

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
УРАЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ГОРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

*На правах рукописи*



**СЕЛИН Иван Юрьевич**

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ВЗРЫВНЫХ РАБОТ  
ПРИ ПОДЗЕМНОЙ ДОБЫЧЕ ПУТЕМ ОБЕСПЕЧЕНИЯ  
СТОЙКОСТИ ГАЗОПОРОВОЙ СЕНСИБИЛИЗАЦИИ  
ЭМУЛЬСИОННЫХ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ К  
ДИНАМИЧЕСКИМ ВОЗДЕЙСТВИЯМ**

Специальность 2.8.8 – Геотехнология, горные машины

Научный руководитель

доктор технических наук, доцент

**ЖАБКО Андрей Викторович**

Диссертация на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Екатеринбург 2026

## Содержание

Введение.....	4
<b>Глава I. Анализ данных о динамическом воздействии опережающих взрывов на детонационные способности скважинных зарядов эмульсионных взрывчатых веществ, сенсibilизированных пузырьками газа. ....</b>	<b>10</b>
1.1. Эмульсионные взрывчатые вещества (ЭВВ). Испытания ЭВВ на стойкость к внешним воздействиям.....	10
1.1.1. Эмульсионные взрывчатые вещества (ЭВВ).....	10
1.1.2. Эмульсионные взрывчатые вещества для добычи сульфидных руд.....	13
1.1.3. Испытания ЭВВ на стойкость к внешним воздействиям.....	15
1.2. Анализ экспериментальных данных о влиянии волны напряжений, вызванной опережающими взрывами скважинных (шпуровых) зарядов, на снижении детонационных способностей зарядов ЭВВ, сенсibilизированных пузырьками газа.....	17
1.3. Анализ теоретических представлений о снижении детонационных способностей ЭВВ, сенсibilизированных пузырьками газа, под действием волны напряжений от опережающих взрывов скважинных (шпуровых) зарядов.....	20
Постановка задачи исследования.....	23
<b>Глава II. Воздействия волны напряжений от опережающих взрывов на детонационные способности скважинных зарядов ЭВВ, сенсibilизированных пузырьками газа.....</b>	<b>27</b>
2.1. Физико-математическая модель воздействия волны напряжений от опережающего взрыва скважинного заряда на детонационные способности расположенных в смежном заряде ЭВВ, сенсibilизированных пузырьками газа.....	27
2.2. Скорость смещения среды при взрыве шпурового (скважинного) заряда.....	38
2.3. Оценка сохранения детонационных способностей ЭВВ с пероксидной газификацией при внешнем воздействии опережающего взрыва шпурового заряда.....	47

2.3.1. Влияние физико-механических свойств горных пород и плотности заряда ЭВВ.....	48
2.3.2. Влияние расстояния между шпуровыми зарядами .....	57
2.3.3. Влияние вязкости ЭВВ.....	61
Выводы по главе II .....	63
<b>Глава III. Экспериментальная оценка возможности применения ЭВВ с пероксидной газогенерацией при массовой отбойке руд веерными зарядами .....</b>	<b>66</b>
3.1. Действие веерного заряда .....	67
3.2. Обоснование параметров моделирования действия взрыва веерного заряда на смежный веерный заряд.....	76
3.3. Методика оценки воздействия взрыва веерного заряда на детонационную способность смежного веерного заряда.....	80
Выводы по главе III.....	84
<b>Глава IV. Технологии взрывных работ с применением ЭВВ с пероксидной газогенерацией, устойчивой к внешним динамическим нагрузкам .....</b>	<b>86</b>
4.1. Обоснование выбора ЭВВ «Аргунит РХ» для ведения взрывных работ на Яковлевском ГОКе .....	86
4.2. Обоснование выбора оборудования для производства зарядных работ при формировании шпуровых и скважинных зарядов .....	88
4.3. Техничко-экономическая оценка эффективности применения разработанной технологии формирования скважинных и шпуровых зарядов ЭВВ, устойчивых по отношению к внешним динамическим нагрузкам.....	102
Выводы по главе IV.....	108
<b>Заключение.....</b>	<b>111</b>
<b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....</b>	<b>114</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЯ.....</b>	<b>131</b>

## **ВВЕДЕНИЕ**

### **Актуальность работы.**

В настоящее время на подземных рудниках страны расширяется применение бестарных эмульсионных взрывчатых веществ (ЭВВ) с химической газогенерацией. Этому способствуют как доступная цена и высокие потребительские свойства данных ЭВВ, так и разработанные технические средства заряжания скважин (шпуров) в подземных условиях.

При химической газогенерации эмульсии в ее объем при зарядании вводятся газогенерирующие вещества, которые в результате реакции или при разложении выделяют газ, который в виде пузырьков распределяется по всему объёму эмульсии. Насыщенная пузырьками газа эмульсия приобретает взрывчатые свойства и является ЭВВ, сенсibiliзирoванным этими пузырьками. Применение данных ЭВВ обеспечивает не только высокий уровень безопасности, так как заряжаемая эмульсия приобретает свойства взрывчатого вещества будучи уже размещенной в скважине (шпуре), но и наименьшие экономические затраты на сенсibiliзацию эмульсии для придания ей взрывчатых свойств.

Условия подземной добычи полезных ископаемых вносят специфику в технологию взрывных работ, связанную с широким применением шпуровых зарядов при проходке выработок и веерных зарядов при отбойке руд, при которых расстояние между зарядами существенно меньше, чем между скважинными зарядами при открытых горных работах. Сближение зарядов ЭВВ приводит к значительному динамическому воздействию взрывов зарядов (групп зарядов) ВВ на еще не детонировавшие заряды в смежных скважинах (шпурах) и способно приводить к снижению в них скорости детонации, а в отдельных случаях и к потере ЭВВ детонационной способности.

Анализ работ, посвященных изучению динамических воздействий на заряды ЭВВ, показал, что в настоящее время, несмотря на несомненные успехи в изучении данного вопроса, при разработке технологии применения бестарных ЭВВ с химической газогенерацией при подземных работах возникают сложности, обусловленные недостаточно разработанными:

физико-математической моделями, описывающими влияние динамических воздействий со стороны ранее взорвавшихся зарядов на детонационные способности заряда ЭВВ, сенсibilизированного пузырьками газа, учитывающими не только плотность, но и вязкость ЭВВ;

воздействием взрыва веерного заряда на детонационную способность смежного веерного заряда бестарного ЭВВ, сенсibilизированного пузырьками газа, взрываемого с замедлением.

Значительные объемы сульфидных руд, являющихся важнейшими источниками никеля, кобальта, меди, цинка, свинца и других ценных металлов, добываются в России подземным способом. Безопасная технология добычи данных руд с применением бестарных ЭВВ важна и востребована горной промышленностью нашей страны. Анализ научно-технической литературы показал, что применение ЭВВ с пероксидной газогенерацией (в качестве газогенерирующего вещества используется пероксид водорода) способствует повышению безопасности взрывных работ в сульфидных рудах, так как для создания данных ЭВВ используется матричная эмульсия с  $pH > 6$ . Применение ЭВВ с нейтральной и слабощелочной реакцией способствует снижению активности взаимодействия ЭВВ с сульфидными рудами и повышает безопасность их применения.

Учитывая целесообразность применения ЭВВ с пероксидной газогенерацией на подземных горных работах при добыче сульфидных руд, необходимо обеспечить сохранение их способности к детонации при последовательном взрывании зарядов (групп зарядов), поэтому разработка технологии применения данных ЭВВ, при которой обеспечивается сохранность их детонационной способности при динамических воздействиях со стороны ранее взорвавшихся зарядов, является важной и актуальной научно-технической задачей.

**Цель работы:** совершенствование технологии взрывных работ в подземных условиях на основе применения бестарных ЭВВ с пероксидной газогенерацией, при которой заряды ЭВВ сохраняют детонационную способность при динамических воздействиях со стороны ранее взорвавшихся зарядов.

**Идея работы** заключается в управлении рецептурно-технологическими характеристиками ЭВВ и параметрами размещения зарядов ЭВВ в массиве горных пород для обеспечения их надежной детонации при динамических воздействиях со стороны ранее взорвавшихся зарядов.

**Объектом исследования** является технология взрывных работ на основе применения зарядов бестарных ЭВВ с пероксидной газогенерацией.

**Задачи исследования:**

разработка физико-математической модели влияния динамических воздействий со стороны ранее взорвавшихся зарядов на детонационную способность заряда ЭВВ, сенсibilизированного пузырьками газа, учитывающей как плотность и пористость, так и вязкость ЭВВ;

разработка методики экспериментальной оценки воздействия взрыва веерного заряда на детонационную способность смежного веерного заряда бестарного ЭВВ, сенсibilизированного пузырьками газа, взрываемого с замедлением;

разработка эффективной технологии взрывных работ в подземных условиях на основе применения бестарных ЭВВ с пероксидной газогенерацией, обеспечивающей сохранность детонационной способности зарядов ЭВВ при последовательном взрывании зарядов (групп зарядов).

**Методы исследования.** В работе использован комплексный метод исследования, включающий анализ и обобщение теоретических и экспериментальных данных о влиянии ударных воздействий на ухудшение детонационных способностей ЭВВ, аналитические исследования влияния

динамических воздействий на изменение параметров бестарных ЭВВ, находящихся в скважинах (шпурах) и сенсibilизированных пузырьками газа, теоретическое изучение особенностей ударного воздействия на массив при взрыве веерного заряда, полевые и опытно-промышленные исследования, технико-экономическая оценка результатов исследования.

**Научные положения, выносимые на защиту:**

сохранение детонационной способности зарядом ЭВВ, сенсibilизированного пузырьками газа, при динамическом воздействии на него со стороны ранее взорвавшихся зарядов зависит как от физико-механических свойств взрывааемых пород, условий взрывания, так от плотности и вязкости ЭВВ;

методика экспериментальной оценки воздействия взрыва веерного заряда на детонационную способность смежного веерного заряда бестарного ЭВВ, сенсibilизированного пузырьками газа, взрывааемого с замедлением;

технология взрывных работ в подземных условиях на основе применения бестарных ЭВВ с пероксидной газогенерацией и специальных средств механизации зарядных работ, при использовании которых обеспечивается сохранность детонационной способности зарядов ЭВВ при динамических воздействиях со стороны ранее взорвавшихся зарядов.

**Научная новизна работы:**

впервые установлено, что сохранение детонационной способности зарядом ЭВВ, сенсibilизированного пузырьками газа, при динамическом воздействии на него со стороны ранее взорвавшихся зарядов зависит не только от плотности и пористости ЭВВ, так и от их вязкости;

показано, что наблюдается существенная неравномерность в скоростях смещения среды в массиве пород при взрыве веерного заряда. Максимальная скорость смещения более, чем в 2,5 раза превышает ее минимальное значение;

разработан способ моделирования динамического воздействия

опережающего взрыва веерного заряда на смежный веер при помощи шпуровых зарядов.

**Практическая значимость работы:**

разработана технология взрывных работ в подземных условиях на основе применения бестарных ЭВВ с пероксидной газогенерацией, при которой обеспечивается сохранность их детонационной способности при последовательном взрывании зарядов (групп зарядов);

разработана методика экспериментальной проверки устойчивости ЭВВ к динамическим воздействиям со стороны ранее взорвавшихся зарядов.

**Достоверность научных положений, результатов и выводов** обеспечивается применением апробированных методов исследования, надежностью исходных данных, хорошей сходимостью результатов теоретических и экспериментальных исследований.

**Личный вклад автора** состоит в проведении аналитических и опытно-промышленных исследований, разработке методик проведения экспериментов, обработке результатов исследований, обобщении и технико-экономической оценке полученных результатов.

**Реализация работы** Результаты исследований использованы при ведении взрывных работ на ООО «Яковлевский ГОК».

**Апробация результатов работы.** Результаты исследований докладывались на XXV Международной научно-практической конференция АНО «НОИВ» по горному и взрывному делу (9-13 сентября 2024 г., Каспийск, Дагестан), на научно-производственном семинаре Ассоциации «Взрывники Урала» и ИГД УрО РАН по буровзрывным работам на базе ЕВРАЗ КГОК (15-16 октября 2024 г., Качканар, Свердловская обл.), на Научном Совете РАН по проблемам народнохозяйственного использования взрыва (г. Москва, 6 февраля 2025 г.), на Международном симпозиуме «Неделя горняка - 2025» (3-7 февраля 2025 г.,

Москва), на XIV Международной научно-технической конференции «Инновационные геотехнологии при разработке рудных и нерудных месторождений» (3-4 апреля 2025 г., Екатеринбург), на Международной научной конференции «Scientific research of the SCO countries: synergy and integration» (2 июля 2025 г., Пекин, КНР), на технических совещаниях по повышению эффективности взрывных работ на ООО «Яковлевский ГОК», ОАО «Высокогорский ГОК», АО «Комбинат КМАруда» и других горнодобывающих предприятиях.

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 6 работ, в том числе 3 работы в рецензируемых научных журналах и изданиях, включенных в «Перечень российских рецензируемых научных журналов, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук», включая 1 работу в научном издании категории К1 и 2 работы – в издании категории К2.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, 4 глав и заключения, изложенных на 133 страницах машинописного текста, содержит 32 рисунка, 31 таблицу, список литературы из 156 наименований и приложение.

Автор выражает искреннюю благодарность за ценные советы и научно-методическую помощь в процессе работы над диссертацией научному руководителю д.т.н., доц., Жабко А.В., а также д.т.н. Горинову С.А. и д.э.н. Вяткину Н.Л. за полезные обсуждения результатов исследований. Глубокая признательность специалистам ООО «РудХим» Клемичеву А.В. и Юрченко М.С., оказавшим содействие и помощь при проведении промышленных и полигонных экспериментов.

# **ГЛАВА I. АНАЛИЗ ДИНАМИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ОПЕРЕЖАЮЩИХ ВЗРЫВОВ НА ДЕТОНАЦИОННЫЕ СПОСОБНОСТИ СКВАЖИННЫХ ЗАРЯДОВ ЭМУЛЬСИОННЫХ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ, СЕНСИБИЛИЗИРОВАННЫХ ПУЗЫРЬКАМИ ГАЗА. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЯ**

## **1.1. Эмульсионные взрывчатые вещества (ЭВВ). Испытания ЭВВ на стойкость к внешним воздействиям**

Взрывные технологии играют важнейшую роль при добыче твердых полезных ископаемых, так как обеспечивают разрушение горных пород для осуществления их последующей выемки и переработки. Дешевизна химической энергии, выделяемой при взрыве взрывчатого вещества (ВВ), обуславливает безальтернативность данных технологий на ближайшие десятилетия. Среди современных промышленных взрывчатых веществ (ПВВ) необходимо выделить эмульсионные взрывчатые вещества (ЭВВ), которые благодаря своим высоким потребительским свойствам стали основой для взрывных работ при добыче твердых полезных ископаемых в России. Значительная часть данных ПВВ производится из доступного и недорогого сырья по достаточно простой технологии на местах их использования. Это делает ЭВВ одним из самых недорогих видов промышленных ВВ.

### **1.1.1. Эмульсионные взрывчатые вещества**

ЭВВ являются сенсibilизированной высококонцентрированной обратной эмульсией (эмульсией типа «вода в масле»), что обеспечивает их хорошую водостойкость [54, 97, 137-142, 147, 148].

Эмульсия ЭВВ состоит из окислительной, топливной фаз и, в ряде случаев, специальных добавок, улучшающих технологические свойства ЭВВ [54, 97]. При этом топливная фаза является дисперсионной средой эмульсии, а окислительная фаза – дисперсионной средой. Окислительная фаза представляет собой

высококонтрированный водный раствор аммиачной селитры (смеси аммиачной и натриевой, аммиачной и кальциевой селитр), а топливная фаза - жидкое углеводородное горючее с растворенным в нем поверхностно-активным веществом (эмульгатором). Эмульгаторы служат уменьшению величины межфазного поверхностного натяжения, что снижает поверхностную энергию раздела фаз и препятствует разрушению эмульсии [54, 97]. Величина массовая доли топливной фазы в составе эмульсии назначается из стремления обеспечить нулевой кислородный баланс эмульсии и выполнить технологические требования процесса эмульгирования к количеству дисперсионной среды.

Данная величина, в зависимости от химического состава окислительной фазы, обычно составляет 6-9 %.

Размер частиц окислительной фазы составляет несколько микрон, а толщина пленки топливной фазы – доли микрона [13, 54, 97].

Важным свойством эмульсия является приобретение ей детонационных свойств только в случае ее сенсбилизации [13, 27, 54, 68, 92, 94, 117, 119, 139]. Для сенсбилизации эмульсии в нее вводят включения, содействующие возникновению локальных областей сильного разогрева эмульсии («горячих точек») при инициировании и детонации ЭВВ [13, 27, 68, 92, 94, 119]. Без сенсбилизации эмульсии в ней невозможно возбудить детонацию даже под действием чрезвычайно больших ударно-волновых нагрузок [91, 92].

В качестве сенсбилизатора могут применяться индивидуальные твердые или растворимые в топливной фазе жидкие ВВ, пузырьки газа, микросферы из стекла или синтетического материала, вспученный порошкообразный перлит или гранулы высокопористых материалов, имеющих преимущественно закрытую пористость и др. [27, 54, 68, 83, 94, 112, 117, 122, 132, 143, 156].

Из возможных способов сенсбилизации эмульсии наибольшее распространение получили способы, связанные с организацией в эмульсии пузырьков газа. Данные способы экономичны и безопасны, так как эмульсия приобретает свойства ВВ, будучи уже помещенной в шпур (скважину) [54, 97].

Детонационные параметры ЭВВ также зависят от плотности [13, 27, 54, 68, 83, 92, 94, 111, 113, 115, 119, 126-128, 132-135, 144]. Управление плотностью ЭВВ осуществляется регулированием рецептурного состава эмульсии и величиной вводимого в эмульсию объема сенсibiliзирующего агента. При этом плотность ЭВВ не должна превышать определенной характерной величины, начиная с которой ЭВВ теряет детонационные свойства [34].

ЭВВ весьма безопасны и экологичны [26, 53-55, 97]:

матричная (несенсибилизированная) эмульсия имеет очень низкую чувствительность по отношению к механическим и тепловым воздействиям. Это позволило отнести ее по теплоустойчивости, чувствительности к сильному удару и нагреванию в ограниченном объеме к подклассу 5.1 класса 5, что делает ее пригодной к перевозке в специально оборудованных автомобилях (автоприцепах) по дорогам общего пользования без дорогостоящих специальных мероприятий, выполняемых при перевозке ВВ и ВМ (взрывчатых материалов);

при выполнении зарядных работ отсутствует пыление и электризация ЭВВ;

ЭВВ изготавливаются из нетоксичных и невзрывоопасных материалов;

ЭВВ характеризуются низкой газовой вредностью.

По консистенции ЭВВ, применяемые в горной промышленности, могут быть твердыми, пастообразными и льющимися в зависимости от их химического состава и типа эмульгатора [54, 97].

Консистенция ЭВВ определяет технологические схемы их производства и применения.

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

Бестарные ЭВВ производят как в стационарных пунктах, расположенных вблизи потребителей ЭВВ, так и в малогабаритных мобильных модулях вблизи указанных потребителей или с помощью специальных машин непосредственно на месте применения. Данные ЭВВ имеют текучую консистенцию, не упаковываются и, как правило, используются или сразу, или вскоре после их

получения. Водостойкость, способность дробить прочные горные породы, дешевизна, пригодность к механизированному заряданию в сочетании с высокой безопасностью применения обусловили широкое применение бестарных ЭВВ.

В настоящее время в РФ данные ЭВВ занимают более 88 % от всего объема потребляемых ЭВВ (или более 77 % от всего объема потребляемых ПВВ), при этом отмечается расширение рынка бестарных ЭВВ [1, 95].

### **1.1.2. Эмульсионные взрывчатые вещества для добычи сульфидных руд**

Сульфидные руды являются важнейшими источниками ценных металлов, играющих огромную роль в экономике России. Безопасная технология добычи данных руд безусловно важна и востребована горной промышленностью страны, поэтому представляет интерес детальное рассмотрение технологии взрывных работ в подземных условиях с применением бестарных ЭВВ.

В настоящее время в РФ в качестве бестарных ЭВВ, сенсibiliзированных пузырьками газа, для производства взрывных работ в подземных условиях используются как ЭВВ с химической газогенерации посредством применения нитрита натрия [54], так и ЭВВ с газогенерацией посредством использования пероксида водорода [58, 59].

Основным массовым компонентом ЭВВ служит аммиачная селитра (АС), что осложняет их применение в сульфидсодержащих горных породах, так как АС при определенных условиях способна вступать в экзотермическое взаимодействие с сульфидными минералами. Данное взаимодействие может вызвать критический разогрев ЭВВ, вызывающий его разложение по механизму теплового взрыва [16, 54, 59, 120, 145, 151].

Согласно [54], для эффективной газогенерации ЭВВ при использовании нитрита натрия необходимо понижать рН газогенерирующей добавки (ГГД) и использовать матричную эмульсию с  $\text{pH} < 4$ . Пониженная кислотность ЭВВ способствует повышению активности экзотермического взаимодействия ЭВВ с сульфидными рудами [48, 49, 54, 58, 59]. Это снижает уровень безопасности

взрывных работ из-за повышения опасности возникновения неконтролируемого взрыва ЭВВ. Во избежание данного явления в состав ЭВВ вводятся ингибиторы, замедляющие реакции взаимодействия аммиачной селитры, являющейся основным компонентом ЭВВ, с сульфидными рудами [16, 48, 76, 77]. Основным недостатком данного вида ЭВВ является то, что по мере нейтрализации ингибитором азотной кислоты и продуктов ее разложения, появляющихся в ходе химических реакций в системе «АС + сульфиды», происходит расходование данного ингибитора. Для повышения эффективности нейтрализации азотной кислоты необходимо увеличивать содержание ингибитора в ЭВВ, однако при введении ингибитора в количестве более 3 масс. % происходит снижение восприимчивости к инициированию и детонационной способности ЭВВ [54, 65], что осложняет выполнение взрывных работ и снижает их эффективность.

При использовании пероксида водорода для газогенерации ЭВВ, напротив, принимают меры для эффективной сенсibilизации к повышению рН ГГД и используют матричную эмульсию с окислительной фазой из аммиачной и кальциевой селитр [59, 71]. Повышение рН до 7,5 достигается введением в окислительную фазу небольшого количества оксида кальция [71, 73]. Это практически не сказывается на детонационных характеристиках ЭВВ, но эффективно снижает активность взаимодействия ЭВВ с сульфидными рудами и повышает уровень безопасности взрывных работ [49, 58, 59].

Примером практической реализации данного вида ЭВВ служит «Аргунит РХ», матричная эмульсия которого содержит (масс. %): нитрат аммония – 34,0-49,0; нитрат кальция – 30,0-38,0; эмульгатор «Аргунит РХ» – 7,5-9,3; оксид кальция – 0,3-1,5; вода – 13,5-16,5. Для ЭВВ выполняется условие (масс. %): матричная эмульсия – 98,5-99,5; газогенерирующая добавка (раствор пероксида водорода) – 0,5-1,5 [71]. Данное ЭВВ можно применять при механизированном зарядании, и оно обладает необходимыми свойствами для создания самоудерживающихся восходящих шпуровых и скважинных (диаметр до 105 мм) зарядов [79, 87].

Отмеченные свойства ЭВВ «Аргунит РХ» делает привлекательным его применение при подземной добыче руд, включая руды содержащих сульфиды металлов.

### **1.1.3. Испытания ЭВВ на стойкость к внешним воздействиям**

Длительный опыт производства, применения ВВ и многочисленные научные исследования их свойств показывают, что данные вещества чувствительны к механическим нагрузкам и тепловому воздействию [4, 30]. Во избежание опасных ситуаций разработаны как общие требования к ВВ [98, 103], так и обязательные методы оценки отдельных характерных параметров ВВ, связанных с их безопасным производством и использованием [17-24 и др.].

Анализ научно-технической литературы показал, что для ЭВВ характерна низкая чувствительность к тепловым и механическим воздействиям [44, 53-55]. Однако ЭВВ содержат в своем составе горючие компоненты и вещества, обладающие окислительными свойствами, поэтому данные ВВ могут при определенных условиях воспламениться и взрываться [53].

ЭВВ подвергают испытаниям по разным параметрам: измерению плотности для оценки качества сенсбилизации, проверке полноты детонации, оценке бризантности, испытаниям на чувствительность к удару и трению, взрыву капсуля-детонатора, прострелу пулями или быстро движущимися телами, измерению скорости детонации [17-24, 28, 53-55]. Дополнительно матричную эмульсию проверяют на термостойкость, водостойкость, морозоустойчивость, а также измеряют вязкость и удельную электропроводность [24, 54, 55]. Удельную электропроводность измеряют для оценки стабильности эмульсии во времени, при этом возможно также испытание эмульсии температурным циклованием [54]. Испытания проводят в лабораторных и полигонных условиях.

Кроме этого, для возможности перевозки матричной эмульсии по дорогам общего пользования осуществляют испытания матричной эмульсии по методике ООН на предмет ее соответствия группе «эмульсии, суспензия или гель нитрата

аммония, используемые в качестве промежуточного сырья при производстве бризантных взрывчатых веществ» [86].

Данные испытания позволяют осуществить классификацию матричной эмульсии, как вещества, удовлетворяющего требованиям подкласса 5.1 класса 5 ГОСТ 19433-88 «Грузы опасные. Классификация и маркировка» (аналогично классификации ДОПОГ) [33]. Принадлежность матричной эмульсии к подклассу 5.1 класса 5 делает ее пригодной к перевозке в специально оборудованных автомобилях (автоприцепах) по дорогам общего пользования без дорогостоящих специальных мероприятий, выполняемых при перевозке ВВ и ВМ (взрывчатых материалов) [80, 86].

Испытания матричной эмульсии по методике ООН состоят из четырех опытов, из которых один выполняется в лаборатории, а три последующих – на полигоне. Лабораторный опыт – определение теплоустойчивости (тип опыта 8a). Полигонные опыты: а) передача детонации через зазор (тип опыта 8b); б) воздействие нагревания в ограниченном объеме (тип опыта 8c); определение пригодности к перевозке в цистерне (тип опыта 8d). Подробно методика опытов описана в работе [53, 86].

Анализ испытаний ЭВВ на стойкость к внешним воздействиям показывает, что они охватывают широкий круг параметров ЭВВ:

влияющих на обеспечение безопасности при производстве и транспортировке матричной эмульсии, на проверку качества газификации (измерение плотности отобранных проб эмульсии после введения газифицирующих добавок), на полноту детонации изготовленного ЭВВ и др. Однако при разработке методов оценки безопасного применения ЭВВ не отражено измерение структуры и плотности в восстающих (нисходящих) скважинных зарядов ЭВВ, sensibilizированных пузырьками газа, обусловленной изменением размеров пузырьков под действием статических и динамических нагрузок, которым может подвергаться заряд ЭВВ при нахождении в скважине. Между тем, структура ЭВВ существенно влияет на характер их детонации [13, 54, 94, 97, 122, 123] что необходимо учитывать при выполнении

взрывных работ для разрушения горных пород. Экспериментальные данные о влиянии внешних воздействий на детонационные способности скважинных зарядов ЭВВ, sensibilizированных пузырьками газа представлены в следующем параграфе.

## **1.2. Анализ экспериментальных данных о влиянии волны напряжений, вызванной опережающими взрывами скважинных (шпуровых) зарядов, на снижении детонационных способностей зарядов ЭВВ, sensibilizированных пузырьками газа**

Взрывные работы являются основным методом подготовки прочных пород к выемке в горнодобывающей промышленности и гражданском строительстве. При проведении взрывных работ важно не только максимально использовать энергию взрыва для совершения полезной работы, но и обеспечить надежность срабатывания заряда взрывчатого вещества. Действительно, ликвидация несработавшего заряда является очень опасной работой, выполнение которой также требует приостановки основных работ и дополнительных затрат, что негативно отражается на экономике производителя и безопасности взрывных работ. Как было сказано в п.1.1.1, ЭВВ получают взрывчатые свойства при sensibilизации матричной эмульсии путем создания в ней микроскопических пустот посредством смешения со стеклянными (пластиковыми) микросферами или насыщение ее пузырьками газа в заранее определенном объемном соотношении. Однако исследования показали, что заряд ЭВВ, подвергнутый предварительному сжатию статическим давлением в скважинах перед инициированием и(или) динамическим давлением при взрыве зарядов в соседних шпурах, может потерять свою чувствительность из-за повреждения стеклянных (пластиковых) микросфер или потери пузырьков газа [31, 32, 47, 50, 51, 135, 136, 150, 152-156].

Необходимо отметить, что ухудшение детонационных свойств ВВ вследствие переуплотнения, отмечается также при использовании штатных

порошкообразных ВВ. Установлено, что при одновременном взрывании смежных зарядов, наблюдается затухание детонации порошкообразных ВВ в шпуровых зарядах из-за переуплотнения ВВ, обусловленного его сжатием при деформации стенок шпуров, вызванной действием ранее взорвавшихся смежных зарядов [10, 61, 62, 67, 78, 85, 100].

Важным фактором, влияющим на устойчивость ЭВВ к предварительному сжатию, является их плотность. Исследования влияния плотности ЭВВ на эффективность их взрыва методом измерения скорости детонации (VOD) взрывчатых веществ в скважине показывает, что скорость детонации ЭВВ по мере возрастания плотности сначала также возрастает, достигает максимума, а затем быстро снижается, и при сильном уплотнении детонация обрывается [34, 54, 68, 83, 94, 97, 105, 113, 115, 127, 128].

В работе [146] изучалось влияние предварительного сжатия эмульсионных взрывчатых веществ на их детонационную способность посредством измерения скорости их детонации. Были рассмотрены три способа сенсбилизации: стеклянными микросферами, полимерными микросферами и пузырьками химического газа. Предварительное динамическое нагружение образцов ЭВВ осуществлялось в водном бассейне посредством взрыва в нем специального заряда. Детонационная способность изучалась при коротких интервалах инициирования с учётом взаимодействия между одинаковыми задержками, вызванными отклонением времени воспламенения электрических детонаторов. В результате было выявлено, что детонационная способность предварительно сжатых эмульсионных взрывчатых веществ была ниже, чем у несжатых эмульсионных взрывчатых веществ, при всех значениях давления.

Снижение детонационной способности в образцах взрывчатых веществ, сенсбилизированных стеклянными микросферами, было больше, чем снижение детонационной способности в образцах взрывчатых веществ, сенсбилизированных полимерными микросферами или химическими газовыми пузырьками.

Указанные факты в работе [146, 153] связывают с различной степенью уплотнения зарядов ЭВВ, имеющих различную сенсibiliзацию, при предварительном динамическом нагружении.

Согласно [150, 152-155] заряды ЭВВ, подвергшиеся предварительному сжатию, часто детонируют в низкоскоростном режиме или теряют способность к инициированию. При взрыве таких зарядов наблюдается значительное выделение бурого дыма и отмечается плохое разрушение пород. Наряду с этим наблюдается также снижение чувствительности ЭВВ к инициирующему импульсу [132, 133], что связывается с увеличением плотности ЭВВ.

В работах [50, 51] приведены экспериментальные данные о влиянии динамических нагрузок от взрыва зарядов ВВ на взрывчатые характеристики газифицированных эмульсионных взрывчатых веществ. Показано, что многократное воздействие взрыва детонирующего шнура на внешнюю стенку трубы с зарядом ВВ приводит к увеличению плотности заряда ВВ и существенному снижению его скорости детонации. Приведены примеры отказов зарядов в контурных шпурах при проходке горных выработок. Показано, что при снижении плотности ЭВВ увеличивается его стойкость к внешнему воздействию.

Исследование [153] показало, что устойчивость газированной эмульсии к предварительному сжатию зависит от коэффициента пористости (плотности) продукта. При этом отмечено, что ЭВВ не способны восстанавливаться после предварительного сжатия. Данный вывод подтверждается в работах [124, 136], где указывается, что представления о том, что эмульсия с газом способна восстанавливаться после предварительного сжатия и детонировать в течение нескольких миллисекунд после детонации, не подтверждается экспериментами, что может быть вызвано кристаллизацией в частицах окислительной фазы эмульсии, вызванной предварительным прессованием.

Анализ приведенных выше экспериментальных данных показывает, что опережающие взрывы шпуровых зарядов способны снижать детонационные способности зарядов эмульсионных взрывчатых веществ, размещенных в

смежных шпурах. Это выдвигает особые требования к применяемым ЭВВ и технологии ведения буровзрывных работ, которые обеспечивали:

с одной стороны, избежание аварийных ситуаций, обусловленных отказом зарядов;

с другой стороны, недопущения ухудшением показателей взрыва, связанных с возможным снижением детонационных способностей зарядов ЭВВ.

Для эффективного решения указанных вопросов предложены теоретические модели, описывающие влияние опережающих взрывов скважинных (шпуровых) зарядов, на снижении детонационных способностей заряда эмульсионных взрывчатых веществ. Анализ данных моделей представлен в следующем пункте.

### **1.3. Анализ теоретических представлений о снижении детонационных способностей ЭВВ, сенсibilизированных пузырьками газа, под действием волны напряжений от опережающих взрывов скважинных (шпуровых) зарядов**

Для описания воздействия опережающего взрыва смежных зарядов на детонационные способности заряда ЭВВ предложено несколько теоретических моделей.

Рассмотрим модель, основанную на обобщении экспериментальных данных по воздействию на шпуровые заряды из патронов порошкообразного ВВ со стороны ранее взорвавшихся смежных шпуровых зарядов, предложенную в работе [47]. Согласно данной модели основную опасность представляет критическое уплотнение ВВ из-за деформации стенок шпуров и(или) откольных явлений.

На основании обобщения экспериментальных данных исследований [10, 66, 85, 100] в работе [47] была предложена эмпирическая формула для определения величины критического давления, действующего на заряд при опережающем взрыве смежного заряда, при превышении которого рассматриваемый заряд теряет способность к детонации:

$$P_{uu} = 20,22 + 59,202m_3 - 52,736a_{uu} - 61,784m_3a_{uu}, \text{ МПа} \quad (1.1)$$

где  $m_3$  - масса заряда, кг;  $a_{uu}$  - расстояние между смежными шпурами, м.

Формула (1,1) получена в результате обобщения данных о взрывах шпуровых зарядов из патронов аммонита ПЖВ-20 в крепких углях (плотность угля –  $\rho_{\text{уголь}} = 1,3 \text{ г/см}^3$ , скорость продольных волн в угле -)  $C_{\text{уголь}} = 2400 \text{ м/с}$ .

В работе [47] в уравнение (1.1) введены поправочные коэффициенты, позволяющие с точки зрения авторов использовать полученное уточненное эмпирическое уравнение для других условий взрывания и для других ВВ:

$$P_{uu}^* = \left( \frac{\rho_{\text{уголь}} C_{\text{уголь}}}{\rho_n C_n} \right)^{0,774} \left( P_{uu} - 0,02237m_3 \left( \rho_{\text{ВВ}} Q_v \left( \frac{d_n}{d_{uu}} \right)^2 - 2646 \right) (1 + 1,043a_{uu}) \right), \text{ МПа} \quad (1.2)$$

Однако анализ эмпирических уравнений (1.1) и (1.2) показывает, что они имеют ограниченную область применения. Действительно, несложно показать, что (1.1) имеет физический смысл лишь при выполнении условия  $0,383 < a_{uu} < 0,958$  (м). При этом, в случае  $a_{uu} \rightarrow 0,958 \text{ м}$ , минимальная масса заряда, создающая положительное значение  $P_{uu}$  равно  $m_3 \approx \frac{0,188}{a_{uu} - 0,958} \rightarrow \infty$ . Последнее противоречит экспериментальным данным, характеризующим падение напряжения в среде при взрыве заряда [57, 84, 99, 101, 106, 107], что свидетельствует об ограниченности эмпирической модели [47].

В работах [50, 51] представлена модель, описывающая динамическое воздействие опережающих взрывов на скважинные (шпуровые) заряды ЭВВ, sensibilizированных пузырьками газа, основанная на энергетических закономерностях. Авторы исходили из того, что при падении волны напряжений на скважинный заряд происходит резкое смещение стенок скважины, что обуславливает инерционное сжатие ЭВВ, сопровождаемое уменьшением общего объема sensibilizированных пузырьков в заряде и увеличением плотности ЭВВ. При этом степень уменьшения общего объема пузырьков определяется из условия, что полученная эмульсией при резком смещении стенок скважины кинетическая энергия расходуется на адиабатическое сжатие газа в

сенсibiliзирующих пузырьках. Величина удельной кинетической энергии эмульсии, вовлеченной в движение смещением стенок скважины равна:

$$E_{кин} = \frac{1}{2} \rho_{эвв} v_{см}^2, \quad (1.3)$$

где  $v_{см}$  - скорость смещения стенок скважины, м/с;  $\rho_{эвв}$  - плотность ЭВВ, кг/м<sup>3</sup>.

Удельная работа сжатия пузырьков газа в эмульсии равна (Дж/м<sup>3</sup>):

$$E_{сж} = \frac{P_{z(0)}}{\gamma - 1} \left( \left( \frac{V_{z(0)}}{V_z} \right)^\gamma - \frac{V_{z(0)}}{V_z} \right), \quad (1.4)$$

где  $P_{z(0)}$  – начальное давление газа в пузырьках, Па;  $\gamma$  - коэффициент адиабаты газа в пузырьке ( $\gamma = 1,4$ );  $V_{z(0)}$ ,  $V_z$  – общий объём пузырьков в начальном состоянии и сжатых пузырьков, соответственно, м<sup>3</sup>.

Из условия  $E_{кин} = E_{сж}$  получено уравнение для определения степени сжатия пузырьков ( $V_{z(0)}/V_z$ ):

$$\left( \frac{V_{z(0)}}{V_z} \right)^\gamma - \frac{V_{z(0)}}{V_z} = \frac{\gamma - 1}{2} \cdot \frac{\rho_{эвв} v_{см}^2}{P_{z(0)}}. \quad (1.5)$$

Знание  $V_{z(0)}/V_z$  позволяет определить степень уплотнения динамически сжатого ЭВВ, сенсibiliзированного пузырьками газа.

Расчеты, выполненные авторами [50, 51], показали, что при достаточно близком расстоянии между зарядами действие опережающей динамической нагрузки от взрыва скважинного или шпурового заряда предыдущей ступени взрывания приводит к увеличению плотности заряда последующей ступени замедления. Последнее приводит к снижению скорости детонации, а в отдельных случаях и к их отказам за счет снижения количества горячих точек в заряде ВВ. Во избежание данных негативных последствий рекомендуется при зарядании скважин или шпуров уменьшать плотность заряда. При этом степень снижения начальной плотности зарядов зависит от условий взрывания и управляется

посредством регулирования количеством добавляемой в эмульсию газогенерирующей добавки [50].

Анализ представленной модели показывает, что она основывается на представлении, что полученная эмульсией кинетическая энергия равномерно передается всему объему заряда, а затем расходуется на адиабатическое сжатие газа в сенсibiliзирующих пузырьках. Однако это возможно, если время сжатия пузырька ( $\tau_{сж}$ ) существенно превосходит время сжатия заряда ( $t_{зар}$ ), т.е.  $\tau_{сж} \gg t_{зар}$ .

Согласно [36, 39]  $\tau_{сж} \sim 4\eta / P_*$ , где  $\eta$  – динамическая вязкость эмульсии, Па·с;  $P_*$  – характерное давление сжатия заряда ЭВВ, Па. Тогда при  $\eta \approx 10 - 100$  Па·с и  $P_{ш}^* \approx 10^7 - 10^8$  Па имеем  $\tau_{сж} \sim 10^{-6} - 10^{-5}$  с.

Время сжатия заряда в скважине равно  $t_{зар} \approx 2R_{скв} / C_{сж}$ , где  $R_{скв}$  – радиус скважины, м;  $C_{сж}$  – скорость распространения волны сжатия в эмульсии, содержащей пузырьки газа, м/с. Тогда при  $R_{скв} \approx 0,02 - 0,1$  м и  $C_{сж} \approx 50 - 100$  м/с [56] имеем  $t_{зар} \sim 10^{-4} - 10^{-3}$  с.

Таким образом,  $\tau_{сж} \ll t_{зар}$ . Следовательно, модель, предложенная в работах [59, 51] нуждается в уточнении, так как не учитывают волновой характер передачи энергии заряду ЭВВ при динамическом воздействии. Кроме этого, указанная модель не позволяет оценить влияние на сжатие газа в сенсibiliзирующих пузырьках такой технологически важной характеристики ЭВВ как вязкость эмульсии, которая априори должна влиять на процессы деформации пузырька.

Анализ работ, посвященных теоретическому описанию снижения детонационных способностей ЭВВ, сенсibiliзированных пузырьками газа, под действием волны напряжений от опережающих взрывов скважинных (шпуровых) зарядов, показывает, что требуются дополнительные исследования данного важного и актуального вопроса.

## Постановка задач исследования

В настоящее время основной объем взрывных работ при открытой добыче полезных ископаемых осуществляется с применением бестарных эмульсионных взрывчатых веществ (ЭВВ) [1, 95]. Это связано с высокими потребительскими свойствами данных ВВ, а также тем, что ЭВВ можно изготавливать на местах производства взрывных работ, что значительно снижает затраты на логистику и выполнение охранных мероприятий [35, 41, 54]. Однако еще недавно применение данного безопасного и экономичного ВВ при подземной добыче было ограниченным. Это объяснялось необходимостью разработки и производства:

малогабаритных средств механизации зарядных работ, способных работать в стесненных условиях;

ЭВВ, способных удерживаться в восстающих скважинах (шпурах) после выполнения зарядных работ.

Последнее требование связано с широким применением восстающих зарядов ВВ в подземных горных работах.

В настоящее время в связи с разработкой различных видов бестарных ЭВВ, способных удерживаться в восходящих скважинах (шпурах) после зарядки, а также малогабаритных средств их механизированного заряжения происходит распространение применения ЭВВ в подземной добыче [72, 87].

Однако для эффективного применения бестарных ЭВВ, наряду со средствами механизации зарядных работ и ЭВВ, способными удерживаться в восходящих скважинах (шпурах), требуется обеспечение условий надежной детонации зарядов.

Одним из негативных факторов, влияющим на надежность детонации ЭВВ, сенсibilизированных пузырьками газа, является ударное (динамическое) воздействие на заряд ЭВВ со стороны массива при его сотрясениях, вызванных опережающими взрывами смежных зарядов [47, 50, 51, 153, 154]. Анализ практики взрывных работ показал, что динамическое воздействие взрыва смежных является достаточно распространенной причиной отказов при взрывании зарядов ЭВВ.

Теоретическое изучение влияния динамического воздействия на ухудшение

детонационных способностей ЭВВ, сенсibilизированных пузырьками газов, показало, что при падении на скважину волны напряжений происходит резко смещение стенок скважины, где расположен заряд [50, 51].

Вопросы определения начальной скорости смещения среды при взрыве заряда (зарядов) рассматривался в многочисленных работах: для отдельных сосредоточенных и скважинных зарядов [3, 6, 57, 69, 84, 99, 106-108], а также систем скважинных и сосредоточенных зарядов при равномерном их распределении в пространстве [93, 101, 108]. Однако для веерного заряда с учетом неравномерности распределения заряда в плоскости веера данный вопрос не рассматривался.

Одновременно анализ работ, посвященных теоретическому описанию снижения детонационных способностей ЭВВ, сенсibilизированных пузырьками газа, под действием волны напряжений от опережающих взрывов скважинных (шпуровых) зарядов, показывает, что в настоящее время требуются существенные уточнения в аналитическом описании процесса. В существующих моделях не учитывается волновой характер передачи энергии заряду ЭВВ при динамическом воздействии, а также влияние таких технологически важных характеристик как вязкость эмульсии, размеры сенсibilизирующих пузырьков и физико-механические свойства горных пород, окружающих заряд.

Эти обстоятельства требуют получения физически обоснованных моделей описания влияния динамических воздействий на ЭВВ, сенсibilизированных пузырьками газа. Действительно, отсутствие данных решений затрудняет разработку технологии взрывных работ для подземных условий на основе применения бестарных ЭВВ, сенсibilизированных пузырьками газа, при которой заряды ЭВВ сохраняют способность к детонации при последовательном взрывании зарядов (групп зарядов). Разработка указанной технологии безусловно является важной и актуальной научно-технической задачей, так как ЭВВ, сенсibilизированные пузырьками газа, занимают в России более половины всего объема применяемых в промышленности ВВ.

Задачи настоящего исследования:

разработка физико-математической модели влияния динамических воздействий со стороны ранее взорвавшихся зарядов на детонационную способность заряда ЭВВ, сенсibilизированного пузырьками газа, учитывающей как плотность и пористость, так и вязкость ЭВВ;

разработка методики экспериментальной оценки воздействия взрыва веерного заряда на детонационную способность смежного веерного заряда бестарного ЭВВ, сенсibilизированного пузырьками газа, взрываемого с замедлением;

разработка технологии взрывных работ в подземных условиях на основе применения бестарных ЭВВ с пероксидной газогенерацией, обеспечивающей сохранность детонационной способности зарядов ЭВВ при последовательном взрывании зарядов (групп зарядов).

## ГЛАВА II. ВОЗДЕЙСТВИЕ ВОЛНЫ НАПРЯЖЕНИЙ ОТ ОПЕРЕЖАЮЩИХ ВЗРЫВОВ НА ДЕТОНАЦИОННЫЕ СПОСОБНОСТИ СКВАЖИННЫХ ЗАРЯДОВ ЭВВ, СЕНСИБИЛИЗИРОВАННЫХ ПУЗЫРЬКАМИ ГАЗА

### 2.1. Физико-математическая модель воздействия волны напряжений от опережающего взрыва скважинного заряда на детонационные способности расположенных в смежном заряде ЭВВ, сенсibiliзирoванных пузырьками газа

При взрыве скважинного (шпурового) заряда ВВ в безграничной среде выделяются следующие зоны деформации горных пород [6, 84, 101, 106, 107]:

зона разрушительных сдвиговых деформаций – область в непосредственной близости от заряда ( $\bar{r} = \frac{r}{R_{скв}} < 3 \div 5$ , где  $r$  – расстояние от оси заряда до рассматриваемой точки массива, м;  $R_{скв}$  – радиус скважины, м);

зона трещинообразования – область радиальных и кольцевых трещин, простирающаяся за зоной разрушительных сдвиговых деформаций на расстояние  $\bar{r} = 20 - 25$  для пород средней и высокой крепости и до  $\bar{r}=40$  для слабых пород;

средняя зона — область, простирающаяся за зоной трещинообразования на расстояние до  $\bar{r} = 80-100$ . В данной области под действием волны напряжений происходит ослабление горных пород без видимых нарушений;

дальняя зона — область упругих деформаций, следующая за средней зоной.

Практика горных работ показывает, что расстояние между последовательно взрываемыми скважинными (шпуровыми) зарядами обычно находятся в средней зоне,  $\bar{r}= 20-80$  [63].

В основу определения условий сохранения детонационной способности скважинным зарядом ЭВВ после динамического воздействия на него положены аналитические исследования, изложенные в работе [11, 12].

Положим, что на вертикальную скважину, расположенную в горной породе и заполненную ЭВВ, сенсibiliзирoванным пузырьками газа, падает ударная

волна, фронт которой параллелен оси скважины. Ударная волна в породе вызывается опережающим взрывом смежного скважинного заряда ЭВВ. Рассматриваемая скважина находится в средней зоне действия опережающего заряда, поэтому прорыв взрывных газов отсутствует. При падении ударной волны на скважинный заряд в ЭВВ заряда также возникает ударная волна, вызванная воздействием на него резко смещающихся стенок скважины. Оценим характерные параметры этой волны, учитывая, что длина ударной волны в породе существенно превосходит диаметр скважины [6, 84].

Проведем плоскость, пересекающую заряд и перпендикулярную оси скважины.

Рассмотрим сечение скважинного заряда в этой плоскости.

Время охвата рассматриваемого сечения скважины ударной волной, приходящей от ранее взорвавшегося смежного заряда ЭВВ, равно

$$\Delta t_{\text{охв}} = 2R_{\text{скв}} C_{\text{п}}^{-1}, \quad (2.1)$$

где  $C_{\text{п}}$  – продольная скорость звука в породе, м/с.

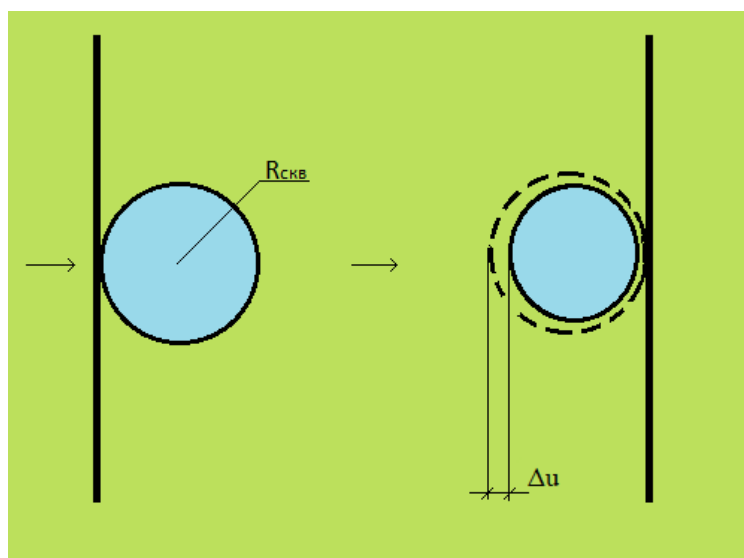


Рис. 2.1 Схема воздействия ударной волны на пузырек

Глубина проникновения ударной волны сжатия в глубь скважинного заряда ЭВВ за время  $\Delta t_{\text{охв}}$ , с, составит:

$$\delta = 2R_{\text{скв}} D_{\text{ЭВВ}} C_{\text{п}}^{-1}, \quad (2.2)$$

где  $D_{\text{ЭВВ}}$  – скорость ударной волны в ЭВВ, м/с.

Согласно [96], скорость ударной волны в ЭВВ равна:

$$D_{\text{эвв}} = \frac{C_{\text{э}}}{1 - \beta_0} \left( 1 + \frac{\beta_0}{1 - \beta_0} \cdot \frac{\rho_{\text{э}} C_{\text{э}}^2}{P_a} \cdot \frac{1 - \left( \frac{P_a}{P_{\text{э}}} \right)^{\frac{1}{\gamma}}}{\frac{P_{\text{э}}}{P_a} - 1} \right)^{-0.5}, \quad (2.3)$$

где  $C_{\text{э}}$  – скорость звука в эмульсии, м/с;  $\beta_0$  – начальная пористость ЭВВ;  $\rho_{\text{э}}$  – плотность эмульсии, кг/м<sup>3</sup>;  $P_a$  – начальное давление газа в пузырьке, Па;  $P_{\text{э}}$  – давление в ударной волне в ЭВВ, Па;  $\gamma$  – коэффициент адиабаты газа, содержащегося в пузырьке.

Относительная глубина проникновения ударной волны сжатия в глубь скважинного заряда ЭВВ за время охвата рассматриваемого сечения скважины волной напряжения составит  $\delta R_{\text{скв}}^{-1} = 2D_{\text{ЭВВ}} C_{\text{п}}^{-1}$ .

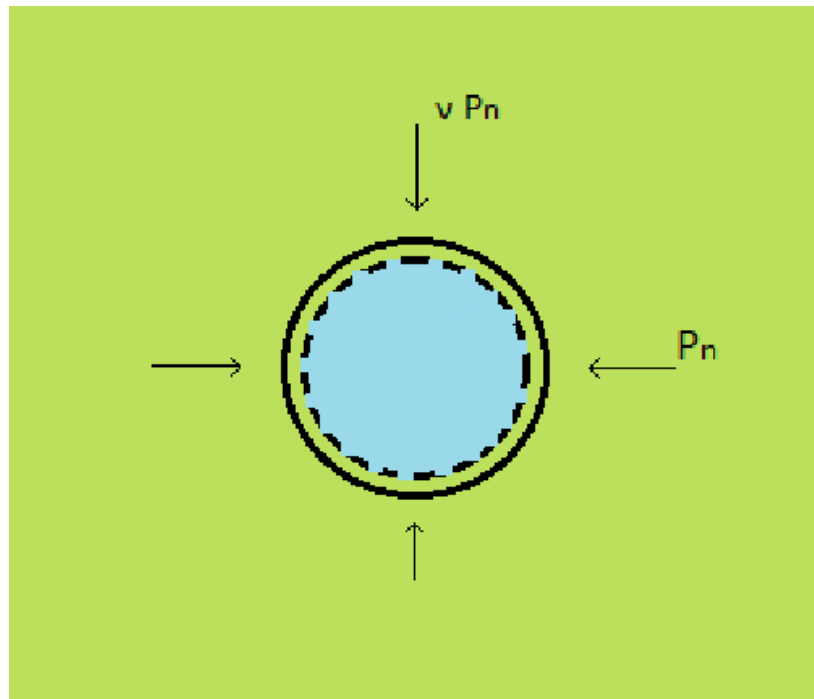


Рис. 2.2. Расчетная схема воздействия ударной волны на пузырек

Оценим величину  $\delta R_{\text{скв}}^{-1}$  для следующих характерных условий:  $C_3 = 1920$  м/с;  $C_{\text{п}} = 5000$  м/с;  $\rho_3 = 1330$  кг/м<sup>3</sup>;  $\beta_0 = 0,15$ ;  $P_3 = 3 \cdot 10^5$  Па;  $P_a = 10^5$  Па;  $\gamma = 1,4$ .

Имеем  $\delta R_{\text{скв}}^{-1} \approx 0,02 \ll 1$ . Таким образом, можно считать, что скважина с ЭВВ подвергается действию мгновенно приложенной всесторонней нагрузки.

Введем обозначения:  $\mu$  – коэффициент Пуассона породы;  $E$  – модуль упругости породы, Па;  $P_{\text{п}}$  – фронтальное напряжение в ударной волне в породе, Па. Тогда, полагая, что порода находится в плосконапряженном состоянии, величину радиального смещения стенок скважины при динамическом нагружении можно определить по формуле [42, 43]:

$$\Delta u = 2(1 + \mu)P_{\text{п}}R_{\text{скв}}E^{-1}(1 - P_3P_{\text{п}}^{-1}) . \quad (2.4)$$

Учитывая, что для ударных волн справедливы уравнения:  $P_{\text{п}} = \rho_{\text{п}}C_{\text{п}}v$  и  $P_3 = \rho_3(1 - \beta_0)D_3v$  где  $v$  – скорость породы за фронтом ударной волны, на основании (2.4) получаем

$$\Delta u = 2(1 - \mu)vR_{\text{скв}}((1 - 2\mu)C_{\text{п}})^{-1}(1 - \rho_3(1 - \beta_0)D_{\text{ЭВВ}}(\rho_{\text{п}}C_{\text{п}})^{-1}) \quad (2.5)$$

Длина ударной волны, распространяющаяся в ЭВВ, равна

$$\lambda = D_{\text{ЭВВ}}\Delta\tau = 2\Delta uD_{\text{ЭВВ}}v^{-1} \quad (2.6)$$

Оценим величину длины волны для характерных условий  $\mu = 0,3$ ;  $D_{\text{ЭВВ}}$  – скорость звука в ЭВВ ( $D_{\text{ЭВВ}} = 40$  м/с);  $C_{\text{п}} = 5000$  м/с;  $\rho_3 = 1330$  кг/м<sup>3</sup>;  $\rho_{\text{сп}} = 2800$  кг/м<sup>3</sup>;  $\beta_0 = 0,15$ . Имеем  $\lambda \approx 0,06R_{\text{скв}}$ . Тогда при  $0,02 \text{ м} \leq R_{\text{скв}} \leq 0,15 \text{ м}$  длина сходящейся волны составляет 1–8 мм, что значительно превосходит размеры пузырьков, в среднем равные 0,1 мм и меньше. Это обстоятельство позволяет считать, что пузырек сжимается длинноволновым импульсом давления, создаваемым в ЭВВ цилиндрической сходящейся волной (рис. 2.3). Под действием этой ударной волны происходят изменения размеров и количества

пузырьков, воспринимающих инициирующий импульс, что находит отражение в снижении детонационных способностей ЭВВ.

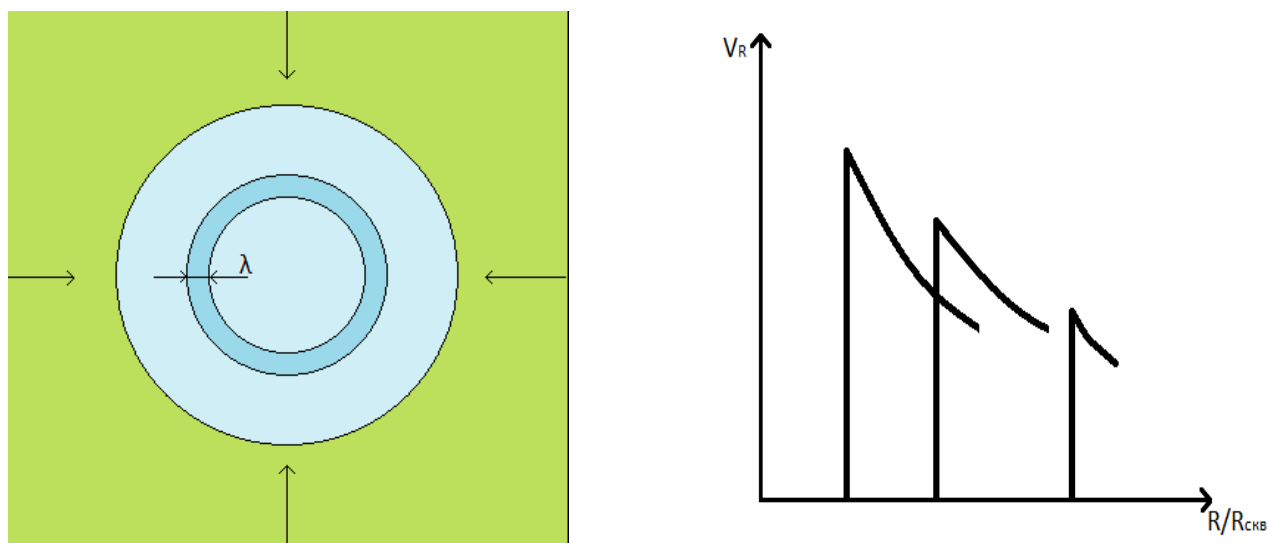


Рис. 2.3. Сходящаяся цилиндрическая ударная волна в скважинном заряде ЭВВ

Под действием сильной ударной волны возможна реализация различных сценариев поведения газовых пузырьков [8, 9, 25, 29, 36-40, 70, 75, 116, 129, 130, 149], сенсibiliзирующих ЭВВ, а именно, пузырьков:

сливаются между собой [8, 75];

разбиваются на мелкие пузырьки [29, 110, 116, 149];

схлопываются в режиме гидродинамического течения эмульсии при заполнении пузырька [36-40];

частично заполняются в режиме пластического течения эмульсии при заполнении пузырька [25, 36-40].

**Сценарии поведения пузырьков**, реализующиеся при распространении ударной волны в заряде ЭВВ.

#### **Слияние пузырьков.**

На основании [8, 75], для слияния пузырьков необходимо одновременное выполнение следующих условий:

$$\rho_3 a_0 v \eta^{-1} > 15 \text{ и } \rho_3 a_0 \sigma_* \eta^{-2} > 10^4 \quad (2.7)$$

где  $a_0$  – начальный радиус пузырька;  $v_n$  – скорость сближения пузырьков, м/с;  $\eta$  – коэффициент динамической вязкости эмульсии, Па·с;  $\sigma_*$  – поверхностное натяжение жидкости, Н/м.

Рассмотрим выполнение второго неравенства из условия (2.4) при характерных значениях параметров:  $\rho_3 = 1330 \text{ кг/м}^3$ ,  $\eta = 5 \text{ Па}\cdot\text{с}$ ,  $\sigma_* = 0,03 \text{ Н/м}$ ,  $a_0 = 40 \text{ мкм}$ . Имеем  $\rho_3 a_0 \sigma_* \eta^{-2} \approx 5 \cdot 10^{-5} \ll 10^4$ . Таким образом, высокая вязкость эмульсии препятствует слиянию пузырьков под действием внешних воздействий.

### **Разбитие пузырьков ударной волной.**

Дробление газовых пузырьков за ударной волной в газожидкостной среде обусловлено неустойчивостью Кельвина–Гельмгольца, связанной с потерей возможности поверхностным натяжением стабилизировать волны сдвига на границе раздела сред. Такая неустойчивость развивается, если число Вебера  $We = 8a_0 \rho_g v^2 \sigma_*^{-1}$  превысит некоторое критериальное значение [110], где  $\rho_g$  – начальная плотность газа в пузырьке, кг/м<sup>3</sup>.

Разбитие пузырьков на множество мелких происходит в случае, если число Вебера удовлетворяет условию  $We > 2\chi\pi$  где  $\chi$  – эмпирический коэффициент. Для оценочных расчетов в [110] рекомендуется считать, что  $\chi \approx 2$ . В этом случае величина скорости породы за фронтом ударной волны, падающей на заряд ЭВВ, должна удовлетворять условию  $v > \sqrt{\pi\sigma_*(2\rho_g a_0)^{-1}}$ .

Фронтальное давление в этой ударной волне в породе будет соответствовать неравенству:  $P_n > P_{n*} = \rho_n C_n v = \rho_n C_n \sqrt{\pi\sigma_*(2\rho_g a_0)^{-1}}$ .

Величина  $P_{n*}$  при характерных значениях параметров  $\rho_n = 2800 \text{ кг/м}^3$ ,  $C_n = 5000 \text{ м/с}$ ,  $\rho_g = 1,3 \text{ кг/м}^3$ ,  $\sigma_* = 0,03 \text{ Н/м}$ ,  $a_0 = 40 \text{ мкм}$  должна соответствовать условию  $P_{n*} > 420 \text{ Мпа}$ .

При характерном для ЭВВ детонационным давлении  $P_{дет} \approx 8$  ГПа [13, 54, 68] давление в фронте ударной волны в породе, равное  $P_{п*}$ , достигается на расстоянии  $(12-16)R_{скв}$  [6, 57, 99, 107].

Таким образом, режим разбития пузырьков ударной волной на множество мелких пузырьков, что делает невозможным инициирование ЭВВ [13, 95], может возникать только в случае близкого расположения рассматриваемых зарядов. Для представляющих практический интерес расстояний между зарядами, равных  $(30-70)R_{скв}$ , пассивации ЭВВ вследствие разбития пузырьков ударной волной не происходит ввиду низких скоростей смещения горных пород, окружающих заряд ЭВВ.

#### **Схлопывание пузырьков в гидродинамическом режиме.**

Согласно [36-40], схлопывание пузырьков в ЭВВ под действием ударной волны происходит в гидродинамическом режиме при выполнении условия Забабахина:

$$a_0 > 8,4\eta(\rho_s P_s)^{-0,5}. \quad (2.8)$$

На основании (2.5) определяем ограничение на давление в ударной волне:

$$P_s > 70,56\eta^2(\rho_s a_0^2)^{-1}. \quad (2.9)$$

При характерных значениях входящих в (2.6) параметров  $\rho_s = 1330$  кг/м<sup>3</sup>,  $\eta = 5$  Па·с,  $a_0 = 40$  мкм, имеем следующее условие –  $P_s > 830$  МПа.

Согласно приведенным ранее сведениям, такое давление в ударной волне, распространяющейся в ЭВВ, возможно лишь при сближении зарядов на расстояние менее  $(6-8)R_{скв}$ . Для представляющих практический интерес расстояний между зарядами, равных  $(30-70)R_{скв}$ , схлопывание пузырьков в ЭВВ под действием ударной волны, возбужденной в ЭВВ, в гидродинамическом режиме не происходит вследствие низкого давления в этой волне.

## Схлопывание пузырьков в ЭВВ под действием ударной волны в режиме пластического затекания эмульсии в пузырек.

В соответствии с [36-40], режим пластического затекания эмульсии в пузырек реализуется при выполнении условия  $a_0 < 8,4\eta(\rho_s P_s)^{-0.5}$ . При его выполнении возможна реализация двух путей заполнения пузырька:

пузырек заполнится эмульсией полностью [36-39] – в таком случае ЭВВ потеряет способность к детонационному разложению [13];

пузырек заполнится частично [25, 36-40] – в этом случае, в зависимости от степени заполнения пузырька, возникает возможность сохранения у ЭВВ, подвергнувшегося ударному воздействию, способности к детонации.

Последний случай представляет наибольший практический интерес.

При выполнении оценочных расчетов полагаем, что в режиме пластического затекания эмульсии в пузырьки затухание волн на поверхности пузырька из-за вязкости и поверхностного натяжения содействует тому, что его форма стремится к идеальной сфере [39].

Необходимо отметить, что под действием гидростатического давления с увеличением глубины расположения пузырька в заряде его размеры уменьшаются. В работе [14] показано, что при расположении пузырька в скважинном заряде ЭВВ на глубине  $h$  от верхней поверхности заряда его начальный радиус  $a_0$  изменится и станет равным  $a_{0h}$ :

$$a_{0h} = a_0 \left[ (1 - z_h \beta_0) z_h^{-1} (1 - \beta_0)^{-1} \right]^{\frac{1}{3}}, \quad (2.10)$$

где  $z_h$  – корень уравнения  $z_h^{-1} + \beta_0 \ln \left[ (1 - z_h \beta_0) z_h^{-1} (1 - \beta_0)^{-1} \right] = 1 + \rho_s g h P_a^{-1}$ ,  $g$  – ускорение свободного падения,  $m/c^2$ .

Одновременно с глубиной происходит уменьшение пористости ЭВВ, которая, как легко показать, может быть найдена из уравнения

$$\beta_{0h} = \beta_0 \left[ \beta_0 + (1 - \beta_0) a_0^3 a_{0h}^{-3} \right]^{-1}, \quad (2.11)$$

где  $\beta_{0h}$  – начальная пористость ЭВВ на глубине  $h$ , м.

Оценим влияние динамического воздействия на изменение размеров пузырьков и пористости ЭВВ на глубине  $h$ . При этом учитываем, что при динамическом воздействии эмульсия, сенсбилизированная газовыми порами, не способна к упругому восстановлению после предварительного сжатия, что вызывается кристаллизацией в частицах окислительной фазы эмульсии, вызванной предварительным прессованием [124, 150].

При частичном заполнении пузырька эмульсией его размер на глубине  $h$  после динамического воздействия, характеризующегося удельным импульсом давления  $I_h$ , изменяется с  $a_{0h}$  на  $a_h$  и будет равен [25]

$$a_h = a_{0h} (1 - 0,119 I_h \eta^{-1})^2. \quad (2.12)$$

Вследствие того, что ЭВВ в заряде подвергается воздействию сходящей цилиндрической ударной волны, удельный импульс давления возрастает по мере приближения фронта волны к оси заряда. Согласно [40], в этом случае величина удельного импульса давления будет равной

$$I_h(R) = I_{0h} (R_{\text{СКВ}} R^{-1})^{0,5}, \quad (2.13)$$

где  $I_{0h}$  – удельный импульс давления на поверхности заряда, кг/(м·с);  $R$  – удаление фронта волны от оси заряда ( $R \leq R_{\text{СКВ}}$ ), м.

Величина удельного импульса на поверхности заряда равна

$$I_{0h} = \int_0^{\tau} \xi P_h dt = \int_0^{\tau} \xi \rho_3 (1 - \beta_{0h}) D_{\text{ЭВВ}}^{(h)} v dt \approx \xi \rho_3 (1 - \beta_{0h}) D_{\text{ЭВВ}}^{(h)} \Delta u, \quad (2.14)$$

где  $\tau$  – продолжительность импульса сжатия, с;  $\xi$  – коэффициент, учитывающий потери импульса на сжатие газа в пузырьке;  $D_{\text{ЭВВ}}^{(h)}$  – скорость ударной волны в ЭВВ на глубине  $h$ , м/с. В соответствие с (1), величина  $D_{\text{ЭВВ}}^{(h)}$  может быть определена численными методами из уравнения

$$D_{ЭВВ}^{(h)} = \frac{C_{\rho}}{1 - \beta_{oh}} \left[ 1 + \frac{(1 - \beta_{oh}) \rho_{\rho} C_{\rho}^2}{P_{ah}} \left[ 1 - \left( \frac{P_{ah}}{\rho_{\rho} (1 - \beta_o) D_{ЭВВ}^{(h)} \nu} \right) \left( \frac{\rho_{\rho} (1 - \beta_{oh}) D_{ЭВВ}^{(h)}}{P_{ah}} - 1 \right)^{-1} \right] \right]^{-0.5} \quad (2.15)$$

где  $\nu = P_n (\rho_n C_n)^{-1}$ ;  $P_{ah}$  – давление газа в пузырьке на глубине  $h$ , Па.

На основании (2.5), (2.12)–(2.14) имеем:

$$a_h(R) = a_{oh} (1 - 0,119 \xi \rho_{\rho} (1 - \beta_{oh}) D_{ЭВВ}^{(h)} \nu (1 - \mu) R_{ккс} (\eta C_n (1 - 2\mu))^{-1} (R_{ккс} R^{-1})^{0,5})^2, \quad (2.16)$$

где  $a_h(R)$  – радиус пузырька на глубине  $h$  на удалении  $R$  от оси заряда, м.

**Условия, которые должны выполняться для сохранения детонационной способности ЭВВ после динамического воздействия на него в случае замедленной релаксации.**

Для того, чтобы в пузырек, расположенный на глубине  $h$  заряда ЭВВ, эмульсия затекала в режиме пластического течения, необходимо выполнения условия  $a_{oh} < 8,4\eta(\rho_{\rho} P_{\rho})^{-0,5}$ .

Для того, чтобы пузырек на глубине  $h$  и на удалении  $R$  от оси заряда мог после иницирующего воздействия создать «горячую точку», необходимо, чтобы его схлопывание происходило в гидродинамическом режиме [13]. Для этого требуется выполнения условия  $a_h(R) > 8,4\eta(\rho_{\rho} P_{дет})^{-0,5}$ , где  $P_{дет}$  – начальное детонационное давление ( $\sim 8$ – $10$  ГПа).

Кроме условий, определяющих размеры пузырьков, необходимо учитывать существование минимального значения пористости ЭВВ  $\beta_{krit}$ , ниже которого детонация не происходит ввиду низкой плотности «горячих точек»,  $\beta_{krit} \approx 0,04$  [34].

Условие, что пористость ЭВВ после динамического воздействия будет не ниже минимальной, в соответствии с (2.11), запишется в виде:

$$a_h(R) > a_0 (\beta_{krit} \beta_0^{-1})^{\frac{1}{3}} \cdot [(1 - \beta_0)(1 - \beta_{krit})^{-1}]^{\frac{1}{3}} \approx 0,347 a_0 [\beta_0 (1 - \beta_0)^{-1}]^{\frac{1}{3}}. \quad (2.17)$$

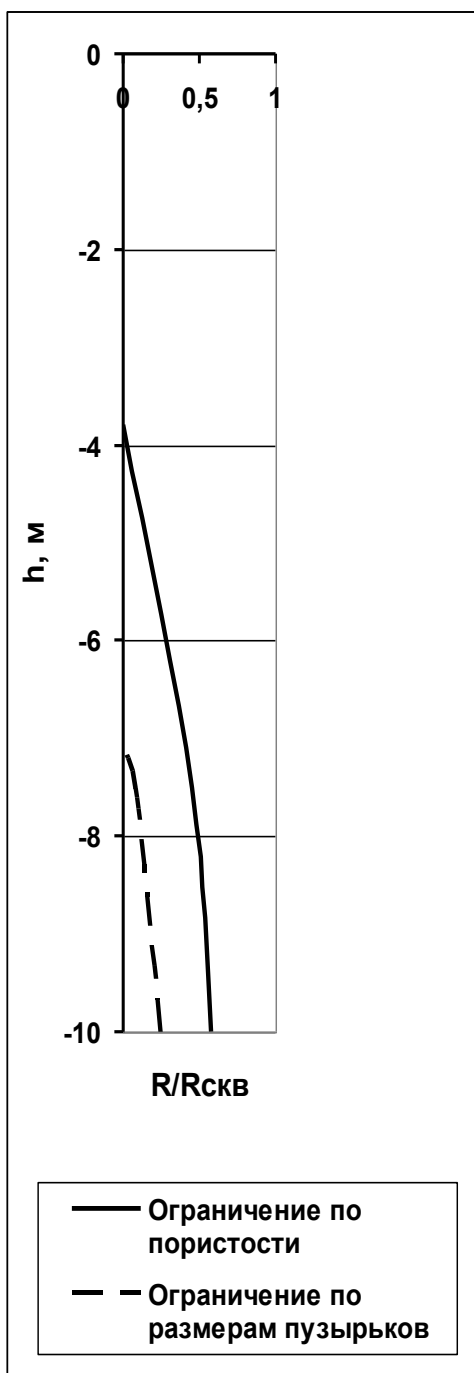
Таким образом, для сохранения детонационной способности ЭВВ после динамического воздействия на него размер пузырька на удалении  $R$  от оси заряда на глубине  $h$  должен удовлетворять как условию (2.17), так и условию:

$$8,4\eta(\rho_3 P_3)^{-0,5} > a_{0h} > 8,4\eta \left(1 - 0,119 \cdot I_{0h} \eta^{-1} (R_{\text{скв}} R^{-1})^{0,5}\right)^{-2} (\rho_3 P_{\text{дет}})^{-0,5}. \quad (2.18)$$

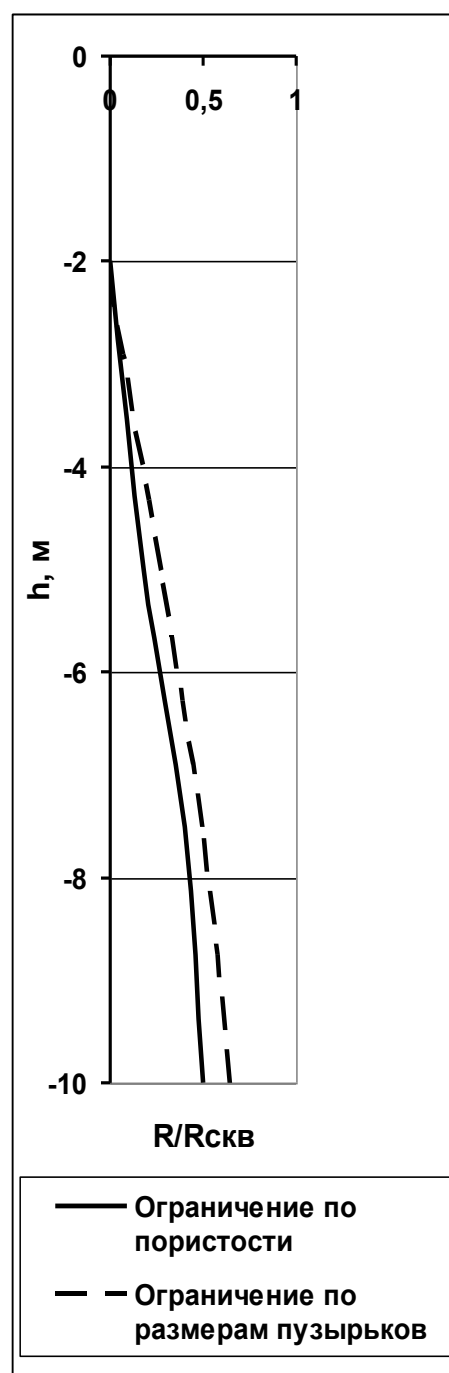
Соотношения (2.10), (2.11), (2.15)–(2.18) позволяют оценить влияние динамических воздействий на способность к детонационному разложению ЭВВ, сенсibilизированных пузырьками газа, и выработать технологические решения по обеспечению сохранения способности ЭВВ к детонации в этих условиях.

Для иллюстрации полученных результатов на рис. 2.3 представлено вертикальное сечение скважинного заряда ЭВВ с нанесением границ областей, в которых ЭВВ теряет восприимчивость к инициирующему импульсу или в связи со снижением общей пористости ниже допустимого уровня, или в связи с уменьшением размера пузырьков ниже критического. Ось ординат совмещена с осью заряда. Верх заряда принят за начало координат. Рис. 2.1 построен при следующих параметрах ЭВВ и окружающей среды:  $\rho_3 = 1330 \text{ кг/м}^3$ ;  $\beta_0 = 0,25$ ;  $C_3 = 1920 \text{ м/с}$ ;  $\eta = 5 \text{ Па}\cdot\text{с}$ ;  $R_{\text{скв}} = 0,1 \text{ м}$ ;  $\mu = 0,3$ ;  $\rho_{\text{п}} = 2800 \text{ кг/м}^3$ ;  $C_{\text{п}} = 5000 \text{ м/с}$ ;  $0 \leq h \leq 10 \text{ м}$ ;  $\zeta = 0,8$ ;  $P_{\text{п}} = 50 \text{ МПа}$ ;  $P_{\text{дет}} = 10 \text{ ГПа}$ . Области скважинного заряда ЭВВ, в которых ЭВВ потеряло восприимчивость к инициирующему импульсу, находятся между соответствующими кривыми и осью ординат.

Анализ рис. 2.4 показывает, что ЭВВ, сенсibilизированное пузырьками меньшего размера, более подвержено негативному воздействию внешних динамических воздействий, чем при сенсibilизации крупными.



а)



б)

Рис. 2.4. Вертикальные сечения скважинного заряда ЭВВ с нанесением границ областей, в которых ЭВВ теряет восприимчивость к инициирующему импульсу или в связи со снижением общей пористости ниже допустимого уровня, или в связи с уменьшением размера пузырьков ниже критического.

## 2.2. Скорость смещения среды при взрыве шпурового (скважинного) заряда

Анализ зависимостей (2.16), (2.18) показывает, что сохранение способности ЭВВ к детонации существенно зависит от максимальной скорости смещения пород вслед за фронтом волны напряжений от опережающего взрыва смежного заряда в месте нахождения скважины.

Известно, что данная скорость связана со значением максимального фронтального напряжения соотношением [4, 56, 57, 69, 101, 107]

$$\sigma(r) = \rho_n C_n v_r, \quad (2.19)$$

где  $v_r$  - скорость радиальных смещений, м/с.

Вопросу определения максимального фронтального напряжения (максимальной скорости смещения) в волне напряжений в средней зоне при взрыве скважинного (шпурового) заряда ВВ в горных породах посвящены экспериментальные и теоретические исследования различных авторов [3, 5-7, 46, 57, 60, 69, 101, 106, 107, 111].

В работах [106, 107] на основании экспериментальных исследований предложена следующая зависимость максимальной скорости смещения пород для удлиненного цилиндрического заряда ВВ

$$v_r(\bar{r}) = \frac{A_o}{(\bar{r})^\omega}, \quad (2.20)$$

где  $A_o$  - экспериментальный параметр, зависящий от вида ВВ и горной породы;  $\omega$  - экспериментальный параметр, характеризующий диссипацию и геометрическое расхождение энергии волны напряжений;  $\bar{r} = r/R_{св}$  - относительный радиус. В частности, при взрыве удлиненного заряда аммонита № 6 ЖВ в граните [107] в м/с -

$$v_r(\bar{r}) = \frac{4072}{(\bar{r})^{1.87}}, \quad (2.21)$$

а при взрыве удлиненного заряда зерногранулиты 50/50 в известняке в м/с -

$$v_r(\bar{r}) = \frac{2040}{(\bar{r})^{1.65}}. \quad (2.22)$$

В исследовании [111] предложено определять максимальное радиальное напряжение при взрыве цилиндрического заряда по формуле

$$\sigma_r(\bar{r}) = \frac{P_{cm}}{(\bar{r})^{1-\frac{\alpha}{2}}}, \quad (2.23)$$

где  $P_{cm}$  - давление продуктов взрыва на границе цилиндрической полости, Па;  
 $\alpha = \frac{\nu}{1-\nu}$  ( $\nu$  - коэффициент Пуассона горной породы).

На основании (2.19) и (2.23), имеем

$$v_r(\bar{r}) = \frac{P_{cm}}{\rho_n C_n (\bar{r})^{1-\frac{\alpha}{2}}}, \quad (2.24)$$

где  $\rho_n C_n$  - акустическая жесткость породы, окружающей заряд (кг/(с · м<sup>2</sup>)).

В работе [69] максимальное значение радиального напряжения в среде в при взрыве скважинного заряда представлено в виде

$$\sigma_r(\bar{r}) = \frac{2\rho_{BB} D_{DD} \rho_n C_n}{(k+1)(\rho_{BB} D_{BB} + \rho_n C_n)} \cdot \frac{1}{(\bar{r})^{2-\alpha}}, \quad (2.25)$$

где  $k$  - коэффициент политропы продуктов взрыва;  $\rho_{BB}$ ,  $D_{BB}$  - плотность и скорость детонации ВВ, соответственно.

Тогда в соответствии (2.19), (2.25), определяем

$$v_r(\bar{r}) = \frac{2D_{DD}}{(k+1)\left(1 + \frac{\rho_n C_n}{\rho_{BB} D_{BB}}\right)} \cdot \frac{1}{(\bar{r})^{2-\alpha}}. \quad (2.26)$$

В работе [5] максимальное радиальное напряжение предлагается определять по формуле

$$\sigma_r(\bar{r}) = \frac{P_{cm}}{(\bar{r})^{1.5}}, \quad (2.27)$$

где  $P_{cm} = \frac{\rho_{BB} D_{BB}^2}{2(k+1)} \cdot \left(\frac{r_{zap}}{R_{скв}}\right)^2$ . На основании (2.19) и (2.27)

$$v_r(\bar{r}) = \frac{D_{BB}}{2(k+1)} \cdot \frac{\rho_{BB} D_{BB}}{\rho_n C_n} \cdot \left(\frac{r_{zap}}{R_{скв}}\right)^2 \cdot \frac{1}{(\bar{r})^{1.5}}. \quad (2.28)$$

В аналитической работе [60] предложено определять радиальную скорость смещения при взрыве скважинного заряда по уравнению

$$v_r(\bar{r}) = \frac{D_{BB}}{k+1} \cdot \frac{\rho_{BB} D_{BB}}{\rho_n C_n} \cdot \frac{e^{-\mu_* r}}{(\bar{r})^{0.5}}, \quad (2.29)$$

где  $\mu_*$  - коэффициент поглощения энергии взрывной волны в среде. Однако значение параметра  $\mu$  в работе [60] не указано.

В работе [6] на основании обобщения экспериментов по взрыванию удлиненных зарядов тэна в горных породах предложено в средней зоне взрывного воздействия определять радиальную скорость смещения породы в м/с по формуле

$$v_r(\bar{r}) = \frac{545}{(\bar{r})^{1.1}} \cdot \left( \frac{\rho_{BB} Q_{BB}}{\rho_{эм} Q_{эм}} \right)^{0.55}, \quad (2.30)$$

где  $\rho_{эм}$ ,  $Q_{эм}$  - плотность и удельная теплота взрыва тэна, соответственно ( $\rho_{эм} = 1500$  кг/м<sup>3</sup>,  $Q_{эм} = 5400$  КДж/кг);  $Q_{BB}$  - удельная теплота взрыва рассматриваемого ВВ, КДж/кг.

В работах [3, 7, 46] максимальное радиальное напряжение определяется по формуле

$$\sigma_r(\bar{r}) = P_\phi \frac{\zeta^{1.1}}{(\bar{r})^{1.1}}, \quad (2.31)$$

где  $\zeta = \sqrt{1 - \varepsilon_{отн}}$ . Здесь  $\varepsilon_{отн}$  - относительная диссипация энергии взрыва. Согласно [3]  $\varepsilon_{отн} = -5,4 \cdot 10^{-3} P_\phi^{*2} + 0,14 P_\phi^* - 0,19$ ;  $P_\phi^* = P_\phi \cdot 10^{-9}$ , ГПа.  $P_\phi$  - начальное давление в породе на границе скважины, Па.

Для определения величины  $P_\phi$  предлагается использовать зависимость

$$P_\phi = 0,81 \frac{\rho_{BB} D_{BB}^2}{k+1} \left( \frac{\rho_n C_n}{\rho_{BB} D_{BB}} \right)^{0.29}, \quad (2.32)$$

где  $P_\phi = \frac{\rho_{BB} D_{BB}^2 (1 - \alpha_k \rho_{BB})}{k(1 - a_o \rho_{BB})}$  ( $\alpha_k$  - коэффциент взрывных газов, м<sup>3</sup>/кг;  $a_o$  - константа).

В соответствии с (2.19), (2.31), имеем

$$v_r(\bar{r}) = \frac{P_\phi}{\rho_n C_n} \cdot \frac{\zeta^{1.1}}{(\bar{r})^{1.1}}. \quad (2.33)$$

В работе [99] показывается, что подбором параметров  $\lambda$  и  $n$  ( $\lambda = 0,009 - 0,023$ ,  $n = 1,00 - 1,23$ ) максимальное радиальное напряжение можно представить в виде

$$\sigma_r(\bar{r}) = P_{cm} \cdot \frac{e^{-\lambda \bar{r}}}{(\bar{r})^n}. \quad (2.34)$$

Радиальная скорость смещения находится из (2.34) на основании (2.19):

$$v_r(\bar{r}) = \frac{P_{cm}}{\rho_n C_n} \cdot \frac{e^{-\lambda \bar{r}}}{(\bar{r})^n}. \quad (2.35)$$

В работе [57] на основании обобщения собственных экспериментальных данных и результатов работы [99] в диапазоне акустической жесткости породы -  $8 \cdot 10^6 \leq \rho_n C_n \leq 18 \cdot 10^6$ , кг/(с·м<sup>2</sup>) и при удалении от оси заряда на расстояние -  $5 \leq \bar{r} \leq 80$  предложено следующее аппроксимационное уравнение для определения радиальной скорости смещения породы в м/с при взрыве скважинного заряда ВВ

$$v_r(r) = \frac{1}{\rho_n C_n} \left( 7969,682 \cdot 10^5 - 0,0154 \cdot \frac{\rho_{BB} D_{BB}^2}{1 + \frac{\rho_{BB} D_{BB}}{\rho_n C_n}} \right) \cdot \exp\left(-\left(0,06302 - 0,125214 \cdot 10^{-8} \rho_n C_n\right) \bar{r}\right). \quad (2.36)$$

В работе [101] предложено рассчитывать радиальную скорость смещения пород при взрыве скважинного заряда ВВ с учетом влияния трещиноватости массива:

а) для открытых горных работ

$$v_r(\bar{r}) = \frac{D_{BB}}{4} \cdot \frac{\sqrt{\pi} \rho_{BB}}{\rho_n} \cdot \frac{1 - k_{mp} \frac{v}{1-v}}{\bar{r}} - \frac{k_{mp} P_{z.d.} \Phi^{0.5}}{\rho_n C_n}; \quad (2.37)$$

б) для подземных горных работ

$$v_r(\bar{r}) = \frac{D_{BB}}{4} \cdot \frac{\sqrt{\pi} \rho_{BB}}{\rho_n \Phi^{0.5}} \cdot \frac{1 - k_{mp} \frac{\nu}{1 - \nu}}{\bar{r}} - \frac{k_{mp} P_{z.d.} \Phi^{0.5}}{\rho_n C_n}, \quad (2.38)$$

где  $k_{mp}$  - коэффициент трения по граням отдельностей (табл. 2.1),  $P_{z.d.}$ , Па - горное давление,  $\Phi$  - показатель трещиноватости массива (табл. 2.2).

Табл. 2.1. Значения коэффициента трения от характера поверхности трещин и коэффициента крепости [101]

Наименование пород	Крепость пород по М.М. Протодяконову	Коэффициент трения ( $k_{mp}$ )	
		Поверхности трещин неровные, шероховатые	Поверхности трещин ровные, гладкие
Порфириты, роговики, джеспилиты, крепкие песчаники	16-20	0,53-0,6	0,35-0,49
Вторичные кварциты, гранодиориты, кварцевые порфиры, скарнированные породы, сиениты, диориты	12-18	0,47-0,53	0,3-0,36
Известняки, метаморфические сланцы, магнетиты	8-12	0,4-0,51	0,29-0,34
Глинистые сланцы, аргиллиты	6-8	0,42-0,49	0,27-0,32
Филлиты, талько-хлоритовые и серицитовые сланцы	4-8	0,42-0,47	0,16-0,21
Любые породы с трещинами, заполненными рыхлым или глинистым материалом, зеркала скольжения	-	0,17-0,21	0,17-0,21

Табл. 2.2. Величина показателя трещиноватости (деформируемости) массива по данным [101]

Категория трещиноватости	Средний размер отдельности, м	Число систем трещин	Показатель трещиноватости, $\Phi$
I	<0,05	>5	>12
II	0,05-0,15	5-4	12-10
III	0,15-0,40	4-3	10-8
IV	0.40-1,0	3	8-6
V	>1,0	3-2	6<

Для обоснованного выбора методики аналитического определения скорости смещения горной породы от относительного радиуса удаления от оси скважинного заряда на рис. 2.5 и рис. 2.6 приведены как экспериментальные зависимости скорости смещения породы при взрыве аммонита 6ЖВ в граните и зерногранулит 50/50 в известняке ([107]), так и расчетные зависимости, построенные на основании представленных выше методик.

В качестве параметров, характеризующих свойства ВВ и пород, принимались следующие значения:

для ВВ – аммонит 6 ЖВ ( $\rho_{ВВ} = 1000 \text{ кг/м}^3$ ,  $D_{ВВ} = 4200 \text{ м/с}$ ) [74],  $k = 2,53$  [64];

зерногранулит 50/50 ( $\rho_{ВВ} = 900 \text{ кг/м}^3$ ,  $D_{ВВ} = 3900 \text{ м/с}$ ) [74],  $k = 2,33$  [64]);

для пород – гранит ( $C_{п} = 5300 \text{ м/с}$ ,  $\rho_{п} = 2700 \text{ кг/м}^3$ ,  $\nu = 0,23$ ) [82] и

( $k_{mp} = 0,45$ ,  $\Phi = 6$ ) [101],  $P_{z.d.} = 0$  ;

известняк – ( $C_{п} = 4500 \text{ м/с}$ ,  $\rho_{п} = 2650 \text{ кг/м}^3$ ,  $\nu = 0,26$ ) [82] и

$(k_{mp} = 0,40, \Phi = 8) [101], P_{z.d.} = 0$ .

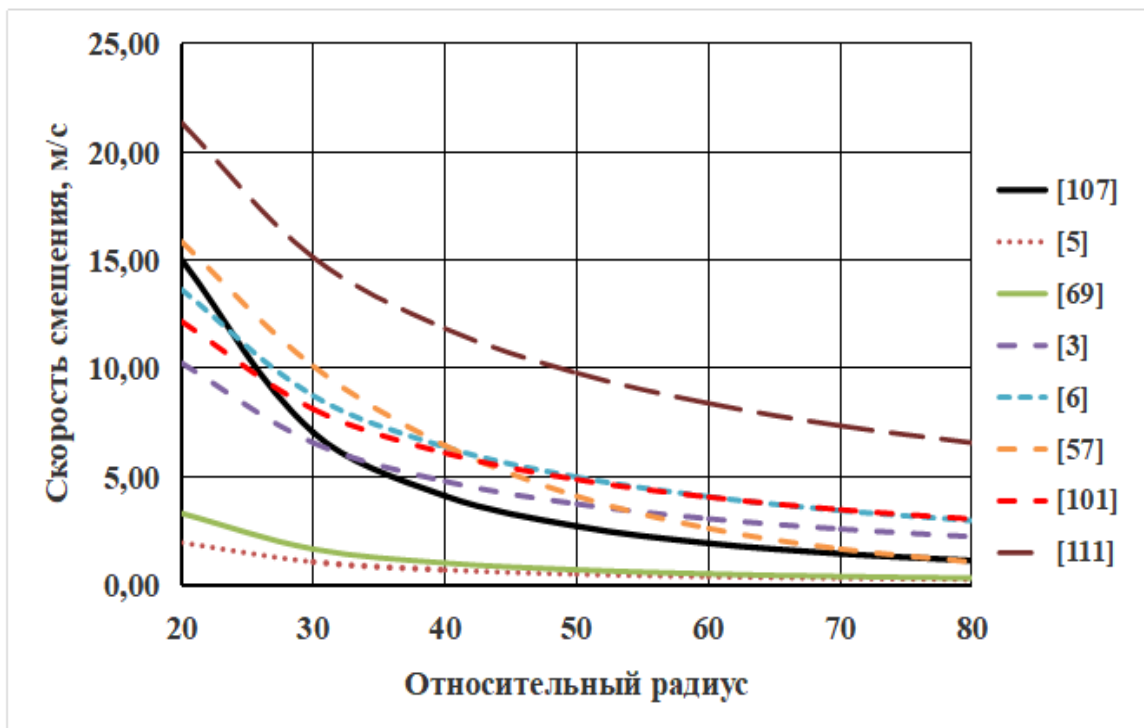


Рис. 2.5. Зависимости скорости смещения гранита при взрыве скважинного заряда аммонита бЖВ от относительного радиуса

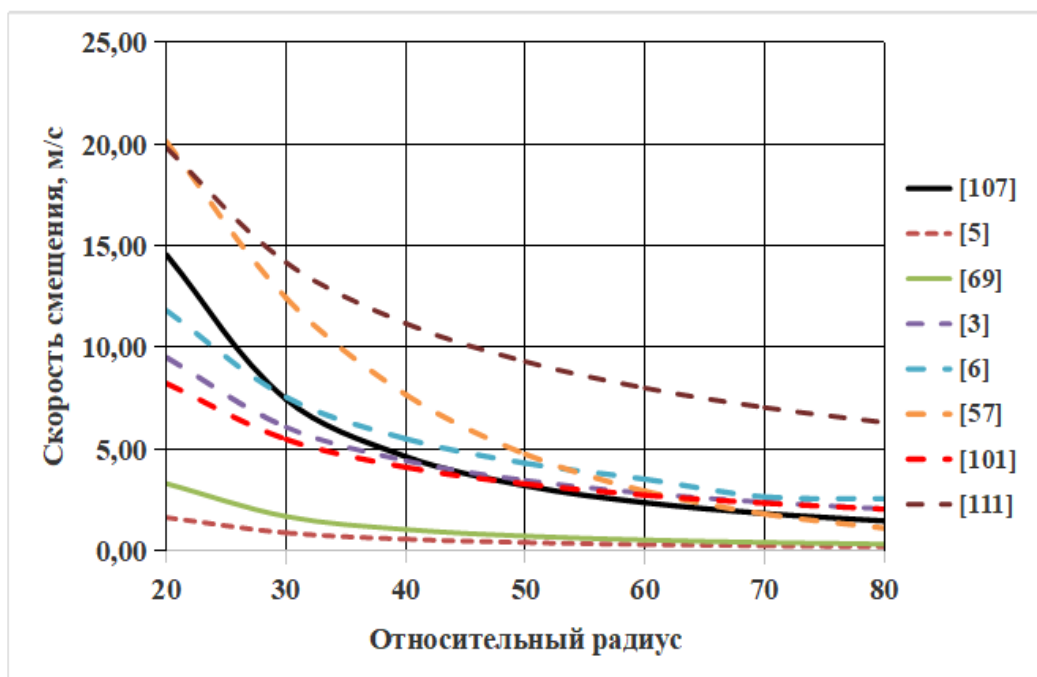


Рис. 2.6. Зависимости скорости смещения известняка от относительного радиуса

Экспериментальные зависимости скорости смещения породы для гранита и известняка строились на основании (2.21) и (2.22), которые справедливы в средней зоне действия взрыва скважинного (шпурового) заряда [107].

Анализ зависимостей, приведенных на рис. 2.5 и 2.6, показывает, что ни одна из них не согласуется с экспериментальными данными на всем диапазоне средней зоны действия скважинного заряда. Однако ряд зависимостей показывает хорошее согласие с опытом на отдельных диапазонах значений относительного радиуса:

а) взрыв скважинного заряда аммонита 6 ЖВ в граните:

при  $20 \leq \bar{r} \leq 30$  наилучшее совпадение дают зависимости, предложенные в работах [6] и [101];

при  $30 \leq \bar{r} \leq 60$  наилучшее совпадение дает зависимость, предложенная в работе [3];

при  $60 \leq \bar{r} \leq 80$  наилучшее совпадение дает зависимость, предложенная в работе [57];

б) взрыв скважинного заряда зерногранулита 50/50 в известняке:

при  $20 \leq \bar{r} \leq 40$  наилучшее совпадение дает зависимость, предложенная в работе [6];

при  $40 \leq \bar{r} \leq 60$  наилучшее совпадение дают зависимости, предложенные в работах [3], [101];

при  $60 \leq \bar{r} \leq 80$  наилучшее совпадение в крепких породах дает зависимость, предложенная в работе [57], а в породах слабой и средней крепости зависимости, предложенные в работах [3, 57, 101].

Наибольший практический интерес представляет ближняя область средней зоны действия взрыва -  $20 \leq \bar{r} \leq 40$ , где лучшее согласие с экспериментальными данными для различных пород дает зависимость (2.30), предложенная в работе [6].

### **2.3. Оценка сохранения детонационных способностей ЭВВ с пероксидной газификацией при внешнем воздействии опережающего взрыва шпурового заряда**

Процесс химической сенсibilизации ЭВВ играет важную роль в формировании свойств конечного продукта, особенно в аспекте равномерности распределения микропузырьков газа и их размера относительно размеров частиц эмульсионной матрицы, так называемое - создание «горячих точек». Это распределение непосредственно влияет на эффективность детонационного фронта и общую производительность заряда.

Очень важно соблюдение скорости газогенерации, которая оказывает значительное влияние на процесс формирования пузырьковой структуры. Если скорость слишком высока, образуются крупные пузырьки газа, которые снижают плотность заряда и приводят к распаду, десенсibilизации и к снижению эффективности взрыва. Напротив, низкая скорость газогенерации может привести к недостаточной плотности перед моментом детонации, слишком мелкие газовые микропузырьки не оказывают сенсibilизирующего действия на эмульсию, что также снижает мощность взрыва.

В случае сенсibilизации ЭВВ посредством введения в матричную эмульсию газогенерирующей добавки наблюдается широкое распределение сенсibilизирующих пузырьков по размеру - от долей мм до 1-2 мм [14, 112]. Микроскопические наблюдения показали, что ЭВВ с пероксидной газификацией вида «Аргунит РХ» имеют характерный размер газовых сенсibilизирующих пузырьков 300-500 мкм. Данное обстоятельство, а также результаты, приведенные в пп. 2.1 и 2.2 настоящей работы, позволяют осуществить оценку сохранения детонационных способностей данного вида ЭВВ.

Верификация полученных теоретических результатов осуществлялась в условиях рудника подземного ООО «Яковлевский ГОК», где представилась возможность проведения опытного взрывания шпуровых зарядов ЭВВ с пероксидной газогенерацией в самых различных условиях.

### 2.3.1. Влияние физико-механических свойств горных пород и плотности заряда ЭВВ

ООО «Яковлевский ГОК» разрабатывает мощнее крутопадающее, представленное богатыми железными рудами, существенно отличающимися между собой по физико-механическим свойствам [81].

Вмещающие породы представлены [81]:

лежащий бока - прочные кварциты;

висячий бок - хлорит-серицитовые сланцы.

Руды характеризуются высокой обводненностью и пористостью.

В рыхлых рудах пористость может достигать до 42%.

Добыча руды осуществляется системой разработки нисходящими слоями с закладкой выработанного пространства [2]. Выбор данной системы разработки обусловлен сложными гидрогеологическими условиями добычи, необходимостью сохранения земной поверхности, а также ценностью руды.

В табл. 2.3 приведены физико-механические свойства пород и руд Яковлевского месторождения [81].

Табл. 2.3. Физико-механические свойства пород Яковлевского месторождения [81]

Породы и руды	Плотность, кг/ м <sup>3</sup>	Среднее значение крепости по М.М. Протоdjяконову	Скорость продольных волн, м/с	Коэффициент Пуассона
Железистые кварциты мартит-железнослюдковые	3920	8	5780	0,23

Продолжение табл. 2.3

Сланцы хлорит-серицитовые железистые	3720	4	2980	0,22
Руда хлорит-лимонит-мартитовая, плотная	3770	3	2620	0,27
Руда гидрогематит-мартитовая, крепкая	4700	2	2500	0,21
Руда мартит-железно-слюдковая, рыхлая	4380	1	1990	0,3
Руда железно-слюдково-мартитовая, хлоритизированная	4700	1	2750	0,2
Руда железно-слюдково-мартитовая, карботизированная, плотная	4680	2	3070	0,27

Влияние физико-механических свойств горных пород на сохранение детонационных свойств зарядами ЭВВ с пероксидной газификации при динамическом воздействии на них со стороны ранее взорвавшихся зарядов рассмотрено как экспериментально, так и теоретически.

Опыты заключались в выполнении взрывов шпуровых зарядов различной плотности заряжания в забоях, представленных железистыми кварцитами, хлорит-серицитовыми железистыми сланцами, хлорит-лимонит-мартитовой плотной рудой и мартит-железно-слюдковой рыхлой рудой. В ходе каждого отдельного опыта перпендикулярно поверхности забоя бурились по два шпура диаметром 51 мм, длиной 4000 мм на расстоянии 700-750 мм между осями шпуров. Оба шпура заряжались на 1500 мм ЭВВ. Для обратного инициирования зарядов использовалась система СИНВ и промежуточные малогабаритные детонаторы ПДМ-25-Ш (рис. 2.7).

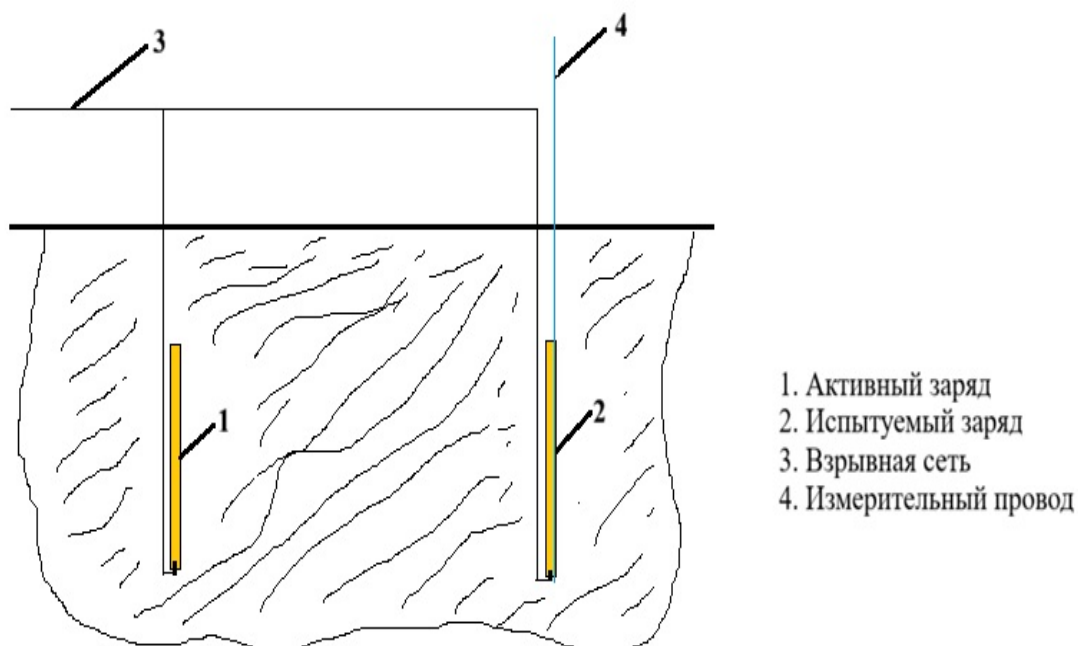


Рис. 2.7. Схема эксперимента по оценке влияния динамической ударной волны на ЭВВ с пероксидной газификацией

Результаты опытных взрывов приведены в таблицах 2.4 - 2.7.

Табл. 2.4. Результаты испытаний влияния динамического воздействия на шпуровой заряд ЭВВ в различных горных породах при плотности 1,28-1,31 г/см<sup>3</sup>

Показатели заряда	Без динамического воздействия	Порода			
		железистые кварциты	хлорит-серицитовые железистые сланцы	хлорит-лимонит-мартитовая плотная руда	мартит-железно-слюдковая рыхлая руда
Плотность заряда, г/см <sup>3</sup>	1,30	1,31	1,32	1,33	1,30
Скорость детонации, м/с	4250	4280	4200	4150	4020

Табл. 2.5. Результаты испытаний влияния динамического воздействия на шпуровой заряд ЭВВ в различных горных породах при плотности 1,20-1,22 г/см<sup>3</sup>

Показатели заряда	Без динамического воздействия	Порода			
		железистые кварциты	хлорит-серицитовые железистые сланцы	хлорит-лимонит-мартитовая плотная руда	мартит-железно-слюдковая рыхлая руда
Плотность заряда, г/см <sup>3</sup>	1,22	1,21	1,22	1,22	1,20
Скорость детонации, м/с	4650	4680	4570	4420	3750

Табл. 2.6. Результаты испытаний влияния динамического воздействия на шпуровой заряд ЭВВ в различных горных породах при плотности 1,10-1,12 г/см<sup>3</sup>

Показатели заряда	Без динамического воздействия	Порода			
		железистые кварциты	хлорит-серицитовые железистые сланцы	хлорит-лимонит-мартитовая плотная руда	мартит-железно-слюдковая рыхлая руда
Плотность заряда, г/см <sup>3</sup>	1,12	1,10	1,12	1,11	1,10
Скорость детонации, м/с	4950	4980	4940	4800	4610

Табл. 2.7. Результаты испытаний влияния динамического воздействия на шпуровой заряд ЭВВ в различных горных породах при плотности 1,02-1,04 г/см<sup>3</sup>

Показатели заряда	Без динамического воздействия	Порода			
		железистые кварциты	хлорит-серицитовые железистые сланцы	хлорит-лимонит-мартитовая плотная руда	мартит-железно-слюдковая рыхлая руда
Плотность заряда, г/см <sup>3</sup>	1,04	1,02	1,03	1,02	1,03
Скорость детонации, м/с	4650	4640	4610	4460	4360

При проведении опыта первоначально взрывался «активный заряд», затем с замедлением 50-100 мс взрывался «испытуемый заряд» (рис. 2.7). В последнем измерялась скорость детонации. Измерение осуществлялись при помощи приборов «VOD Vate» и «NandyTrap», позволяющим непрерывно измерять величину сопротивления электрической цепи аксиального датчика-проводника, проложенного вдоль заряда ЭВВ. Приборы записывают процесс взрыва в виде цифрового файла, который в последствии расшифровывается на компьютере посредством специальной программы, давая зависимость пути, пройденного детонационной волной, от времени.

Для верификации, предложенной в п. 2.1 физико-математической модели динамического воздействия на ЭВВ, сравнивали фактические и расчетные скорости детонации ЭВВ после динамического воздействия на шпуровой заряд ЭВВ в различных горных породах при различных плотностях.

Расчеты величины доли ЭВВ, сохранившей способности к детонации (выполнение условия (2.17)) представлены на рис. 2.8-2.11. При этом расчеты показали, что в основном потери ЭВВ восприимчивости к инициирующему импульсу связаны не со снижением общей пористости ниже допустимого уровня,

а в связи с уменьшением размера пузырьков ниже критического. При расчетах физико-механические свойства пород заимствовали из табл. 2.1.

Параметры ЭВВ – плотность и скорость детонации на данным экспериментов (табл. 2.4-2.7), коэффициент политропы принимали равным 3 [13]. Вязкость эмульсии – 60 Па·с. Скорость смещения породы рассчитывали в соответствии с п. 2.2 настоящей работы по формуле (2.30). Удельную теплоту взрыва ЭВВ рассчитывали по методике работы [66].

При расчете скорости детонации (табл. 2.8) исходили из того, что ЭВВ после динамического воздействия быть пассивировано частью ЭВВ, не способного к детонации. Тогда, в соответствии с [30], имеем:

$$D/D_0 \approx \sqrt{D}, \quad (2.39)$$

где  $D_0$  - скорость детонации ЭВВ в кварците при отсутствии динамического воздействия;  $D$  - доля заряда ЭВВ, способного к детонации [30].

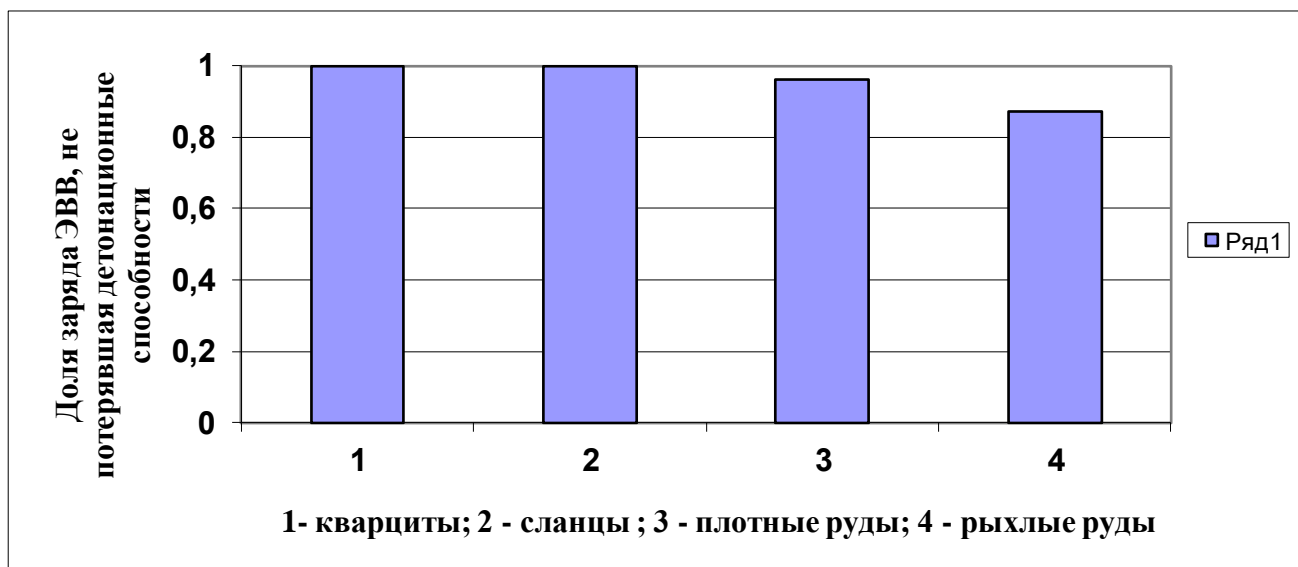


Рис. 2.8. Доля заряда ЭВВ, не потерявшая детонационные способности после динамического воздействия. Плотность ЭВВ – 1,28-1,31 г/см<sup>3</sup>; относит. радиус равен 30.

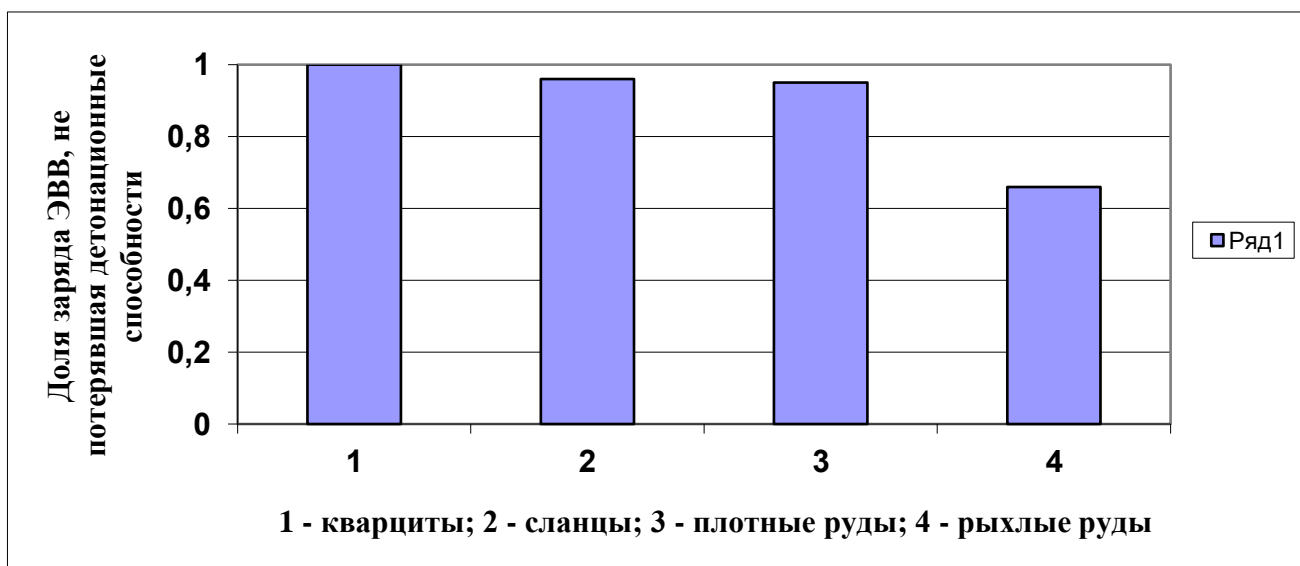


Рис. 2.9. Доля заряда ЭВВ, не потерявшая детонационные способности после динамического воздействия. Плотность ЭВВ – 1,20-1,22 г/см<sup>3</sup>; относит. радиус равен 30.

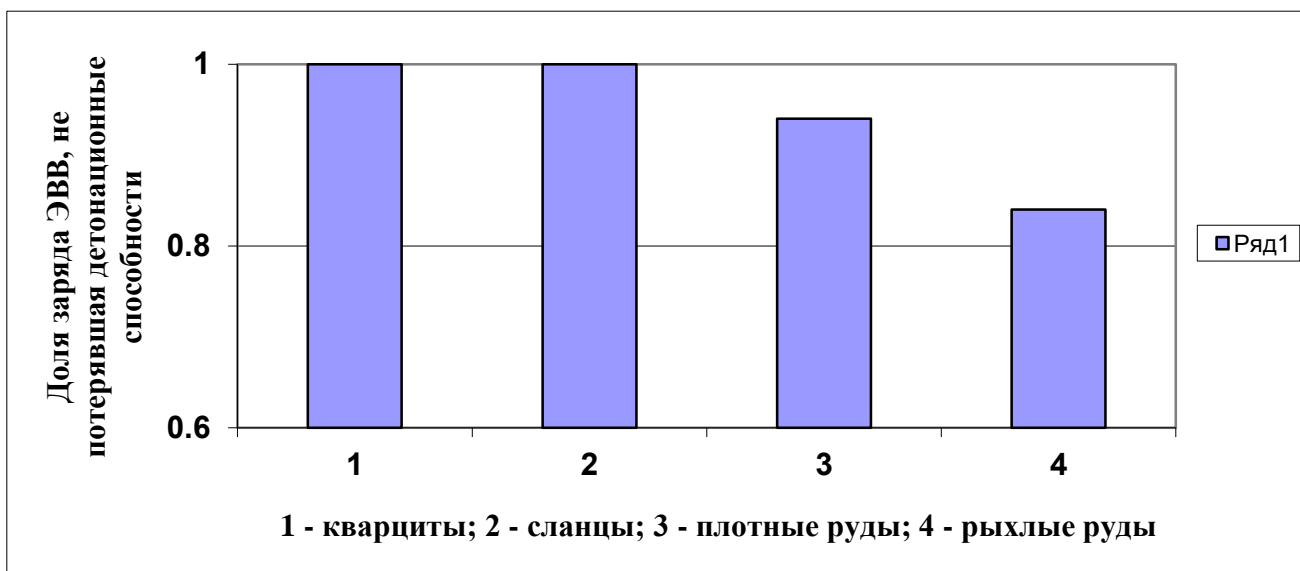


Рис. 2.10. Доля заряда ЭВВ, не потерявшая детонационные способности после динамического воздействия. Плотность ЭВВ – 1,10-1,12 г/см<sup>3</sup>; относит. радиус равен 30.

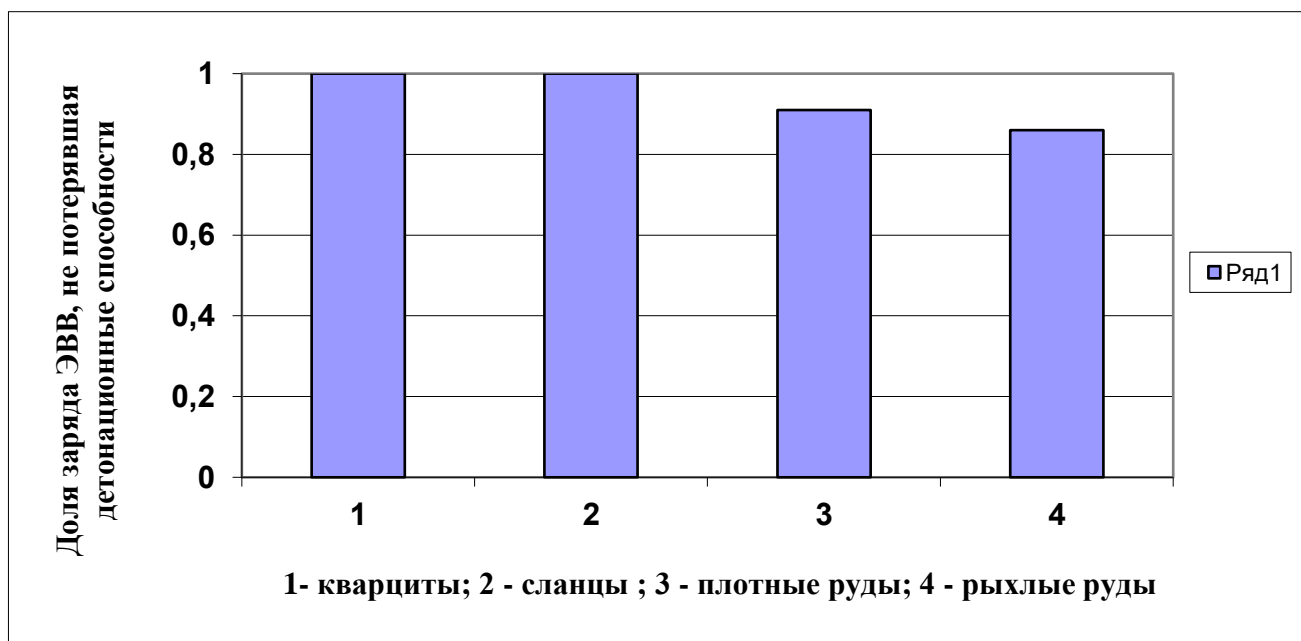


Рис. 2.11. Доля заряда ЭВВ, не потерявшая детонационные способности после динамического воздействия. Плотность ЭВВ – 1,0-1,02 г/см<sup>3</sup>; относит. радиус равен 30.

Табл. 2.8. Значения экспериментальных и расчетных скоростей детонации ЭВВ в различных породах при разной плотности ЭВВ

Показатели		Порода			
		Железистые кварциты	Хлорит-серицитовые железистые сланцы	хлорит-лимонит-мартитовая плотная руда	Мартит-железно-слюдковая рыхлая руда
Плотность ЭВВ, 1,28-1,31 г/см <sup>3</sup>	Скорость детонации, м/с (опыт)	4280	4200	4150	4020
	Доля заряда ЭВВ, способного к детонации (рис. 2.7)	1,00	0,96	0,94	0,87
	Скорость детонации, м/с (расчет)	4250	4164	4121	3964

Продолжение табл. 2.8

Плотность ЭВВ, 1,20-1,22 г/см <sup>3</sup>	Скорость детонации, м/с (опыт)	4680	4570	4520	3750
	Доля заряда ЭВВ, способного к детонации (рис. 2.8)	1,00	0,96	0,93	0,66
	Скорость детонации, м/с (расчет)	4650	4556	4484	3778
Плотность ЭВВ, – 1,10-1,12 г/см <sup>3</sup>	Скорость детонации, м/с (опыт)	4980	4940	4800	4610
	Доля заряда ЭВВ, способного к детонации (рис. 2.9)	1,00	1,00	0,91	0,86
	Скорость детонации, м/с (расчет)	4950	4950	4722	4590
Плотность ЭВВ, 1,02-1,04 г/см <sup>3</sup>	Скорость детонации, м/с (опыт)	4640	4610	4460	4360
	Доля заряда ЭВВ, способного к детонации (рис. 2.10)	1,00	1,00	0,91	0,86
	Скорость детонации, м/с (расчет)	4650	4650	4436	4312

Анализ полученных результатов показывает, что:

физико-механические свойства горных пород оказывают существенное влияние на сохранение детонационных свойств зарядами ЭВВ с пероксидной газификации при динамическом воздействии на них со стороны ранее взорвавшихся зарядов;

физико-математическая модель динамического воздействия на ЭВВ, предложенная в п. 2.1 дает корректные результаты;

при плотности ЭВВ 1,10-1,12 г/см<sup>3</sup> наблюдается бóльшая скорость детонации в зарядах, подвергнутых динамическому воздействию, по сравнению с зарядами ЭВВ другой плотности;

при любой плотности ЭВВ снижение прочности горной породы уменьшает стойкость ЭВВ к динамическим воздействиям. Данный вывод согласуется со сведениями, приведенными в работе [47].

### **2.3.2. Влияние расстояния между шпуровыми зарядами**

Расстояние между отдельными зарядами влияет на интенсивность воздействия на заряд со стороны смежного ранее взорвавшегося заряда. Если шпуры расположены близко друг к другу, то взрыв первого заряда через горный массив оказывает ударное воздействие на колонку заряда ЭВВ, что способствует процессу десенсибилизации (схлопыванию газовых пузырьков) ЭВВ и, соответственно, снижению скорости детонации.

В ходе анализа полученных данных замеров скорости детонации в проходческих забоях обнаружена зависимость скорости детонации от расстояния между шпурами. Установлено, что скорость детонации врубовых шпуров (близко расположенных) заметно снижается с очередностью взрывания [45]. При этом расстояние между шпурами во врубе составляло 0,4-0,8м (рис. 2.12).

Измерения скоростей детонации ЭВВ во врубовых зарядах показали, что продолжительность детонации ЭВВ в первом шпуре, как видно из рис.2.13, продолжалась около 1 мс [45].

При скорости распространения упругих волн в горной породе забоя около 2 км/с за время 84 мс взрывная волна сжатия от шпура № 1 уйдет в горном массиве на расстояние около 170 м. Это означает, что к моменту детонации шпура № 2 процесс разрушения и деформирования горной среды вокруг шпура № 1 будет закончен и горная среда вокруг шпура № 2 будет снова в ненагруженном состоянии, как и до взрыва в шпуре № 1. Отсюда следует, что взрывы шпуров при таких номиналах замедлений не являются классическими короткозамедленными взрывами (КЗВ), это будут последовательные взрывы невзаимодействующих друг с другом шпуров (пошпуровое взрывание). Однако ЭВВ в шпуре № 2 может

иметь некоторые отличия в свойствах по сравнению с ЭВВ в шпуре № 1, так как по ЭВВ в шпуре № 2 прошла волна сжатия от шпура № 1.

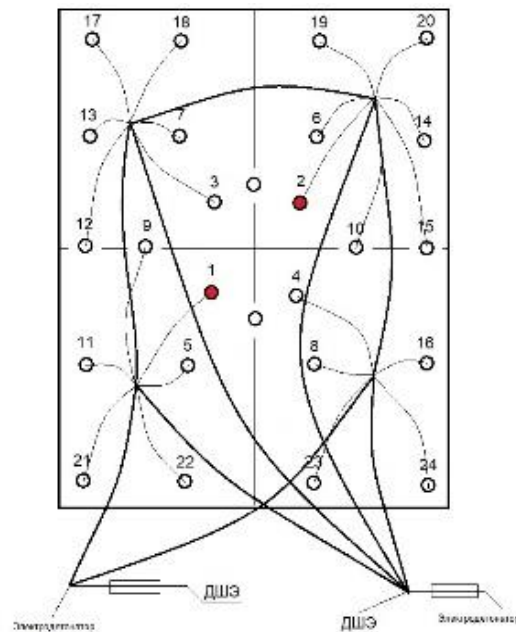


Рис. 2.12. Схема врубовой части забоя

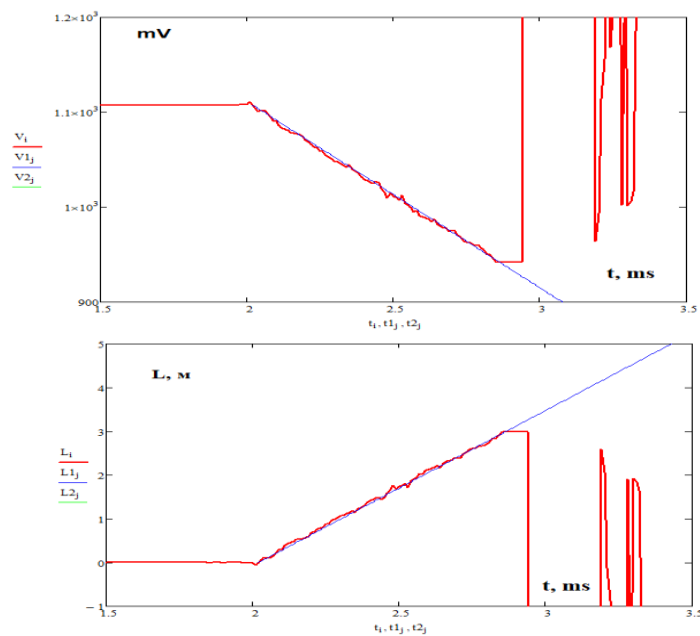


Рис. 2.13. Зависимость пути, пройденного детонационной волны в шпуровых зарядах, от времени

Влияние расстояния между зарядами на сохранение детонационных свойств зарядами ЭВВ с пероксидной газификации при динамическом воздействии на них со стороны ранее взорвавшихся зарядов рассмотрено как теоретически, так и экспериментально для различных горных пород. Методика экспериментов была аналогична, применяемой в п. 2.3.1.

Эксперименты заключались в выполнении взрывов шпуровых зарядов различной плотности заряжания в забоях, представленных железистыми кварцитами, хлорит-серицитовыми железистыми сланцами, хлорит-лимонит-мартитовой плотной рудой и мартит-железно-слюдковой рыхлой рудой. В ходе каждого отдельного опыта перпендикулярно поверхности забоя бурились по два шпура диаметром 51 мм, длиной 4000 мм на различных расстояниях между осями шпуров. Оба шпура заряжались на 1500 мм ЭВВ. Вязкость ЭВВ – 60 Па·с. Для обратного инициирования зарядов использовалась система СИНВ и промежуточные малогабаритные детонаторы ПДМ-25-Ш (рис. 2.6). При помощи приборов «VOD Vate» и «HandyTrap» измерялась скорость детонации в «испытуемом заряде».

Результаты опытных взрывов и расчеты величины доли ЭВВ, сохранившей способности к детонации при взрыве приведены в табл. 2.9 и 2.10.

При расчетах физико-механические свойства пород заимствованы из табл. 2.1. Параметры ЭВВ – плотность и скорость детонации на данным экспериментов (табл. 2.4-2.7), коэффициент политропы принимали равным 3 [13]. Вязкость эмульсии – 60 Па·с. Скорость смещения породы рассчитывали в соответствии с п. 2.2 настоящей работы по формуле (2.30). Удельную теплоту взрыва ЭВВ рассчитывали по методике работы [66].

Для верификации, предложенной в п. 2.1 физико-математической модели динамического воздействия на ЭВВ, сравнивали фактическую и расчетную скорости детонации ЭВВ после динамического воздействия на шпуровой заряд ЭВВ в различных горных породах при плотностях 1,20-1,22 г/см<sup>3</sup> и 1,10-1,12 г/см<sup>3</sup>. При расчете скорости детонации применялось уравнение (2.39).

Табл. 2.9. Результаты испытаний влияния динамического воздействия на шпуровой заряд ЭВВ в различных горных породах при различном расстоянии между шпурами (плотность 1,20-1,22 г/см<sup>3</sup>)

Показатель	Железистые кварциты			Хлорит-серицитовые железистые сланцы			Мартит-железно-слюдковая рыхлая руда		
	Относительный радиус			Относительный радиус			Относительный радиус		
	20	30	40	20	30	40	20	30	40
Скорость детонации, м/с (опыт)	4380	4680	4680	4130	4570	4650	Не детонирует	3750	4350
Доля заряда ЭВВ, способного к детонации	0,9	1	1	0,8	0,96	1	-	0,66	0,89
Скорость детонации, м/с (расчет)	4411	4650	4650	4159	4556	4650	-	3778	4387

Табл. 2.10. Результаты испытаний влияния динамического воздействия на шпуровой заряд ЭВВ в различных горных породах при различном расстоянии между шпурами (плотность 1,10-1,12г/см<sup>3</sup>)

Показатель	Железистые кварциты			Хлорит-серицитовые железистые сланцы			Мартит-железно-слюдковая рыхлая руда		
	Относительный радиус			Относительный радиус			Относительный радиус		
	20	30	40	20	30	40	20	30	40
Скорость детонации, м/с (опыт)	4820	4980	4960	4400	4940	4960	4080	610	3960
Доля заряда ЭВВ, способного к детонации	0,935	1	1	0,8	1	1	0,7	0,86	1
Скорость детонации, м/с (расчет)	4786	4950	4950	4427	4950	4950	4141	4590	4960

Анализ полученных результатов показывает, что:

расстояние между зарядами в зависимости от физико-механических свойств горных пород оказывают существенное влияние на сохранение детонационных

свойств зарядами ЭВВ с пероксидной газификации при динамическом воздействии на них со стороны ранее взорвавшихся зарядов;

наблюдается соответствие между экспериментальными данными и результатами теоретических расчетов по предложенной в п. 2.1 физико-математическая модели воздействия волны напряжений от опережающего взрыва скважинного заряда на детонационные способности расположенных в смежном заряде ЭВВ. веществ, сенсibilизированных пузырьками газа;

в прочных породах ( $f = 10-12$ ) в средней зоне действия взрыва величина расстояния между зарядами влияет на скорость детонации ЭВВ в ближнем диапазоне -  $\bar{r} < 30$ . В то же время в слабых породах ( $f = 1-2$ ) в средней зоне действия взрыва скорость детонации в «исследуемом заряде» зависит от расстояния между зарядами в более широком диапазоне -  $\bar{r} < 40$ ;

при  $\bar{r} \leq 25$  в слабых породах возможно затухание детонации заряда ЭВВ из-за критического повреждения сенсibilизирующих пузырьков.

### **2.3.3. Влияние вязкости ЭВВ**

Возрастание вязкости эмульсии приводит к росту диссипации энергии импульса при сжатии пузырька, что способствует исчезновению стадии интенсивного сжатия, которая имеет место в маловязкой жидкости [36, 39].

Анализ условия (2.17) показывает, что скорость детонации в «исследуемом заряде» снижается при возрастании динамической вязкости эмульсии. Для проверки данного вывода были выполнены экспериментальные работы.

Эксперименты заключались в выполнении взрывов шпуровых зарядов различной плотности заряжания в забоях, представленных железистыми кварцитами, хлорит-серицитовыми железистыми сланцами, хлорит-лимонит-

мартитовой плотной рудой и мартит-железно-сланцевой рыхлой рудой. В ходе каждого отдельного опыта перпендикулярно поверхности забоя бурились по два шпура диаметром 51 мм, длиной 4000 мм на расстоянии 700-750 мм между осями шпуров. Оба шпура заряжались на 1500 мм ЭВВ. Плотность ЭВВ - 1,10-1,12 и 1,20-1,22 г/см<sup>3</sup>. Вязкость ЭВВ – 40, 60 и 90 Па·с. Для обратного инициирования зарядов использовалась система СИНВ и промежуточные малогабаритные детонаторы ПДМ-25-Ш (рис. 2.4). При помощи приборов «VOD Vate» и «NandyTrap» измерялась скорость детонации в «испытуемом заряде».

Результаты опытных взрывов приведены в табл. 2.11 и табл. 2.12.

Табл. 2.11. Результаты испытаний влияния динамического воздействия на шпуровой заряд ЭВВ в различных горных породах и различной вязкости эмульсии (плотность ЭВВ 1,10-1,12 г/см<sup>3</sup>, относительное расстояние -  $\bar{r} = 30$ )

Вязкость эмульсии, Па·с	Показатель	Порода			
		железистые кварциты	хлорит-серицитовые железистые сланцы	хлорит-лимонит-мартитовая плотная руда	мартит-железно-сланцевая рыхлая руда
40	Скорость детонации, м/с	4980	4970	4900	4850
60	Скорость детонации, м/с	4980	4940	4800	4610
90	Скорость детонации, м/с	4980	4310	4160	3900

Табл. 2.12. Результаты испытаний влияния динамического воздействия на шпуровой заряд ЭВВ в различных горных породах и различной вязкости эмульсии (плотность ЭВВ 1,20-1,22 г/см<sup>3</sup>, относительное расстояние -  $\bar{r} = 30$ )

Вязкость эмульсии, Па·с	Показатель	Порода			
		железистые кварциты	хлорит-серицитовые железистые сланцы	хлорит-лимонит-мартитовая плотная руда	мартит-железно-слюдковая рыхлая руда
40	Скорость детонации, м/с	4680	4670	4650	4450
60	Скорость детонации, м/с	4680	4570	4520	3750
90	Скорость детонации, м/с	4680	4560	4390	3230

Анализ полученных результатов показывает, что динамическая вязкость эмульсии оказывает существенное влияние на сохранение детонационных свойств зарядами ЭВВ с пероксидной газификации при динамическом воздействии на них со стороны ранее взорвавшихся зарядов; наблюдается снижение скорости детонации при возрастании динамической вязкости эмульсии.

## Выводы по главе II

Показано, что:

физико-механические свойства горных пород оказывают существенное влияние на сохранение детонационных свойств зарядами ЭВВ с пероксидной газификации при динамическом воздействии на них со стороны ранее взорвавшихся зарядов;

физико-математическая модель динамического воздействия на ЭВВ, предложенная в п. 2.1 дает корректные результаты;

при плотности ЭВВ 1,10-1,12 г/см<sup>3</sup> наблюдается бóльшая скорость детонации в зарядах, подвергнутых динамическому воздействию, по сравнению с зарядами ЭВВ другой плотности;

при любой плотности ЭВВ снижение прочности горной породы уменьшает стойкость ЭВВ к динамическим воздействиям;

расстояние между зарядами в зависимости от физико-механических свойств горных пород оказывают существенное влияние на сохранение детонационных свойств зарядами ЭВВ с пероксидной газификации при динамическом воздействии на них со стороны ранее взорвавшихся зарядов;

наблюдается соответствие между экспериментальными данными и результатами теоретических расчетов по предложенной в п. 2.1 физико-математической модели воздействия волны напряжений от опережающего взрыва скважинного заряда на детонационные способности расположенных в смежном заряде ЭВВ. веществ, сенсibilизированных пузырьками газа;

в прочных породах ( $f = 10-12$ ) в средней зоне действия взрыва величина расстояния между зарядами влияет на скорость детонации ЭВВ в ближнем диапазоне -  $\bar{r} < 30$ . В то же время в слабых породах ( $f = 1-2$ ) в средней зоне действия взрыва скорость детонации в «исследуемом заряде» зависит от расстояния между зарядами в более широком диапазоне -  $\bar{r} < 40$ ;

при  $\bar{r} \leq 25$  в слабых породах возможно затухание детонации заряда ЭВВ из-за критического повреждения сенсibilизирующих пузырьков;

динамическая вязкость эмульсии оказывает существенное влияние на сохранение детонационных свойств зарядами ЭВВ с пероксидной газификации при динамическом воздействии на них со стороны ранее взорвавшихся зарядов;

наблюдается снижение скорости детонации при возрастании динамической вязкости эмульсии;

оптимальная вязкость эмульсии для условий рудника подземного ООО «Яковлевский ГОК» составляет 60-80 Па·с.

Анализ полученных результатов показывает, что сохранение детонационной способности зарядом ЭВВ, сенсibilизированного пузырьками газа, при динамическом воздействии на него со стороны ранее взорвавшихся зарядов зависит как от физико-механических свойств взрываеваемых пород, условий взрывания, плотности и пористости ЭВВ, так и от вязкости ЭВВ. Таким образом, **первое научное положение доказано.**

### ГЛАВА III. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ЭВВ С ПЕРОКСИДНОЙ ГАЗОГЕНЕРАЦИЕЙ ПРИ МАССОВОЙ ОТБОЙКЕ РУД ВЕЕРНЫМИ ЗАРЯДАМИ

В настоящее время на подземных рудниках страны начинает расширяться применение бестарных эмульсионных взрывчатых веществ (ЭВВ). Этому способствуют как доступная цена и высокие потребительские свойства ЭВВ, так и разработанные технические средства заряжания скважин (шпуров) в подземных условиях [72, 79, 87, 114]. Однако условия подземной добычи полезных ископаемых вносят специфику в технологию взрывных работ, связанную с широким применением [63]:

шпуровых зарядов при проходке выработок;

веерных зарядов при отбойке руд.

Анализ методик проектирования веерных зарядов и паспортов БВР для горнопроходческих работ, а также опыта горных работ показывает, что в обоих случаях в прочных скальных породах возможно размещение скважинных (шпуровых) зарядов на расстояниях 10-15 диаметров заряда друг от друга [90, 104]. Это практически вдвое меньше расстояний между скважинными зарядами при открытых горных работах, составляющее 20-40 диаметров скважин [63], но в тоже время больше размеров зоны разрушения прочных скальных пород радиальными трещинами [106]. Оценки, выполненные на основании [108], показывают, что области с указанным расстоянием между зарядами находятся в ближней зоне сейсмического действия этих зарядов, т.к. удовлетворяют условию  $0,5 < R/\sqrt[3]{Q} < 10$ , где  $R$  – расстояние между зарядами (м), а  $Q$  – масса заряда в тротиловом эквиваленте (кг).

Современные технологии взрывных работ при добыче полезных ископаемых основаны на последовательном взрывании зарядов (групп зарядов) взрывчатых веществ. Сближение зарядов ЭВВ приводит к существенному динамическому воздействию взрывов зарядов (групп зарядов) ВВ на еще не детонировавшие заряды в смежных скважинах (шпурах). Согласно [50, 51, 135,

136, 150, 152-155] данное динамическое воздействие на заряды ЭВВ, сенсibilизированные пузырьками газа, приводят к снижению в них скорости детонации, а в отдельных случаях и к потере детонационной способности ЭВВ.

Теоретическое изучение влияния динамического воздействия на ухудшение детонационных способностей ЭВВ, сенсibilизированных пузырьками газов, показало, что при падении на скважину волны напряжений происходит резко смещение стенок скважины, где расположен заряд. Это вызывает возникновение волны сжатия в ЭВВ, способной оказывать негативное воздействие на сенсibilизирующие ЭВВ пузырьки газа. Последнее подробно представлено во второй главе.

Вопросы определения начальной скорости смещения среды при взрыве заряда (зарядов) рассматривался в многочисленных работах: для отдельных сосредоточенных и скважинных зарядов [3, 6, 57, 69, 84, 99, 106-108], а также систем скважинных и сосредоточенных зарядов при равномерном их распределении в пространстве [93, 101, 108]. Однако, как отмечалось в первой главе, для веерного заряда с учетом неравномерности распределения заряда в плоскости веера данный вопрос не рассматривался.

### **3.1. Действие веерного заряда**

В основу настоящего параграфа положены результаты, полученные в работе [89].

Учитывая важность сохранения детонационных способностей веерных зарядов ЭВВ, подвергнувшихся ударному воздействию со стороны ранее взорвавшихся вееров, оценка величины начальной скорости смещения в массиве пород при взрыве веерного заряда в ближней зоне сейсмического действия является важной и актуальной задачей для практики ведения горных работ.

При решении поставленной задачи используем метод эквивалентных зарядов, позволяющий определять для системы зарядов ВВ величину эквивалентного ей по сейсмическому воздействию на среду сосредоточенного

заряда в данной точке среды. Метод основан на свойстве аддитивности сейсмических воздействий в ближней зоне: при взрыве системы зарядов суммарная энергия сейсмического воздействия равна сумме энергий сейсмических воздействий отдельных зарядов [108]. В указанной работе приведены оценки величины эквивалентного заряда для скважинного заряда, системы сближенных скважинных и сосредоточенных зарядов. Показано, что при коэффициенте сближения зарядов больше 0,15 величина энергии воздействия эквивалентного заряда определяется как сумма энергий сейсмических воздействий отдельных зарядов. В веерном заряде коэффициент сближения скважин изменяется от 0,5-0,6 в областях сближения скважин до 1,1-1,3 в вершинах скважин [104], поэтому при расчете эквивалентного заряда необходимо учитывать как место положения рассматриваемой точки среды, так и расстояния между зарядами.

Положим, что в безграничной среде имеется линейный заряд длины  $L$  (м) с постоянной линейной плотностью заряжения  $\gamma$  (кг/м). Введем прямоугольную систему координат  $O(xyz)$  так, чтобы ось координат  $Ox$  проходила по оси заряда (рис. 3.1). Эквивалентный сосредоточенный заряд, расположенный в точке  $(x_o, 0, 0)$ , оказывающий аналогичное линейному заряду воздействие на среду в точке  $(x_o, 0, W)$ , равен [108]

$$Q(x_o, 0, W) = \frac{\gamma W}{2} \left( \frac{W(x_o + L)}{W^2 + (x_o + L)^2} - \frac{Wx_o}{W^2 + x_o^2} + \arctg\left(\frac{x_o + L}{W}\right) - \arctg\left(\frac{x_o}{W}\right) \right). \quad (3.1)$$

Введем безразмерные параметры  $\bar{L} = L/W$ ,  $\bar{x}_o = x_o/W$ .

Тогда (3.1) можно записать в следующем виде

$$\bar{Q}_{\text{экв}} = \frac{1}{2} \left( \frac{(1 + \bar{x}_o)\bar{L}}{1 + ((1 + \bar{x}_o)\bar{L})^2} - \frac{\bar{x}_o\bar{L}}{1 + (\bar{x}_o\bar{L})^2} + \arctg((1 + \bar{x}_o)\bar{L}) - \arctg(\bar{x}_o\bar{L}) \right), \quad (3.2)$$

где  $\bar{Q}_{\text{экв}}$  - отношение массы эквивалентного сосредоточенного заряда к массе всего линейного заряда  $Q_o = \gamma L$  (кг).

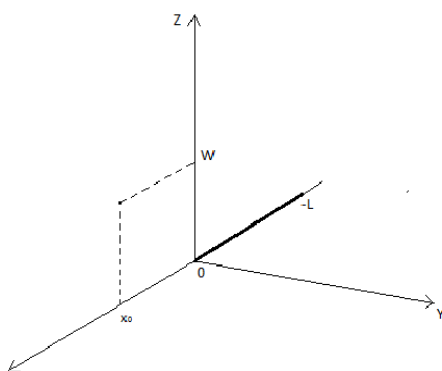


Рис. 3.1. Расположение линейного заряда в пространстве

На рис. 3.2 представлены зависимости  $\overline{Q_{экг}}$  от величины  $\overline{x_0}$  при различных значениях  $\overline{L}$ .

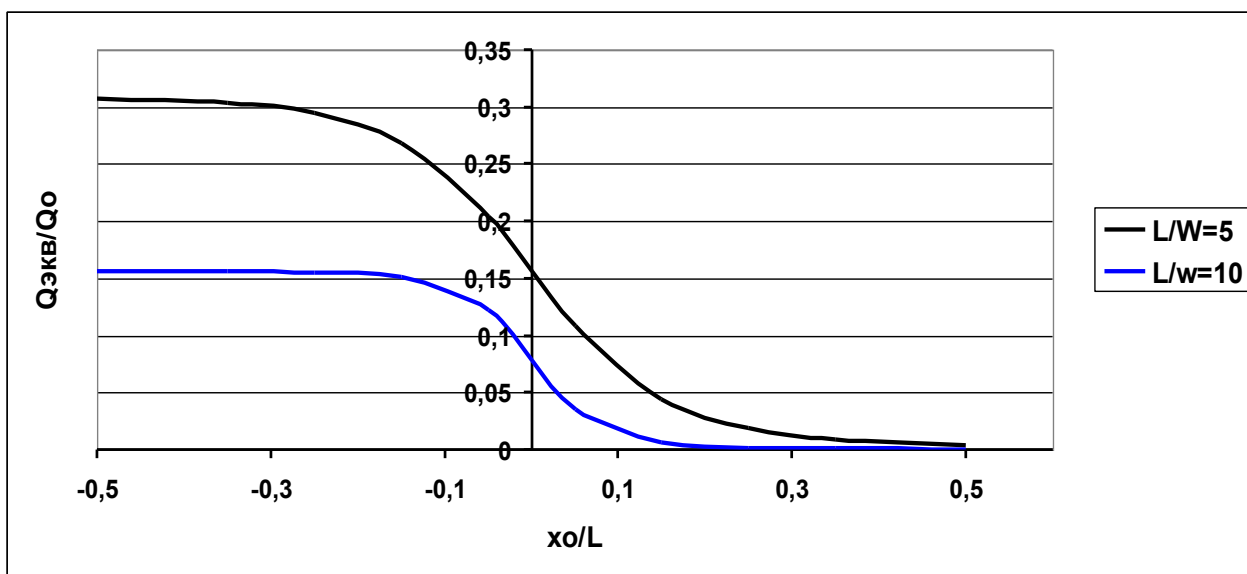


Рис. 3.2. Зависимости  $\overline{Q_{экг}}$  от величины  $\overline{x_0}$  при различных значениях  $\overline{L}$

Изменения величины  $\overline{Q_{экг}}(x_0, y, W)$  для точек, лежащих на прямой, задаваемой пересечением плоскостей  $z = W$  и  $x = x_0$ , описывается уравнением

$$\overline{Q_{экг}}(x_0, y, W) = \overline{Q_{экг}}(x_0, 0, W) \left( 1 + \frac{y^2}{W^2} \right)^2, \quad (3.3)$$

где  $y$  - текущая ордината, м.

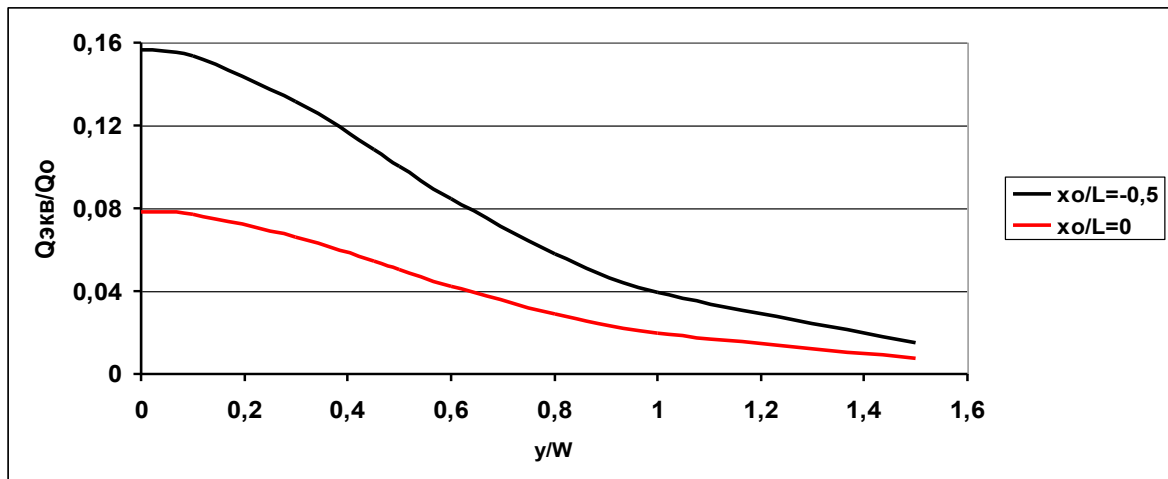


Рис. 3.3. Зависимости  $\overline{Q_{\text{экв}}}$  от величины  $y/W$  в различных поперечных сечениях линейного заряда

Характер изменения величины  $\overline{Q_{\text{экв}}}(x_0, y, W)$  в сечениях заряда плоскостями  $x = -0,5W$  и  $x = 0$  при  $\bar{L} = 10$  показан на рис. 3.3.

Анализ зависимостей, приведенных на рис. 3.2 и рис. 3.3, показывает, что величина эквивалентного заряда, а соответственно и скорость смещения среды быстро убывает при удалении от заряда как в направлениях коллинеарных заряду, так и в поперечных направлениях. При этом, величина  $Q_{\text{экв}}$  уменьшается более, чем в 10 раз по сравнению со значением на краю заряда, при удалении от края заряда на  $0,15L$ , а в поперечном направлении в любом сечении заряда - при удалении от оси заряда на  $1,5W$ .

На основании (3.1) определяем значения сосредоточенных зарядов, эквивалентных линейному заряду, для характерных точек среды:

а) над серединой заряда – точка  $(-0,5L, 0, W)$

$$Q_{\text{экв}}^{\text{центр}} = Q_{\text{экв}}(-0,5L, 0, W) = \gamma W \left[ \frac{L/2W}{1 + (L/2W)^2} + \arctg \frac{L}{2W} \right] \quad (3.4)$$

б) над краем заряда – точки  $(-L, 0, W)$  и  $(0, 0, W)$

$$Q_{\text{экв}}^{\text{край}} = Q_{\text{экв}}(0, 0, W) = \frac{\gamma W}{2} \left[ \frac{L/W}{1 + (L/W)^2} + \arctg \frac{L}{W} \right]. \quad (3.5)$$

В табл. 3.1 приведены расчеты отношения  $\frac{Q_{\text{экв}}^{\text{центр}}}{Q_{\text{экв}}^{\text{край}}}$  и параметра

$$k(L,W) = \frac{L/2W}{1+(L/2W)^2} + \arctg \frac{L}{2W} \text{ для различных значений величины } L/W.$$

Анализ табл. 3.1 показывает, что при  $L/W > 4$  можно с точность до 3,5% считать, что отношение  $\frac{Q_{\text{центр}}}{Q_{\text{край}}} = 2$ , а параметр  $k(L,W) \approx \pi/2$  с точностью до 4%.

Табл. 3.1. Значения величины  $\frac{Q_{\text{центр}}}{Q_{\text{край}}}$  и параметра  $k(L,W)$  от отношения  $L/W$ .

Показатели	$L/W$									
	1	2	3	4	5	6	8	10	12	
$\frac{Q_{\text{центр}}}{Q_{\text{край}}}$	1,344	1,706	1,865	1,931	1,961	1,976	1,989	1,994	1,997	
$k(L,W)$	0,8636	1,2854	1,4443	1,5071	1,5351	1,549	1,5611	1,5657	1,5678	

На основании (3.3)-(3.5) и свойства аддитивности сейсмических воздействий в ближней зоне определяем величины эквивалентного веерному заряду сосредоточенного заряда для различных областей среды, удаленных от плоскости веера на расстояние  $W$ . При расчетах принимаем, что эквивалентный сосредоточенный заряд, располагается в плоскости веера напротив точки среды, для которой определяется величина этого заряда. В соответствие с ранее полученными результатами при энергетическом суммировании учитывается вклад скважинных зарядов, удаленных друг от друга на расстояние до  $1,5W$ .

В дальнейшем будем полагать, что в верхней части выполняется условие  $L/W > 4$ .

Следовательно, для верхней части веера принимаем

$$Q_{\text{край}} \approx 0,5Q_{\text{центр}} \text{ и } Q_{\text{край}} \approx 0,5Q_{\text{центр}}. \quad (3.6)$$

На рис. 3.4 представлен веерный заряд с областями, в пределах которых расстояния между смежными зарядами имеют близкие значения.

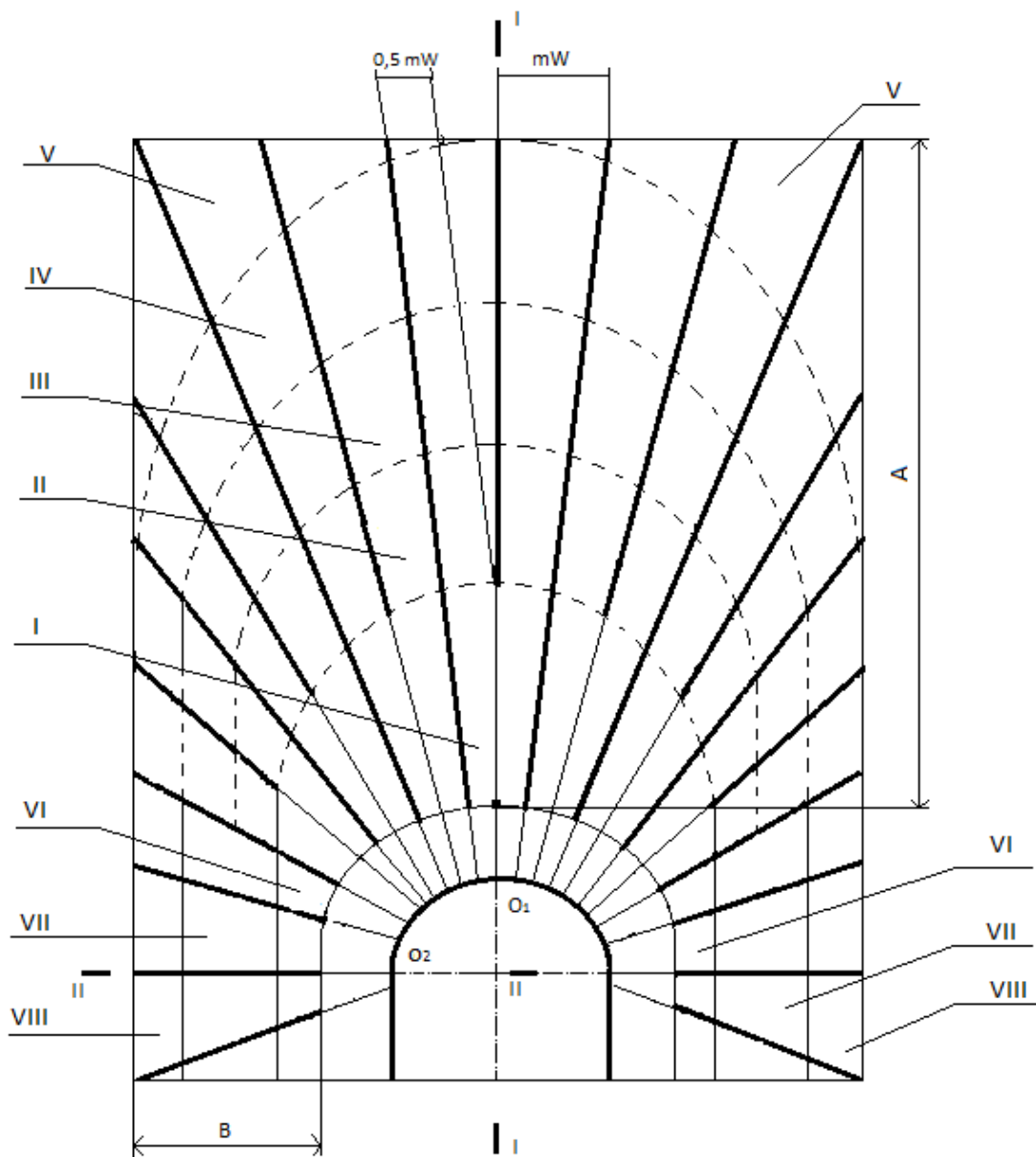


Рис. 3.4. Веерный заряд

### Область устьевых концов восходящих скважинных зарядов.

Расстояние между зарядами составляет  $0,5mW$ , где  $m$  - коэффициент сближения между зарядами в веере. В соответствии с (3.3), имеем

$$Q_{\text{экв}}(I) = \frac{2Q_{\text{экв}}^{\text{край}}}{(1 + (0,25m)^2)^2} + \frac{2Q_{\text{экв}}^{\text{край}}}{(1 + (0,75m)^2)^2} = \frac{\pi}{2} \gamma W \left[ \frac{1}{(1 + (0,25m)^2)^2} + \frac{1}{(1 + (0,75m)^2)^2} \right]. \quad (3.7)$$

$$\text{При } m = 1,1 \text{ получаем, } Q(I) \approx 1,913\gamma W. \quad (3.8)$$

### II. Область, расположенная выше области I.

Расстояние между зарядами составляет  $0,5mW$ , но происходит чередование: «край заряда» - «центр заряда» и т.д.

$$Q_{\text{экв}}(II) = Q_{\text{экв}}^{\text{край}} + \frac{2Q_{\text{экв}}^{\text{центр}}}{(1+(0,5m)^2)^2} + \frac{Q_{\text{экв}}^{\text{край}}}{(1+m^2)^2} + \frac{2Q_{\text{экв}}^{\text{центр}}}{(1+(1,5m)^2)^2} \\ = \frac{\pi}{2} \gamma W \left[ \frac{1}{2} + \frac{2}{(1+(0,5m)^2)^2} + \frac{1}{(1+m^2)^2} + \frac{1}{(1+(1,5m)^2)^2} \right]. \quad (3.9)$$

При  $m = 1,1$  получаем  $Q(II) \approx 3,023\gamma W$ . (3.10)

### III. Область, расположенная выше области II.

Расстояние между зарядами составляет  $0,7mW$ .

$$Q_{\text{экв}}(III) = Q_{\text{экв}}^{\text{центр}} + \frac{2Q_{\text{экв}}^{\text{центр}}}{(1+(0,7m)^2)^2} + \frac{Q_{\text{экв}}^{\text{центр}}}{(1+(1,4m)^2)^2} + \frac{2Q_{\text{экв}}^{\text{центр}}}{(1+(2,1m)^2)^2} \\ = \frac{\pi}{2} \gamma W \left[ 1 + \frac{2}{(1+(0,7m)^2)^2} + \frac{1}{(1+(1,4m)^2)^2} + \frac{1}{(1+(2,1m)^2)^2} \right]. \quad (3.11)$$

При  $m = 1,1$  получаем,  $Q(III) \approx 3,162\gamma W$ . (3.12)

### IV. Концевая область, примыкающая к верхней границе веера.

Расстояние между зарядами составляет  $mW$ .

$$Q_{\text{экв}}(IV) = Q_{\text{экв}}^{\text{край}} + \frac{2Q_{\text{экв}}^{\text{край}}}{(1+m^2)^2} + \frac{2Q_{\text{экв}}^{\text{край}}}{(1+(2m)^2)^2} = \frac{\pi}{2} \gamma W \left[ \frac{1}{2} + \frac{1}{(1+m^2)^2} + \frac{1}{(1+(2m)^2)^2} \right]. \quad (3.13)$$

При  $m = 1,1$  получаем,  $Q(IV) \approx 1,152\gamma W$ . (3.14)

### V. Угловые области.

Учитывается действие краевой части лишь одного заряда.

$$Q(V) \approx \frac{\pi}{4} \gamma W. \quad (3.15)$$

При  $m = 1,1$  получаем,  $Q(V) \approx 0,785\gamma W$ . (3.16)

Для боковых областей нижней части веера  $L/W = 2...3$ . Согласно данным, приведенным в табл. 1, в этом случае

$$(Q_{\text{экв}}^{\text{центр}})^* \approx 1,35\gamma W \text{ и } (Q_{\text{экв}}^{\text{край}})^* \approx 0,55(Q_{\text{экв}}^{\text{центр}})^*. \quad (3.17)$$

## VI. Область устьевых концов скважинных зарядов в нижней части веера.

Расстояние между зарядами составляет  $0,5mW$ .

$$Q_{\text{экв}}(VI) = \frac{2(Q_{\text{экв}}^{\text{край}})^*}{(1+(0,25m)^2)^2} + \frac{2(Q_{\text{экв}}^{\text{край}})^*}{(1+(0,75m)^2)^2} = 1,35\gamma W \left[ \frac{1,1}{(1+(0,25m)^2)^2} + \frac{1,1}{(1+(0,75m)^2)^2} \right]. \quad (3.18)$$

$$\text{При } m = 1,1 \text{ получаем, } Q(VI) \approx 1,809\gamma W. \quad (3.19)$$

## Область средней части зарядов в нижней части веера.

Расстояние между зарядами составляет  $0,65mW$ .

$$Q_{\text{экв}}(VII) = \frac{2(Q_{\text{экв}}^{\text{центр}})^*}{(1+(0,325m)^2)^2} + \frac{2(Q_{\text{экв}}^{\text{центр}})^*}{(1+(0,975m)^2)^2} = 1,35\gamma W \left[ \frac{2}{(1+(0,325m)^2)^2} + \frac{2}{(1+(0,975m)^2)^2} \right]. \quad (3.20)$$

$$\text{При } m = 1,1 \text{ получаем, } Q(VII) \approx 2,707\gamma W. \quad (3.21)$$

## VIII. Концевая область зарядов в нижней части веера.

Расстояние между зарядами составляет  $0,8mW$ .

$$Q_{\text{экв}}(VIII) = \frac{2(Q_{\text{экв}}^{\text{край}})^*}{(1+(0,4m)^2)^2} + \frac{2(Q_{\text{экв}}^{\text{край}})^*}{(1+(1,2m)^2)^2} = 1,35\gamma W \left[ \frac{1,1}{(1+(0,4m)^2)^2} + \frac{1,1}{(1+(1,2m)^2)^2} \right]. \quad (3.22)$$

$$\text{При } m = 1,1 \text{ получаем, } Q(VIII) \approx 1,24\gamma W. \quad (3.23)$$

Для придания наглядности полученным результатам приведем эпюры начальных скоростей точек среды, удаленных на расстояние  $W$  от плоскости веерного заряда.

Согласно [108] в ближней зоне сейсмического действия взрыва начальная скорость смещения среды при взрыве сосредоточенного заряда равна

$$v = K(\sqrt[3]{Q/R})^2, \quad (3.24)$$

где  $K$  - коэффициент, учитывающий свойства среды, параметры ВВ и условия взрывания,  $R$  - текущее расстояние от центра заряда до рассматриваемой точки среды, м.

На основании (3.6), (3.24) скорость смещения среды на расстоянии  $W$  от середины длинного линейного заряда ( $L/W > 4$ ) равна

$$v = K(\pi\gamma/2)^{\frac{2}{3}}W^{-\frac{4}{3}}, \text{ м/с.} \quad (3.25)$$

На рис. 3.5 приведены построенные на основании (3.7)-(3.25) эпюры относительной скорости смещения для точек среды, находящихся в сечениях I-I и II-II (рис. 3.4) на расстоянии  $W$  от плоскости веерного заряда. Принятые обозначения на рис. 5:  $X$  и  $Y$  - удаление от т.  $O_1$  и  $O_2$  вдоль линий I-I и II-II, соответственно;  $A$  - высота верхней части веера, м;  $B$  - ширина нижней части веерного заряда, м (рис. 3.4).

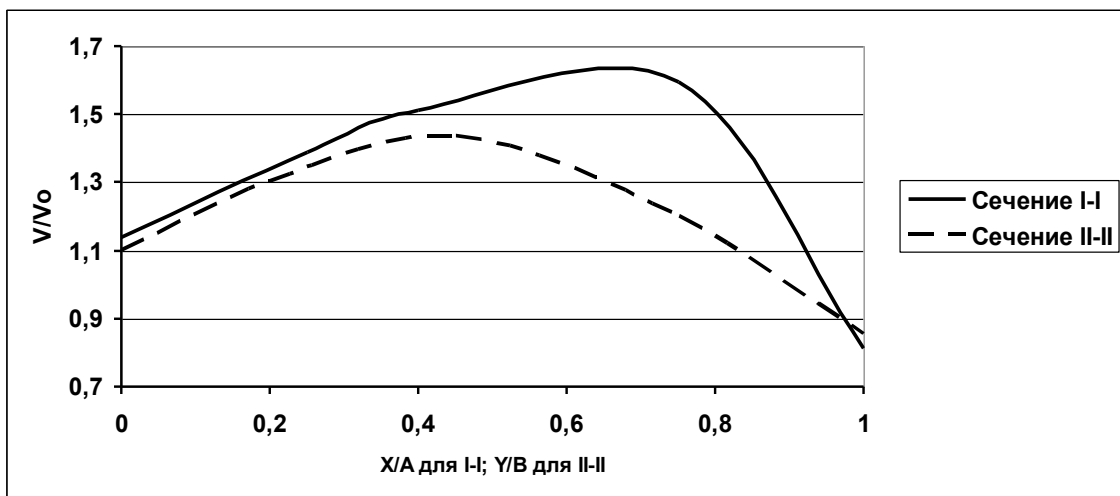


Рис. 3.5. Эпюры относительной скорости смещения точек среды в массиве пород, находящихся в сечениях I-I и II-II (рис. 4) на расстоянии  $W$  от плоскости веерного заряда.

Анализ зависимостей, приведенных на рис. 3.5, показывает, что вследствие неравномерности распределения ВВ в плоскости веера наблюдается существенная неравномерность в скоростях смещения среды в массиве пород. Расчеты на основании (3.12), (3.16) и (3.24) показывают, что максимальная скорость смещения более, чем в 2,5 раза превышает ее минимальное значение.

Полученные результаты позволяют обосновать экспериментальные методы проверки стойкости ЭВВ, сенсibilизированных пузырьками газа, к динамическим воздействиям на предмет возможности их эффективного применения при веерной отбойке, а также представляют интерес при

рассмотрении разрушительного действия веерного заряда на отбиваемые породы.

### **3.2. Обоснование параметров моделирования действия взрыва веерного заряда на смежный веерный заряд**

В настоящее время в связи с разработкой различных видов бестарных ЭВВ, способных удерживаться в восходящих скважинах (шпурах) после зарядки, а также малогабаритных средств их механизированного заряжения происходит распространение применения ЭВВ в подземной добыче [72, 87].

Однако для эффективного применения бестарных ЭВВ наряду со средствами механизации зарядных работ и ЭВВ, способными удерживаться в восходящих скважинах (шпурах), требуется обеспечение условий надежной детонации зарядов.

Одним из негативных факторов, влияющим на надежность детонации ЭВВ, сенсibilизированных пузырьками газа, является ударное (динамическое) воздействие на заряд ЭВВ со стороны массива при его сотрясениях, вызванных опережающими взрывами смежных зарядов, о чем сказано во второй главе.

Экспериментальная оценка стойкости ЭВВ, сенсibilизированных пузырьками газа, при шпуровом взрывании не вызывает сложностей. В забое бурится два параллельных между собой шпура. Шпуры заряжаются и взрываются с замедлением друг от друга. При этом происходит измерение скорости детонации в обоих шпурах. Если в заряде, взрываемом с последним, скорость детонации не уменьшилась, то считается, что на данном расстоянии между зарядами ухудшения сенсibilизации не происходит [45].

Сложности возникают при оценке стойкости ЭВВ, сенсibilизированных пузырьками газа, в случае их использования в веерных зарядах.

Учитывая важность сохранения детонационных способностей веерных зарядов ЭВВ, подвергнувшихся динамическому воздействию со стороны ранее взорвавшихся вееров, разработка способов экономически доступной экспериментальной оценки стойкости ЭВВ, сенсibilизированных пузырьками

газа, к данному виду нагрузок является важной и актуальной задачей для практики ведения горных работ.

Теоретические исследования влияния на детонационные способности бестарных ЭВВ внешних динамических воздействий показали, что оказывает влияние акустическая жесткость среды, окружающей заряд, и начальная скорость смещения стенок скважины (шпура) [11, 12].

Данное обстоятельство, с учетом результатов, приведенных в предыдущем параграфе, позволяет распространить описанный выше способ оценки стойкости ЭВВ, сенсублизированных пузырьками газа, при шпуровом взрывании на веерное взрывание [88].

Положим, что в безграничной среде имеется линейный заряд длины  $l$  (м) с постоянной линейной плотностью заряжения  $\gamma_{unyp}$ , кг/м. Направим вдоль оси заряда ось абсцисс. Начало системы координат  $O(xy)$  совместим с левым концом заряда, как показано на рис. 3.6. Тогда при взрыве линейного заряда величина эквивалентного сосредоточенного заряда в т.  $A(\Delta, W)$ , равна [108]

$$Q_{unyp} = \frac{\gamma W}{2} \left( \frac{W(l-\Delta)}{W^2 + (l-\Delta)^2} + \frac{W\Delta}{W^2 + \Delta^2} + \arctg\left(\frac{l-\Delta}{W}\right) + \arctg\left(\frac{\Delta}{W}\right) \right) = \beta(\bar{l}, \bar{\Delta}) \gamma W, \quad (3.26)$$

где  $\beta(\bar{l}, \bar{\Delta}) = \frac{1}{2} \left( \frac{\bar{l} - \bar{\Delta}}{1 + (\bar{l} - \bar{\Delta})^2} + \frac{\bar{\Delta}}{1 + \bar{\Delta}^2} + \arctg(\bar{l} - \bar{\Delta}) + \arctg(\bar{\Delta}) \right)$  - параметр, зависящий от отношений  $\bar{l} = l/W$ ,  $\bar{\Delta} = \Delta/W$ .

Максимальное значение параметра  $\beta(\bar{l}, \bar{\Delta})$  определяется из уравнения  $\frac{d(\beta(\bar{l}, \bar{\Delta}))}{d(\bar{\Delta})} = 0$  и равно

$$\beta^* = \frac{(\bar{l}/2)}{1 + (\bar{l}/2)^2} + \arctg(\bar{l}/2). \quad (3.27)$$

Равенство (3.27) достигается при  $\bar{\Delta} = 0,5\bar{l}$ .

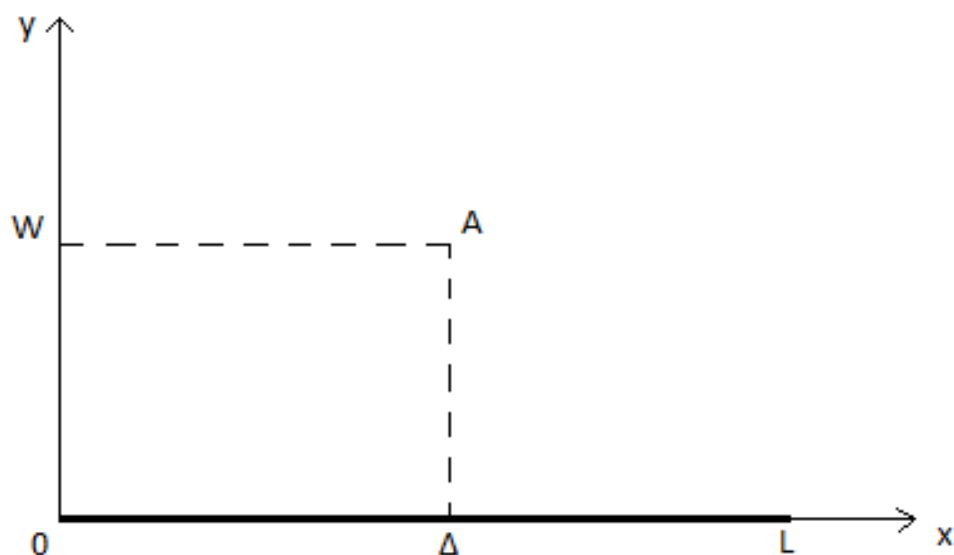


Рис. 3.6. Линейный заряд

При взрыве веерного заряда максимальная величина эквивалентного сосредоточенного заряда равна [88]

$$Q_{\text{веер}} = \beta_{\text{веер}}^* \gamma_{\text{веер}} W_{\text{веер}}, \quad (3.28)$$

где коэффициент  $\beta_{\text{веер}}^* \approx 3,2$ ;  $\gamma_{\text{веер}}$  - линейная плотность скважинного заряда в веере;  $W_{\text{веер}}$  - л.н.с. веерного заряда, м.

Согласно [108] в ближней зоне сейсмического действия взрыва начальная скорость смещения среды при взрыве сосредоточенного заряда равна

$$v = K \left( \sqrt[3]{Q} / R \right)^2, \text{ м/с} \quad (3.29)$$

где  $K$  - коэффициент, учитывающий свойства среды, параметры ВВ и условия взрывания,  $R$  - текущее расстояние от центра заряда до рассматриваемой точки среды, м.

Так как взрывы выполняются в одинаковых средах, то для соблюдения подобия необходимо выполнения условия равенства начальных скоростей смещения стенок шпура и скважины

$$v_{\text{веер}} = v_{\text{шпур}}. \quad (3.30)$$

На основании (3.29), (3.30) получаем

$$\frac{\sqrt[3]{Q_{\text{шпур}}}}{W_{\text{шпур}}} = \frac{\sqrt[3]{Q_{\text{веер}}}}{W_{\text{веер}}}, \quad (3.31)$$

где  $W_{шпур}$  - искомое расстояние между шпурами, моделирующими воздействие взрыва веерного заряда на смежный веер.

В случае создания веерного и линейного зарядов из различных ВВ на основании принципа энергетического подобия [84] и (3.26), (3.38), (3.31), определяем

$$W_{шпур} = W_{веер} \left( \frac{\beta^* \gamma_{шпур} q_{шпур}}{\beta_{веер}^* \gamma_{веер} q_{веер}} \right)^{0,5}, \quad (3.32)$$

где  $q_{шпур}$  и  $q_{веер}$  - удельная теплота взрыва шпурового и веерного зарядов, соответственно, Дж/кг.

Учитывая, что линейная плотность заряда при использовании бестарных ЭВВ пропорциональна квадрату диаметра скважины (шпура), находим

$$W_{шпур} = k_o \frac{d_{шпур}}{d_{веер}} W_{веер} \left( \frac{\beta^* \gamma_{шпур} q_{шпур}}{\beta_{веер}^* \gamma_{веер} q_{веер}} \right)^{0,5}, \quad (3.33)$$

где  $k_o$  – коэффициент, учитывающий отклонение скважин веера при их бурении ( $k_o \approx 0,98$  [102]).

При  $l/W \approx 2$  согласно (3.27) определяем:  $\beta^* = 1,285$ . Тогда имеем

$$W_{шпур} = 0,63 \frac{d_{шпур}}{d_{веер}} W_{веер} \left( \frac{\rho_{шпур} q_{шпур}}{\rho_{веер} q_{веер}} \right)^{0,5}. \quad (3.34)$$

В случае использования при создании веерного и линейного зарядов одинакового ВВ, которое детонирует при различных диаметрах зарядов с различной скоростью, получаем

$$W_{шпур} = 0,63 \frac{d_{шпур} D_{шпур}}{d_{веер} D_{веер}} W_{веер} \left( \frac{\rho_{шпур}}{\rho_{веер}} \right)^{0,5}, \quad (3.35)$$

так как в этом случае приблизительно выполняется равенство  $\frac{q_{шпур}}{q_{веер}} = \frac{D_{шпур}^2}{D_{веер}^2}$  [4].

Здесь  $D_{шпур}$  и  $D_{веер}$  – скорость детонации шпурового и скважинного зарядов ВВ.

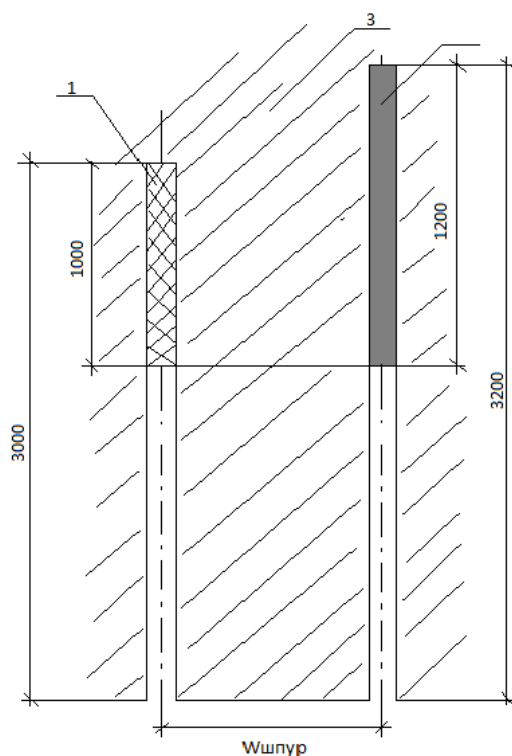


Рис. 3.7. Схема моделирования динамического воздействия опережающего взрыва веерного заряда на смежный веер при помощи шпуровых зарядов

Для оценки стойкости ЭВВ, сенсibilизированных пузырьками газа, к динамическому воздействию опережающего взрыва веерного заряда на смежный веер на рис. 3.7 приведена схема моделирования этого воздействия при помощи шпуровых зарядов. На рис. 3.7: 1 – шпуровой заряд, взрываемый с характерным для веерной отбойки временем замедления - 25 мс; 2 – шпуровой заряд, взрываемый первым; 3 – массив.

### 3.3. Методика оценки воздействия взрыва веерного заряда на детонационную способность смежного веерного заряда

Для экспериментальной проверки, предлагаемой были проведены опытные взрывы. Эксперименты заключались в выполнении взрывов шпуровых и скважинных зарядов, имеющих плотность заряжания 1,20-1,22 г/см<sup>3</sup>, в забоях, представленных мартит-железно-сланцевой рыхлой рудой.

Выбор плотности заряжания ЭВВ и горной породы основывался на чувствительности к расстоянию между «активным» и «испытуемым» зарядами

сохранения детонационных способностей такого заряда ЭВВ после динамического воздействия (табл. 2.9).

Каждый эксперимент включался для сравнения действий веерного и шпурового зарядов и включал два отдельных опыта.

В ходе первого опыта перпендикулярно поверхности забоя бурились 2 шпура диаметром 51 мм, длиной 4000 мм на расчетном расстоянии между осями шпуров. Оба шпура заряжались на 1500 мм ЭВВ «Аргунит РХ». Для обратного инициирования зарядов использовалась система СИНВ и промежуточные малогабаритные детонаторы ПДМ-25-Ш. При проведении опыта первоначально взрывался «активный заряд», затем с замедлением 50-100 мс взрывался «испытываемый заряд» (рис. 2.4). В последнем измерялась скорость детонации. Измерение осуществлялись при помощи приборов «VOD Vate» и «HandyTrap», позволяющим непрерывно измерять величину сопротивления электрической цепи аксиального датчика-проводника, проложенного вдоль заряда ЭВВ.

В ходе второго опыта перпендикулярно поверхности забоя бурились 4 скважины диаметром 89 мм, длиной 4000 мм согласно схеме, представленной на рис. 3.8. Скважины заряжались на 1500 мм ЭВВ. Для обратного инициирования зарядов использовалась система СИНВ и промежуточные малогабаритные детонаторы ПДМ-25-Ш. Три скважины инициировались мгновенно («активный заряд», моделирующий действие веерного заряда), а четвертая («испытываемый заряд», моделирующий скважину смежного веерного заряда) – с замедлением 50-100 мс. При проведении опыта первоначально взрывался «активный заряд», затем с замедлением 50-100 мс взрывался «испытываемый заряд» (рис. 2.4). В последнем заряде измерялась скорость детонации. Измерение осуществлялись при помощи приборов «VOD Vate» и «HandyTrap», позволяющим непрерывно измерять величину сопротивления электрической цепи аксиального датчика-проводника, проложенного вдоль заряда ЭВВ.

Три параллельных скважины оказывали действие эквивалентное действию веерного заряда на смежный веер в области его наиболее интенсивного воздействия действия (область III на рис. 3.4).

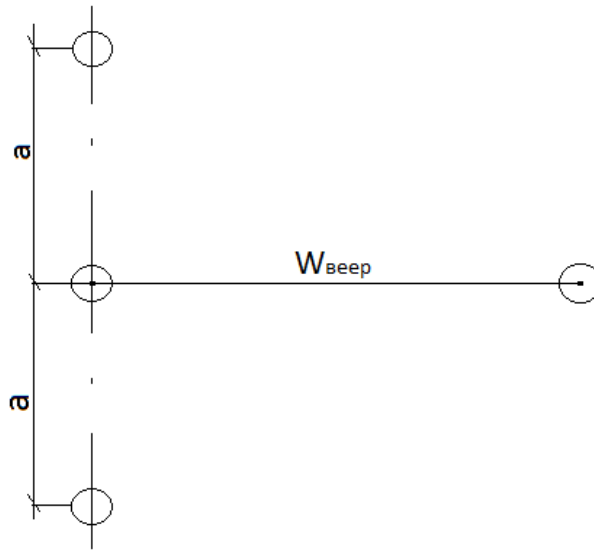


Рис. 3.8. Схема расположения скважин при имитации действия веерного заряда на соседний веер

Согласно [108] в случае взрыва трех одинаковых сближенных ( $0,15 < \frac{a}{W_{\text{вееp}}} < 0,65$ ) скважинных зарядов эквивалентный им по действию заряд равен

$$Q_{\text{эkv}} = Q_{\text{скв}} \left( 1 + \frac{2}{1 + \frac{a}{W_*}} \right), \quad (3.36)$$

где  $Q_{\text{эkv}}$  - сосредоточенный заряд, эквивалентный скважинному, кг;  $a$  – расстояние между сближенными скважинами, м;  $W_{\text{вееp}}$  – расстояние от системы сближенных скважин («активный заряд») до «испытуемого заряда», м (рис. 3.8).

Считая  $\beta^* = 1,285$ , на основании (3.26)- (3.28) и (3.36) определяем

$$\frac{a}{W_*} = \frac{2}{\frac{\beta}{\beta^*} - 1} - 1 = \frac{2}{\frac{3,2}{1,285} - 1} - 1 \approx 0,34. \quad (3.37)$$

При использовании в «активном» и «испытуемом» зарядах ЭВВ одинаковой плотности, в соответствие с (3.35), имеем

$$W_{\text{инур}} = 0,63 \frac{d_{\text{инур}} D_{\text{инур}}}{d_{\text{вееp}} D_{\text{вееp}}} W_{\text{вееp}}. \quad (3.38)$$

Эксперименты по взрыванию 89-миллиметровых зарядов, не подвергаемых динамическому воздействию, в рудах Яковлевского месторождения разрабатываемых ООО «Яковлевский ГОК» составляет 5200-5400 м/с [79]. Инициирование зарядов обратное посредством промежуточных малогабаритных детонаторов ПДМ-25-Ш. Согласно результатам опытов, приведенным в табл. 2.5 и 2.6, имеем:

$$\begin{aligned} D_{шнур} &= 4950 \text{ м/с при } \rho_{шнур} = 1,10-1,12 \text{ г/см}^3, \\ D_{шнур} &= 4650 \text{ м/с при } \rho_{шнур} = 1,20-1,22 \text{ г/см}^3. \end{aligned} \quad (3.39)$$

Тогда, при  $d_{шнур} = 0,051$  м и  $d_{скв} = 0,089$  м, на основании (3.38), (3.39), получаем

$$W_{шнур} \approx 0,3W_{вееp}. \quad (3.40)$$

При  $d_{шнур} = 0,051$  м и  $d_{скв} = 0,105$  м -  $W_{шнур} \approx 0,25W_{вееp}$ .

Известно, что при взрыве «активного» шнурового заряда в мартит-железно-слюдковой рыхлой руде в «испытуемом заряде» плотностью 1,20-1,22 г/см<sup>3</sup>, удаленном на 500 мм ( $\bar{r}=20$ ) заряде детонация не возбуждается, а при  $\bar{r}=30$  детонация уже возникает ( $d_{шнур} = 0,051$  м).

Для верификации методики проведены эксперименты по взрыванию зарядов по схеме, представленной на рис. 3.8. Порядок проведения экспериментов описан выше.

В первой серии опытов -  $\bar{r}=20$ .

Так как  $d_{шнур} = 0,051$  м, то  $W_{вееp} = 20 \cdot 0,051 / 2 = 0,51$  м. (3.41)

При  $d_{скв} = 0,089$  м согласно (3.40) и (3.41), получаем

$$W_{вееp} = 3,3W_{шнур} = 3,3 \cdot 0,051 \approx 1,7 \text{ м}. \quad (3.42)$$

Из (3.37), (3.42), имеем  $a = 0,34 \cdot W_{шнур} = 0,34 \cdot 1,7 \approx 0,6$  м.

Во второй серии опытов -  $\bar{r}=30$ .

Тогда, выполняя аналогичные расчеты, имеем  $a = 0,9$  м,  $W_{вееp} = 2,5$  м.

Результаты экспериментальных взрывов приведены в таблицах 3.2, 3.3 (средние значения по трем сериям опытов).

Табл. 3.2. Результаты испытаний влияния динамического воздействия шпурового заряда на веерный заряд ЭВВ в мартит-железно-слюдковой рыхлой руде при  $\bar{r}=20$

Показатели заряда	Вид динамического воздействия	
	Шпуровой заряд	Веерный заряд
Плотность заряда, г/см <sup>3</sup>	1,20	1,20
Скорость детонации, м/с	Детонации нет	Детонации нет

Табл. 3.3. Результаты испытаний влияния динамического воздействия шпурового заряда на веерный заряд ЭВВ в мартит-железно-слюдковой рыхлой руде при  $\bar{r}=30$

Показатели заряда	Вид динамического воздействия	
	Шпуровой заряд	Веерный заряд
Плотность заряда, г/см <sup>3</sup>	1,20	1,20
Скорость детонации, м/с	3750	4120

Анализ полученных результатов свидетельствует о корректности предлагаемой методики оценки воздействия взрыва веерного заряда на детонационную способность смежного веерного заряда, взрываемого с замедлением, при использовании ЭВВ с пероксидной газификацией. Второе научное положение подтверждено.

### **Выводы по главе III**

Разработана методика определения величины сосредоточенного заряда эквивалентного веерному заряду по воздействию на данную точку массива.

Показано, что наблюдается существенная неравномерность в скоростях смещения среды в массиве пород при взрыве веерного заряда. Максимальная скорость смещения более, чем в 2,5 раза превышает ее минимальное значение.

Разработан способ моделирования динамического воздействия опережающего взрыва веерного заряда на смежный веер при помощи шпуровых зарядов.

Показано, что расстояние между модельными шпуровыми зарядами зависит от величины л.н.с. веерного заряда, отношений диаметров, плотностей и удельной теплоты взрыва ВВ шпуровых и веерных зарядов.

Разработана и обоснована методика экспериментальной оценки воздействия взрыва веерного заряда на детонационную способность смежного веерного заряда бестарного ЭВВ, сенсibilизированного пузырьками газа, взрываемого с замедлением. **Это подтверждает второе научное положение.**

## **ГЛАВА IV. ТЕХНОЛОГИЯ ВЗРЫВНЫХ РАБОТ С ПРИМЕНЕНИЕМ ЭВВ С ПЕРОКСИДНОЙ ГАЗОГЕНЕРАЦИЕЙ, УСТОЙЧИВОЙ К ВНЕШНИМ ДИНАМИЧЕСКИМ НАГРУЗКАМ**

### **4.1. Обоснование выбора ЭВВ «Аргунит РХ» для ведения взрывных работ на Яковлевском ГОКе**

Бестарное (наливное) ЭВВ «Аргунит РХ» с пероксидной газогенерацией имеет существенные преимущества по сравнению с другими видами ВВ:

#### **1. По сравнению с тротилосодержащими ЭВВ –**

более безопасны как при применении, так и в логистических операциях (стоимость транспортировки компонентов ЭВВ в 2-3 раза ниже тротилосодержащих, так как компоненты имеют класс опасности 5.1), также значительно ниже затраты на хранение;

выделяют значительно меньше вредных газов, что сокращает время проветривания и увеличивает скорость, а также снижает риск профессиональных заболеваний;

значительно дешевле - наливные ЭВВ практически в два раза дешевле патронированных тротилосодержащих ВВ, и на 20-40% тротилосодержащих гранулированных ВВ – граммонитов.

При этом использование ЭВВ «Аргунит РХ» на ООО «Яковлевский ГОК» показали высокие технико-экономические показатели за 2024 год:

- фактический коэффициент использования шнура – 0,95;
- удельный расход – 3,3 кг/м<sup>3</sup>.

#### **2. По сравнению с игданитом (АС/ДТ) и гранулитами:**

ЭВВ «Аргунит РХ» обеспечивает разрушение пород любой крепости и обводненности, в то время как АС/ДТ, изготовленное на пористой селитре имеет более низкую работоспособность, тем более по сравнению со смесевыми взрывчатыми веществами (ВВ), изготавливаемыми на месте применения из

плотной аммиачной селитры и дизельного топлива, имеющего низкую физическую стабильность из-за расслоения компонентов.

Высокая работоспособность обеспечивается высокой скоростью детонации «Аргунит РХ», которая составляет 4800-5400 м/с (для сравнения скорость детонации АС/ДТ обычно составляет 3000 м/с). Это позволяет уменьшить расход ВВ, количество бурения, увеличить КИШ, улучшить качество дробления и выход негабарита.

Гранулиты в отличие от ЭВВ неводоустойчивы, что может приводить к некачественному взрыванию или отказам. Пневмозаряжание гранулитов связано с повышенной опасностью, сопровождается пылением, при веерном заряжении могут быть значительные до 10-15 % просыпи. Благодаря меньшему времени проветривания при использовании ЭВВ можно увеличить скорость добычи.

В работе [125] показано, что ANFO, как правило, на 40 % дешевле наливных ЭВВ.

Но даже при самых дешевых ANFO, наливное ЭВВ экономически целесообразнее. Наливное ЭВВ позволяет сократить расходы на ВВ на 25 %, а расходы на буровзрывные работы на 14 %. Сочетание экономических факторов и других практических преимуществ, позволяет говорить о более высоком уровне эффективности наливных ЭВВ.

### **3. По сравнению с патронированными ЭВВ:**

Стоимость патронированных ЭВВ, а также их транспортировки и хранения существенно выше компонентов наливных ЭВВ.

При замещении патронированных ВВ практически исключается ручной труд, достаточно установить зарядный шланг в шпур и закачать требуемое количество.

Эффективное заполнение шпура при использовании патронированных ВВ составляет 60-70%. Для наливных ЭВВ этот параметр составляет 100 %, что обеспечивает непрерывную колонку заряда с полным заполнением заряжаемой части шпура.

Стоимость строительства производства патронированных ЭВВ значительно выше, чем строительство производства компонентов ЭВВ, так как патронированные ЭВВ являются ВВ, а компоненты ЭВВ относятся к классу 5.1. (окислители). При этом затраты на производство упакованных в ящики патронов значительно выше наливных ЭВВ.

Кроме этого, ЭВВ «Аргунит РХ»:

допущено для ведения взрывных работ в сульфидсодержащих рудах, к которым относятся руды Яковлевского месторождения, разрабатываемые ООО «Яковлевский ГОК»;

имеет малый критический диаметр, что позволяет применять данное ЭВВ при шпуровой отбойке;

обладает необходимыми реологическими свойствами для удержания в восстающих шпурах и скважинах (диаметром до 105 мм);

пригодно для механизированного заряжения шпуров и скважин.

Вопросы механизации зарядных работ с применением ЭВВ «Аргунит РХ» рассмотрены в следующем параграфе.

#### **4.2. Обоснование выбора оборудования для производства зарядных работ при формировании шпуровых и скважинных зарядов**

Настоящий параграф написан на основании работ [15, 121].

В параграфе представлен обзор средств механизации, позволяющих осуществлять в подземных условиях зарядание шпуров и скважин ЭВВ «Аргунит РХ». Данное ЭВВ специально разработано для использования при подземной добыче, так как благодаря высокой вязкости способно удерживаться в восходящих скважинах (шпурах) после выполнения зарядных работ. Представлены зарядно-смесительные устройства и приведены их технические характеристики. Сделан вывод, что технология взрывных работ, основанная на применении ЭВВ «Аргунит РХ», может быть рекомендована для применения горным предприятиям, особенно разрабатывающим подземным способом сульфидные руды.

В настоящее время основной объем взрывных работ при открытой добыче полезных ископаемых осуществляется с применением эмульсионных взрывчатых веществ (ЭВВ) [1, 95]. Это связано с высокими потребительскими свойствами данных взрывчатых веществ (ВВ), а также тем, что ЭВВ можно изготавливать на местах производства взрывных работ, что значительно снижает затраты на логистику и выполнение охранных мероприятий.

Однако при подземной добыче применение более безопасного и экономичного ЭВВ имеет ограниченное распространение. Это объясняется особенностями технологий подземной добычи полезных ископаемых, для которых характерны стесненные условия и широкое применение восстающих зарядов ВВ. Последнее сужает область применения патронированных ЭВВ и не позволяет производителям взрывных работ полностью отказаться от штатных тротилосодержащих, гранулированных ВВ, либо применять комбинированно.

Решение вопроса о расширении применения ЭВВ при подземной добыче наметилось в применении наливных ЭВВ с химической газогенерацией. Последняя обеспечивает как высокий уровень безопасности, так как заряжаемая эмульсия приобретает свойства ВВ будучи уже размещенной в скважине (шпуре), так и наименьшие экономические затраты для придания эмульсии взрывчатых свойств (по сравнению с другими способами сенсбилизации).

Однако для эффективного применения наливных ЭВВ требуется выполнения комплекса технологических и технических решений, направленных на обеспечение взрывников-практиков:

- различными средствами механизации зарядных работ, позволяющими выполнять взрывные работы в самых разных условиях – при проходке стволов и капитальных выработок на горизонте откатки, нарезке вспомогательных выработок, включая восходящие, скважинной (шпуровой) отбойке, дроблении негабарита и ликвидации завесаний;
- матричными эмульсиями, способными к газогенерации в холодном состоянии;

- ЭВВ, способными удерживаться в восходящих скважинах (шпурах) после зарядных работ.

При подземной добыче в РФ потребляются значительные объемы ВВ, поэтому решение вопроса о переходе на ЭВВ взамен штатных тротилосодержащих ВВ является актуальной технической и научной задачей.

Одним из наиболее важных условий внедрения наливных ЭВВ на подземных рудниках является разработка, испытание и производство отечественных средств зарядания наливных ЭВВ для любых условий разработок горных выработок.

Рассмотрим средства механизации, позволяющие осуществлять зарядание шпуров и скважин высоковязким ЭВВ [15, 79, 121]. ЭВВ «Аргунит РХ» специально разработано для применения в подземных условиях [71]. Матрица эмульсионная РХ способна к газогенерации в холодном состоянии, а высокая вязкость и липучесть позволяет ему удерживаться в восходящих скважинах (шпурах) после зарядных работ без дополнительных запорных устройств и рукавов.

Ниже приведены разработанные шпуровые зарядчики и зарядно-смесительные модули, их технические характеристики [15, 79, 121].

### **Зарядчик эмульсионный шпуровой для подземных работ ЗЭШ РХ-1 (пневматический)**

Легкий (13-15 кг) ранцевый порционный зарядчик (может изготавливаться с порцией ЭВВ 250 гр или 500 гр) для зарядания шпуров в узких и удаленных участках, в том числе вертикальных. Указанный механизм позволяет получать плотность ЭВВ – 0,85–1,35 г/см<sup>3</sup> и эффективно заряжать шпуры при вязкости эмульсии 40-140 Па·с.

Может изготавливаться в двух вариантах, когда в качестве энергоносителя является шахтная магистраль сжатого воздуха или блок аккумуляторов, в этом случае, зарядчик становится автономным. Зарядание батарей производится с помощью универсальной зарядной станции, которая может работать от 24В и 220В.

Внешний вид показан на рис 4.1.

Основные характеристики приведены в табл. 4.1.



Рис. 4.1. Зарядчик эмульсионный шпуровой РХ-1.

Использование зарядчика позволяет замещать дорогостоящие патронированные ВВ, используемые в качестве основного заряда.

В качестве детонатора можно использовать малогабаритные промежуточные детонаторы.

Зарядчик пневматический шпуровой РХ-1 для подземных работ предназначен для изготовления ЭВВ Аргунит РХ-Н и заряжания шпуров (в т.ч. вертикальных при ручном бурении) в узких и удаленных участках подземных выработок, также может применяться для изготовления накладных зарядов при вторичном дроблении.

Табл. 4.1. Технические характеристики зарядчика пневматического шпурового РХ-1

1.	Сухой вес, не более	13 -15 кг
2.	Производительность , до	8-10 кг/мин
3.	Длина зарядного шланга	5 м
4.	Диаметр зарядного шланга	19 мм
5	Потребляемая мощность	0.3 кВт
6	Дистанционное включение зарядчика	Есть
7.	Рабочее давление воздуха	2-3 атм
8.	Зарядчик порционный, при двух вариантах построения	0.25 кг или 0,5 кг

## Зарядчик эмульсионный шпуровой для подземных работ РХ-2

ЗЭШ РХ-2 предназначен для приготовления эмульсионного взрывчатого вещества Аргунит РХ-Н, заряжания шпуров (в т. ч. вертикальных) на проходческих работах.

Зарядчик пневматический ЗЭШ РХ-2 предназначен для работы на проходческих работах с применением самоходной техники. Количество заряжаемого ЭВВ за цикл может достигать 250-300 кг. Энергоносителем может быть сжатый воздух шахтной магистрали или блок аккумуляторов. Исполняется в пластиковом корпусе или в кожухе из нержавеющей стали. Модуль РХ-2 позволяет получать плотность ЭВВ – 0,85–1,35 г/см<sup>3</sup> и эффективно осуществлять зарядку шпуров при вязкости эмульсии 40-140 Па·с.

Фото и основные технические характеристики представлены на рис 4.2 и табл. 4.2, соответственно.



Рис. 4.2. Зарядчики ЗЭШ РХ-2, РХ-2.02

Табл. 4.2. Технические характеристики зарядчика ЗЭШ РХ-2

1.	Сухой вес, с колесной рамой	27 кг
2.	Размеры, (без колесной рамы), Д x Ш x В	700 x 330 x 310 мм
3.	Емкость эмульсионной композиции, не менее	20 л
4.	Емкость сенсбилизатора	2,5-5 л
5.	Длина зарядного шланга	7 м
6.	Диаметр зарядного шланга	25 мм
7.	Производительность, не менее	15 кг/мин
8.	Конечная плотность продукта	0,85-1,35 г/см <sup>3</sup>
9.	Требования к сжатому воздуху	Min – 2 атм Мах- 6 атм
10.	Вязкость эмульсионной композиции	От 40Па·с до 140 Па·с
11.	Потребляемая мощность	1.3 кВт

### Комплекс для веерного заряжения скважин Модуль смесительно-зарядный МСЗ РХ-3

Предназначен для изготовления ЭВВ Аргунит РХ и механизированного заряжения им скважин. Модуль РХ-3 позволяет получать плотность ЭВВ – 0,85 – 1,35 г/см<sup>3</sup> и эффективно осуществлять зарядку скважин при вязкости эмульсии до 40-140 Па·с.



Рис. 4.3. Комплекс для веерного заряжения скважин МСЗ РХ-3

Табл. 4.3. Технические характеристики МСЗ РХ-3 для зарядания скважин

1.	Объем расходной емкости ЭК, не менее	730 л
2.	Объем расходной емкости ГГД-У	100 л
3.	Объем расходной емкости воды, не менее	200 л
4.	Шланг зарядный 32*5,4 мм	общая длина 350 м (7 шт. по 50 м в комплекте с быстро разъемными переходами) со смесителем - 1 шт.
5.	Производительность, не менее при рабочем давлении магистрали сжатого воздуха 3-4 атм	85 кг/мин
6.	Габаритные размеры, мм длина ширина высота	2600 1100 1100
7.	Потребляемая мощность	14 кВт
8.	Масса модуля без компонентов	970 кг

### Смесительно-зарядный модуль РХ-4 для зарядания шпуров

Модуль смесительно-зарядный РХ-4 предназначен для производства промышленного эмульсионного взрывчатого вещества Аргунит РХ (рис. 4.5) и зарядания механизированным способом сухих и обводненных шпуров, устанавливается на самоходное шасси (рис. 4.6). Модуль МСЗ РХ-4 позволяет получать плотность ЭВВ – 0,85–1,35 г/см<sup>3</sup> и эффективно осуществлять зарядку шпуров при вязкости эмульсии 40-140 Па·с.



Рис. 4.5. Модуль смесительно-зарядный РХ

Табл. 4.4. Технические характеристики модуля смесительно-зарядного РХ-4 для зарядания шпуров

1	Производительность, не менее	40 кг/мин
2	Производительность перекачивающего насоса воды, при давлении питания воздуха 3 атм, не менее	20 л/мин
3	Давление энергоносителя, сжатый воздух	2-6 атм
4	Максимальный расход энергоносителя	800 Нл/мин
5	Тип насоса-дозатора	поршневой
6	Тип насоса подачи воды	поршневой
7	Объем бака ЭМ РХ	1000 л
8	Объем бака воды	80 л
9	Объем бака ГГД РХ	40 л
10	Габаритные размеры модуля, ДхШхВ	1906x1152x1480
11	Масса пустого модуля	600 кг
12	Длина зарядного шланга	10-30 м
13	Внутренний диаметр зарядного шланга	25 мм



Рис.4.5. Самоходное шасси с установленным модулем смесительно-зарядным для зарядания шпуров и нисходящих скважин МСЗ РХ.

### **Модуль смесительно-зарядный для зарядания шпуров и веера скважин РХ-5**

Модуль смесительно-зарядный предназначен для изготовления ЭВВ Аргунит РХ, зарядания скважин и шпуров двумя шлангоподатчиками (рис. 4.6). Устанавливается на самоходные шасси (например, Normet или Paus) (рис. 4.7). Модуль МСЗ РХ-5 позволяет получать плотность ЭВВ – 0,85–1,35 г/см<sup>3</sup> и эффективно осуществлять зарядку скважин при вязкости эмульсии 40 до 140 Па·с.

Табл. 4.6. Технические характеристики МСЗ РХ-5

1.	Производительность, не менее	85 кг/мин
2	Объем бака ЭК, не менее	3.3 м <sup>3</sup>
3	Объем бака ГГД-У	180 л
4	Объем бака воды, не менее	180 л
5	Габаритные размеры, мм	3285 x 1950 x 1300
6	Масса модуля без компонентов	1900 кг
7	Длина зарядного шланга, не менее	50 м
8	Внутренний диаметр зарядного шланга	25 мм

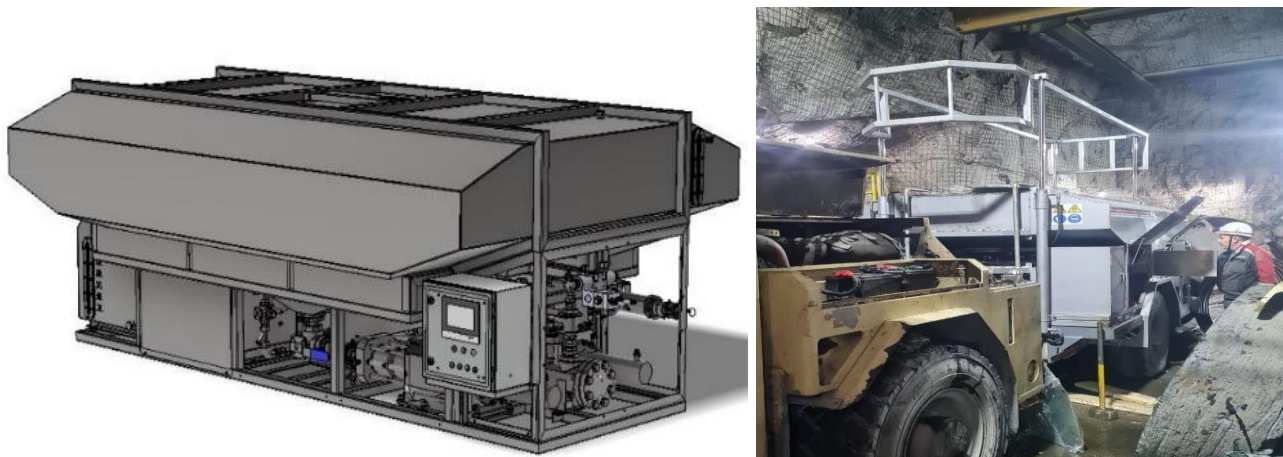


Рис. 4.6. Модуль смесительно-зарядный предназначен для изготовления ЭВВ и зарядания шпуров и вееров скважин

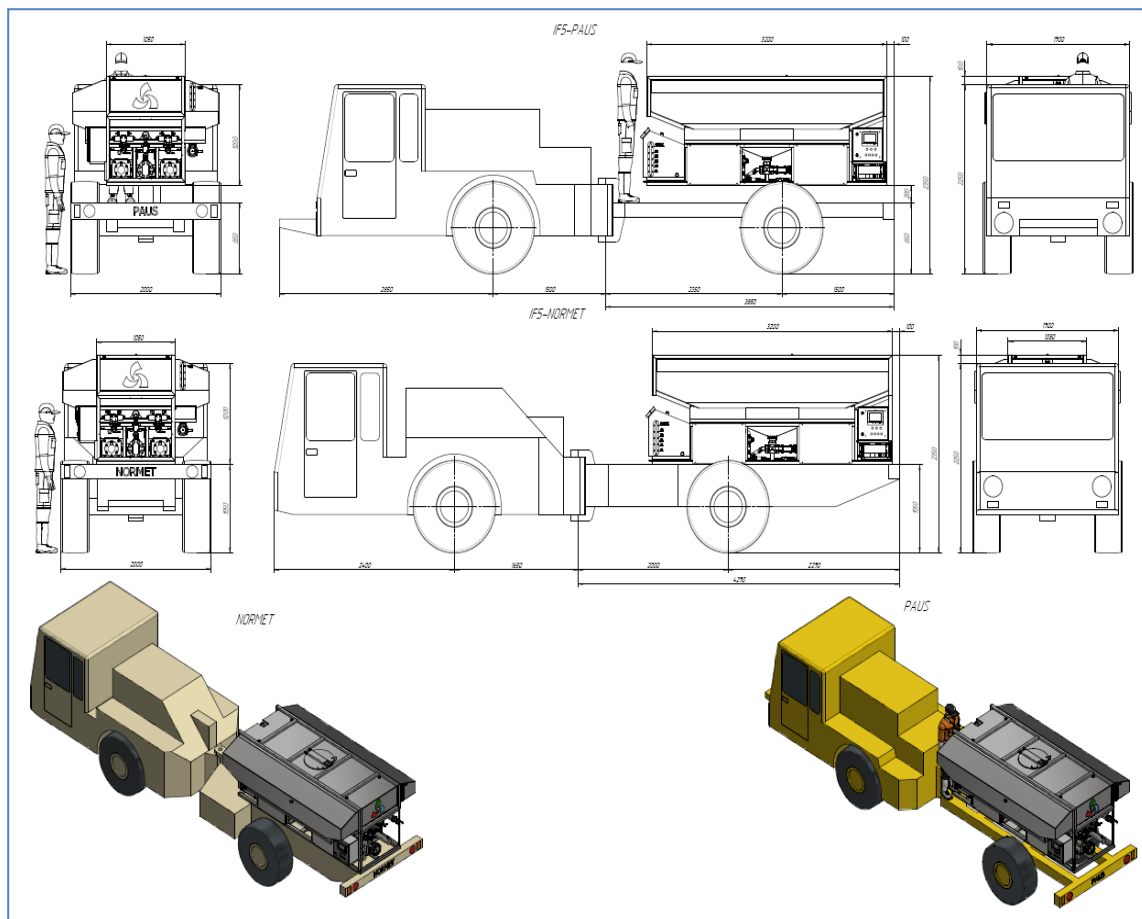


Рис. 4.7. Самоходное шасси для транспортировки РХ-5 в подземных условиях

**Модуль для зарядания скважин и шпуров РХ-6**

Модуль РХ-6 предназначен для изготовления ЭВВ «Аргунит РХ» и зарядания им шпуров и скважин. В подземных условиях может транспортироваться как вручную (на тележке), так и с помощью механизированных средств доставки (в ковше ПДМ или на самоходном шасси).

Производится в трех вариантах:

с пневмоприводом (РХ-6П). Рабочее давление сжатого воздуха – 5 атм. Расход воздуха – 3 куб.м/мин;

с гидроприводом (РХ-6Н). Рабочее давление масла – 110 атм. Требуемый поток масла гидросистемы – 90 л/мин;

с электроприводом (РХ-6Э). Напряжение – 380 В.

Модуль РХ-6 позволяет получать плотность ЭВВ – 0,85–1,35 г/см<sup>3</sup> и эффективно осуществлять зарядку скважин при вязкости эмульсии 40-140 Па·с.

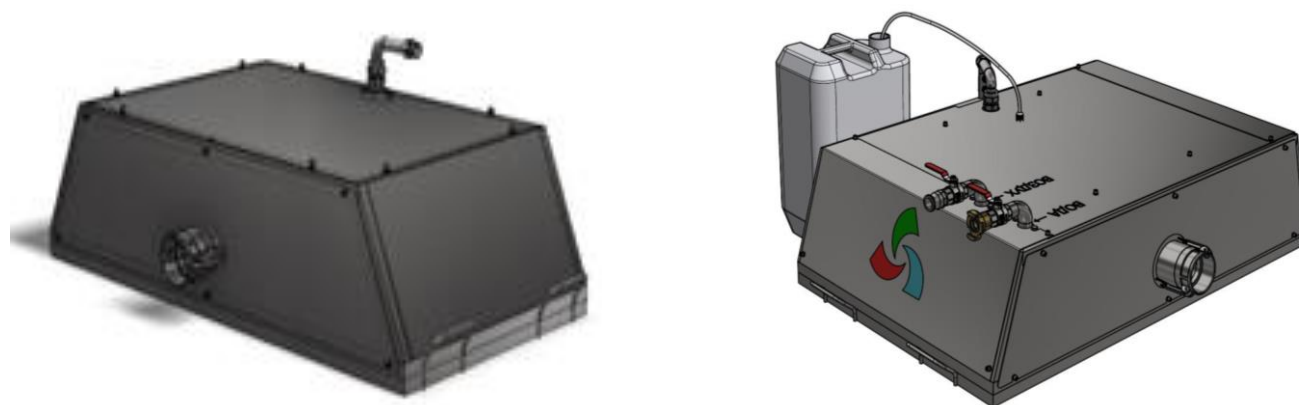


Рис. 4.8. Модуль для зарядания скважин и шпуров РХ-6

Табл. 4.7. Технические характеристики модуля для зарядания скважин и шпуров РХ-6

1.	Производительность	45-75 кг/мин
2.	Длина зарядного шланга	До 150 м
3.	Масса модуля без компонентов	130 кг
4.	Габаритные размеры, мм: длина ширина высота	1300 650 550

## Модуль для зарядания скважин и шпуров РХ-6Н

Для осуществления зарядных работ при размещении ЭВВ в контейнерах ИВС (еврокубах) также можно применять модуль РХ-6Н для зарядания скважин и шпуров и на открытой земляной поверхности, в карьерах (рис. 4.9). Модуль РХ-6Н работает на гидравлическом приводе и позволяет получать плотность ЭВВ – 0,85–1,35 г/см<sup>3</sup>, эффективно осуществлять зарядку скважин при вязкости эмульсии 40-140 Па·с.

Табл. 4.8. Технические характеристики модуля смесительно-зарядного для зарядания скважин РХ-6Н

1	Вес без компонентов	85 кг
2	Эмульсия поступает в модуль непосредственно из контейнера ИВС	1 м <sup>3</sup>
3	Сенсибилизатор поступает из полиэтиленовой канистры	40 л
4	Габаритные размеры	640x425x1400
5	Внутренний диаметр зарядного шланга	19-38 мм
6	Производительность	200 кг/мин
7	Масса модуля без компонентов	1900 кг
8	Рабочее давление масла в гидросистеме	110 атм
9	Производительность масла в гидросистеме	90 л/мин



Рис. 4.9. Модуль для зарядания скважин и шпуров РХ-6Н с контейнером ИВС



Рис. 4.10. Модуль для зарядания скважин и шпуров РХ-6Н с контейнером ИВС и расположенный на автоплатформе.

Для доставки эмульсии от ее производителя до потребителя на земной поверхности применяются как доставщики эмульсии в цистернах (рис. 4.11), так и в контейнерах ИВС (еврокубах) на грузовых машинах, аттестованных для перевозки пожароопасных грузов.



Рис. 4.11. Цистерна-полуприцеп для доставки эмульсии по дорогам общего пользования

Анализ технических показателей предлагаемых шпуровых зарядчиков и зарядно-смесительных модулей показывает, что они позволяют эффективно осуществлять взрывные работы при подземной добыче полезных ископаемых в любых условиях. Указанное оборудование прошло успешную проверку при эксплуатации на руднике подземном ООО «Яковлевский ГОК», о чем свидетельствует справка о внедрении в производство результатов и рекомендаций диссертационной работы (Приложение). Представленные средства механизации позволяют не только повысить производительность зарядных работ, но и обеспечить управление параметрами ЭВВ в широких диапазонах. Это позволяет создавать ЭВВ необходимой плотности и вязкости для придания им необходимой стойкости к внешним динамическим воздействиям.

Данное обстоятельство позволяет рекомендовать разработанную технологию взрывных работ, основанную на применении ЭВВ с пероксидной газификацией для применения на горных предприятиях. Особенно разрабатываемым подземным способом сульфидные руды.

#### **4.3. Техничко-экономическая оценка эффективности применения разработанной технологии формирования скважинных и шпуровых зарядов ЭВВ, устойчивых по отношению к внешним динамическим нагрузкам**

Техничко-экономическая оценка выполнена для условий рудника подземного ООО «Яковлевский ГОК», где добыча руды осуществляется слоевой системой разработки с закладкой, как для варианта технологии применения эмульсионных взрывчатых составов, так и для технологии применения гранулированных ВВ. При технико-экономической оценке учтены затраты на приобретение и установку собственных пунктов изготовления (СПИ) для производства или эмульсии «Аргунит РХ», или гранулированных ВВ. При расчетах вследствие колебаний цен на углеводородное топливо, электрическую энергию, аммиачную и кальциевую селитры и др. использованы ориентировочные цены на указанную продукцию, которые в каждом конкретном случае могут отличаться в ту или другую сторону от приведенной.

#### **Себестоимость изготовления промышленных ВВ, собственного изготовления**

Таблица 4.9. Стоимость эмульсионной матрицы «Аргунит РХ» по статье «Компоненты».

Состав	Матрица эмульсионная «Аргунит РХ»			
	Содержание %	Ст-ть ед. руб/кг	Ст-ть компонента руб/кг	Ст-ть компонента в % к общей
Аммиачная селитра	46,5	20	9,3	27,34
Кальциевая селитра	31	50	15,5	40,85
Индустриальное масло	7	60	6,3	17,70
Эмульгатор	1,5	400	6,0	14,11
Вода	14	0	0	0
ИТОГО, руб/кг		<b>37,1</b>		100

Таблица 4.10. Стоимость гранулированных ВВ по статье «Компоненты»

Состав	Гранулит А6				Гранулит Игданит П			
	Содержание %	Ст-ть ед. руб/кг	Ст-ть компонента руб/кг	Ст-ть компонента в % к общей	Содержание %	Ст-ть ед. руб/кг	Ст-ть компонента руб/кг	Ст-ть компонента в % к общей
Аммиачная селитра пористая	90	23	20,7	70,59	94,5	23	21,74	93,0
Дизельное топливо	4	50	2	4,41	4,5	50	2,25	7,0
Алюминий	6	250	15,0	25,0	-			
<b>ИТОГО, руб/кг</b>	<b>37,7</b>				<b>23,99</b>			

Таблица 4.11. Прямые инвестиции в реализацию проекта по вариантам пункта изготовления промышленных ВВ (СПИ)

№ п/п	Затраты	Варианты СПИ	
		ЭВВ	ГВВ
1	Изыскательские, проектные, разработка эксплуатационной документации, экспертиза, млн. руб.	23	3
2	Комплекс смесительного и вспомогательного оборудования, млн. руб.	57	8
3	Строительно-монтажные работы, млн. руб.	20	1
<b>ИТОГО:</b>		<b>100</b>	<b>12</b>
4	Амортизационные отчисления на 1кг ЭВВ, при сроке амортизации 10 лет, руб. (объем 3000т)	3,33	1,92
5	Зарядное оборудование ЭВВ (70 зарядчиков ЗЭП-10) Зарядное оборудование ГВВ (70 зарядчиков ЗП-2)	12,95	2,45
6	Амортизационные отчисления зарядчиков на 1т ВВ, при сроке амортизации 2 года, руб.	3,24	1,63
<b>Всего на 1кг ВВ, руб.</b>		<b>7,24</b>	<b>3,55</b>

Таблица 4.12. Расходы по статье «Заработная плата» на персонал, задействованный в производстве ПВВ

Персонал	СПИ ЭВВ			СПИ ГВВ		
	Кол-во чел.	Зар. плата, руб./мес.	Сумма в год, руб.	Кол-во чел.	Зар. плата, руб./мес.	Сумма в год, руб.
Начальник СПИ	1	100 000,00	1200 000	1	80 000,00	960 000
Оператор СПИ	4	80 000,00	3840000	2	70 000,00	1680 000
Рабочие	4	60 000,00	2880 000	3	60 000,00	2160000
Водитель автопогрузчика	1	60 000,00	720 000	1	60 000,00	720 000
Электрослесарь-механик	1	80 000,00	960 000	1	70 000,00	840 000
<b>ИТОГО по СПИ:</b>	11		9660 000	8		6360 000
С учетом начислений 41,6%			13678560			9005760
<b>ВСЕГО руб. на 1 кг ВВ</b>			<b>4,56</b>			<b>3,00</b>

Табл. 4.13. Расходы по статье «Электроэнергия»

Позиции	ЭВВ	ГВВ
Установленная мощность оборудования, кВт	70	15
Стоимость 1 кВт. часа. руб.	8	8
Производственная мощность, т/год	3 000	3000
Коэффициент использования	0,8	0,6
<b>Затраты на 1кг ВВ</b>	<b>0,90</b>	<b>0,15</b>

Табл. 4.14. Себестоимость изготовления 1 кг ВВ с учетом всех статей расходов

№ п/п	Статьи затрат	ЭВВ	ГВВ	
		Аргунит РХ	А 6	Игданит П
1	Компоненты	37,1	37,7	23,99
2	Инвестиции (max)	7,24	3,55	3,55
3	Заработная плата	4,56	3,00	3,00
4	Электроэнергия	0,90	0,15	0,15
<b>ИТОГО: руб/кг</b>		<b>49,80</b>	<b>44,40</b>	<b>30,69</b>

По результатам опытных взрывов установлено, что при механизированном зарядании шпуров, как гранулированными, так и эмульсионными ВВ, в целом время на зарядание забоя не увеличивается, поэтому затраты на выполнение зарядных работ в сравниваемых вариантах одинаковые и в дальнейшем не учитываются.

**Укрупненные сравнительные экономические показатели технологий, рассчитанные с учетом показателей БВР, представлены в табл. 4.15.**

Таблица 4.15. Укрупненные сравнительные экономические показатели технологий

№ п/п	Показатели	Аммонит № 6ЖВ	Аргунит РХ	Гранулиты	
				А 6	Игданит П
	1	2	3	4	5
1	Сечение выработки, м <sup>2</sup>	11,2	11,2	11,2	11,2
2	Количество шпуров на забой	36	32	32	32
3	Глубина шпуров, м	1,8	1,8	1,8	1,8
4	Количество шпурометров, м	64,8	57,6	56,0	57,6
5	Стоимость бурения 1 м шпура, руб/м	116,06	116,06	116,06	116,06
6	Стоимость по бурению на цикл, руб	7520,69	6685,06	6499,36	6685,06
7	КИШ	0,8	0,9	0,85	0,8
8	Объём горной массы за цикл, м <sup>3</sup>	16,13	18,144	17,136	16,128
9	Стоимость 1 кг ВВ	240	55,23	47,5	39,19
10	Плотность заряда в шпуре г/см <sup>3</sup>	0,6	1,1	1,1	1,05
11	Удельный расход ВВ кг/м <sup>3</sup>	2,23	3,31	3,50	3,57
12	Расход ВВ за цикл, кг	28,8	60	60	57,5
13	Стоимость ВВ на цикл, руб	6912,00	2988,00	2664,00	1764,68
14	Удельная стоимость по бурению, руб/м <sup>3</sup>	466,31	368,45	390,68	414,51
15	Удельная стоимость по ВВ, руб/м <sup>3</sup>	428,52	164,68	155,46	109,42
18	Масса патрона-боевика, кг	0,2	0,2	0,2	0,2
19	Уд. стоимость патронов-боевиков, руб/ м <sup>3</sup>	31,66	25,01	26,48	28,14
20	Стоимость СИНВШ, руб/шт	53,52	53,52	53,52	53,52
21	Стоимость СИНВШ на цикл, руб.	1926,72	1712,64	1712,64	1712,64
22	Удельная стоимость СИНВШ, руб/ м <sup>3</sup>	119,46	94,39	99,94	106,19
18	Общая стоимость по БВР, руб/ м <sup>3</sup>	1045,95	652,53	673,56	658,26
19	Объём применения, млн. м <sup>3</sup>	1,0	1,0	0,7*	0,7*
20	Затраты, млн. руб.	1045,95	652,53	313,79	313,39
21	Затраты на применение штатных ВВ для обводненных шпуров, млн. руб	-	-	223,85	223,85
22	ИТОГО:	1045,95	<b>652,53</b>	785,28	774,57

\* - Объем применения гранулированных типов ВВ принят равным 0,7 из условия, что нижние и обводненные шпуры, доля которых составляет до 30%, заряжаются только водоустойчивыми ВВ.

Анализ табл. 4.15 показывает, что наибольший экономический эффект достигается при применении ЭВВ «Аргунит РХ». В этом случае затраты на БВР по сравнению с использованием штатного ВВ (Аммонит № 6ЖВ) снижаются на 37%, в то время как при использовании гранулированных ВВ снижение данных затрат происходит лишь на 25-26%.

### Сводные показатели

Табл. 4.16. Сводные показатели по применению промышленных ВВ, собственного изготовления

Наименование показателей		Ед. изм.	СПИ ЭВВ	СПИ ГВВ
1	Годовая производственная программа	т	3 000	3000
2	Сменная производительность пункта	т/см	до 20	до 12
3	Капитальные вложения	млн. руб.	100	12
4	Режим работы: - рабочих дней в году - рабочих дней в неделю - смен в сутки		252 5 1	252 5 1
5	Списочная численность работающих	чел	11	8
6	Установленная мощность э/оборудования	кВт	70	15
7	Срок окупаемости инвестиций	лет	0,4	0,1

### Экологические аспекты

Применяемая технология, обеспечивает экологически чистое и безопасное производство промышленных ВВ. Технология не использует токсичные вещества,

относящиеся к 1 классу опасности по воздействию на организм человека.

Эмульсионные ВВ сбалансированы по кислороду и применение их сопровождается гораздо более низкими выбросами (до 10 раз) по сравнению с применяемыми, в настоящее время патронированными ВВ

В производстве принят замкнутый технологический оборот воды, предусматривающей использование всего количества воды, образующейся при промывке оборудования технологических линий, для изготовления бинарных растворов.

Вовлечение в переработку природных ресурсов минимально.

Анализ взрывчатых способностей ЭВВ с пероксидной газогенерацией «Аргунит РХ», технологических решений в области механизации зарядных работ и процессах сенсбилизации, а также технико-экономическое сравнение с альтернативными способами ведения взрывных работ в подземных условиях показал эффективность предлагаемых решений. Техничко-экономический анализ показал, что применение ЭВВ «Аргунит РХ» при слоевой системе разработки снижает затраты на БВР по сравнению с использованием штатного ВВ (Аммонит № 6ЖВ) на 37%, в то время как при использовании гранулированных ВВ снижение данных затрат происходит лишь на 25-26%.

Таким образом, обоснована эффективная технология взрывных работ в подземных условиях на основе применения бестарных ЭВВ с пероксидной газогенерацией и специальных средств механизации зарядных работ, при использовании которых обеспечивается создание зарядов необходимой плотности и вязкости для обеспечения сохранности их детонационной способности при динамических воздействиях со стороны ранее взорвавшихся зарядов. **Это подтверждает третье научное положение.**

#### **Выводы по главе IV**

Показано, что ЭВВ с пероксидной газогенерацией «Аргунит РХ» имеет преимущество перед широко распространенными на подземных горных работах

штатными ВВ, благодаря своей безопасности, экологичности и экономичности. При этом данные ВВ имеют необходимые взрывчатые способности для разрушения прочных пород, могут применяться при добыче сульфидных руд и использоваться в шпуровых зарядах.

Предложена линейка механизмов, имеющих различную производительность, габаритные размеры и различные источники энергии для привода их в действие. для выполнения работ по сенсбилизации и заряданию ЭВВ в подземных условиях. Данные механизмы способны получать ЭВВ плотностью 0,85–1,35 г/см<sup>3</sup> и осуществлять зарядание шпуров и скважин при вязкости эмульсии 40-140 Па·с, что достаточно для получения ЭВВ оптимальных параметров для обеспечения сохранности детонационной способности зарядов ЭВВ при динамических нагрузках на них.

Выполнен технико-экономический анализ эффективности применения бестарных ЭВВ с пероксидной газогенерацией вместо штатных ВВ, показавший, что применение указанных ЭВВ дает существенное снижение затрат на выполнение взрывных работ и повышает их производительность. При применении ЭВВ «Аргунит РХ» при слоевой системе разработки затраты на БВР по сравнению с использованием штатного ВВ (Аммонит № 6ЖВ) снижаются на 37%, в то время как при использовании гранулированных ВВ снижение данных затрат происходит лишь на 25-26%.

Таким образом, обоснована эффективная технология взрывных работ в подземных условиях на основе применения бестарных ЭВВ с пероксидной газогенерацией и специальных средств механизации зарядных работ, при использовании которых обеспечивается создание зарядов необходимой плотности и вязкости для обеспечения сохранности их детонационной способности при

динамических воздействиях со стороны ранее взорвавшихся зарядов, что доказывает **третье научное положение.**

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация является научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных исследований разработаны научно обоснованные положения и практические способы совершенствования технологии взрывных работ в подземных условиях на основе применения бестарных ЭВВ с пероксидной газогенерацией, при которой заряды ЭВВ сохраняют детонационную способность при динамических воздействиях со стороны ранее взорвавшихся зарядов, что является решением важной и актуальной научно-технической задачи.

Основные научные выводы и практические результаты, полученные лично автором в процессе исследования:

1. Разработана и обоснована физико-математическая модель влияния динамических воздействий со стороны ранее взорвавшихся зарядов на детонационную способность заряда ЭВВ, сенсibilизированного пузырьками газа, учитывающей как плотность и пористость, так и вязкость ЭВВ. Определены условия для ЭВВ, которые должны выполняться для сохранения детонационной способности ЭВВ после динамического воздействия на него.

Показано, что:

физико-механические свойства горных пород оказывают существенное влияние на сохранение детонационных свойств зарядами ЭВВ с пероксидной газификации при динамическом воздействии на них со стороны ранее взорвавшихся зарядов;

при плотности ЭВВ 1,10-1,12 г/см<sup>3</sup> наблюдается бóльшая скорость детонации в зарядах, подвергнутых динамическому воздействию, по сравнению с зарядами ЭВВ другой плотности;

при любой плотности ЭВВ снижение прочности горной породы уменьшает стойкость ЭВВ к динамическим воздействиям;

расстояние между зарядами в зависимости от физико-механических свойств горных пород оказывают существенное влияние на сохранение детонационных свойств зарядами ЭВВ с пероксидной газификации при динамическом воздействии на них со стороны ранее взорвавшихся зарядов;

в прочных породах ( $f = 10-12$ ) в средней зоне действия взрыва величина расстояния между зарядами влияет на скорость детонации ЭВВ в ближнем диапазоне -  $\bar{r} < 30$ . В то же время в слабых породах ( $f = 1-2$ ) в средней зоне действия взрыва скорость детонации в «исследуемом заряде» зависит от расстояния между зарядами в более широком диапазоне -  $\bar{r} < 40$ ;

при расстояниях между шпуровыми зарядами менее 25 радиусов зарядов в слабых породах возможно затухание детонации заряда ЭВВ из-за критического повреждения сенсibiliзирующих пузырьков;

динамическая вязкость эмульсии оказывает существенное влияние на сохранение детонационных свойств зарядами ЭВВ с пероксидной газификации при динамическом воздействии на них со стороны ранее взорвавшихся зарядов;

наблюдается снижение скорости детонации при возрастании динамической вязкости эмульсии;

оптимальная вязкость эмульсии для условий рудника подземного ООО «Яковлевский ГОК» составляет 60-80 Па·с.

2. Впервые разработана и обоснована методика экспериментальной оценки воздействия взрыва веерного заряда на детонационную способность смежного веерного заряда бестарного ЭВВ, сенсibiliзированного пузырьками газа, взрываемого с замедлением.

Разработана методика определения величины сосредоточенного заряда эквивалентного по воздействию на данную точку массива пород веерному заряду, что позволяет прогнозировать начальную скорость смещения среды в массиве при взрыве веерного заряда.

Показано, что наблюдается существенная неравномерность в скоростях смещения среды в массиве пород при взрыве веерного заряда. Максимальная скорость смещения более, чем в 2,5 раза превышает ее минимальное значение.

Разработан способ моделирования динамического воздействия опережающего взрыва веерного заряда на смежный веер при помощи шпуровых зарядов.

Показано, что расстояние между модельными шпуровыми зарядами зависит от величины л.н.с. веерного заряда, отношений диаметров, плотностей и удельной теплоты взрыва ВВ шпуровых и веерных зарядов.

3. Разработана эффективная технологии взрывных работ в подземных условиях на основе применения бестарных ЭВВ с пероксидной газогенерацией, имеющих рациональную плотность и вязкость, с размещением зарядов на необходимом расстоянии друг от друга, при которых обеспечивается сохранность детонационной способности зарядов ЭВВ при последовательном взрывании зарядов (групп зарядов).

Предложена линейка механизмов, имеющих различную производительность, габаритные размеры и различные источники энергии для привода их в действие. для выполнения работ по сенсбилизации и заряданию ЭВВ в подземных условиях.

Данные механизмы способны получать ЭВВ плотностью 0,85–1,35 г/см<sup>3</sup> и осуществлять зарядание шпуров и скважин при вязкости эмульсии 40-140 Па·с, что достаточно для получения ЭВВ оптимальных параметров для обеспечивается сохранности детонационной способности зарядов ЭВВ при динамических нагрузках на них.

Показано, что технические параметры шпуровых зарядчиков и зарядно-смесительных модулей позволяют эффективно и экономично осуществлять взрывные работы при подземной добыче полезных ископаемых в любых условиях горно-геологических условиях. Данное обстоятельство позволяет рекомендовать разработанные технологии взрывных работ для применения горным предприятиям, особенно разрабатывающим подземным способом сульфидные руды.

Результаты исследований успешно используются при ведении взрывных работ на ООО «Яковлевский ГОК».

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Анализ российского рынка промышленных взрывчатых веществ, 2023. Прогноз 2030/ Черноголовка: Центр инвестиционно-промышленного анализа и прогноза (ЦИПАП) – 97 с.
2. Антонов А.А. Особенности технологической схемы отработки запасов на руднике «Яковлевский» / А.А. Антонов, М.Д. Морозов, А.С. Малютин // Записки Горного института. - 2012. – Т. 195. – С. 85–88.
3. Афанасьев П.И. Метод расчета диссипации энергии и ее влияние на максимальные параметры волн напряжения и грасоставов разрушенной гранитной горной массы/ Автореф. дисс. ... канд. техн. наук: 25.00.20/ Афанасьев Павел Игорьевич. – СПб. – 2012. – 20 с.
4. Баум Ф.А. Физика взрыва /Ф.А. Баум, К.П. Станюкович, Б.И. Шехтер. - М.: Физматгиз. - 1959. - 800с.
5. Бондаренко И.Ф. Буровзрывные работы на кимберлитовых карьерах Якутии/ И.Ф. Бондаренко, С.Н. Жариков, И.В. Зырянов, В.Г. Шеменев. – Екатеринбург: ИГД УрО РАН. – 2017. – 172 с.
6. Боровиков В.А. Моделирование действия взрыва при разрушении горных пород / В.А. Боровиков, И.Ф. Ванягин. – М.: Недра. – 1990. – 231 с.
7. Бровин В.Е. Влияние диссипации в волне напряжений на параметры распределения грансоставав отдельных зонах взрывного разрушения горных пород/ Автореф. дисс. ... канд. техн. наук: 25.00.20/ Бровин Виталий Евгеньевич. – СПб. – 2009. – 20 с.
8. Бошнятов Б.В. Роль гидродинамического взаимодействия при коалесценции пузырьков газа в жидкости/ Б.В. Бошнятов// Доклады Академии наук. - 2009. - Т. 427. - № 3. - С. 321-323.
9. Воронин Д.В. Динамика газового пузырька при его взаимодействии с волнами сжатия и разряжения / Д. В. Воронин // Журнал прикладной механики и технической физики. – 2005. - Т. 46. - № 5. - С. 76-85.

10. Галаджий Ф.М. Влияние времени замедления на устойчивость детонации шпуровых зарядов ВВ / Ф.М. Галаджий, В.И. Зенин// Вопросы безопасности в угольных шахтах: сборник науч. трудов. Т. XVIII. – М.: Недра. – 1968. – С. 119-128.

11. Горинов С.А. Воздействие ударных волн на детонационную способность эмульсионного взрывчатого вещества, сенсibilизированного пузырьками газа / С.А. Горинов, И.Ю. Селин// Известия ВУЗов. Горный журнал. – 2025. - № 2. – С. 52-64. - DOI: 10.21440/0536- 1028- 2025-2-67-76.

12. Горинов С.А. Воздействие ударных волн на детонационную способность эмульсионного взрывчатого вещества, сенсibilизированного пузырьками газа / С.А. Горинов, И.Ю. Селин// Технология и безопасность взрывных работ: Материалы научно-производственных конференций по взрывным работам – 2024 г. / отв. ред. Г. П. Берсенёв. – Екатеринбург: Типография «Печатное поле». - 2025. – С. 110-121.

13. Горинов С.А. Иницирование и детонация эмульсионных взрывчатых веществ/ С.А. Горинов. – Йошкар-Ола: ООО «Стринг». – 2020. – 214 с. – doi:10.25625/y1981-6651-8304-y.

14. Горинов С.А. Оценка времени сохранения восприимчивости к инициирующему импульсу эмульсионным взрывчатым веществом, сенсibilизированным газовыми порами/ С.А. Горинов, А.С. Корецкий, И.Ю. Маслов// Известия ВУЗов. Горный журнал. – 2022. - № 5. –С. 53-65. DOI: 10.21440/0536-1028-2022-5-53-65.

15. Горинов С.А. Технология применения ЭВВ «Аргунит РХ» при подземных горных работах/ С.А. Горинов, А.В. Жабко, И.Ю. Селин// Сборник докладов на XIV Международной научно-технической конференции «Инновационные геотехнологии при разработке рудных и нерудных месторождений». – Екатеринбург: УГГУ. - 2025. – С. 24-30.

16. Горинов С.А. Эмульсионные взрывчатые вещества для добычи сульфидсодержащих горных пород / Горинов С.А., Маслов И.Ю., Оверченко М.Н., Пустовалов И.А // Взрывное дело. – 2017. - № 117/74. - С. 127-137.

17. ГОСТ 14839.13-2013. Вещества взрывчатые бризантные. Методы определения водоустойчивости.
18. ГОСТ 14839.18-2013. Вещества взрывчатые бризантные. Методы определения плотности.
19. ГОСТ 14839.19-69. Вещества взрывчатые бризантные. Методы определения полноты детонации.
20. ГОСТ 4545-88. Вещества взрывчатые бризантные. Методы определения характеристик чувствительности к удару.
21. ГОСТ 50843-95. Вещества взрывчатые промышленные. Приемка и отбор проб.
22. ГОСТ 5984-99. Вещества взрывчатые. Методы определения бризантности.
23. ГОСТ 7140-98. Вещества взрывчатые бризантные. Методы определения в метановоздушной и пылевоздушной смесях.
24. ГОСТ 32411-2013. Вещества взрывчатые бризантные. Методы определения электрической емкости, плотности и водоустойчивости.
25. Григорьев Н.А. Действие импульса давления на полость в вязкой жидкости/ Н.А. Григорьев, Доронин Г.С., Одинокий В.Л.// Журнал прикладной механики и технической физики. – 1978. - № 2. – С. 86-88.
26. Державец А.С. О возможности отнесения эмульсий, применяемых для приготовления промышленных ВВ, в подкласс 5.1 «эмульсия, суспензия или гель нитрата аммония, используемые при производстве бризантных веществ / А.С. Державец, Т.Г. Руднева, А.А. Фильчаков, П.Н. Столяров// Взрывное дело. - Выпуск №101/58. - М.: ЗАО “МВК по взрывному делу”. - 2009. - С. 175-193.
27. Дерibas А.А. Детонация эмульсионных взрывчатых веществ с полыми микросферами / Дерibas А.А. [и др.]// Доклады РАН. - 2003. - Т. 389. - №6. - С.747-748.
28. Добрынин А.А. Взрывчатые вещества. Химия. Составы. Безопасность/ А.А. Добрынин. – М.: ИД Академия Жуковского. – 2014. – 527 с.

29. Донцов В.Е. Ударные волны в воде с пузырьками фреона-12 с образованием гидрата газа / В.Е. Донцов, В.Е. Накоряков, А.А. Чернов // Журнал прикладной механики и технической физики. – 2007. - Т. 48. - № 3. - С. 58–75.
30. Дубнов Л.В. Промышленные взрывчатые вещества / Л.В. Дубнов, Н.С. Бахаревич, А.И. Романов. - М.: Недра, 1988. - 358 с.
31. Дунин С.З. Динамика закрытия пор во фронте ударной волны / С.З. Дунин, В.В. Сурков // Прикладная математика и механика. - 1979. - Т.43.- С.511-518.
32. Дунин С.З. О распространении пластических волн в пористых телах / С.З. Дунин, В.К. Сироткин, В.В. Сурков // Механика твердого тела. - 1978. - №3. - С.92-98.
33. Европейское соглашение о международной дорожной перевозке опасных грузов (ДОПОГ) 2021. [(по состоянию на 1 июля 2022 г.)]
34. Жученко Е.И. Применение ЭВВ, сенсублизированных методом газогенерации, в глубоких скважинах / Жученко Е.И [и др.]// Безопасность труда в промышленности. - 2002. - № 11. - С.30-32.
35. Жученко Е.И. Смесительно-зарядные и доставочные машины, предназначенные для транспортирования, изготовления и зарядания эмульсионных взрывчатых веществ Сибиритов / Е.И. Жученко, В.Б. Иоффе, И.К. Зырянов // Безопасность труда в промышленности. - 2002. - № 5. - С.39-41.
36. Забабахин Е.И. Заполнение пузырьков в вязкой жидкости / Е.И. Забабахин // Прикладная математика и механика. - Т. XXIV.- вып.6. - С.1129-1131.
37. Забабахин Е.И. Кумуляция и неустойчивость. Сборник научных статей. – Снежинск: Изд-во РФЯЦ-ВНИИТФ. – 1998. – С. 35-47
38. Забабахин Е.И. Некоторые вопросы газодинамики взрыва/ Е.И. Забабахин. - Снежинск: РФЯЦ: ВНИИТФ, 1997. - 208 с.
39. Забабахин Е.И. Некоторые случаи движения вязкой жидкости / Е.И. Забабахин. - Сб. науч. трудов «Вопросы современной экспериментальной и теоретической физики. – Л.: Наука. – 1984. - С. 8-19.

40. Забабахин Е.И. Явление неограниченной кумуляции / Сб. науч. статей «Кумуляция и неустойчивость»// Снежинск: Изд-во РФЯЦ-ВНИИТФ, 1998. - С.69-106.

41. Заслов В.Я. Современное оборудование для заряжения скважин ВВ на горных работах/ В.Я. Заслов, В.Б. Ткачев, В.Г. Шеменев. – Развитие ресурсосберегающих технологий во взрывном деле. - Екатеринбург: ИГД УрО РАН. - 2009. - С. 235-244.

42. Ионов А.М. Алгоритм расчета характеристик волн в трубе, генерируемых внешним импульсным источником в скважине в упругослоистой среде/ А. М. Ионов, О. В. Козлов, Г. А. Максимов// Акустический журнал. – 1995. - Т. 41. - №4. - С. 603 – 612.

43. Ионов А.М. О возбуждении гидроволны в скважине внешним источником/ А. М. Ионов, Г. А. Максимов// Акустический журнал. – 1999. – Т. 45. - № 3. - С. 354-362.

44. Иоффе В.Б. Научные основы безопасного производства и применения эмульсионных взрывчатых веществ типа «Сибиритов» на горных предприятиях: диссертация доктора технических наук: 05.26.03, 25.00.20: Валерий Борисович Иоффе. - Москва, 2002. - 349 с.:

45. Исследование скорости детонации 21.03.2023 ПЭВВ Аргунит РХ-Н (О.З. № 6-7-32): отчет по НИР № 01/23/ В.И. Куликов. – М.: ИДГ РАН. – 2023. – 14 с.

46. Казьмина А.Ю. Обоснование параметров буровзрывных работ при разрушении скальных пород скважинными зарядами конечной длины (на примере ЗАО «Гавриловское карьероуправление») / Автореф. дисс. ... канд. техн. наук: 25.00.20/ Казьмина Анна Юрьевна. – СПб. – 2012. – 20 с.

47. Калякин С.А. Действие взрыва на заряды взрывчатых веществ, находящихся в смежных шпурах/ С.А. Калякин, Р.И. Азаматов// Сучасні ресурсозберегаючі технології виробництва. – 2013. – 1(11). – С. 65-76.

48. Катышев С.Ф. Влияние добавок на взаимодействие аммиачной селитры с сульфидной рудой/ С.Ф. Катышев, В.Н. Десятник, Л.М. Теслюк// Пожаровзрывобезопасность. – 2010. – Т. 19. - № 5. – С. 54-57.

49. Коваленко И.Л. Ингибирование взаимодействия пирита с аммиачно-селитренными взрывчатыми веществами / И.Л. Коваленко, В.П. Куприн// Сучасні ресурсоенергозберігаючі технології гірничого виробництва. – 2013(11). - № 1. – С. 84-91.
50. Козырев С.А. Влияние динамических нагрузок на взрывчатые характеристики газифицированных эмульсионных взрывчатых веществ/ С.А. Козырев, В.А. Фокин, А.В. Соколов, А.С.// Взрывное дело. - 2014. - № 111-68. - С. 228-242.
51. Козырев С.А. Исследование взрывчатых характеристик промышленных ВВ местного изготовления/ С.А.Козырев, Е.А.Власова - Апатиты: КНЦ РАН. - 2023. - 114 с.
52. Козырев С.А. Оценка качества, приготовленного эмульсионного ВВ / С.А. Козырев, Е.А. Власова// Взрывное дело. - 2019. - № 123-80. - С. 42-50.
53. Колганов Е.В. Безопасность эмульсионных промышленных взрывчатых веществ / Е.В. Колганов, В.А. Соснин// Записки Горного института. 2007. - Т. 171. - С. 203-212.
54. Колганов Е.В. Эмульсионные промышленные взрывчатые вещества. 1-я книга (Составы и свойства) / Е.В. Колганов, В.А. Соснин - Дзержинск Нижегородской области, издательство ГосНИИ «Кристалл». - 2009. - 592 с.
55. Колганов, Е.В. Эмульсионные промышленные взрывчатые вещества / Е.В. Колганов, В.А. Соснин – 2-ая книга (Технология и безопасность).- Дзержинск Нижегородской обл.: изд. ГосНИИ «Кристалл», 2009.- 336с.
56. Красильников В.А. Введение в физическую акустику. – М.: Наука. – 1984. – 403 с.
57. Крысин Р.С. Модели взрывного дробления горных пород/ Р.С. Крысин, В.В. Новинский. – Днепропетровск: АРТ-Пресс. – 2006. – 144 с.
58. Куприн В.П. Взаимодействие эмульсионных взрывчатых веществ и их компонентов с сульфидными минералами / В.П. Куприн, И.Л. Коваленко // Взрывное дело. – 2010. - № 103/60. – С. 154-159.

59. Куприн В.П. О возможности применения водонаполненных аммиачно-селитренных ВВ для разрушения сульфидных руд /В.П. Куприн, И.Л. Коваленко// Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2010. - № 8. – С. 136.
60. Куриной В.П. Теоретические основы взрывного разрушения горных пород / В.П. Куриной. – Днепр: НГУ. - 2018. – 280 с.
61. Кутузов Б.Н. Безопасность взрывных работ в промышленности/ Б.Н. Кутузов, Ф.М. Галаджий, С.А. Давыдов и др. – М.: Недра. – 1977. – 343 с.
62. Кутузов Б.Н. Взрывные работы в опасных условиях угольных шахт/ Б.Н. Кутузов, А.Ю. Бутуков, Б.И. Вайнштейн и др. – М.: Недра. – 1979. – 373 с.
63. Кутузов Б.Н. Проектирование и организация взрывных работ/ Б.Н. Кутузов, В.А. Белин. – М.: Изд. «Горная книга». – 2012. – 416 с.
64. Кутузов Б.Н. Расчет детонационных параметров аммиачно-селитренных ВВ / Б.Н. Кутузов, С.А. Горинов// Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2010. - № 6. – С. 40-49.
65. Маслов И.Ю. Влияние вида и содержания ингибитора на детонационные характеристики сульфидоустойчивых ЭВВ / И.Ю. Маслов, С.А. Горинов // Взрывное дело. - 2020. - № 129/86. - С. 188-205.
66. Маслов И.Ю. К вопросу о расчете удельной теплоты взрыва эмульсионных взрывчатых веществ и гранэммитов / Маслов И.Ю., Горинов С.А., Козырев С.А. // Взрывное дело. - 2020. - № 126/83. - С. 51-67.
67. Матюнин В.С. О влиянии давления на детонационную способность промышленных взрывчатых веществ/ В.С. Матюнин// Сборник науч. трудов аспирантов МакНИИ. – Макеевка-Донбасс. – 1968. – С. 126-131.
68. Медведев А.Е. Приближенно-аналитические решения задач механики реагирующих, многофазных сред: Дисс. ... докт. физ.-мат. наук: 01.02.05 / Медведев Алексей Елизарович. - Новосибирск, 2015. – 208 с.
69. Мосинец В.Н. Дробящее и сейсмическое действие взрыва в горных породах / В.Н. Мосинец. – М.: Недра. – 1976. – 271 с.
70. Нигматулин Р.И. Динамика многофазных сред. Ч. 1. – М.: Наука. – 1987. – 464 с.

71. Патент № 2622305 RU. Эмульсионное взрывчатое вещество Аргунит РХ/ Савченко Н.В., Куприн А.В., Куприн Р.В., Селин И.Ю.// Оpubл. 14.07.2017.
72. Патент RU 168286. Смесительно-зарядная машина для подземных горных работ/ М.Н. Оверченко, А.Г. Луныков, С.П. Мозер// Оpubл. 26.01.2017.
73. Патент на изобретение RU 2753071С1. Эмульсионное взрывчатое вещество (варианты) / Горинов С.А., Маслов И.Ю.// Оpubл. 11.08.2021.
74. Перечень рекомендуемых промышленных взрывчатых материалов. – М.: Недра. – 1977. – 45 с.
75. Петров А.Г. Механизмы слияния и дробления пульсирующих в жидкости газовых пузырьков / А.Г. Петров// Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. – 2011. - № 4 (3). - С. 1034–1035.
76. Петров Е.А. Исследование влияния концентрации ингибирующих добавок на химическую стойкость эмульсионных взрывчатых веществ в среде пирита /Е.А. Петров, И.П. Вдовина, П.И. Савин// Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. - 2018. - № 1. – С. 54-58
77. Петров Е.А. Исследование влияния стабилизирующих добавок на термическое разложение эмульсионного взрывчатого вещества в среде пирита /Е.А. Петров, П.И. Савин, П.Г. Тамбиев, Н.В. Бычин// Горный журнал Казахстана. - 2016. - № 1. – С. 18-21.
78. Петров Н.Г. Короткозамедленное взрывание в шахтах / Н.Г. Петров, Н.Л. Росинский. – М.: Недра. – 1985. – 270 с.
79. Подземная эмульсионная технология «РудХим». – Белгородская обл., п. Яковлево: «РудХим». – 2024. – 38 с.
80. Приказ Минтранса РФ от 8 августа 1995 г. № 73 «Об утверждении Правил перевозки опасных грузов автомобильным транспортом».
81. Протосеня А.Г. Прогноз устойчивости выработок в низкопрочных железных рудах Яковлевского месторождения / А. Г. Протосеня, В. Л. Трушко// Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2013. - № . 4. – С. 49-61.

82. Распределение и корреляция показателей физических свойств горных пород: Справочное пособие / М.М. Протодяконов, Р.И. Тедер, Е.И. Ильницкая и др. – М.: Недра. – 1981. – 192 с.

83. Решетняк А.Ю. Детонация эмульсии на основе аммиачной селитры с ценосферами: автореф. дис. ... канд.техн. наук: 01.02.05 / Решетняк Александр Юрьевич. - Новосибирск, 2007. - 20 с.

84. Родионов В.Н. Механический эффект подземного взрыва/ В.Н. Родионов, В.В. Адушкин, В.Н. Костюченко и др. – М.: Недра. – 1971. – 224 с.

85. Росинский Н.Л. Лабораторные методы испытания взрывчатых веществ на устойчивость детонации под давлением/ Н.Л. Росинский, В.С. Матюнин, К.С. Толстых// Безопасность труда в угольных шахтах: сборник науч. трудов. Т. XXII. – М.: Недра. – 1972. – С. 208-217.

86. Русских А.П. Испытание эмульсионной матрицы порэмита 1А по методике ООН в условиях ОАО «Уралабест» / А.П. Русских // Развитие ресурсосберегающих технологий во взрывном деле. - Екатеринбург: изд. УрО РАН, 2009. - С.137-147.

87. Селин И.Ю. ООО «РудХим» - отечественный метод современного, высокотехнологичного взрыва/ И.Ю. Селин// Горная промышленность. – 2023. - № 3. – С. 46-47.

88. Селин И.Ю. Оценка стойкости сенсбилизации ЭВВ микропузырьками газа к динамическим воздействиям / И.Ю. Селин// Взрывное дело. – 2025. - № 148/105. – С. – 67-76.

89. Селин И.Ю. Ударное воздействие на массив при взрыве веерного заряда/ И.Ю. Селин// Взрывное дело. – 2025. - № 147/104. – С. 121-137.

90. Сенук В. М. Импульс взрыва и условия более полного использования его на дробление массивов крепких пород при скважинной отбойке / В. М. Сенук// Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 1979. – № 1. – С. 28-34.

91. Сильвестров В.В. Нагружение эмульсии ударом высокоскоростной пластины / В.В. Сильвестров, А.В. Пластинин, А.В. Юношев // Физика горения и взрыва. – 2016. - Т. 52. - № 3. - С.114-118.

92. Сильвестров В.В. Ударная сжимаемость эмульсионной матрицы при давлении до 37 Гпа / В. В. Сильвестров, А. С. Юношев, А. В. Пластинин, С. И. Рафейчик// Физика горения и взрыва. - 2014. - Т. 50. - № 4. - С.110-116.

93. Смирнов А.А. Применение принципов ресурсосбережения при отбойке крепких трещиноватых руд веерами скважинных зарядов/ А.А. Смирнов, К.В. Барановский, А.А. Рожков // Горный информационно-аналитический бюллетень. - 2020. - №3-1. - С. 300-312.

94. Соснин В.А. Особенности механизма детонации эмульсионных взрывчатых веществ / В.А. Соснин, С.Э. Межеричкий, Ю.Г. Печенев и др.// Вестник Казанского технологического университета. - 2016. - Т. 19. - № 19. - С. 28-33.

95. Соснин В.А. Состояние и перспективы развития промышленных взрывчатых веществ в России и за рубежом / В.А. Соснин, С.Э. Межеричкий // Вестник Казанского технологического университета. - 2016. - Т. 19. - № 19. - С. 84-89.

96. Сычев А.И. Сильные ударные волны в пузырьковых средах / А.И. Сычев// Журнал технической физики. - 2010. - Т.8. - Вып. 6. - С.31-35.

97. Сюйгуан Ван. Эмульсионные взрывчатые вещества. Пер. монографии проф. Ван Сюйгуан издания Metallurgical Industry Press, Beijing, 1994г./ Ван Сюйгуан. - Красноярск: Metallurgical Industry Press, 2012.- 380 с.

98. Технический регламент Таможенного союза «О безопасности взрывчатых веществ и изделий на их основе» ТР ТС 028/2012 (с изменениями на 23 декабря 2020 года).

99. Ткачук К.Н. Разрушение горных пород взрывом / К.Н. Ткачук. – Киев: Техника. – 1974. – 201 с.

100. Толстых К.С. Аппаратура и методика измерений давления в патронах ВВ в массиве, находящемся под воздействием взрыва зарядов смежных шпуров/

К.С. Толстых, В.С. Манюнин// Вопросы безопасности взрывных работ в угольных шахтах: сбор. науч. трудов МакНИИ. – Макеевка-Донбасс. – 1968. – С. 89-97.

101. Тюпин В.Н. Взрывные и геомеханические процессы в трещиноватых напряженных горных массивах: монография/ В.Н. Тюпин. – Белгород: ИД «Белгород» НИУ «БелГУ», 2017. – 192 с.

102. Тюпин В.Н. Предельные параметры буровзрывных работ при отбойке руды глубокими скважинами в камерах шахты им. Губкина АО «Комбината КМАруда»/ В.Н. Тюпин, С.Н. Кубриков// Горная промышленность. – 2020. - № 4. – С. 92-97.

103. Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Правила безопасности при производстве, хранении и применении взрывчатых материалов промышленного назначения». Утверждены приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 3 декабря 2020 г. N 494.

104. Филиппов В.Н. Определение оптимальных параметров распределения веерных скважинных зарядов при отбойке блоков/ В.Н. Филиппов, Е.А. Христоролюбов, А.В. Волков// Бюллетень Кузбасского государственного университета. – 2023. - № 2. – С. 92-100. - doi:10.26730/1999-4125-2023-2-92-100.

105. Фокин В.А. Распределение плотности эмульсионных взрывчатых веществ по высоте колонки скважинного заряда / В.А. Фокин // Изв.ВУЗов. Горный журнал. - 2007. - №3. - С.89-94.

106. Ханукаев А.Н. Снижение напряженности горного массива с помощью взрывов/ А.Н. Ханукаев, И.Ф. Кусов, В.И. Пшеничный и др. – М.: Наука. – 1979. – 120 с.

107. Ханукаев А.Н. Физические проблемы при отбойке горных пород взрывом / А.Н. Ханукаев. – М.: Недра. – 1974. – 221 с.

108. Цейтлин Я.И. Сейсмические и ударные воздушные волны промышленных взрывов / Я.И. Цейтлин, Н.И. Смолий. – М.: Недра. – 1981. – 192 с.

109. Чедвик П. Механика глубинных подземных взрывов / П. Чедвик, А. Кокс, Г. Гопкинс. – М.: Мир. – 1966. – 126 с.
110. Шагапов В.Ш. Распространение волн сжатия в пузырьковой жидкости, сопровождаемое образованием гидрата/ В.Ш. Шагапов, С.А. Лепихин, И.А. Чиглинец // Теплофизика и аэромеханика. – 2010. - Том 17. - № 2. – С. 247-260.
111. Шемякин Е.И. О волнах напряжений в прочных горных породах/ Е.И. Шемякин// Журнал прикладной механики и технической физики. – 1963. - № 5. – С. 83-93.
112. Юношев А. С. Влияние искусственных пор на параметры детонации эмульсионного взрывчатого вещества/ А.С. Юношев, В.В. Сильвестров, А.В. Пластинин, С.И. Рафейчик // Физика горения и взрыва. — 2017. — Т. 53. - № 2. — С. 91–97.
113. Юношев А.С. Исследование влияние плотности эмульсионного взрывчатого вещества на ширину зоны реакции / А.С. Юношев, А.В. Пластинин, В.В. Сильвестров // Физика горения и взрыва. - 2012. - Т. 48. - № 3. - С. 79-88.
114. Юрченко М.С. Открытое акционерное общество «РудХим»: передовые отечественные технологии для предприятий горнодобывающей отрасли/ М.С. Юрченко, И.Ю. Селин// Взрывное дело. – 2023. - № 140/97. – С. 117-121. - DOI:10.18698/0372-7009-2023-9-117-121.
115. Agrawal H. A Study on Influence of Density and Viscosity of Emulsion Explosive on Its Detonation Velocity / H. Agrawal, A.K. Mishra// Modeling, Measurement and Control C. - 2017. - Vol. 78. - N°3. - Pp 316-336. DOI:10.18280/mmc\_c.780305.
116. Avdeev K.A. Experimental and computational investigation of shock wave-to-bubble water momentum transfer / K.A. Avdeev, V.S. Aksenov, A.A. Borisov and etc.// Progress in Detonation Physics / Edited by S.M. Frolov and G.D. Roy/ - Moscow: TORUS PRESS, 2016. - pp. 199-219.
117. Balakrishnan V. Effect of Distributed Spherical Air-Gaps on Performance of Emulsion Explosive/ V. Balakrishnan, M. Pradhan, P. Dhekne// Engineering Journal of the Institution of Engineers (India). – 2019. – V. 100. – P. 155-162.

118. Cooper J. Void size dependence of the steady detonation properties of emulsion explosives/ J. Cooper, G. Leiper // *J. Energ. Mater.* — 1989. — V. 7. — P. 405–417.

119. Deribas A.A. Mechanism of detonation of emulsion explosives with hollow microballons / A.A. Deribas and etc // *XII International Conference on the Methods of Aerophysical Research: 28 June – 3 July, 2004, Novosibirsk, Russia.* - Novosibirsk, 2004. - Part I. - pp.75-80. – doi:10.1615/IntJEnergeticMaterialsChemProp.2012005987.

120. Fu-qiang Yang. Kinetic analysis of thermal decomposition process of emulsion explosive matrix in the presence of sulfide ores/ Fu-qiang Yang, Yong Guo, Yong Lai, Yidu Hong, Shuaiqi Yuan//*Sustainability: MDPI.* - 2022. - V. 14 (18). - P. 1-11. DOI:10.3390/su141811614

121. Gorinov S.A. Mechanization of charging operations when using bulk emulsion explosives in underground conditions/ S.A. Gorinov, A.V. Zhabko, I.Ju. Selin/ *International Scientific Conference "Scientific research of the SCO countries: synergy and integration". Beijing, China – July 2, 2025.* - DOI:10.34660/INF.2025.24.20.053.

122. Gorinov S.A. Physical and technical evaluation of possibility using low-density explosives in smooth blasting / S.A. Gorinov, I.Y. Maslov // *11<sup>th</sup> International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting. 24-26 August 2015. Sydney, Australia: Published by AIMM, 2015.* - Pp. 555-564.

123. Hirosaki Yu., Murata K., Kato Yu., Ito S. Characteristics of detonation of an emulsion explosive depending on the size and volume of voids/ Yu. Hirosaki, K. Murata, Yu. Kato, S. Ito// *Proceedings of the 12th International Detonation Symposium; San Diego, California, USA. August 11-16, 2002.* — P. 263–270.

124. Huang W. An experimental study of the effect of an emulsifier on the degree of crystallization of emulsion explosives under dynamic pressure/ W. Huang, Sl. Yan, Hb. Wu and others // *J Coal Sci Eng (China).* – 2011. – V. 17. – P. 100–103. - <https://doi.org/10.1007/s12404-011-0119-z>

125. Kononenko M. Economic and environmental aspects of using mining equipment and emulsion explosives for ore mining/ M. Kononenko, O. Khomenko, I. Myronova, I. Kovalenko// *Mining Machines.* – 2022. – V. 40(2). – P. 88-97

126. Kramarczyk B. Study of Influence of Sensitizer Content on Density of Bulk Emulsion Explosive Used in Underground Operations/ B. Kramarczyk, P. Mertuszka// Cent. Eur. J. Energetic Mater. – 2021. - N 18. – P. 429–447.

127. Lee J. Detonation and shock initiation properties of emulsion explosives / J. Lee, F.W. Sandstrom, B.G. Craig, P.A. Persson // Proc. 9th Int. Symp. on Detonation, Portland, Oregon, 1989. — P. 263–271.

128. Lee J. Detonation behaviour of emulsion explosives / J. Lee J., P.A. Persson // Propellants, Explosives, Pyrotechnics. - 1990.- V.15.- №5.- P. 208-216.

129. Liang X.-X. Comprehensive analysis of spherical bubble oscillations and shock wave emission in laser-induced cavitation / X-X. Liang, N. Linz, S. Freidank and etc. // Journal of Fluid Mechanics. – 2022. – V. 940. – A5. – P. 1-56.  
<https://doi.org/10.1017/jfm.2022.202>

130. Liu W. Bubble dynamics and pressure field characteristics of underwater detonation gas jet generated by a detonation tube/ Liu W., Li N., Weng C. and etc// Phys. Fluids. – 2021. – V. 33. - 023302.

131. Liu W. Experimental study of underwater pulse detonation gas jets: Bubble velocity field and time–frequency characteristics of pressure field/ Liu W., Li N., Huang X. and etc// Phys. Fluids. – 2021. - V. 33. - 083324.

132. Mendes R. Differences between the detonation behavior of emulsion explosives sensitized with glass or with polymeric microballoons / R. Mendes, J. Ribeiro, I. Plaksin, J. Campos, B. Tavares // 2013 Joint APS-SCCM/AIRAPT Conf. J. Phys.: Conf. Ser. - 2014. - V. 500. - 052030. - doi:10.1088/1742-6596/500/5/052030.

133. Mertuszka P. The influence of time on the density and detonation velocity of bulk emulsion explosives–A case study from Polish copper mines/ P. Mertuszka, K. Fuławka, M. Pytlik et al. // Cent. Eur. J. Energetic Mater. 2019. - N16. – P. 245–258.

134. Mishra A.K. Influence of Gassing Agent and Density on Detonation Velocity of Bulk Emulsion Explosives/ A.K. Mishra, M. Rout, D.R. Singh, Jana S.P. // Geotech Geol Eng. – 2018. -V. 36. P. 89–94. - doi.org/10.1007/s10706-017-0308-7

135. Mohanty B. Pressure Effects on Density of Small Diameter Explosives/ B. Mohanty, R. Deshaies. - Proceedings of 5th Annual Symposium on Explosives and Blasting Research, February 9–10, New Orleans, Louisiana, USA, pp. 9–16, 1989.

136. Nie S. Pressure Desensitization of a Gassed Emulsion Explosive in Comparison with MicroBallooon Sensitized Emulsion Explosives/ S. Nie. - Proceedings of 13th Annual Symposium on Explosives and Blasting Research, February 8–9 1997, Las Vegas, ISEE. - Las Vegas, Nevada, USA. – 1997. - Pp. 5–13.

137. Parsons S. The Benefits of Bulk Emulsion Explosives in Underground Development Mining/ S. Parsons, N. Bennett// Proceedings of EXPL0 2007 conference, Wollongong, Australia, 3-4 September 2007. - pp 87-91.

138. Patent US № 3447978. Ammonium nitrate emulsion blasting agent and method of preparing same / H.F. Bluhm. - Publ. 03.06.1969.

139. Patent US № 3642547. Method of controlling density in gas-sensitized aqueous explosives / K.L. Conrad. - Publ. 15.02.1972.

140. Patent US № 4500369 Emulsion explosive/ A. Tag, B.T. Petterson, E.C. Nygaard. – 19.02.1985.

141. Patent US № 4710248. Emulsion Explosive Composition/ D/. E. Yates, S.W. Dack. – Publ. 12.12.1987.

142. Patent US № 4326900 Water-in-oil Emulsion Explosive Composition/ K. Hattori, Y. Fukatsu, M. Takahashi. – Publ. 27.04.1982.

143. Patent US № 4940497. Emulsion Explosive Composition Containing Expanded Perlite/ C.L. Ommeren. – Publ. 10.07.1990.

144. Patent US № 5507889. Precompression resistant emulsion explosive/ J.J. Mulley, J.M. Farkas, C.J. McGinlay. – Publ. 16.04.1995.

145. Priyananda P. Premature detonation of an NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub> emulsion in reactive ground/ Priyananda P., Djerdjev A. M., Gore J., Neto C., Beattie J. K., Hawckett B. S.// Journal of Hazardous Materials. - 2014. – V. 283. – Pp. 314-320. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2014.08.070.

146. Sumiya F. Detonation Velocity of Precompressed Emulsion Explosives/ F. Sumiya, Y. Hirotsaki, Y. Kato // International Society of Explosives Engineers. – 2002. - Jan 1. – P. 11. - OneMine.org.
147. Takeuchi F. Emulsion type explosives / F. Takeuchi, K. Yamamoto, H. Sakai // J. Ind. Explos. Soc. Jap. - 1982.- V.43.- №5. - Pp. 285-294.
148. Thiard R. Emulsion explosives / R. Thiard, J. Linca // Ind. miner techn. - 1984. - №10. - pp. 800-804.
149. Tikhvatullina R.R. Numerical simulation of shock and detonation waves in bubbly liquids / R.R. Tikhvatullina, S.M. Frolov// Shock Waves. – 2020. – V. 30. – P. 263–271. doi.org/10.1007/s00193-019-00914-2.
150. Turcotte R. Factors Affecting Fume production in Surface Coal Blasting Operation/ R. Turcotte, R. Yang, M.C. Lee and etc. - Proceedings of 18th Annual Symposium on Explosives and Blasting Research, February 2002, ISEE. - Las Vegas, Nevada, USA - Pp. 4–11.
151. Xu Z. Thermal stability and mechanism of decomposition of emulsion explosives in the presence of pyrite/ Zhixiang Xu, Qian Wang, Xiaoru Fu// Journal of hazardous materials. - 2015. - V. 300. – P. 702-710. - doi: 10.1016/j.jhazmat.2015.07.069.
152. Yang R. Blast Diagnosis Monitoring at Black Thunder Coal Mine/ R. Yang, R. Turcotte, M.C. Lee and etc. - Orica Internal Report. - 2001.
153. Yang R. Effect of product density on the resistance to dynamic and static precompression of gassed emulsion explosives and recoverability / R. Yang // International Journal of Energetic Materials and Chemical Propulsion. – 2011. – V. 10. - N 6. – P. 487–496.
154. Yang R. Evaluation of the Resistance to Pre-compression of High Energy Magnums in Field and Underwater Blasts/ R. Yang, L. Pelletier. - Orica Internal Report, 1998.
155. Yang R. Field Monitoring of Loading Properties of Gassed Bulk Emulsions/ R. Yang. - ISEE 25th Annual Conference, Nashville, February 7–10 1999. - ISEE, Nashville. - Pp. 9–18.

156. Yoshida H. Detonation behavior of emulsion explosives containing glass microballoons / H. Yoshida, M. Iida, K. Tanaka, M. Kusakabe, K. Shiino // Proc. 8th Int. Symp. on Detonation, Albuquerque, NM, 1985. — P. 171–177.

## **ПРИЛОЖЕНИЯ**

**Справка о внедрении в производство результатов и рекомендаций  
диссертационной работы**

В диссертационный совет Д 24.2.423.02  
620144, г. Екатеринбург,  
ул. Куйбышева, 30

#### Справка о внедрении

Настоящим подтверждаем, что результаты и рекомендации диссертационной работы Селина Ивана Юрьевича на тему «Совершенствование технологии взрывных работ при подземной добыче путем обеспечения стойкости газопоровой сенсбилизации эмульсионных взрывчатых веществ к динамическим нагрузкам» обладают актуальностью, представляют практический интерес и были использованы на предприятии при ведении взрывных работ с применением эмульсионных взрывчатых веществ с пероксидной газогенерацией.

С целью повышения надежности взрывных работ и создания условий эффективного применения бестарных ЭВВ с пероксидной газогенерацией на подземных горных работах на руднике внедрены, предложенные в диссертационной работе Селина И.Ю. рекомендации по управлению рецептурно-технологическими характеристиками ЭВВ и параметрами размещения зарядов ЭВВ в массиве горных пород для обеспечения их надежной детонации при динамических воздействиях со стороны ранее взорвавшихся зарядов.

Предложенная в диссертационной работе технология взрывных работ добычи сульфидных руд с применением бестарных ЭВВ показала свою эффективность, так как позволяет повысить безопасность и снизить затраты на ведение взрывных работ

В диссертационной работе Селина Ивана Юрьевича разработана технология заряжания бестарного ЭВВ в подземных условиях. Данная технология прошла успешную проверку в производственных условиях и рекомендована к применению на Яковлевском ГОКе.

Таким образом, практическая полезность и актуальность рекомендаций диссертационной работы Селина И.Ю. подтверждается успешным внедрением технологии взрывных работ в подземных условиях на основе применения бестарных ЭВВ с пероксидной газогенерацией, при которой обеспечивается сохранность их детонационной способности при последовательном взрывании зарядов (групп зарядов).

Главный инженер  
Рудника подземного  
ООО «Яковлевский ГОК»



В.В. Нагорнюк