации шпуровых зарядов при групповом короткозамедленном взрывании были выбраны контрольные выработки на перечисленных выше шахтах объединений Донбасса. В этих выработках после отработки паспортов БВР было проведено не менее чем по 10 циклов с применением опытного угленита 10П и серийно выпускаемых ВВ.

В процессе проведения испытаний для установления соответствия нового ВВ по газовому фактору требованиям Правил безопасности, работниками ВГСО № 3, МакНИИ и шахты им. Батова были отобраны пробы продуктов взрыва после взрываний угленитов 10П и 13П/1 в бортовом уклоне № 27 на расстоянии 70 м от забоя.

Анализ проб газовой среды для определения окиси углерода и окислов азота проводился в лаборатории ВГСО № 3, а определение аммиака – в аналитической лаборатории МакНИИ.

Результаты анализов показали, что содержание ядовитых газов в продуктах взрыва угленитов 10П и 13П/1 не превышает норм, установленных Правилами безопасности в угольных и сланцевых шахтах.

Результаты приемочных испытаний в объединениях «Макеевуголь», «Донецкуголь», «Октябрюголь» и «Шахтерскуголь» показали следующее.

Эффективность взрывной отбойки горного массива угленитом 10П увеличивается по сравнению с патронами П12ЦБ-2/2 (VI класс) до 10...11% при меньшем расходе ВВ (в среднем на 10%).

Эффективность взрывных работ угленитом 10П и угленитами 13П/1 и Э-6 (V класс) в различных условиях взрывания практически одинаковая. Приемочные испытания также показали, что применение нового ПВВ VI класса позволяет получать положительные результаты взрывной отбойки горной массы в сложных горно-геологических и горнотехнических условиях (забои выработок с одной обнаженной поверхностью, проводимые по крепкому углю и породам средней крепости), где применяются более мощные ВВ IV. Кроме того, улучшаются условия труда за счет снижения ядовитых газов в продуктах взрыва при применении угленита 10П по сравнению серийно выпускаемыми патронами П12ЦБ-2/2 и угленитом Э-6.

За период проведения приемочных испытаний на 21 шахте в 70 выработках было израсходовано 50 т угленита 10П. При этом было пройдено порядка 2500 п. м горных выработок различных типов.

Случаев неполных детонаций и отказов шпуровых зарядов, выгораний угленита 10П, воспламенений метана, угольной пыли и других аномальных явлений не было. Жалоб горнорабочего персонала и ИТР шахт на токсическое и раздражающее действие продуктов взрыва угленита 10П не поступало. В то же время, при применении патронов П12ЦБ-2/2 имели место частые случаи жалоб работников шахт на раздражающее действие продуктов взрыва, содержащих значительное количество аммиака.

На основании положительных результатов предварительных и приемочных испытаний МакНИИ выдал заключение о возможности допуска угленита 10П к постоянному применению для взрывных работ в угольных шахтах, опасных по газу и пыли в условиях, где допущено «Едиными правилами безопасности при взрывных работах» применение предохранительных ВВ VI класса.

Госнадзорхрантруда Украины письмом № 3-313/21 от 27.06.1995 г. допустил угленит 10П к постоянному применению в условиях угольных шахт, где разрешено применение ПВВ VI класса.

7.4. Испытание способа обратного инициирования шпуровых зарядов при взрывных работах в угольных шахтах

В соответствии с решением Межведомственного Совета по взрывному делу при Госнадзорохрантруда Украины (протокол № 2 от 10.11.93 г.) и приказом Председателя Государственного Комитета Украины по угольной промышленности от 23.10.92 г. № 108, по «Программе и методике...», утвержденной Госуглепром Украины 23.10.92 г. и разрешению Управления Донецкого округа Госнадзорохрантруда Украины (письмо от 22.10.92 г. № 01/ 601), испытание способа обратного инициирования шпуровых зарядов проводилось в условиях угольных шахт, где допущено применение ВВ IV...VI классов. При испытании использовались отечественные взрывчатые материалы: углениты Э-6 и 13П, патроны П12ЦБ-2, аммонит Т-19 и электродетонаторы ЭДКЗ-ПМ, а также чешские взрывчатые материалы: «Остравит-Ц» (высокопредохранительное взрывчатое вещество, сенсibilизированное нитроэфиром) и электродетонаторы DeM-Zb-N мгновенного и короткозамедленного действия, предназначенные для инициирования зарядов «Остравита Ц». Согласно техническому описанию, они являются предохранительными, защищены от зарядов статического электричества и имеют 13 ступеней замедления с интервалом времени 23 мс.

Результаты испытаний по производственным объединениям показали следующее. Сравнительные испытания способов прямого и обратного инициирования проводились при взрывной отбойке угля и породы с различной газоносностью и крепостью при проведении подготовительных и нарезных выработок, в том числе по угольным пластам, опасным и не опасным по взрывам пыли, а также в бутовых штреках и нишах лав.

Анализ данных испытаний показал, что при обратном инициировании шпуровых зарядов по сравнению с прямым к.и.ш. увеличивается на 12% и удельный расход ВМ уменьшается на 5%. При применении обратного инициирования с использованием более предохранительных ВВ VI класса технико-экономические

показатели практически такие же, как и при прямом с использованием менее предохранительных и более мощных ВВ V класса.

За период испытаний отказов шпуровых зарядов, неполных детонаций и выгораний ВВ ни при прямом, ни при обратном инициировании не зафиксировано. Применение способа обратного инициирования не усложняет технологию заряжания шпуров. Поэтому на основании положительных результатов испытаний способа обратного инициирования с использованием отечественных и чешских ВМ было принято решение допустить его к постоянному применению наряду со способом прямого в забоях выработок, где имеется газовыделение или взрывчатая пыль. Для этого следует внести соответствующие изменения и дополнения в §138 «Единых правил безопасности при взрывных работах».

Госнадзорхрантруда Украины приказом № 95 от 20.06.1995 г. внес изменения в §§ 138 и 176 «Единых правил безопасности при взрывных работах» и допустил способ обратного инициирования шпуровых зарядов ВВ к постоянному применению в условиях угольных шахт, опасных по газу и пыли.

7.5. Промышленные испытания шпуровых зарядов ПВВ V и VI классов с донной ингибиторной забойкой при сотрясательном взрывании

Комиссия, назначенная приказами № 101 от 23.09.2003 г. и № 58 от 29.04.2004 г. по ГП «Донецкуголь» и комиссия, назначенная приказом по ГП «Макеевуголь» № 113 от 12.09.03 г. провели в период с 15.09.03 г. по 15.12.03 г. и в период с 10.10.03 г. по 09.06.04 г. экспериментальные испытания ПВВ V и VI классов при сотрясательном взрывании в забоях горных выработок, проводимых на пластах, опасных по внезапным выбросам угля, породы и газа. Испытания проводились на основании распоряжения Минтопэнерго Украины № 96-Р от 04.09.03 г., разрешения Госнадзорхрантруда (письма от 17.07.03 г. № 5.2-09/3512 и от 10.11.03 г. № 5.2-08/5596) и в соответствии с «Программой и методикой экспериментальных испытаний ПВВ V и VI классов» (углениит 13П и углениит 10П), утвержденной в установленном порядке.

При испытаниях использовали углениты 13П и 10П серийного выпуска, изготовленные химическим казенным объединением им. Г.И. Петровского по ТУ 12.0174086-002-92 и ТУ 12.0174086-001-93, аммониты Г5 и Ф-5 от серийных партий, изготовленные соответственно Донецким казенным заводом химических изделий и ХКО им. Г.И. Петровского.

Цель экспериментальных испытаний угленитов 13П и 10П – установление возможности их применения при сотрясательном взрывании в условиях, где применяются ПВВ IV класса, выбор и обоснование основных параметров БВР, позволяющих получить необходимые темпы проведения горных выработок с помощью ПВВ V и VI классов на уровне ПВВ IV класса и определение технико-экономических показателей взрывных работ.

Параллельные испытания угленитов 13П и 10П и аммонитов Г5 и Ф-5 при сотрясательном взрывании проходили в производственных условиях угольных шахт. На шахте им. А.А. Скочинского они проводились в подготовительной выработке, проводимой по смешанному забою вентиляционного ходка 1-ой западной лавы УЩЦ и в верхней нише 8-ой восточной лавы ЦП пласта h_6^1 «Смоляниновский» на глубине 1200...1300 м. На шахте им. М.И. Калинина испытания проводились в смешанном забое 2-го вентиляционного конвейерного штрека ЦПУ пласта H_{10} . Глубина разработки 1200 м. Испытания угленитов на шахте «Ясиноватая-Глубокая» проводились в двух подготовительных забоях, проводимых по пласту m_5 (5-й Западный транспортный штрек Восточного блока) и пласту L_6 (3-й Западный транспортный штрек Восточного блока). На шахте «Чайкино» испытания проводились по пласту m_3 «Макеевский» в угольных забоях трубного ходка и нижней ниши разгрузочной лавы и в чистопородном забое конвейерного уклона горизонта 908 м. В процессе испытаний в производственных условиях проводилась оценка технико-экономических показателей проведения выработок при применении угленитов 13П и 10П в сравнении с аммонитами Г5 и Ф-5. Перечень выработок, краткие сведения по горно-геологическим и горнотехническим условиям и некоторые технико-экономические показатели приведены в актах испытаний.

Испытаниями в производственных условиях шахт подтверждены рекомендованные МакНИИ величины шпуровых зарядов, которые должны применяться при сотрясательном взрывании с использованием ПВВ V класса – не более 1,2 кг на шпур, а для ПВВ VI класса – не более 1,5 кг. Данные заряды ПВВ в шпурах длиной 1,6 м обеспечивают к.и.ш. 0,9...0,97, а в шпурах глубиной 2,0...2,2 м 0,75...0,85. Был сделан вывод, что применяемые в настоящее время электродетонаторы ЭДКЗ-ПМ, имеющие интервал замедления 15 мс и общее время короткозамедленного взрывания 120 мс (по номиналу), не обеспечивают эффективности взрывания ПВВ V и VI классов по сравнению с эффективностью ПВВ IV класса. Поэтому комиссии рекомендовали МакНИИ подготовить необходимые материалы по решению вопроса об увеличении общего времени замедления. Так, ЭДКЗ для сотрясательного взрывания ПВВ V и VI классов должны иметь общее время замедления до 500 мс.

В соответствии с разрешением Госнадзорохрантруда Украины (письмо от 17.07.03 г. № 2-09/3512) были проведены испытания пластичной забойки при сотрясательном взрывании ПВВ V и VI классов в выбросоопасных забоях: в верхней нише 8-ой восточной лавы ЦП пласта h_6^1 «Смоляниновский» и в смешанном забое вентиляционного ходка 1-ой западной лавы УПЦП с вентиляционного штрека 1-ой западной лавы УПЦП этого же пласта. Конструкция шпурового заряда предусматривала расположение пластичной ингибиторной забойки в донной и устьевой частях шпура. Параметры забойки в донной части были определены с учетом необходимости снижения напряжения горного массива после сотрясательного взрывания и обеспечения безопасности взрывных работ. Техничко-экономические показатели взрывных работ при сотрясательном взрывании шпуровых зарядов с донной забойкой хорошие.

7.6. Лабораторно-полигонные испытания герметичных стыкующихся патронов ПВВ

Были проведены лабораторно-полигонные испытания образцов угленитов 13П и 10П в полиэтиленовых оболочках, изготовленных на заводе ХКО им.

Г.И. Петровского. Они проводились в соответствии с техническими требованиями (ТТ) к патронированным ВВ V и VI классов с повышенной устойчивостью против выгорания и технической документацией на углениты и полиэтиленовые оболочки: ТУ 12.00173769.024-94, ТУ 12.0174086-002-92 и ТУ 12.0174086-001-95. Испытания решали следующие задачи:

- сравнить качество угленитов 13П и 10П в полиэтиленовых оболочках с этими же угленитами в бумажных оболочках;

- оценить герметичность полиэтиленовых оболочек угленитов 13П и 10П и возможность экссудации и испарения жидких нитроэфиров, содержащихся в их составе;

- определить возможность применения угленитов 13П и 10П в полиэтиленовых оболочках в шахтах, опасных по газу и пыли в условиях, где разрешено применение ВВ V или VI классов соответственно, а также для условий гидровзрывания.

В результате испытаний комиссией установлено:

- углениты 13П и 10П в полиэтиленовых оболочках являются промышленными предохранительными ВВ V и VI класса, предназначенными для использования в шахтах, опасных по газу и пыли в условиях, где разрешено применение ВВ V и VI классов соответственно.

- действительные характеристики изготовленных для испытаний опытных образцов угленитов 13П и 10П в полиэтиленовых оболочках соответствуют показателям технических условий на эти ПВВ.

На основании проведенных испытаний установлено, что полиэтиленовая оболочка с крышкой повышает герметичность патронов угленитов, что повышает водоустойчивость зарядов ПВВ и дает возможность применять их при гидровзрывании.

Приведенные в разделе результаты промышленных испытаний средств и способов обеспечения безопасного производства взрывных работ в угольных шахтах позволяют сделать следующие выводы:

– при проведении приемочных испытаний ПВВ IV класса аммонитов Г5 и П5 установили их безопасность и эффективность при производстве взрывных работ в угольных шахтах. На основании положительных результатов испытаний аммониты Г5 и П5 допущены к постоянному применению при взрывных работах в шахтах, где разрешено применение ПВВ IV класса;

– при проведении приемочных испытаний ПВВ V класса угленита П52 установили его безопасность и эффективность при производстве взрывных работ в угольных шахтах. Этот угленит имеет более высокий уровень предохранительных свойств, чем угленит 13П. Поэтому на основании положительных результатов испытаний угленит П52 допущен к применению при взрывных работах в шахтах, где разрешено применение ПВВ V класса;

– при проведении приемочных испытаний ПВВ VI класса угленита 10П установили его безопасность и эффективность при производстве взрывных работ в угольных шахтах. Угленит 10П имеет более высокую (в 5...10 раз), чем угленит 12ЦБ, устойчивость к выгоранию и большую (на 10...15%) работоспособность. Уровень предохранительных свойств угленита 10П такой, что позволяет обеспечить безопасность взрывных работ и создать предохранительную среду в забое выработки при взрывании его шпуровых зарядов. Поэтому на основании положительных результатов испытаний угленита 10П он допущен к применению при взрывных работах в особо опасных условиях угольных шахт;

– установили, что при обратном инициировании шпуровых зарядов к.и.ш. по сравнению с прямым способом увеличивается на 12% и удельный расход ВМ уменьшается на 5%. Учитывая высокую безопасность и эффективность этого способа взрывания шпуровых зарядов ПВВ, в §§138 и 176 «Единых правил безопасности при взрывных работах» внесены изменения, которыми способ обратного инициирования шпуровых зарядов ВВ допущен к постоянному применению в условиях угольных шахт, опасных по газу и пыли;

– на основании экспериментальных испытаний установили возможность допустить углениты 13П и 10П для сотрясательного взрывания в следующих условиях: ПВВ V класса использовать в подготовительных и очистных выработках, проводи-

мых на выбросоопасных пластах пологого и наклонного падения (угольные, смешанные и породные забои); ПВВ VI класса использовать в подготовительных и очистных выработках, проводимых на выбросоопасных пластах пологого и наклонного падения, в том числе в зонах геологических нарушений горного массива и в восстающих выработках без ограничения угла восстания. Результаты испытаний и выводы комиссий направлены в соответствующие органы горного надзора для внесения изменений в действующие правила безопасности;

– установили, что пластичную ингибиторную забойку шпуров необходимо применять при сотрясательном взрывании с применением ПВВ V и VI классов как в устьевой, так и в донной части шпура. Было рекомендовано МакНИИ внести в «Руководство по применению забойки» изменения с учетом особенностей проведения сотрясательного взрывания;

– разработали конструкцию монозаряда ПВВ из стыкующихся патронов, что обеспечивает высокую водостойчивость шпуровых зарядов и дает возможность применять их при гидровзрывании.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В монографии дано развитие научных основ, новой идеологии и решение актуальной отраслевой проблемы безопасного производства взрывных работ в газоносном горном массиве шахт, заключающееся в установлении закономерности воспламенения взрывоопасной среды при взрывании шпуровых зарядов предохранительных взрывчатых веществ и зависимости воспламенения от массы зарядов и параметров ВВ, в раскрытии механизма дезрекомбинационного эффекта солей-ингибиторов и влияния этого эффекта на предохранительные свойства взрывчатых веществ, предотвращающих в шахтах взрывы метано-воздушной смеси, которые приводят к авариям, катастрофам и социальным потрясениям в угольной отрасли.

Основные научные и практические результаты работы заключаются в следующем.

1. Анализируя состояние проблемы, было установлено, что производство взрывных работ в угольных шахтах при применении предохранительных ВВ и способов взрывозащиты в выработках не является безопасным из-за образования взрывоопасной среды в трещиноватом горном массиве, недостаточного уровня предохранительных свойств обнаженных зарядов, низкой степени устойчивости ПВВ к выгоранию, ненадежной взрывозащиты и негативного влияния человеческого фактора. Поэтому назрела необходимость модернизации ПВВ и их шпуровых зарядов путем выявления новых свойств солей-ингибиторов, определения их концентрации в составе ВВ и установления допустимых масс шпуровых зарядов.

2. Установлены закономерность воспламеняющей способности шпуровых зарядов, имеющих одинаковую работу взрыва в газоносном горном массиве и зависимость массы предельного заряда от параметров ПВВ (плотность ВВ, скорость детонации, удельная энергия взрыва и т.д.): если шпуровой или обнаженный в шпуре заряд имеет массу не больше массы предельного заряда ПВВ, устойчивого к выгоранию, то такой заряд не воспламеняет МВС и его взрывание в газовой среде безопасно.

3. Установлена вероятность воспламенения взрывоопасной среды на границе

раздела «массив – полость», которая прямо пропорциональна параметрам ударных волн и дальности полета горящих частиц ВВ. Установлены зависимости критического давления во фронте ударной волны от кислородного коэффициента ВВ и удельной концентрации ингибитора в продуктах взрыва, а также дальности полета горящих частиц ВВ от радиуса частиц и отношения их скоростей горения и разброса. Эти зависимости позволяют определять объем взрывоопасной среды в забое, который необходимо флегматизировать при взрывных работах.

4. Установлен механизм влияния содержащихся в ВВ солей-ингибиторов на воспламеняющую способность зарядов ПВВ, заключающийся в рекомбинации радикалов, образовавшихся в продуктах взрыва ВВ. Это позволяет при взрывных работах создавать в забое предохранительную (ингибиторную) среду даже при наличии взрывоопасной газовой смеси.

5. Экспериментально установлено и практически подтверждено, что в течение 0,3...1,4 мс после окончания детонации заряда невозможно ингибировать и предотвратить взрывную цепную реакцию окисления горючих газов при их взаимодействии с продуктами детонации ПВВ, так как на соль-ингибитор действует детонационная волна, вызывающая запредельное напряжение сдвига в кристаллах (явление дезрекомбинационного эффекта). Значит, чем больше напряжение сдвига в кристаллах, тем меньше предельный заряд ПВВ. Определено критическое напряжение сдвига в кристаллах у различных солей-ингибиторов, позволяющее выбирать наиболее эффективные для ПВВ соли-ингибиторы.

6. Экспериментально определена концентрация ингибитора в продуктах взрыва ПВВ, которые предотвращают взрыв горючих газов и создают двухфазную ингибиторную предохранительную среду. Установили, что эта концентрация прямо пропорциональна удельному содержанию соли-ингибитора в ПВВ и массе взрываемых зарядов и обратно пропорциональна скорости детонации ВВ и времени замедления взрывания зарядов. Двухфазная ингибиторная среда характеризуется предельным радиусом своего расширения и давлением во фронте ударной волны, зная которые можно предопределять безопасные параметры взрывозащиты – объем и длину выработки.

7. Разработаны стыкующийся из отдельных патронов монозаряд и конструкция шпурового заряда ПВВ V и VI классов, устойчивых к выгоранию, обеспечивающие антигризутность зарядов этих ВВ при большей их работоспособности (на 12...18%) по сравнению с аналогами.

8. Выявлены новые свойства солей-ингибиторов и совокупное их влияние на предохранительные свойства ВВ. На основании этого осуществлена модернизация ПВВ IV...VI классов путем замены в их составах хлорида натрия на хлорид кальция и (или) фосфат натрия, коэффициент ингибирования МВС которых соответственно в 2,18 и 3,626 раза больше.

9. Обосновано создание при взрывных работах взрывозащиты в разрушаемом объеме забоя горной выработки на время короткозамедленного взрывания зарядов ПВВ VI класса.

10. Дана концепция безопасного производства взрывных работ в угольных шахтах при разрушении газоносных горных массивов, заключающаяся в использовании зарядов высокопредохранительных ВВ, способа обратного инициирования этих зарядов и гидровзрывания для предупреждения при взрывных работах взрывов горючих газов и исключения негативного влияния человеческого фактора.

11. В угольных шахтах проведены промышленные испытания и осуществлено внедрение модернизированных ПВВ IV...VI классов, устойчивых к выгоранию и шпуровых зарядов с использованием способа обратного инициирования детонации зарядов ПВВ V и VI классов в режиме сотрясательного взрывания. Государственным комитетом Украины по надзору за охраной труда допущены к постоянному применению в угольных шахтах, опасных по газу и взрывам угольной пыли аммониты Г5 и П5, углениты П52 и 10П и способ обратного инициирования шпуровых зарядов. В целом, результаты работы повысили уровень безопасности взрывных работ в угольных шахтах и обеспечили предотвращение в них взрывов метано-воздушной смеси, а также аварий, катастроф и социальных потрясений в угольной отрасли.

Дальнейшее развитие предохранительных ВВ и способов их взрывания будет идти в направлении их применения не только в угольной, но и в нефтяной и газовой

промышленности для эффективной борьбы с горением и взрывами углеводородов, а также в целях борьбы с лесными пожарами.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Румежак О. Н. Состояние и проблемы промышленной безопасности на горнодобывающих предприятиях Украины / О. Н. Румежак // Науковий вісник НГУ. – Днепропетровск, 2010. - № 2. – С. 36-39.
2. Гражданкин А. И. Обеспечение промышленной безопасности на опасных производственных объектах угольной промышленности / А. И. Гражданкин // Безопасность труда в промышленности. – М., 2008. - № 2. – С. 17-21.
3. Брюханов А. М. Разработка концепции повышения уровня охраны труда на угольных шахтах Украины / А. М. Брюханов, Н. Б. Левкин // Способы и средства создания безопасных и здоровых условий труда в угольных шахтах: Сб. научн. тр. МакНИИ. – Макеевка-Донбасс, 2005. – С. 3-10.
4. Брюханов А. М. О повышении безопасности труда в угольных шахтах Украины / А. М. Брюханов, В. П. Коптиков, Ю. В. Кудинов, Н. Б. Левкин // Способы и средства создания безопасных и здоровых условий труда в угольных шахтах: Сб. научн. тр. МакНИИ. – Макеевка-Донбасс, 2001. – С. 14-23.
5. Брюханов А. М. Развитие теории и совершенствование практики предупреждения и локализации взрывов в глубоких шахтах: автореферат дисс. на соиск. научн. степени доктора технических наук: спец. 05.26.01 «Охрана труда» / А. М. Брюханов. – Днепропетровск, 2007. – 36 с.
6. Единые правила безопасности при взрывных работах. – Киев: Норматив, 1992. – 171 с. – (нормативный документ).
7. Шевцов Н. Р. Взрывозащита горных выработок: учебное пособие для вузов / Н. Р. Шевцов – Донецк: «Норд-Пресс», 2002. – 280 с.
8. Инструкция по применению сотрясательного взрывания в угольных шахтах Украины / МакНИИ. – Макеевка-Донбасс, 1994. – 46 с. – (нормативный документ Минуглепрома Украины).
9. Галаджий Ф. М. О причинах выгорания предохранительных ВВ в шпурах / Ф. М. Галаджий // Взрывное дело, № 44/1. – М.: Госгортехиздат, 1960. – С. 144-158.

10. Бабицкий В. Н. Анализ причин воспламенения метано- и пылевоздушной смеси в угольных шахтах в различных условиях ведения взрывных работ / В. Н. Бабицкий, В. И. Зенин, Б. И. Вайнштейн // Безопасность взрывных работ в угольных шахтах: Сб. научн. тр. МакНИИ. – Макеевка-Донбасс, 1974. – С. 64-69.

11. Росинский Н. Л. Область, условия применения и меры безопасности при короткозамедленном взрывании / Н. Л. Росинский, Ф. М. Галаджий // Короткозамедленное взрывание при добыче полезных ископаемых. – Киев: Госгортехиздат УССР, 1961. – С. 24-50.

12. Росинский Н. Л. Исследование максимально допустимого времени замедления при короткозамедленном взрывании в забоях подготовительных выработок шахт Донбасса / Н. Л. Росинский, В. С. Матюнин, К. С. Толстых, А. Ю. Бутуков // Взрывное дело, № 72/29. – М.: Недра, 1973. – С. 83-92.

13. Попов И. И. Изучение явления откола в шпурах и его влияние на безопасность взрывных работ по углю / И. И. Попов // Выгорание зарядов ВВ в шахтах и меры борьбы с ними. – М.: Госгортехиздат, 1963. – С. 113-117.

14. Попов И. И. Определение времени разрушения и выброса раздробленного угля при взрывании зарядов врубовых шпуров / И. И. Попов // Сб. научн. тр. МакНИИ. – Макеевка-Донбасс, 1962. – № 20. – С. 32-35.

15. Галаджий Ф. М. Предупреждение воспламенений метана при взрывных работах / Ф. М. Галаджий, М. К. Песоцкий // Безопасность труда в промышленности. – М., 1971. - № 4. – С. 13-15.

16. Dolan J. E. The development of explosives for delay firing in Coal Mines / J. E. Dolan and R. Wastewater // Mining Engineer, 1962. – V. 122. – p. 35.

17. Песоцкий М. К. О создании новых предохранительных ВВ для угольных шахт / М. К. Песоцкий, С. А. Калякин, В. М. Расторгуев, А. В. Белодед // Способы и средства создания безопасных и здоровых условий труда в угольных шахтах: Сб. научн. тр. МакНИИ. – Макеевка-Донбасс, 1996. – С. 176-181.

18. Зенин В. И. Метод определения устойчивости предохранительных ВВ против выгорания / В. И. Зенин, В. С. Казачков // Взрывное дело, № 84/41. – М.: Недра, 1982. – С. 97-103.

19. Кутузов Б. Н. Безопасность взрывных работ в промышленности / Б. Н. Кутузов, Ф. М. Галаджий, С. А. Давыдов, В. И. Зенин, Б. И. Вайнштейн. – М.: Недра, 1977. – 344 с.
20. Mallard. Rapport du 8 nov. 1888 / Mallard // Mem. Des poudress. – 1888. – II. – p 466.
21. Веннен Л. Пороха и взрывчатые вещества / Л. Веннен, Э. Бюрло, А. Лекорше. – М.: ОНТИ, 1936. – 652 с.
22. Штетбахер А. Пороха и взрывчатые вещества / А. Штетбахер – М.: ОНТИ, 1936. – 355 с.
23. Кутузов Б. Н. Взрывные работы в опасных условиях угольных шахт / Б. Н. Кутузов, А. Ю. Бутуков, Б. И. Вайнштейн, Ф. М. Галаджий, В. И. Зенин. – М.: Недра, 1979. – 373 с.
24. Зенин В. И. Основные типы зарубежных предохранительных ВВ и требования, предъявляемые к ним / В. И. Зенин, Б. И. Вайнштейн / Безопасность взрывных работ в шахтах: Сб. научн. тр. МакНИИ. – МакНИИ: Макеевка-Донбасс, 1972. – С. 17-25.
25. Dautriche. Vitesses de detonation des explosifs / Dautriche // Comp tes rendus de L'Academie des sciences, 1907. – 144. – p. 1030-1032.
26. Audibert E. Sur la detonation des explosifs solides // E. Audibert and L. Delmas // Annales des mines. – Paris, 1934. – Т. 5. – p. 5-45.
27. Drookes A. Trans. Inst. Min. Eng-rs / A. Drookes and J. C. Statham. – London, 1942. – 102. – p. 231.
28. Lemaire E. Annales des mines des Belgique / E. Lemaire. – 1913. – p. 812.
29. Наум Н. Пороха и взрывчатые вещества / Н. Наум. – Ленинград: Госхимтехиздат, 1933. – 194 с.
30. Allsop G. Iron Coal Tr. Rev. / G. Allsop. – 1944. – 149. – p. 836.
31. Тейлор Дж. Взрывчатые вещества, применяемые в угольной промышленности Англии / Дж. Тейлор, П. Грей. – М.: Госгортехиздат, 1961. – 139 с.
32. Одибер Е. О применении гризудинамитов в шахтах, опасных по газу / Е. Одибер, Р. Шерадан / Взрывное дело, № 34/35. – М.-Л.: ГОНТИ, 1938. – С. 61-101.

33. Андреев К. К. Состояние и перспективы развития предохранительных взрывчатых веществ во Франции / К. К. Андреев. – М.: ЦНИИТЭИ, 1963. – 31 с.
34. Бейлинг К. Взрывчатые вещества и средства взрывания / К. Бейлинг, К. Дрекопф, – М.: Оборонгиз, 1941. – 302 с.
35. Щекотихин С. А. Совершенствование предохранительных взрывчатых веществ за рубежом / С. А. Щекотихин, Б. Н. Кукиб, В. Г. Шуткин, В. Е. Александров, З. Г. Поздняков – М.: ВНИИПИ, 1983. – 98 с.
36. Shepherd W. C. F. Recent advances towards safer snotfiring in coal mines / W. C. F. Shepherd, H. C. Grimshaw // Trans. Inst. Min. Engrs. – V. 109, 1949. – p. 1100-1110.
37. Андреев К. К. Теория взрывчатых веществ / К. К. Андреев, А. Ф. Беляев. – М.: Оборонгиз, 1960. – 595 с.
38. Селезнев А. И. Физико-химические свойства ВВ, применяемых в горной промышленности Союза / А. И. Селезнев, А. Г. Суворов // Взрывное дело. Вып. 21. – М.: ОНТИ – Горное, 1934. – С. 60-80.
39. Суворов А. Г. Об антигризутности 12%-ного гризутина / А. Г. Суворов // Взрывное дело. Вып. 21. – М.: ОНТИ - Горное, 1934. – С. 83-90.
40. Селезнев А. И. Влияние предохранительных оболочек Лемера на безопасность взрывных работ в пыльно-газовых шахтах / А. И. Селезнев // Безопасность труда в горной промышленности. – М., 1937. – № 5. – С. 14-17.
41. Гольбиндер А. И. Антигризутные взрывчатые вещества / А. И. Гольбиндер, К. К. Андреев. – М.: Углетехиздат, 1947. – 155 с.
42. Семенов Н. Н. Развитие теории цепных реакций и теплового воспламенения / Н. Н. Семенов. – М.: Знание, 1969. – 94 с.
43. Дубнов Л. В. Предохранительные взрывчатые вещества в горной промышленности / Л. В. Дубнов. – М.-Л.: Углетехиздат, 1953. – 148 с.
44. Глазкова А. П. Катализ горения взрывчатых веществ / А. П. Глазкова. – М.: Наука, 1976. – 263 с.
45. Ahrens H. Les explosifs de antigrisoten grand puissance affecte a employe une dans excavations / H. Ahrens // Revue de l'industrie minerale. – № 619, 1955. – p. 7-12.

46. Sartoris R. Contribution a l'etude de la deflagration fusante des explosifs de mine / R. Sartoris // Revue de l'industrie minerale. – Vol. XXXVI, 1955. – № 621. – p. 217-233.

47. Seleman D. Risque de denudation et d'amputation des chargees an course du fir a retard / D. Seleman and M. Giltair // Explosifs, 1968. – V. 21. - № 3. – p. 81-90.

48. Андреев К. К. О факторах, определяющих склонность предохранительных ВВ к выгоранию / К. К. Андреев, В. Г. Хотин // Взрывное дело, № 52/9. – М.: Госгортехиздат, 1963. – С. 140-152.

49. Eitz E. Uber das Verhalten von Wettersprengstoffen bei Initierung im anstehenden Gasdruck / E. Eitz // Nolel Hefte, 1962. - № 28. – p. 17-21.

50. Зенин В. И. Исследование путей предотвращения выгораний предохранительных ВВ / В. И. Зенин, Ю. В. Манжос // Способы и средства создания безопасных и здоровых условий труда в угольных шахтах: Сб. научн. тр. МакНИИ. – Макеевка-Донбасс, 1996. – С. 163-172.

51. Shephard W. C. F. Research Report № 65 / W. C. F. Shephard // Safety in Mines Research Establishment. – Sheffield, 1953. – 10 p.

52. Росинский Н. Л. Опыт применения гидровзрывного способа отбойки угля за рубежом / Н. Л. Росинский, П. И. Кушнеров, К. С. Толстых // Безопасность взрывных работ в угольных шахтах: Сб. научн. тр. МакНИИ. – Макеевка-Донбасс, 1971. – С. 19-23.

53. Cocu J. Le tir sous eau / J. Cocu, J. Bigourd, M. Giltaire // Extrait de Revue de l'industrie minerale. – Vol. 47, 1965. № 9. – p. 2-10.

54. Галаджий Ф. М. Новые способы обеспечения безопасности взрывных работ / Ф. М. Галаджий // Вопросы безопасности в угольных шахтах: Сб. научн. тр. МакНИИ. – М.: Госгортехиздат, 1960. – С. 177-231.

55. Галаджий Ф. М. Способ повышения эффективности и безопасности предохранительных патронов / Ф. М. Галаджий, В. Н. Бондаренко // Вопросы безопасности взрывных работ в угольных шахтах: Сб. научн. тр. МакНИИ. – Макеевка-Донбасс, 1968. – С. 26-33.

56. Галаджий Ф. М. Предохранительные взрывные патроны СП-1 / Ф. М. Галаджий, М. К. Песоцкий, В. С. Шаталов. – М.: ЦНИЭИуголь, 1974. – 15 с.

57. Стикачев В. И. Применение различных видов гидрозабойки шпуров / В. И. Стикачев, Ф. М. Галаджий // Вопросы безопасности в угольных шахтах: Сб. научн. тр. МакНИИ. – Макеевка-Донбасс, 1968. – С. 334-342.

58. Демчук П. А. Водяная забойка шпуров / П. А. Демчук. – М.: Недра, 1964. – 40 с.

59. Кушнеров П. И. О безопасности гидровзрывания в газовых шахтах / П. И. Кушнеров, К. С. Толстых // Безопасность взрывных работ в угольных шахтах: Сб. научн. тр. МакНИИ. – Макеевка-Донбасс, 1973. – С. 72-77.

60. Патент 1277785 Великобритания, МКИ С 06 В 1/04. Предохранительное взрывчатое вещество. - № 162079; заявл. 06.08.68; опубл. 14.06.72, НКИ С 1D.

61. Патент 693429 Бельгия, МКИ С 06 В 1/04. Способ получения предохранительных взрывчатых веществ. - заявл. 31.01.67; опубл. 7.10.70, НКИ 78С.

62. Патент 1273394 ФРГ, МКИ С 06 В 1/04. Предохранительное селективно-детонирующее взрывчатое вещество. - № 48032; заявл. 21.08.65; опубл. 20.03.69, НКИ 78С.

63. Патент 1435849 Франция, МКИ С 06 В 1/04. Предохранительное взрывчатое вещество. - № 51192/63; заявл. 30.12.63; опубл. 14.03.66, НКИ С 1D.

64. Штейнбук В. Л. Беспламенное взрывание на угольных шахтах / В. Л. Штейнбук. – Киев: ГИЗ «Технической литературы», 1963. – 94 с.

65. Петрухин П. М. Разработка и исследование датчиков пламени автоматического заслона / П. М. Петрухин, М. И. Нецепляев, Е. П. Плоскоголовый, В. С. Сергеев // Безопасность взрывных работ в угольных шахтах: Сб. научн. тр. МакНИИ. – Макеевка-Донбасс, 1974. – С. 72-77.

66. Расторгуев В. М. Исследование ПВВ V класса с целью улучшения их эксплуатационных свойств / В. М. Расторгуев, С. А. Калякин, М. К. Песоцкий // Снижение травматизма при взрывных работах в угольных шахтах: Сб. научн. тр. МакНИИ. – Макеевка-Донбасс, 1989. – С. 51-57.

67. Зенин В. И. Разработка предохранительных ВВ IV класса с повышенной устойчивостью к выгоранию / В. И. Зенин, Ю. В. Манжос, С. А. Калякин, Б. А. Анисимкин // Способы и средства создания безопасных и здоровых условий труда в угольных шахтах: Сб. научн. тр. МакНИИ. – Макеевка-Донбасс, 1996. – С. 158-163.

68. Миндели Э. О. К вопросу о воспламеняющем действии воздушных ударных волн / Э. О. Миндели, Н. Ф. Кусов, Ф. М. Гельфанд. – М. – Уголь, 1970. - № 2. – С. 49-53.

69. Murray W. L. Further studies of the ignition of methane – air by detonating explosives / W. L. Murray // S.M.R.E.: Research Report № 262, 1970. – 21 p.

70. Андреев К. К. Основы теории антигризутности / К. К. Андреев // Антигризутные взрывчатые вещества // Взрывное дело, № 34/35. – М.: ГОНТИ, 1938. – С. 5-34.

71. Дубнов Л. В. К вопросу о методах оценки условий воспламенения шахтных сред под воздействием взрыва ВВ / Л. В. Дубнов // Взрывное дело, № 44/1. – М.: Госгортехиздат, 1960. – С. 133-144.

72. Когарко С. М. Зажигание метано-воздушных смесей горячими продуктами горения / С. М. Когарко, А. С. Новиков, А. И. Сербинов, Г. И. Скачков // Взрывное дело, № 44/1. – М.: Госгортехиздат, 1960. – С. 122-133.

73. Льюис Б. Горение, пламя и взрывы в газах / Б. Льюис, Г. Эльбе. – М.: Иностранная литература, 1948. – 246 с.

74. Илюшин А. А. К вопросу разработки антигризутных взрывчатых веществ / А. А. Илюшин // Взрывное дело, № 34/35. – М.: ГОНТИ, 1938. – С. 155-169.

75. Таффанель Ж. Исследования испытательной станции в Льевене по взрывчатым веществам для шахт, опасных по рудничному газу и угольной пыли / Ж. Таффанель, Г. Дотриш // Взрывное дело, № 34/35. – М.: ГОНТИ, 1938. – С. 101-115.

76. Кушнеров П. И. Температура твердых частиц, выбрасываемых из шпуров / П. И. Кушнеров, А. Ф. Федоров, Л. И. Долженко // Техника безопасности, охрана труда и горноспасательное дело. – М.: Недра, 1968. - № 6. – С. 51-53.

77. Бейлинг К. Исследование безопасности предохранительных взрывчатых веществ / К. Бейлинг. – М. – «За овладение техникой», 1933. - № 3. – С. 3-5.

78. Вайнштейн Б. И. Об аналитическом определении предохранительных свойств ВВ / Б. И. Вайнштейн, Ф. М. Галаджий, В. И. Комская // Взрывное дело, № 75/32. – М.: Недра, 1975. – С. 185-190.

79. Вайнштейн Б. И. Энергетические соотношения для оценки предохранительных свойств ВВ / Б. И. Вайнштейн // Взрывное дело, № 84/41. – М.: Недра, 1982. – С. 54-60.

80. Вайнштейн Б. И. Расчет предохранительных свойств ВВ с учетом селективности детонации ВВ / Б. И. Вайнштейн, Б. Н. Кукиб // Безопасность взрывных работ в угольных шахтах: Сб. научн. тр. МакНИИ. – Макеевка-Донбасс, 1979. – С. 12-16.

81. Вайнштейн Б. И. О механизме воспламенения газовых смесей детонирующим зарядом ВВ / Б. И. Вайнштейн, Ф. М. Галаджий // Взрывное дело, № 75/32. – М.: Недра, 1975. – С. 180-185.

82. Кукиб Б. Н. Высокопредохранительные взрывчатые вещества / Б. Н. Кукиб, Б. Д. Росси. – М.: Недра, 1980. – 174 с.

83. Кукиб Б. Н. О механизме воспламенения метано-воздушных смесей детонирующими зарядами взрывчатых веществ / Б. Н. Кукиб // Взрывное дело, № 75/32. – М.: Недра, 1975. – С. 177-179.

84. Глазкова А. П. Положительный и отрицательный катализ при горении аммиачной селитры и ВВ на ее основе и связь его с антигризутностью / А. П. Глазкова // Физика горения и взрыва, 1971. – № 4. – С. 528-536.

85. Зельдович Я. Б. Теория горения и детонации газов / Я. Б. Зельдович. – М.-Л.: Изд-во АН СССР, 1944. – 69 с.

86. Михельсон В. А. О нормальной скорости воспламенения гремучего газа / В. А. Михельсон. – М., 1890. – 21 с.

87. Семенов Н. Н. О цепных реакциях и теории горения / Н. Н. Семенов. – М.: «Знание», 1957. – 31 с.

88. Зельдович Я. Б. Математическая теория горения и взрыва / Я. Б. Зельдович, Г. И. Баренблатт, В. Б. Либрович, Г. М. Махвиладзе. – М.: Наука, 1980. – 478 с.

89. Семенов Н. Н. Цепные реакции / Н. Н. Семенов. – Л.: Госхимиздат, 1934. – 555 с.
90. Вайнштейн Б. И. К вопросу о количественной связи предохранительных свойств ВВ с вероятностью вспышек и взрывов в угольных шахтах / Б. И. Вайнштейн // Снижение травматизма при взрывных работах в угольных шахтах: Сб. научн. тр. МакНИИ. – Макеевка-Донбасс, 1985. – С. 43-50.
91. Байрамов В. М. Основы химической кинетики и катализа / В. М. Байрамов. – М.: АСАДЕМА, 2003. – 251 с.
92. Безарашвили Г. С. Ингибирование пламени метана порошками неорганических солей / Г. И. Безарашвили, А. Н. Баратов, Э. Г. Дзоценидзе // Кинетика и катализ, 1979. - № 3. – С. 584-588.
93. Арабец М. М. Предотвращение воспламенения метана при взрывных работах с помощью ингибиторов / М. М. Арабец, В. И. Стикачев // Создание предохранительной среды при взрывных работах в угольных шахтах: руководящие материалы Межведомственной комиссии по взрывному делу. – М. ИГД им. А. А. Скочинского, 1971. – С. 11-12.
94. Песоцкий М. К. К вопросу о предотвращении воспламенений метана инертными газами продуктов детонации высокопредохранительных ВВ / М. К. Песоцкий, Ю. В. Манжос, М. М. Песоцкий, А. В. Белодед // Способы и средства создания безопасных и здоровых условий труда в угольных шахтах: Сб. науч. тр. МакНИИ. – Макеевка-Донбасс. – 2005. – С. 151-158.
95. Инструкция по применению водораспылительных завес при взрывных работах в угольных шахтах. – Макеевка-Донбасс: МакНИИ, 1984. – 21 с. – (Нормативный документ МУП СССР).
96. Инструкция по созданию предохранительных аэрозольных (порошковых) завес при взрывных работах в угольных шахтах. – Макеевка-Донбасс: МакНИИ, 1989. – 21 с. – (Нормативный документ МУП СССР).
97. Инструкция по созданию предохранительной среды в призабойном пространстве горных выработок при взрывных работах / Сборник нормативных доку-

ментов по взрывным работам в угольных шахтах. – Макеевка-Донбасс: МакНИИ, 2000. – С. 65-71. – (Нормативный документ МУП Украины).

98. Краснянский М. Е. Огнетушащие и взрывоподавляющие порошки / М. Е. Краснянский. – Донецк: Донбасс, 1991. – 110 с.

99. Азатян В. В. Неизотермические режимы разветвленных цепных реакций и новые теоретические аспекты / В. В. Азатян // Кинетика и катализ, 1999. – т. 40. - № 6. – С. 818-822.

100. Денисов Е. Т. Ингибирование цепных реакций / Е. Т. Денисов, В. В. Азатян. – Черноголовка: ИХФРАН, 1997. – 268 с.

101. Взрывобезопасность. Система стандартов безопасности труда: ГОСТ 12.1.010-76. – [утвержденный с 1978-01-01]. – М. Государственный комитет по стандартам, 1984. – С. 94-100. – (Госстандарт СССР).

102. Ковалев П. Ф. Методика оценки взрывобезопасности производственного процесса на участке угольной шахты / П. Ф. Ковалев, Л. И. Сердюк // Безопасность труда в промышленности. – М., 1984. - № 11. – С. 41-43.

103. Бусыгин К. К. Концепция оценки взрывобезопасности основных производственных процессов в угольных шахтах / К. К. Бусыгин, Ю. А. Иванов, И. В. Недашковский // Способы и средства создания безопасных и здоровых условий труда в угольных шахтах: Сб. науч. тр. МакНИИ, 1998. – С. 16-21.

104. Александров В. Е. Безопасность взрывных работ в угольных шахтах / В. Е. Александров, Н. Р. Шевцов, Б. И. Вайнштейн. – М.: Недра, 1986. – 149 с.

105. Стикачев В. И. Создание предохранительной среды при взрывных работах / В. И. Стикачев. – М.: Недра, 1972. – 113 с.

106. Шевцов Н. Р. Экспериментальный метод определения удельного теплопоглощения / Н. Р. Шевцов // Уровень динамики и причины производственного травматизма на угольных шахтах: Сб. науч. тр. МакНИИ. Макеевка-Донбасс, 1983. – С. 66-70.

107. Расторгуев В. М. Параметры ударных волн при взрывании обнаженных зарядов ВВ / В. М. Расторгуев, В. М. Мегеря // Техника безопасности, охрана труда и горноспасательное дело: реф. сб. – М.: ЦНИЭМуголь, – 1973. - № 7. – С. 23-24.

108. Мегеря В. М. Параметры ударных воздушных волн в зоне призабойного пространства / В. М. Мегеря, В. М. Расторгуев // Техника безопасности, охрана труда и горноспасательное дело: реф. сб. – М.: ЦНИЭМуголь, – 1971. - № 12. – С. 22-23.

109. Зажигаев Л. С. Методы планирования и обработки результатов физического эксперимента / Л. С. Зажигаев, А. А. Кишьян, Ю. И. Романиков. – М.: Атомиздат, 1978. – 231 с.

110. Плескунин В. И. Теоретические основы организации анализа выборочных данных в эксперименте / В. И. Плескунин, Е. Д. Воронина. – Л.: Изд-во ЛГУ, 1979. – 231 с.

111. Песоцкий М. К. Влияние фугасности взрывчатых веществ на эффективность и безопасность взрывных работ в угольных шахтах / М. К. Песоцкий, С. А. Калякин, И. С. Грицюк, М. М. Песоцкий // Способы и средства создания безопасных и здоровых условий труда в угольных шахтах: Сб. науч. тр. МакНИИ. – Макеевка-Донбасс: МакНИИ. – 2002. – С. 65-74.

112. Песоцкий М. К. Работоспособность взрывчатых веществ и безопасность их применения в шахтах / М. К. Песоцкий, С. А. Калякин, М. М. Песоцкий // Уголь Украины. – 2003. – № 12. – С. 40-43.

113. Калякин С. А. Обеспечение эффективности и безопасности взрывных работ в шахтах / С. А. Калякин, Н. Р. Шевцов // Уголь Украины. – 2007. – № 6. – С. 30-40.

114. Песоцкий М. К. Безопасные параметры сотрясательного взрывания при проведении горных выработок / М. К. Песоцкий, С. А. Калякин, М. М. Песоцкий // Способы и средства создания безопасных и здоровых условий труда в угольных шахтах: Сб. науч. тр. МакНИИ. – Макеевка-Донбасс. – 2003. – С. 116-129.

115. Дубнов Л. В. Промышленные взрывчатые вещества / Л. В. Дубнов, Н. С. Бахаревич, А. И. Романов. – М.: Недра, 1973. – 264 с.

116. Песоцкий М. К. О методах испытаний ВВ на работоспособность / М. К. Песоцкий, С. А. Калякин, И. С. Грицюк // Снижение травматизма при взрывных работах в угольных шахтах: Сб. науч. тр. МакНИИ. – Макеевка-Донбасс. – 1985. – С. 57-63.

117. Калякин С. А. О новом методе испытаний ВВ на работоспособность / С. А. Калякин, М. К. Песоцкий, И. С. Грицюк // Способы и средства создания безопасных и здоровых условий труда в угольных шахтах: Сб. научн. тр. МакНИИ. – Макеевка-Донбасс. – 1991. – С. 105-115.

118. Калякин С. А. О взаимосвязи величины уровня предохранительности ВВ с работоспособностью / С. А. Калякин // Сб. научн. тр. ДонНТУ: «Серия горно-геологическая». – Вып. 72. – Донецк: ДонНТУ, 2004. – С. 76-83.

119. Зенин В. И. К вопросу о воспламеняющей способности предохранительных ВВ в разрушенных средах / В. И. Зенин // Безопасность взрывных работ в угольных шахтах: Сб. научн. тр. МакНИИ. – Макеевка-Донбасс, 1971. – С. 87-91.

120. Александров В. Е. Повышение эффективности и безопасности взрывных работ на угольных шахтах / В. Е. Александров, Б. Н. Кукиб, В. Б. Иоффе // Буровзрывные работы: Центральное правление горного общества. – М.: ИГД им. А. А. Скочинского, 1981. – 36 с.

121. Кушнеров П. И. Безопасность электровзрывания в угольных шахтах / П. И. Кушнеров. – М.: Недра, 1980. – 86 с.

122. Песоцкий М. К. К вопросу безопасности взрывных работ в условиях возможного обнажения шпуровых зарядов ВВ / М. К. Песоцкий, К. С. Толстых, А. Ю. Бутуков, А. В. Белодед // Способы и средства создания безопасных и здоровых условий труда в угольных шахтах: Сб. науч. тр. МакНИИ. – Макеевка-Донбасс. – 2000. – С. 66-73.

123. Песоцкий М. К. К вопросу о параметрах обнажений шпуровых зарядов и их влияние на безопасность сотрясательного взрывания в угольных шахтах / М. К. Песоцкий, С. А. Калякин, М. М. Песоцкий // Способы и средства создания безопасных и здоровых условий труда в угольных шахтах: Сб. науч. тр. МакНИИ. – Макеевка-Донбасс. – 2004. – С. 85-93.

124. Калякин С. А. Критические условия инициирования взрыва метано-воздушной смеси открытым зарядом взрывчатого вещества / С. А. Калякин // Взрывное дело, № 97/54. – М.: ЗАО «МВК по взрывному делу», 2007. – С. 170-181.

125. Von Regierungsrat. Bergbausprenngstoffe und ihre Beurteilung / Von Regierungsrat, H. Ahrens // GluucKauf, 1960. № 6. – p. 325-341.

126. Бутуков А. Ю. Исследование воспламеняемости сланцевой пыли под воздействием взрыва ВВ / А. Ю. Бутуков, В. М. Расторгуев, К. С. Толстых, С. Ш. Нигматулин // Снижение травматизма при взрывных работах: Сб. науч. тр. МакНИИ. – Макеевка-Донбасс: МакНИИ. – 1990. – С. 12-19.

127. Калякин С. А. Аномальное влияние ингибитора на цепную реакцию окисления метана при взрыве / С. А. Калякин, Н. Р. Шевцов // Технология и проектирование подземного строительства: Вестник. – Вып. 2. – Донецк: Норд-Пресс, 2002. – С. 166-180.

128. Ларес Г. Уточненная формула расчета зарядов при горных взрывных работах / Г. Ларес. – М.-Л.: ОНТИ, 1934. – 52 с.

129. Поздняков З. Г. Справочник по промышленным взрывчатым веществам и средствам взрывания / З. Г. Поздняков, Б. Д. Росси. – М.: Недра, 1977. – С. 193-199.

130. Пат. 83618 Украина, МПК G 01 N 25/00. Устройство для определения предохранительных свойств взрывчатых веществ в взрывоопасной среде / М. К. Песоцкий, А. М. Брюханов, Ю. В. Манжос, С. А. Калякин; заявитель и патентообладатель Макеевский научн.-исслед. инс-т по безопасности работ в горн. промышленности. - № 20040605124, заявл. 29.06.2004, опубл. 11.08.08. Бюл. № 15.

131. Методика определения предохранительных свойств новых образцов ВВ V и VI классов при взрывании их в метано-воздушной смеси: Технические требования к патронированным ВВ V и VI классов с повышенной устойчивостью против выгорания и методики их испытаний / МУП СССР, МакНИИ, ИГД им. А. А. Скочинского. – Макеевка-Донбасс: МакНИИ, 1984. – С. 21-41. – (нормативный документ).

132. Миндели Э. О. Буровзрывные работы при подземной добыче полезных ископаемых / Э. О. Миндели. – М.: Недра, 1966. – 555 с.

133. Вильд Г. Совершенствование буровзрывных работ в каменноугольных шахтах / Г. Вильд // Глюкауф, 1962. - № 26. – С. 5-10.

134. Бутуков А. Ю. О способах инициирования зарядов ВВ в угольных шахтах / А. Ю. Бутуков, К. С. Толстых, Г. Ф. Солопов // Уголь Украины, 1997. - № 8. –

С. 24-26.

135. Миндели Э. О. Разрушение горных пород / Э. О. Миндели. – М.: Недра, 1974. – 599 с.

136. Калякин С. А. Значение факторов, определяющих безопасные и эффективные параметры способа обратного инициирования заряда ВВ / С. А. Калякин // Способы и средства создания безопасных и здоровых условий труда в угольных шахтах: Сб. научн. тр. МакНИИ. – Макеевка-Донбасс, 2004. – С. 164-176.

137. Баум Ф. А. К вопросу оценки эффективности действия взрыва зарядов с воздушными промежутками / Ф. А. Баум // Взрывное дело, № 54/11. – М.: Недра, 1964. – С. 48-53.

138. Баум Ф. А. Определение импульса взрыва вдоль образующей скважины и оптимальных параметрах скважинного заряда / Ф. А. Баум, С. С. Григорян, Н. С. Санасарян // Взрывное дело, № 54/11. – М.: Недра, 1964. – С. 53-102.

139. Баум Ф. А. Физика взрыва / Ф. А. Баум, К. П. Станюкович, Б. И. Шехтер. – М.: Физматгиз, 1958. – 800 с.

140. Зельдович Я. Б. Теория детонации / Я. Б. Зельдович, А. С. Компанеец. – М.: ГИТТЛ, 1955. – 268 с.

141. Ландау Л. Д. Определение скорости истечения продуктов детонации конденсированных взрывчатых веществ / Л. Д. Ландау, К. П. Станюкович // Сб. тр. Л. Д. Ландау. – М.: Наука, 1969. – т. 1. – С. 499-503.

142. Танака М. О безопасности взрывных работ при прямом и обратном инициировании зарядов / М. Танака, Т. Тэсима, Ю. Кога // Сайко ТОХОАН, 1985. – Т. 31. - № 11. – С. 8-14.

143. Калякин С. А. Исследование влияния способа инициирования шпурового заряда на антигризутность ВВ / С. А. Калякин // Сб. научн. тр. ДонНТУ: серия «Горно-геологическая». – Донецк: ДонНТУ, 2008. - № 7(135). – С. 31-35.

144. Расторгуев В. М. Влияние свободного пространства на воспламеняемость метано-воздушной смеси при взрыве зарядов аммонита ПЖВ-20 в канале мортиры / В. М. Расторгуев, А. С. Попова // Безопасность взрывных работ в угольных шахтах: Сб. научн. тр. МакНИИ. – Макеевка-Донбасс, 1973. – С. 77-81.

145. Зенин В. И. О воспламенении метана при взрывных работах в выработках, проводимых с подрывкой боковых пород / В. И. Зенин, Б. А. Анисимкин, В. С. Тимошенко // Безопасность взрывных работ в угольных шахтах: Сб. научн. тр. МакНИИ. – Макеевка-Донбасс, 1975. – С. 54-56.

146. Ullrich E. Untersuchungleiniger Einflussfaktorent beider Prufung der Schlagwettersicherheit von Wettersprengstoffen der Klasse I im Bohrbochmorser /E. Ullrich, D. Harzt // Bergakademic, 1970. - № 12. – S. 721-725.

147. Миндели Э. О. Забойка шпуров / Э. О. Миндели, П. А. Демчук, В. Е. Александров. – М.: Недра, 1967. – 150 с.

148. Асонов В. А. Определение оптимальной длины песчано-глинистой забойки шпуров / В. А. Асонов, П. А. Демчук, Д. С. Кузнецова // Взрывное дело, № 55/12. – М.: Недра, 1964. – С. 60-69.

149. Миндели Э. О. Забойка как средство улучшения санитарно-гигиенических условий труда и повышения безопасности и эффективности взрывных работ / Э. О. Миндели, П. А. Демчук, В. Е. Александров: матер. XIV межд. конф. научн-исслед. инс-тов по безопасности работ в угольной промышленности, (Донецк 15-19 июля 1971 г.) // МУП СССР, МакНИИ. – Макеевка: МакНИИ, 1971. – Е. 7. – 18 с.

150. Селезнев А. И. Внутренняя забойка шпуров при взрывных работах / А. И. Селезнев, Ф. М. Галаджий. – М.: Углетехиздат, 195. – 25 с.

151. Шевцов Н. Р. Забойка скважины при пневмозаряжании / Н. Р. Шевцов, А. Б. Михайлов // Снижение травматизма при взрывных работах в угольных шахтах: Сб. научн. тр. МакНИИ. – Макеевка-Донбасс, 1986. – С. 73-80.

152. Калякин С. А. Исследование влияния параметров буферной среды на способность метано-воздушных смесей воспламеняться от взрывного импульса / С. А. Калякин, Н. Р. Шевцов // Сб. научн. тр. ДонНТУ: Серия «Горно-геологическая». – Донецк: ДонНТУ, 2002. – Вып. 45. – С. 123-129.

153. Шевцов Н. Р. Исследование влияния степени замкнутости зарядной камеры на воспламеняющую способность продуктов взрыва / Н. Р. Шевцов, С. А. Калякин // Сб. научн. тр. Физико-технического института. – Донецк: ДонНТУ, 2002. – С. 14-18.

154. Шевцов Н. Р. Исследование запирающей и пламегасящей эффективности порошковых забоечных материалов / Н. Р. Шевцов, А. Б. Михайлов, Н. Н. Малявка // Снижение травматизма при взрывных работах в угольных шахтах: Сб. научн. тр. МакНИИ. – Макеевка-Донбасс, 1986. – С. 66-73.

155. Калякин С. А. Взаимодействие продуктов детонации ВВ с забоечным материалом при камуфлетном взрывании / С. А. Калякин, Н. Р. Шевцов // Способы и технические средства обеспечения безопасных и здоровых условий труда на угольных шахтах: Сб. научн. тр. МакНИИ. – Макеевка-Донбасс, 1988. – С. 47-53.

156. Тэйлор Дж. Детонация конденсированных взрывчатых веществ / Дж. Тейлор: пер. с англ. – Оксфорд, 1952. – 260 с.

157. Калякин С. А. Исследование факторов, определяющих безопасную длину забойки шпуров при взрыве взрывчатых веществ / С. А. Калякин: матер. IV межд. научно-практ. конф. [VEDAA TECHNOLOGIE; KROK DO BUDOUCNOSTI - 2008], (Praha, 1-15 brezen 2008 г.). – Praha: «Education and Science», 2008. – S. 80-89.

158. Калякин С. А. Об условиях выгорания скважинного заряда при торпедировании / С. А. Калякин, В. С. Казачков // Снижение травматизма при взрывных работах в угольных шахтах: Сб. научн. тр. МакНИИ. – Макеевка-Донбасс, 1986. – С. 107-111.

159. Шевцов Н. Р. Влияние забойки на процесс поджигания и выгорания шпурового заряда ВВ / Н. Р. Шевцов, С. А. Калякин, К. Н. Лабинский, И. В. Купенко // Сб. научн. тр. ДонНТУ: Серия «Горно-геологическая». – Донецк: ДонНТУ, 2001. – Вып. 36. – С. 18-26.

160. Соркин Р. Е. Теория внутрикамерных процессов в ракетных системах на твердом топливе / Р. Е. Соркин. – М.: Наука, 1983. – 285 с.

161. Кондриков Б. Н. Изучение воспламеняемости предохранительных ВВ в присутствии угля / Б. Н. Кондриков, Г. Д. Козак, В. П. Лушкин // Взрывное дело, № 72/29. – М.: Недра, 1973. – С. 217-225.

162. Калякин С. А. О влиянии поджигаемости ВВ на устойчивость против выгорания шпурового заряда / С. А. Калякин, Ю. В. Манжос // Взрывное дело, № 96/53. – М.: ЗАО «МВК по взрывному делу», 2006. – С. 207-218.

163. Ловля С. А. Взрывное дело / С. А. Ловля, Б. Л. Каплан, В. В. Майоров. – М.: Недра, 1976. – 266 с.

164. Физика взрыва [монография] / Под ред. К. П. Станюковича. – М.: Наука, 1975. – 704 с.

165. Калякин С. А. Обоснование необходимого уровня устойчивости против выгорания зарядов ВВ / С. А. Калякин // Взрывное дело, № 100/57. – М.: ЗАО «МВК по взрывному делу», 2008. – 203 с.

166. Ханукаев А. Н. Энергия волн напряжений при разрушении пород взрывом / А. Н. Ханукаев. – М.: Госгортехиздат, 1962. – 198 с.

167. Кушнеров П. И. Исследование условий безопасного производства взрывных работ при интенсивном выделении метана в шпуров / П. И. Кушнеров, В. И. Стикачев, В. Н. Бабицкий // Вопросы безопасности в угольных шахтах: Сб. научн. тр. МакНИИ. – Макеевка-Донбасс, 1969. – т. XX. – С. 244-257.

168. Инструкция по применению забойки шпуров / Сборник нормативных документов по взрывным работам в угольных шахтах. – Макеевка-Донбасс, 2000. – С. 71-73. – (нормативный документ МУП Украины).

169. Казачков В. С. Применение статистических методов при определении поджигаемости взрывчатых веществ / В. С. Казачков // Безопасность взрывных работ, улучшение проветривания в угольных шахтах: Сб. научн. тр. МакНИИ. – Макеевка-Донбасс, 1982. – С. 14-16.

170. Метод определения поджигаемости предохранительных взрывчатых веществ: технические требования к патронированным ВВ V и VI классов с повышенной устойчивостью против выгорания и методики их испытаний / МУП СССР, МакНИИ, ИГД им. А. А. Скочинского. – Макеевка-Донбасс, 1984. – С. 60-78. – (нормативный документ).

171. Андреев К. К. Термическое разложение и горение взрывчатых веществ / К. К. Андреев. – М.: Госэнергоиздат, 1957. – 312 с.

172. Аренс Г. Методы испытаний взрывчатых веществ, применяемых в угольной промышленности, при преимущественном внимании к устойчивости против дефлаграции предохранительных и водонаполненных ВВ: матер. XIV Междунар.

конф. научно-исслед. инс-тов по безопасности работ в угольной промышленности, (Донецк, 15-19 июля 1971 г.) // МУП СССР, МакНИИ. – Макеевка: МакНИИ, 1971. – Е-9. – Перевод ВИННИТИ, № 89299. – 20 с.

173. Зенин В. И. Технические требования к ВВ V и VI классов с повышенной устойчивостью против выгорания / В. И. Зенин, Б. И. Вайнштейн, В. С. Казачков, М. С. Клейнер // Уровень, динамика и причины производственного травматизма на угольных шахтах при ведении взрывных работ: Сб. научн. тр. МакНИИ. – Макеевка-Донбасс, 1983. – С. 14-19.

174. Зенин В. И. Об устойчивости детонации патронированных взрывчатых веществ в породных забоях подготовительных выработок / В. И. Зенин, В. С. Тимошенко, В. И. Колесников, Б. А. Анисимкин // Взрывное дело, № 80/37. – М.: Недра, 1978. – С. 214-221.

175. Гмурман В. Е. Руководство к решению задач по теории вероятности и математической статистике / В. Е. Гмурман. – М.: «Высшая школа», 1975. – 333 с.

176. Ахназарова С. Л. Методы оптимизации эксперимента в химической технологии / С. Л. Ахназарова, В. В. Кафаров. – М.: «Высшая школа», 1985. – 319 с.

177. Калякин С. А. О комплексном показателе применимости предохранительных ВВ / С. А. Калякин, В. М. Расторгуев // Снижение травматизма при взрывных работах в угольных шахтах: Сб. научн. тр. МакНИИ. – Макеевка-Донбасс, 1988. – С. 56-59.

178. Галаджий Ф. М. К вопросу о связи антигризутности с термохимическими характеристиками ВВ / Ф. М. Галаджий, Б. И. Вайнштейн // Безопасность взрывных работ в угольных шахтах: Сб. научн. тр. МакНИИ. – Макеевка-Донбасс, 1971. – С. 3-9.

179. Галаджий Ф. М. К вопросу о механизме воспламенения метано-воздушной смеси детонирующим зарядом ВВ / Ф. М. Галаджий, Б. И. Вайнштейн // Безопасность взрывных работ в угольных шахтах: Сб. научн. тр. МакНИИ. – Макеевка-Донбасс, 1973. – С. 89-99.

180. Орленко Л. П. Физика взрыва и удара / Л. П. Орленко. – М.: Физматлит, 2008. – 304 с.

181. Митрофанов В. В. Детонация гомогенных и гетерогенных систем / В. В. Митрофанов. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2003. – 200 с.

182. Седов Л. И. Методы подобия и размерности в механике / Л. И. Седов. – М.: Недра, 1981. – 447 с.

183. Лебедев В. Н. Исследование параметров ударных воздушных волн и способов их снижения в призабойной части выработки при проведении взрывных работах в шахтах, опасных по газу или пыли: автореф. на соиск. ученой степени канд. техн. наук: спец. 05.26.01 «Техника безопасности и противопожарная техника» / В. Н. Лебедев. – Донецк, 1973. – 19 с.

184. Расторгуев В. М. Исследование и разработка способа сравнительной оценки предохранительных свойств взрывчатых веществ: автореф. на соиск. научн. ученой степени канд. техн. наук: спец. 05.15.02 «Подземная разработка и эксплуатация угольных, рудных и нерудных месторождений» / В. М. Расторгуев. – М., 1974. – 13 с.

185. Калякин С. А. Влияние условий гидровзрывания на энергетические показатели и работоспособность взрывчатых веществ / С. А. Калякин, Н. Р. Шевцов // Проблемы горного давления: Сб. научн. тр. ДонНТУ. – Донецк: ДонНТУ, 2002. – С. 116-144.

186. Калякин С. А. Исследование изменения уровня предохранительных свойств ВВ от его давления детонации / С. А. Калякин // Сб. научн. тр. ДонНТУ: серия «Горно-геологическая». – Донецк: ДонНТУ, 2006. – Вып. III. – Т.2. – С. 72-76.

187. Физика взрыва / Под ред. Л. П. Орленко. – В 2 т. Т. 1 – М.: Физматлит, 2004. – 832 с.

188. Ландау Л. Д. Определение скорости истечения продуктов детонации конденсированных взрывчатых веществ / Л. Д. Ландау, К. П. Станюкович // Детонация конденсированных и газовых систем: Сб. тр. – М.: Наука, 1986. – С. 32-36.

189. Кук М. А. Наука о промышленных взрывчатых веществах / М. А. Кук. – М.: Недра, 1980. – 452 с.

190. Зенин В. И. Условия создания предохранительных накладных зарядов / В. И. Зенин, С. А. Калякин, Ю. В. Манжос, Б. А. Анисимкин // Снижение травматизма

при взрывных работах в угольных шахтах: Сб. научн. тр. МакНИИ. – Макеевка-Донбасс, 1987. – С. 37-41.

191. Шевцов Н. Р. Определение толщины предохранительной оболочки вокруг заряда ВВ / Н. Р. Шевцов, В. И. Стикачев, А. Б. Михайлов // Уровень, динамика и причины производственного травматизма на угольных шахтах при ведении взрывных работ: Сб. научн. тр. – Макеевка-Донбасс, 1983. – С. 9-13.

192. Адушкин В. В. О формировании ударной волны и разлете продуктов взрыва в воздухе / В. В. Адушкин. – ПМТФ, 1963. - № 5. – С. 107-114.

193. Калякин С. А. О влиянии энергии, передаваемой при взрыве ВВ в ударную волну на предохранительность / С. А. Калякин // Сб. научн. тр. ДонНТУ: серия «Горно-геологическая». – Донецк: ДонНТУ, 2005. – Вып. 86. – С. 37-44.

194. Шевцов Н. Р. Экспериментальные данные по предотвращению воспламенения метано-воздушной смеси взрывом заряда ВВ / Н. Р. Шевцов // Сб. научн. тр. ДонНТУ: серия «Горно-геологическая». – Донецк: ДонНТУ, 2001. Вып. 21. – С. 32-36.

195. Розовский А. И. Научные основы техники взрывобезопасности при работе с горючими газами и парами / А. И. Розовский. – М.: Химия, 1972. – 364 с.

196. Глазкова А. П. Ингибирование метано-воздушных смесей и проблема антигризутности / А. П. Глазкова – Кинетика и катализ, 1971. - № 1. – С. – 16-19.

197. Механизмы ингибирования реакций пламенного горения / М. Е. Краснянский – 2007. – 43 с. – Режим доступа на сайт: <http://www.mikrasna.narod.ru/fire/3.htm>.

198. Калякин С. А. Механизм воспламенения метано-воздушной смеси продуктами взрыва ВВ / С. А. Калякин // Способы и средства создания безопасных и здоровых условий труда в угольных шахтах: Сб. научн. тр. МакНИИ. – Макеевка-Донбасс, 2004. – С. 143-158.

199. Дубнов Л. В. Промышленные взрывчатые вещества / Л. В. Дубнов, Н. С. Бахаревич, А. И. Романов. – М.: Недра, 1982. – 326 с.

200. Зенин В. И. Аммиак в продуктах взрыва промышленных ВВ / В. И. Зенин, С. А. Калякин, В. П. Удовиченко, Е. П. Мальковская // Безопасность труда в промышленности – М., 1986. – № 3. – С. 36-37.

201. Зельдович Я. Б. Цепные реакции в горячих пламенах – приближенная теория скорости / Я. Б. Зельдович. – Кинетика и катализ, 1961. Т. 2. - № 3. – С. 305-318.
202. Семенов Н. Н. О некоторых проблемах химической кинетики и реакционной способности / Н. Н. Семенов. – М.: Изд-во АН СССР, 1958. – 686 с.
203. Физическая химия быстрых реакций [монография] / Под ред. И. С. Заслонко. – М.: Мир, 1976. – 394 с.
204. Гурвич А. М. Термодинамические исследования методом взрыва и расчеты процессов горения / А. М. Гурвич, Ю. Х. Шаулов. – М.: Изд-во МГУ, 1955. – 162 с.
205. Галаджий Ф. М. О причинах выгорания предохранительных ВВ в шнурах / Ф. М. Галаджий // Взрывное дело, № 44/1. – М.: Госгортехиздат, 1960. – С. 144-158.
206. Зенин В. И. Исследование воспламенения метано-воздушной смеси выгорающим зарядом / В. И. Зенин, Ю. В. Манжос // Безопасность взрывных работ в угольных шахтах: Сб. научн. тр. МакНИИ. – Макеевка-Донбасс, 1974. – С. 3-6.
207. Гельфанд Ф. М. Предупреждение аварий при взрывных работах в угольных шахтах / Ф. М. Гельфанд. – М.: Недра, 1972. – 207 с.
208. Калякин С. А. Горящие частицы предохранительных взрывчатых веществ как источники воспламенения взрывоопасной среды / С. А. Калякин // Вести Донецкого горного института: Сб. научн. тр. ДонНТУ. – Донецк: ДВНЗ, 2009. – С. 41-49.
209. Гельфанд Б. Е. Фугасные эффекты взрывов / Б. Е. Гельфанд, М. В. Сильников. – С.-Пб.: Полигон, 2002. – 272 с.
210. Дубнов Л. В. Исследования и горения некоторых предохранительных взрывчатых веществ / Л. В. Дубнов, Б. А. Игнатьев, А. И. Романов // Взрывное дело, № 49/6. – М.: Госгортехиздат, 1962. – С. 165-170.
211. Глазкова А. П. О возможных направлениях повышения безопасности антигризутных взрывчатых веществ / А. П. Глазкова, В. П. Карпов, О. К. Андреев // Взрывное дело, № 75/32. – М.: Недра, 1975. – С. 190-191.

212. Зельдович Я. Б. Теория горения пороха и приложение ее к реактивным снарядам / Я. Б. Зельдович. // Теория горения порохов и взрывчатых веществ: Сб. научн. тр. – М.: Наука, 1982. – С. 186-226.

213. Лейпунский О. И. К вопросу о физических основах внутренней баллистики реактивных снарядов / О. И. Лейпунский // Теория горения порохов и взрывчатых веществ: Сб. научн. тр. – М.: Наука, 1982. – С. 126-278.

214. Калякин С. А. Обеспечение эффективности и безопасности взрывных работ на шахтах / С. А. Калякин, Н. Р. Шевцов. – Уголь Украины, 2007. - № 6. – С. 30-34.

215. Калякин С. А. К вопросу воспламенения метано-воздушной смеси зарядами ПВВ, взрывающимися в канале мортиры / С. А. Калякин, В. М. Расторгуев // Снижение травматизма при взрывных работах в угольных шахтах: Сб. научн. тр. МакНИИ. – Макеевка-Донбасс, 1989. – С. 45-51.

216. Селезнев А. И. Изыскание мероприятий, повышающих безопасность взрывных работ в пылегазовых шахтах / А. И. Селезнев // Вопросы безопасности в горном деле: Сб. научн. тр. МакНИИ. – М.: Гостоптехиздат, 1940. – С. 139-156.

217. Стикачев В. И. Съёмки взрыва заряда ВВ в окружении инородных предметов / В. И. Стикачев, Н. Р. Шевцов, А. Б. Михайлов // Способы безопасного ведения взрывных работ и борьба с выбросами в угольных шахтах: Сб. научн. тр. МакНИИ. – Макеевка-Донбасс, 1983. – С. 10-14.

218. Гельфанд Ф. М. О возможных причинах воспламенения метано-воздушной смеси при взрывных работах / Ф. М. Гельфанд, В. И. Мамаев, В. А. Лигай // Борьба с газом, пылью и подземными пожарами: Сб. № 19. – М.: Недра, 1966. – 43 с.

219. Зенин В. И. О воспламенении метана горящими частицами продуктов взрыва ВВ / В. И. Зенин, В. М. Расторгуев, А. С. Попова // Безопасность взрывных работ в угольных шахтах: Сб. научн. тр. МакНИИ. – Макеевка-Донбасс, 1976. – С. 11-16.

220. Одибер Е. О воспламенении гремучегазовых смесей от взрывчатых веществ / Е. Одибер. – Транзейшен, 1938. – Т. 95. – С. 111-123.

221. Kalyakin S. The critical conditions of initiating air – methane mixture explosion with an open charge / S. Kalyakin, O. Moroz // *Techicka univerzita Ostrava. – Vysoka skola banska*, 2008. Vol. LIV. - № 2. – p. 8-14.

222. Калякин С. А. Критические условия инициирования взрыва метано-воздушной смеси открытым зарядом взрывчатого вещества / С. А. Калякин // *Взрывное дело*, № 97/54. – М.: ЗАО «МВК по взрывному делу», 2007. – С. 170-181.

223. Вайнштейн Б. И. Эмпирические соотношения для оценки предохранительных свойств ВВ / Б. И. Вайнштейн // *Взрывное дело*, № 89/41. – М.: Недра, 1982. – С. 54-61.

224. Парамонов П. А. Статистический метод оценки степени безопасности взрывчатых веществ / П. А. Парамонов // *Вопросы безопасности в угольных шахтах: Сб. научн. тр. МакНИИ*. – М.: Госгортехиздат, 1962. – С. 250-265.

225. Умнов А. Е. Предупреждение и локализация взрывов в подземных условиях / А. Е. Умнов, А. С. Голик, Д. Ю. Палеев, Н. Р. Шевцов. – М.: Недра, 1990. – 285 с.

226. Адушкин В. В. Расчет безопасных расстояний при газовом взрыве в атмосфере / В. В. Адушкин, С. М. Когарко, А. Г. Ламин // *Взрывное дело*, № 75/32. – М.: Недра, 1975. – С. 82-94.

227. Мамаев В. И. Условия воспламенения горючей шахтной среды ударными волнами взрыва зарядов ВВ / В. И. Мамаев, Ж. А. Ибраев // *Взрывное дело*, № 72/29. – М.: Недра, 1973. – С. 59-66.

228. Murray W. L. Further studies of the ignition of methane – air by detonating explosives / W. L. Murray // *Research report: safety in mines research establishment. - Ministry of Technology*. – Crown Copyright, 1970. – p. 24.

229. Песоцкий М. К. О методах испытаний ВВ на работоспособность / М. К. Песоцкий, С. А. Калякин, И. С. Грицюк // *Снижение травматизма при взрывных работах в угольных шахтах: Сб. научн. тр. МакНИИ*. – Макеевка-Донбасс, 1985. – С. 57-63.

230. Расторгуев В. М. Исследование ингибирующего действия солей кальция в составах ВВ / В. М. Расторгуев, С. А. Калякин // *Снижение травматизма при взрыв-*

ных работах в угольных шахтах: Сб. научн. тр. МакНИИ. – Макеевка-Донбасс, 1990. – С. 64-73.

231. Шевцов Н. Р. Развитие теории и принципов построения эффективных и безопасных предохранительных ВВ / Н. Р. Шевцов, С. А. Калякин: матер. междуна. конф. [Форум горняков - 2009], (Днепропетровск, 30 сентября – 3 октября 2009 г.). – Днепропетровск: Национальный горный университет, 2009. – С. 114-125.

232. Калякин С. А. Обоснование технических требований к экологически чистым предохранительным ВВ / С. А. Калякин, К. Н. Лабинский, Е. В. Терентьева // Вестник Кременчугского государственного политехнического университета им. М. Остроградского. – Кременчуг: КГПУ, 2009. – Вып. 6/59. – Ч. 1. – С. 169-175.

233. Гелин В. А. О путях повышения работоспособности высокопредохранительных ВВ // В. А. Гелин, Л. В. Дубнов, Н. С. Бахаревич // Взрывное дело, № 71/28. – М.: Недра, 1972. – С. 206-213.

234. Галаджий Ф. М. О влиянии состава газообразных продуктов взрыва на антигризутные свойства ВВ / Ф. М. Галаджий, Б. И. Вайнштейн // Безопасность взрывных работ в угольных шахтах: Сб. научн. тр. МакНИИ. – Макеевка-Донбасс, 1972. – С. 6-14.

235. Расторгуев В. М. Исследование ингибирующего действия инертных добавок по излучению продуктов взрыва / В. М. Расторгуев // Безопасность взрывных работ в угольных шахтах: Сб. научн. тр. МакНИИ. – Макеевка-Донбасс, 1978. – С. 49-54.

236. Jorrissen W. P. Cinétique et mécanisme des réactions d'inflammation et combustion en phase gazeuse / W. P. Jorrissen // Rev. Just. France. – Paris, 1948. – p. 326.

237. Калякин С. А. Влияние времени «жизни» радикалов в продуктах взрыва ВВ на его предохранительность / С. А. Калякин, Н. Р. Шевцов // Импульсная обработка материалов: Сб. научн. тр. – Днепропетровск: Национальный горный университет, 2005. – С. 68-75.

238. Калякин С. А. Исследование ингибирующего действия солей-ингибиторов на метано-воздушную смесь при взрыве заряда предохранительного взрывчатого вещества в канале мортиры / С. А. Калякин // Высокоэнергетическая

обработка материалов: Сб. научн. тр. НТУ. – Днепропетровск: АРТ-ПРЕСС, 2009. – С. 59-70.

239. Куликов И. С. Термическая диссоциация соединений / И. С. Куликов. – М.: Metallurgia, 1966. – 250 с.

240. Вайнштейн Б. И. Оптимизация свойств предохранительных ВВ / Б. И. Вайнштейн // Безопасность взрывных работ, улучшение проветривания в угольных шахтах: Сб. научн. тр. МакНИИ. – Макеевка-Донбасс, 1983. – С. 3-5.

241. Галаджий Ф. М. Инфракрасное излучение метановоздушной смеси, возбужденной взрывом заряда ВВ / Ф. М. Галаджий, Б. И. Вайнштейн, В. Н. Бондаренко, В. М. Расторгуев // Безопасность взрывных работ в угольных шахтах: Сб. научн. тр. МакНИИ. – Макеевка-Донбасс, 1971. – С. 28-31.

242. Расторгуев В. М. Исследование параметров ударных волн и воспламеняемости метановоздушной смеси при взрыве частично обнаженных зарядов ВВ / В. М. Расторгуев, М. К. Песоцкий, В. П. Сумской // Способы безопасного ведения взрывных работ и борьба с выбросами в угольных шахтах: Сб. научн. тр. МакНИИ, 1981. – С. 14-18.

243. Калякин С. А. Исследование скорости детонации ПВВ V и VI классов в зависимости от плотности патронов и условий взрывания / С. А. Калякин, В. М. Расторгуев // Снижение травматизма при взрывных работах в угольных шахтах: Сб. научн. тр. МакНИИ. – Макеевка-Донбасс, 1990. – С. 58-64.

244. Калякин С. А. Аномальное влияние ингибитора на цепную реакцию окисления метана при взрыве / С. А. Калякин, Н. Р. Шевцов // Технология и проектирование подземного строительства: Вестник АСУ. Вып. 3. – Донецк: Норд-Пресс, 2002. – С. 166-180.

245. Калякин С. А. Научные основы открытого явления временной потери рекомбинационного эффекта кристаллическим ингибитором реакции окисления метана / С. А. Калякин, Н. Р. Шевцов // Взрывное дело, № 95/52. – М.: ЗАО «МВК по взрывному делу», 2005. – С. 100-110.

246. Калякин С. А. О спонтанном переходе ингибитора реакции окисления метана в составе предохранительного ВВ в инертное состояние / С. А. Калякин, Н. Р.

Шевцов // Сб. научн. тр. ДонНТУ: серия «Горно-геологическая». Вып. 85. – Донецк: ДонНТУ, 2005. – С. 51-54.

247. Зельдович Я. Б. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений / Я. Б. Зельдович, Ю. П. Райзер. – М.: Наука, 1966. – 686 с.

248. Каннель Г. И. Ударные волны в физике конденсированного состояния / Г. И. Каннель, В. Е. Фортов, С. В. Разоренов // Успехи физических наук. – М.: АН РФ, 2007. – Т. 177. - № 8. – С. 809-829.

249. Калякин С. А. Взаимодействие кристаллов солей-ингибиторов с продуктами детонации взрывчатого вещества / С. А. Калякин // Сб. научн. тр. НГУ. - Днепрпетровск: АРТ-ПРЕСС, 2007. – С. 10-18.

250. Олинджер Б. Ударная сжимаемость тэна, ТАТБ, CO_2 и H_2O при давлении до 10 ГПа, рассчитанная на основании экспериментальных данных по гидростатическому сжатию / Б. Олинджер, Г. Кейди // Сб. ст. «Детонация и взрывчатые вещества». – М.: Мир, 1987. – С. 204-219.

251. Богомолов В. М. Электромагнитные явления, сопровождающие детонацию зарядов мощных ВВ / В. М. Богомолов, И. М. Воскобойников, А. Я. Апин // Взрывное дело, № 68/25. – М.: Недра, 1970. – С. 197-202.

252. Kolsky H. Electromagnetic waves emitted on detonation of explosives / H. Kolsky // Nature, 1954. – Vol. – 73. – № 4393. – p. 73-77.

253. Боронин А. П. Экспериментальное изучение электромагнитного поля в ближней зоне при взрыве конденсированных ВВ / А. П. Боронин, В. А. Вельмин, Ю. А. Медведев, Б. М. Степанов // ПМТФ, 1968. - № 6. – С. 99-103.

254. Горшунов Л.М. Электромагнитные возмущения при взрывах / Л. М. Горшунов, Г. П. Кононенко, Е. И. Сиротинин // ЖЭТФ, 1967. – Т. 53. – Вып. 3 (9). – С. 818-821.

255. Зенин В. И. Электромагнитное излучение при взрыве промышленных ВВ / В. И. Зенин, В. Н. Миц // Взрывное дело, № 52/9. М.: Госгортехиздат, 1963. – С. 115-130.

256. Корнфельд М. И. Электризация ионного кристалла при пластической деформации и расщеплении / М. И. Корнфельд // УФН, 1975. – Т. 116. – № 2. – С. 327-340.

257. Хитиошвили Н. Г. Об электромагнитном эффекте при трещинообразовании в щелочно-галоидных кристаллах и горных породах / Н. Г. Хитиошвили // Изв. АН СССР. Физика Земли, 1984. - № 9. – С. 13-19.

258. Тупик А. А. Электромагнитная эмиссия при разрушении металлов / А. А. Тупик, Н. П. Валуев // ЖТФ, 1980. – Т. 6. – № 2. – С. 82-85.

259. Чаркина О. В. Электромагнитное излучение подвижных дислокационных сегментов в ионном кристалле / О. В. Чаркина, К. А. Чишко // Физика твердого тела, 2001. – Т. 43. – Вып. 10. – С. 1821-1827.

260. Витайкин Б. Е. Физика твердого тела / Б. Е. Витайкин. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2008. – 358 с.

261. Могилевский М. А. О теоретической прочности кристалла в условиях ударно-волнового нагружения / М. А. Могилевский, И. О. Мышкин // Физика горения и взрыва. – Новосибирск: Наука, 1988. - № 6. – С. 106-111.

262. Kalyakin S. A. Prevention mechanism of explosives of air – methane by salt inhibitors / S. A. Kalyakin, O. K. Moroz // Vysoka skola banska: Techicka univerzita Ostrava, 2008. Vol. LIV. - № 2. – pp. 1-7.

263. Калякин С. А. Явление дезрекомбинационного эффекта у кристаллов соли-ингибитора при детонации предохранительных взрывчатых веществ / С. А. Калякин, Н. Р. Шевцов // Строительная технология: Горный информационно-аналитический бюллетень. – М.: Горная книга, 2009. – Вып. 9. – С. 220-239.

264. Булат А. Ф. О некоторых особенностях атомной структуры ископаемых углей / А. Ф. Булат, С. И. Скипочка, Н. А. Куцева // Геотехнічна механіка: міжвід. зб. пр. ІДТМ ім. А. С. Полякова НАН України. – Дніпропетровськ, 2005. – Вип. 61. – С. 3-11.

265. Трубецкой К. Н. Техногенные минеральные наночастицы как проблема освоения недр / К. Н. Трубецкой, С. Д. Викторов, Ю. П. Галченко, В. Н. Одинцев // Вестник Российской академии наук. – М., 2006. – Т. 76. - № 4. – С. 318-324.

266. Алексеев А. Д. Новітні технології – надійний ключ до надр / А. Д. Алексеев // Вісник НАН України. – К., 2005. - № 1. – С. 24-31.

267. Фролков Г. Д. Механохимическая концепция выбросоопасности угольных пластов / Г. Д. Фролков, А. Г. Фролков // Уголь. – М., 2005. - № 2. – С. 18-22.

268. Калякин С. А. Охрана труда как результат применения безопасных средств и способов разрушения горных пород / С. А. Калякин, Н. Р. Шевцов // Вісті Донецького гірничого інституту. – Донецьк: ДВНЗ «ДонНТУ», 2008. – Ч.1. – С. 76-83.

269. Калякин С. А. Оценка взрывобезопасности забоев горных выработок при выбросах и сотрясательном взрывании / С. А. Калякин // Способы и средства создания безопасных и здоровых условий труда в угольных шахтах: Сб. научн. тр. МакНИИ. – Макеевка-Донбасс, 2009.– С. 39-55.

270. Калякин С. А. Предотвращение взрывов метана и пыли на угольных шахтах / С. А. Калякин // Безопасность труда в промышленности. – М., 2008. - № 12. – С. 24-29.

271. Калякин С. А. Борьба со взрывами метана на выбросоопасных угольных пластах / С. А. Калякин // Способы и средства создания безопасных и здоровых условий труда в угольных шахтах: Сб. научн. тр. МакНИИ. – Макеевка-Донбасс, 2007. – Вып. 20. – С. 15-25.

272. Вайнштейн Б. И. Детонационная способность ВВ с инертными добавками / Б. И. Вайнштейн, М. С. Клейнер, В. И. Зенин // Снижение травматизма при взрывных работах в угольных шахтах: Сб. научн. тр. МакНИИ. – Макеевка-Донбасс, 1985. – С. 50-57.

273. Калякин С. А. Испытания ПВВ V и VI классов при сотрясательном взрывании на выбросоопасных пластах / С. А. Калякин // Вісник Криворізького техн. університету: Зб. наук. пр. – Кривий Ріг: КРУ, 2009. – С. 41-47.

274. Калякин С. А. Высокопредохранительные ВВ для разрушения газоносных напряженных горных пород / С. А. Калякин // Бюллетень УСИВ. – Кривой Рог, 2010. - № 1. – С. 14-20.

275. Росинский Н. Л. Влияние материала наполнителя донной полости заряда ВВ на распределение динамических напряжений / Н. Л. Росинский, В. Н. Подставкин, М. В. Калиниченко // Способы и средства создания безопасных условий труда: Сб. научн. тр. МакНИИ. – Макеевка-Донбасс, 1984. – С. 102-104.

276. Гагулин М. В. О применении гидровзрывания на выбросоопасных пластах / М. В. Гагулин // Научн. сообщ. ИГД им. А. А. Скочинского. – М.: ИГД им. А. А. Скочинского, 1976. – Вып. 136. – С. 20-24.

277. Калякин С. А. О механизме взаимодействия продуктов детонации ВВ с гидрозабойкой / С. А. Калякин, Н. Р. Шевцов, К. Н. Лабинский // Проблемы гірського тиску: Зб. наук. пр. ДонНТУ. – Донецьк: ДонНТУ, 2003. – Вип. 8. – С. 222-236.

278. Шевцов Н. Р. Основы теории гидровзрывания при разрушении пород / Н. Р. Шевцов, К. Н. Лабинский, С. А. Калякин // Проблемы гірського тиску: Зб. наук. пр. ДонНТУ. – Донецьк: ДонНТУ, 2002. – Вип. 7. – С. 116-144.

279. Эмануэль Н. М. Курс химической кинетики / Н. М. Эмануэль, Д. Г. Кнорре. – М.: Высшая школа, 1969. – 431 с.

280. Jorrissen W. P. Rev. Just. France: Petrole et Ann. Combustible Liqueudes/ W. P. Jorrissen. – Paris, 1949. - № 4. – p. 326.

281. Boucart J. Etude bibliographique sur l'ampboidesin-hiditeurs dans les explosives antigrisouteus / J. Boucart // Explosife, 1960. - № 4. – pp. 127-140.

282. Хотин В. Г. Исследование параметров детонационных волн в смесевых ВВ электромагнитным методом / В. Г. Хотин, В. А. Пономарев, Н. М. Серегина, К. Б. Мясников // Вопросы теории взрывчатых веществ: Сб. ст. МХТИ им. Д.И. Менделеева. – М.: МХТИ, 1974. – С. 166-172.

283. Калякин С. А. Об уравнении состояния продуктов детонации предохранительных взрывчатых веществ / С. А. Калякин // Взрывное дело, № 98/55. – М.: ЗАО «МВК по взрывному делу», 2007. – С. 242-251.

284. Шевцов Н. Р. Обоснование эффективной длины донно-устьевой гидрозабойки / Н. Р. Шевцов, К. Н. Лабинский, С. А. Калякин // Сб. научн. тр. ДонНТУ: Серия «Горно-геологическая». – Донецк: ДонНТУ, 2002. – Вып. 54. – С. 115-123.

285. Шкуматов А. Н. Перераспределение импульса взрыва при помощи рефракторов / А. Н. Шкуматов, С. А. Калякин // Взрывное дело, № 98/55. – М.: ЗАО «МВК по взрывному делу», 2007. – С. 120-128.

286. Зенин В. И. О времени образования взрывоопасных метано-воздушных смесей внутри взрываеваемого массива / В. И. Зенин, Б. И. Вайнштейн // Безопасность взрывных работ в угольных шахтах: Сб. научн. тр. МакНИИ. – Макеевка-Донбасс, 1976. – С. 29-31.

287. Зенин В. И. К вопросу об антигризутности предохранительных ВВ при групповом разновременном взрывании / В. И. Зенин, Б. И. Вайнштейн // Безопасность взрывных работ в угольных шахтах: Сб. научн. тр. МакНИИ. – Макеевка-Донбасс, 1973. – С. 63-66.

288. Шевцов Н. Р. Результаты испытаний огнетушащих составов в опытном штреке / Н. Р. Шевцов, А. Б. Михайлов, Н. Н. Малявка // Динамика, причины производственного травматизма на шахтах: Сб. научн. тр. МакНИИ. – Макеевка-Донбасс, 1982. – С. 76-80.

289. Калякин С. А. О критических параметрах антигризутности предохранительных ВВ / С. А. Калякин, В. М. Расторгуев // Снижение травматизма при взрывных работах в угольных шахтах: Сб. научн. тр. МакНИИ. – Макеевка-Донбасс, 1987. – С. 41-49.

290. Баум Ф. А. О механизме сенсibiliзирующего действия на ВВ добавок в условиях возбуждения детонационной формы взрыва / Ф. А. Баум, А. С. Державец // Взрывное дело, № 60/17. – М.: Недра, 1966. – С. 50-62.

291. Deffet L. Utilisation des lampes explosives pour la photographie par le systeme schardin / L. Deffet, R. Vanden Berghe // Explosifs, 1960. - № 4. – p. 119-126.

292. Жуков В. П. Самовоспламенение метано-воздушных смесей в широком диапазоне давлений / В. П. Жуков, В. А. Сеченов, А. Ю. Стариковский // Физика горения и взрыва. – 2003. – Т. 39. - № 5. – С. 78-86.

293. Калякин С. А. Взрывоопасность горючих газов при разрушении газоносных горных массивов / С. А. Калякин // Способы и средства создания безопасных и

здоровых условий труда в угольных шахтах: Сб. научн. тр. МакНИИ. – Макеевка-Донбасс, 2009. - № 2 (24). – С. 36-43.

294. Калякин С. А. Исследование зарядов ВВ в качестве средств, создающих в забое предохранительную среду / С. А. Калякин // Способы и средства создания безопасных и здоровых условий труда в угольных шахтах: Сб. научн. тр. МакНИИ. – Макеевка-Донбасс, 2005. – С. 174-180.

295. Шевцов Н. Р. Теория локализации взрыва, способы и средства взрывозащиты горных выработок при взрывных работах: автореф. диссер. на соиск. научн. степени докт. техн. наук: спец. 05.26.01 «Охрана труда и пожарная безопасность» / Шевцов Н. Р. – Донецк, 1992. – 45 с.

296. Шевцов Н. Р. Развитие теории локализации взрывов газопылевоздушных смесей дисперсными системами в угольных шахтах / Н. Р. Шевцов, С. А. Калякин: матер. межд. конф. «Форум горняков – 2005», 12-14 октября 2005 г., Днепропетровск. Т. 4. – Д.: НГУ, 2005. – С. 245-250.

297. Шевцов Н. Р. К теории локализации взрыва в загазированных выработках / Н. Р. Шевцов // Снижение травматизма при взрывных работах в угольных шахтах: Сб. научн. тр. МакНИИ. – Макеевка-Донбасс, 1990. – С. 27-35.

298. Калякин С. А. Предотвращение взрывов метана и угольной пыли в горных выработках шахт / С. А. Калякин // Взрывное дело, № 99/56. – М.: ЗАО «МВК по взрывному делу», 2008. – С. 271-284.

299. Митрофанов В. В. Теория детонации / В. В. Митрофанов. – Новосибирск: Изд-во НГУ, 1982. – 92 с.

300. Гурин А. А. Управление ударными воздушными волнами при взрывных работах / А. А. Гурин. – М.: Недра, 1978. – 80 с.

301. Калякин С. А. Предотвращение воспламенения взрывоопасной смеси в горных выработках дисперсной средой / С. А. Калякин // Способы и средства создания безопасных и здоровых условий труда в угольных шахтах: Сб. научн. тр. МакНИИ. – Макеевка-Донбасс, 2006. – С. 88-98.

302. Песоцкий М. К. Исследование рудничной атмосферы после взрывных работ в выработках, проводимых по нарушенному массиву / М. К. Песоцкий, В. С.

Шаталов // Безопасность взрывных работ в угольных шахтах: Сб. научн. тр. МакНИИ. – Макеевка-Донбасс, 1975. – С. 7-11.

303. Песоцкий М. К. Определение факторов, влияющих на воспламенение метана при производстве взрывных работ по трещиноватым горным массивам / М. К. Песоцкий, Б. А. Анисимкин // Безопасность взрывных работ в угольных шахтах: Сб. научн. тр. МакНИИ. – Макеевка-Донбасс, 1971. – С. 32-38.

304. Калякин С. А. Взрывозащита горных выработок при взрывных работах / С. А. Калякин // Сучасні ресурсо-енергозберігаючі технології гірничого виробництва: Зб. Кременчуцький державний університет ім. М. Остроградського. – Кременчуг: КДУ, 2010. – Вип. 1. – С. 142-148.

305. Ярембаш И. Ф. Очистка рудничной атмосферы после взрывных работ / И. Ф. Ярембаш. – М.: Недра, 1979. – 186 с.

306. Калякин С. А. Развитие и совершенствование современной концепции безопасности взрывных работ в угольных шахтах / С. А. Калякин: матер. межд. конф. «Форум горняков - 2007», 11-13 октября 2007 г., Днепропетровск. – Д.: НГУ, 2007. – С. 245-249.

307. Калякин С. А. Совершенствование концепции безопасности взрывных работ на основе применения высокопредохранительных ВВ / С. А. Калякин // Способы и средства создания безопасных и здоровых условий труда в угольных шахтах: Сб. научн. тр. МакНИИ. – Макеевка-Донбасс, 2008. – Вып. 21. – С. 62-73.

308. Шевцов Н. Р. Развитие концепции безопасности производства взрывных работ в угольных шахтах / Н. Р. Шевцов, С. А. Калякин // Збірник наукових праць НГУ. – Д.: Національний гірничий університет, 2010. – Т. 1. - № 34. – С. 60-67.

309. Пат. 28213А Україна, МПК СО 6 В 31/28. Запобіжна вибухова речовина / Калякін С. О., Пісоцький М. К. Апаров О. П., Новікова М. О., заявник та патентовласник МП «Флейм». - № 9508692; заявл. 07.08.1995; надр. 29.12.1999, Бюл. № 8.

310. Пат. 23550 Україна, МПК СО 6 В 31/28. Запобіжна вибухова речовина / Зенін В. І., Калякін С. О., Манжос Ю. В., Шапранов В. В., заявник та патентовласник Зенін В. І. - № 97063047; заявл. 24.06.97; надр. 17.03.2003, Бюл. № 3.

311. Калякин С. А. Исследование промышленных ВВ для угольной промышленности / С. А. Калякин, А. В. Белодед, Е. В. Терентьева, Н. А. Новикова // Способы и средства создания безопасных и здоровых условий труда в угольных шахтах: Сб. науч. трудов МакНИИ. – МакНИИ: Макеевка-Донбасс, 2006. – С. 49-53.

312. Песоцкий М. К. Об определении продуктов взрыва новых промышленных ВВ / М. К. Песоцкий, П. Т. Зволейко, А. В. Белодед // Снижение травматизма при взрывных работах в угольных шахтах: Сб. научн. тр. МакНИИ. – Макеевка-Донбасс, 1990. – С. 18-21.

313. Маурина Н. Д. Методы и результаты изучения чувствительности промышленных ВВ к механическим воздействиям / Н. Д. Маурина, Н. А. Федосова, В. С. Рязанская // Взрывное дело, № 68/25. – М.: Недра, 1970. – С. 158-168.

314. Пат. 75851 Україна, МПК СО 6 В 31/20. Запобіжна вибухова речовина / Новікова Н. О., Потапчук М. В., Володченко Г. Г., Калякін С. О., Манжос Ю. В., заявник та патентовласник Новікова Н. О. - № а 200503959; заявл. 25.04.05; надр. 15.05.06, Бюл. № 5.

315. Пат. 38055 U Україна, МПК СО 6 В 31/20. Запобіжна вибухова речовина / Новікова Н. О., Потапчук М. В., Володченко Г. Г., Калякін С. О., Манжос Ю. В., заявник та патентовласник Новікова Н. О. - № u 200806763; заявл. 16.05.08; надр. 25.12.08, Бюл. № 24.

316. Расторгуев В. М. Исследование ПВВ V класса с целью улучшения их эксплуатационных показателей / В. М. Расторгуев, С. А. Калякин, М. К. Песоцкий // Снижение травматизма при взрывных работах в угольных шахтах: Сб. научн. тр. МакНИИ. – Макеевка-Донбасс, 1990. – С. 51-57.

317. Технические требования к патронированным ВВ V и VI классов с повышенной устойчивостью против выгорания и методики их испытаний: Сб. техн. треб. и методик / МУП СССР, МакНИИ, ИГД им. А.А. Скочинского. – Макеевка-Донбасс: МакНИИ, 1984. – 91 с. – (Нормативный документ МУП СССР).

318. Пат. 19772 U Україна, МПК СО 6 В 31/20. Запобіжна вибухова речовина / Калякін С. О., заявник та патентовласник Калякін С. О. - № u 200609337; заявл. 28.08.06; надр. 15.12.06, Бюл. № 12.

319. Пат. 20005 U Україна, МПК СО 6 В 31/20. Запобіжна вибухова речовина / Зенін В. І., Шевцов В. О., Сібілев М. М., Шамсутдінов К. К., заявн. та патентовласник Зенін В. І. - № u 200606071; заявл. 01.06.06; надр. 25.05.07, Бюл. № 7.

320. Пат. 25384 U Україна, МПК СО 6 В 31/20. Запобіжна вибухова речовина / Калякін С. О., Шевцов В. О., Сібілев М. М., заявн. та патентовласник Калякін С. О. - № u 200702625; заявл. 12.03.07; надр. 10.08.07, Бюл. № 12.

321. Пат. 10493 А Україна, МПК СО 6 В 31/25. Запобіжна вибухова речовина / Пісоцький М. К., Калякін С. О., Бондаренко В. С., Шевцов В. О., заявник та патентовласник Пісоцький М. К. - № 93005753; заявл. 16.07.93; надр. 25.12.96, Бюл. № 4.

322. Пат. 11978 U Україна, МПК СО 6 В 31/20. Запобіжна вибухова речовина / Калякін С. О., Шевцов В. О., Грицюк І. С., заявник та патентовласник Калякін С. О. - № u 200507100; заявл. 18.07.05; надр. 16.01.06, Бюл. № 1.

323. Петров Н. Г. Короткозамедленное взрывание в шахтах / Н. Г. Петров, Н. Л. Росинский. – М.: Недра, 1985. – 268 с.

324. Песоцкий М. К. Результаты экспериментальных испытаний ПВВ V и VI классов при сотрясательном взрывании на пластах, опасных по ГДЯ / М. К. Песоцкий, Ю. В. Манжос, М. М. Песоцкий // Способы и средства создания безопасных и здоровых условий труда в угольных шахтах: Сб. науч. трудов МакНИИ. – МакНИИ: Макеевка-Донбасс, 2004. – С. 123-136.

325. Пат. 83618 Україна, МПК GO 1 N 25/00. Пристрій для визначення запобіжних властивостей вибухових речовин у вибухонебезпечному середовищі / Пісоцький М. К., Брюханов О. М., Манжос Ю. В., Калякін С. О., заявник та патентовласник Держ. Макіївський наук.-дослідн. інс-т з безп. робіт у гірн. промисловості. - № 20040605124; заявл. 29.06.04; надр. 11.08.08, Бюл. № 15.

326. Шкуматов А. Н. Исследование бокового импульса взрыва шпуровых зарядов ВВ с вкладышами / А. Н. Шкуматов, И. В. Антипов, Б. Н. Андреев, С. А. Калякин // Разработка рудных месторождений: Сб. научн. тр. Криворожского технического университета. – Кривой Рог: КТУ, 2007. – С. 79-83.

327. Пат. 78078 С2 Україна, МПК Е 21 С 37/00. Е 21 F 5/00. F 42 D 1/00. Спосіб висадження на викидонебезпечних пластах і шпуровий заряд для його реалізації

/ Рубінський О. О., Калякін С. О., Шевцов М. Р., Лабінський К. М., заявник та патентовласник Калякін С. О. - № а 200501295; заявл. 14.02.05; надр. 15.02.07, Бюл. № 2.

328. Калякин С. А. Разработка экологически безопасных предохранительных ВВ для угольных шахт / С. А. Калякин, Е. В. Терентьева // Сб. науч. тр. ДонНТУ: серия «Горно-геологическая». – Донецк: ДНВЗ «ДонНТУ», 2009. – Вып. 10 (151). – С. 63-70.

329. Пат. 22936 UA Україна, МПК СО 6 В 31/20. Вибухова речовина для запобіжного заряду у полімерній оболонці / Калякін С. О., Грицюк І. С., заявник та патентовласник Калякін С. О. - № и 200701128; заявл. 05.02.07; надр. 25.04.07, Бюл. № 5.

330. Кушнеров П. И. О безопасности гидровзрывания в газовых шахтах / П. И. Кушнеров, К. С. Толстых // Безопасность взрывных работ в угольных шахтах: Сб. научн. тр. МакНИИ. – Макеевка-Донбасс, 1973. – С. 72-77.

Безопасность взрывных работ в газонасыщенных массивах угольных шахт

В монографии изложена идеология безопасного производства взрывных работ в газонасыщенных массивах глубоких угольных шахт, опасных по газу, внезапным выбросам и взрывам угольной пыли. В основу идеологии положены научные основы безопасности применения в угольных шахтах предохранительных взрывчатых веществ (ВВ), устойчивых к выгоранию в шпуровых зарядах. Даны обстоятельный обзор развития предохранительных ВВ для угольных шахт и основы теории антигризутности применения предохранительных ВВ в особо опасных условиях угольных шахт. Приведены результаты анализа состояния техники безопасности при производстве взрывных работ в угольных шахтах, опасных по газу и взрывам угольной пыли. Исследованы условия применения предохранительных ВВ при взрывных работах и факторы, определяющие антигризутность их зарядов. Дано обоснование ингибирующего действия на МВС солей, входящих в состав предохранительных ВВ. Предложены новая концепция безопасности ведения взрывных работ в шахтах при разрушении газонасыщенных горных массивов и способы модернизации предохранительных ВВ и безопасного производства взрывных работ. Данная монография послужит полезным и ценным пособием для работников угольных шахт.



Станислав Калякин

Родился 27 декабря 1953 года в г. Степняк, республика Казахстан. Горный инженер, закончил в 1979 году Донецкий политехнический институт. Доктор технических наук, профессор кафедры строительства шахт и подземных сооружений Донецкого национального технического университета. Живет в г. Макеевка Донецкой обл., Украина. Женат, имеет дочь.



978-3-8473-9111-1