

**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Российский химико-технологический университет
имени Д.И. Менделеева»**

На правах рукописи



Михеев Денис Иголевич

**Научные аспекты разработки водно-гелевых
составов на основе утилизируемых пироксили-
новых порохов для обеспечения необходимых
параметров детонации**

05.17.07 – Химия и технология топлива и высокоэнергетических веществ

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Москва – 2020

Работа выполнена на кафедре техносферной безопасности федерального государственного образовательного учреждения высшего образования «Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева» (РХТУ им. Д.И. Менделеева).

Научный руководитель:
доктор технических наук, профессор
Акинин Николай Иванович

заведующий кафедрой техносферной безопасности Российского химико-технологического университета имени Д.И. Менделеева

Официальные оппоненты:
доктор технических наук
Франтов Александр Евгеньевич

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В.Мельникова Российской академии наук (ИПКОН РАН)
ведущий научный сотрудник отдела №5 «Отдел проблем геомеханики и разрушения горных пород»

кандидат технических наук
Старшинов Александр Васильевич

Группа компаний «Нитро-технологии»
технический директор

Ведущая организация:

Автономная Некоммерческая Организация «Национальная организация инженеров-взрывников» (АНО НОИВ)

Защита состоится 15 декабря 2020 года в 11:00 часов на заседании диссертационного совета РХТУ.Р.06 федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева» (125480, г. Москва, ул. Героев Панфиловцев, дв.20) в конференц-зале ректората.

С диссертацией можно ознакомиться в Информационно-библиотечном центре РХТУ им. Д.И. Менделеева и на сайте федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева»

https://muctr.ru/university/departments/ods/inhouse/inhouse_announcements/

Автореферат диссертации разослан « ____ » _____ 2020 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета РХТУ.Р.06
д.т.н., профессор



А.Я. Васин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность диссертационной работы. Утилизация различных видов вооружения является одной из важнейших проблем современного мира. Действующей в настоящее время Федеральной Целевой Программой (ФЦП) «Промышленная утилизация вооружения и военной техники на 2011-2015 гг. и на период до 2020 года» предусмотрен практически полный переход к промышленной утилизации боеприпасов, предусматривающий завершение и последующий отказ от уничтожения методом подрыва. Переход к промышленной утилизации безусловно снизил опасность обращения энергоемких компонентов, однако экологическая и экономическая составляющие практически не претерпели изменений, поскольку утилизация велась преимущественно уничтожением в специальных печах или на площадках, что абсолютно неэффективно с точки зрения возвратного потенциала таких энергоемких компонентов.

В годы действия предшествующих ФЦП было разработано множество способов утилизации боеприпасов, включающих в себя извлечение энергоемких компонентов с последующим использованием во взрывчатых составах промышленного назначения, разработаны десятки рецептов подобных взрывчатых составов, допущенных к постоянному применению. При этом большинство рецептов разработано целесообразно эксплуатационным показателям промышленных взрывчатых веществ (ПВВ), практически не учитывая специфики протекания детонационных процессов при использовании в качестве компонентов утилизируемых энергоемких материалов. Детальное изучение особенностей детонации таких взрывчатых систем позволит расширить область их применения и эффективнее реализовывать потенциал конверсионной продукции.

В группу наиболее сложных с точки зрения вовлечения во вторичный оборот энергонасыщенных компонентов входят пироксилиновые пороха (ПП), проявляющие способность к взрывному превращению при особых условиях, в частности в присутствии высокоплотных наполнителей малой сжимаемости. Одним из наиболее перспективных наполнителей, позволяющих не только снизить опасность в обращении, но и повысить эффективность взрывного воздействия являются энергоемкие водные гели.

Однако, при разработке рецептов подобных пороховых водно-гелевых составов (ПВГС) необходимо учитывать существующие технологии производства специальных продуктов и особенности используемых компонентов, выявляемые в ходе исследований влияния различных факторов на процесс детонации взрывчатых составов.

Цель и задачи работы. Цель настоящей работы заключалась в совершенствовании технологии разработки рецептур ПВГС с учетом особенностей течения детонационного процесса и влияния компонентов ПВГС на параметры детонации.

В ходе достижения цели решались следующие задачи:

1) Экспериментальное определение влияния химического состава водных гелей в ПВГС на основе утилизируемого зерненого пироксилинового пороха на граничные условия возбуждения детонации;

2) Экспериментальное определение влияния химического состава водных гелей и их содержания в ПВГС на параметры детонации;

3) Экспериментальное определение влияния размеров пороховых элементов утилизируемых зерненных пироксилиновых порохов на параметры детонации ПВГС;

4) Анализ закономерностей течения детонационного процесса в ПВГС в зависимости от химической активности используемых водных гелей;

5) Формирование научно-обоснованного подхода и разработка рекомендаций для создания и совершенствования рецептур ПВГС на основе полученных сведений о течении детонационного процесса и влиянии компонентов взрывчатых составов на параметры детонации.

Научная новизна. Впервые сформулированы аспекты научно-обоснованного подхода при разработке рецептур ПВГС на основе утилизируемых пироксилиновых порохов для обеспечения необходимых параметров детонации.

Впервые определены скорости детонации, массовые скорости и давления детонации ПВГС на основе утилизируемых зерненных пироксилиновых порохов различных марок с применением водных гелей различной энергоемкости.

Электромагнитным методом определения параметров детонационных и ударных волн получены профили массовой скорости ПВГС. Установлено, что виды профилей изученных составов характерны для гетерогенных смесевых взрывчатых составов. Отмечается ряд особенностей в части отсутствия выраженного пика максимально достигаемого избыточного давления, неоднородности в зоне химпика, а также проявления вторичных пиков у составов на основе крупнозерненных пироксилиновых порохов, которые в значительной степени способны оказать влияние на практику применения подобных составов.

Впервые изучено влияние состава водного геля на граничные условия детонации ПВГС. Определены критические диаметры детонации и минимальное содержание

пироксилинового пороха, обеспечивающее устойчивую детонацию с учетом химического состава водного геля. Экспериментально установлено, что наличие в составе водного геля топливного компонента повышает детонационную способность ПВГС.

Предложен экспериментально обоснованный механизм протекания детонационного процесса в ПВГС. Установлено характерное для крупных марок порохов проявление потоков продуктов взрыва, опережающих фронт детонации через каналы пороховых элементов, и, вероятно, способствующих распространению детонации.

Практическая ценность. Сформулированы рекомендации по разработке и модифицированию рецептур, с целью учета особенностей состояния используемых пироксилиновых порохов, влияния состава водного геля и реализующегося механизма взрывчатого превращения для управления параметрами детонации в зависимости от целей применения.

Установлены параметры детонации, особенности протекания и распространения детонационного процесса, характерные для ПВГС на основе утилизируемых зернистых пироксилиновых порохов с учетом размеров пороховых элементов для водных гелей на основе нитратов.

По результатам исследований подготовлены практические рекомендации по разработке рецептур ПВГС, направленные индустриальным партнерам буровзрывной компании ООО «Промстройвзрыв» (г. Санкт-Петербург), и заводу по утилизации боеприпасов ООО «Гефест-М» (г. Реж, Свердловская обл.), с учетом их ресурсной базы.

На защиту выносятся следующие положения

Результаты экспериментального исследования влияния химического состава водного геля на критический диаметр детонации ПВГС;

Результаты экспериментального исследования влияния содержания водных гелей в ПВГС на их детонационную способность;

Результаты экспериментального исследования влияния химического состава водных гелей на параметры детонации ПВГС;

Результаты экспериментального исследования влияния размеров пороховых элементов на параметры детонации ПВГС;

Результаты анализа процессов, происходящих в детонационной волне, определяющих течение детонации в ПВГС;

Рекомендации по разработке рецептур ПВГС на основе утилизируемых пироксилиновых порохов для обеспечения необходимых параметров детонации.

Апробация работы. Основные результаты работы представлены и обсуждены на следующих конференциях: XIV Ежегодной международной научно-практической конференции по взрывному делу, г. Порторож, Словения, 2014 г., Международные научные симпозиумы «Неделя горняка - 2015», «Неделя горняка - 2017», НИТУ «МИСиС», Москва, 2015, 2017 гг., Всероссийская научно-техническая конференция "Успехи в специальной химии и химической технологии", посвященная 80-летию основания ИХТ факультета, РХТУ им. Д.И. Менделеева, Москва, 2015 г., Международный конгресс молодых ученых по химии и химической технологии, РХТУ им. Д.И. Менделеева, Москва, 2017 г., 21st Seminar of the New Trends in Research of Energetic Materials, University of Pardubice, г. Пардубице, Чехия, 2018 г., Европейский симпозиум по геомеханике "EUROCK 2018", Санкт-Петербург, 2018 г.

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 12 печатных работ, в том числе 10 работ в изданиях, индексируемых РИНЦ, 7 из которых входят в перечень рецензируемых научных журналов, рекомендованных ВАК.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из Введения, 3-х глав, заключения, списка литературы, включающего 100 источников и 3 приложений. Работа изложена на 157 страницах машинописного текста и содержит 45 рисунков, 35 таблиц.

Личный вклад автора состоит в поиске и анализе литературных данных, проведении расчетов, подготовке и проведении экспериментальных исследований, обработке полученных результатов. Обсуждение результатов и написание научных публикаций проведено автором при участии научного руководителя.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы работы, сформулированы цель и задачи исследования, научная новизна и практическая значимость полученных результатов, основные положения, выносимые на защиту, а также данные о структуре и объеме диссертационной работы.

В **первой главе** изложены принципы утилизации боеприпасов с истекшими гарантийными сроками хранения (ГСХ), примеры и подходы использования энергоемких компонентов боеприпасов в качестве компонентов промышленных взрывчатых составов. Описываются выявленные особенности детонации пироксилиновых порохов и их использование в качестве компонентов взрывчатых составов. Рассматриваются водно-

гелевые взрывчатые составы, как самостоятельный класс взрывчатых составов промышленного назначения и как перспективные наполнители ПВГС, а также особенности взрывного воздействия подобных взрывчатых составов на объекты разрушения.

Во **второй главе** приводятся результаты оценочных расчетов детонационных характеристик ПВГС. Полученные данные позволяют проводить разработку рецептур ПВГС с предварительной оценкой итоговых параметров и вносить корректировки с целью достижения оптимальных значений для решения конкретных задач.

В **третьей главе**, содержащей 4 раздела, приводятся описания объектов исследования и их компонентов, методы и методики изготовления ПВГС и проведения экспериментальных исследований, представление и обсуждение полученных результатов.

Раздел **3.1** включает описание основных компонентов, используемых для приготовления водных гелей и ПВГС на их основе.

В разделе **3.2** описывается рецептура и методика приготовления водных гелей, выбранных в качестве компонентов исследуемых ПВГС, а также методика изготовления самих ПВГС с последующим структурированием получаемых составов.

Раздел **3.3** посвящен описанию методов и методик проведения экспериментальных исследований критического диаметра детонации и минимального содержания ПП, позволяющего сохранить устойчивую детонацию ПВГС, в зависимости от состава водного геля, используемого в качестве наполнителя, и исследования особенностей течения детонационного процесса с помощью анализа слеодообразования и электромагнитного метода исследования параметров детонационных и ударных волн.

Составы исследуемых водных гелей представлены в таблице 1.

Таблица 1 - Составы водных гелей

Водный гель	Содержание компонента, масс. %					
	NH ₄ NO ₃	NaNO ₃	(NH ₂) ₂ CO	H ₂ O	CaCl ₂	ПАА*
Состав №1	45,0	15,0	10,0	30,0	-	1,2
Состав №2	50,0	20,0	-	30,0	-	1,2
Состав №3	-	-	-	61,3	38,7	1,2

*Сверх 100%

Раздел **3.4** посвящен описанию полученных результатов и их обсуждению. Экспериментальное исследование влияния диаметра заряда на детонационную способность проведено для ПВГС на основе трех водных гелей различного химического состава одинаковой плотности с ПП марки 6/7 гр. Содержание пироксилинового пороха

данной марки в ПВГС обусловлено созданием оптимальных условий детонации ПП в присутствии наполнителя. Сравнительные результаты представлены в таблице 2. Теплоты взрывного превращения ПВГС рассчитаны с помощью программ SD и REAL.

Таблица 2 - Сравнительные значения критического диаметра детонации ПВГС

Водный гель	ρ водного геля, г/см ³	С _{пп} , масс. %	КБ, %	ρ ПВГС, г/см ³	Критический диаметр, мм	Q _{взр} , кДж/кг
Состав №1	1,38	63	-18,2	1,42	7,8-10,1	3149
Состав №2			-14,0		10,1-12,5	3321
Состав №3			-33,5		13,3-20,5	2679

ПВГС с Составом №1 демонстрирует высокую детонационную способность, связанную с режимом энерговыделения в детонационном процессе, характерном для гетерогенных систем. В частности, водный гель Составы №1 является более реакционноспособным ввиду наличия в составе растворенного топливного компонента – карбамида, в то время как водный гель Составы №2 не обладает подобной собственной энергоемкостью и не способен быстро реализовать свой окислительный потенциал, что в свою очередь сказывается на итоговых детонационных параметрах ПВГС. Водный гель Составы №3, не имеющий окислительных и топливных компонентов логично демонстрирует более высокие значения критического диаметра.

Все составы устойчиво детонируют при диаметре свыше 20,5 мм, что с учетом данных о детонации зеренных ПП в сухом ненаполненном состоянии указывает на выраженную роль наличия наполнителя на детонационную способность ПП, проявляющуюся в том числе у зеренных ПП с истекшими ГСХ.

Влияние химического состава водного геля на критический диаметр детонации указывает на участие водных гелей в детонационном процессе, помимо обеспечения передачи детонации пороховым элементам. В работах Апина А.Я. указывается об изменении воздействия наполнителя на детонацию состава в зависимости от степени заполнения заряда. В частности, после заполнения наполнителем всего свободного пространства между пороховыми элементами, его избыток ведет к снижению детонационных параметров из-за ослабления контакта между пороховыми элементами. В виду этого изучалось влияние содержания водного геля в составе ПВГС и его химического состава на детонационную способность ПВГС. Полученные результаты указывают на раздельное течение детонационного процесса, поскольку с учетом расчетной теплоты взрывного превращения исследованных составов более энергоемкие ПВГС с

наполнителем в виде Состава №2 демонстрируют крайне резкое падение детонационной способности, утрачиваемое в зарядах диаметром 20,5 мм при содержании водного геля 50 масс. % (коэффициент заполнения 1,35), ПВГС с Составом №1 значительно превосходит по детонационной способности другие составы, сохраняя способность к детонации при содержании наполнителя 65 масс. % (коэффициент заполнения 1,76). ПВГС с инертным Составом №3 показали быструю утрату детонационной способности при содержании наполнителя 43 масс. % (коэффициент заполнения 1,14).

Исследование слеодообразования при детонации ПВГС для оценки возможности влияния упоминаемых в литературе явлений ускорения детонации по пороховым элементам ПП, проводилось с использованием зарядов ПВГС на основе ПП марки 14/7 и водного геля Состава №1 с перпендикулярным относительно пластины-свидетеля расположением пороховых элементов.

Фотография торца заряда и пластина-свидетель после его подрыва представлены на рисунках 1 и 2. Как видно по следам воздействия, в каналах пороховых элементов



Рисунок 1 - Фотография торца заряда ПВГС на основе ПП марки 14/7

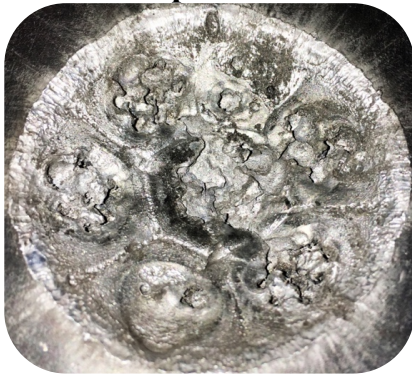


Рисунок 2 - Фотография пластины-свидетеля после взрыва ПВГС

ПП марки 14/7 в ходе детонационного процесса образуются мощные струи продуктов взрыва, опережающие основной ударный фронт, и, вероятно, обладающие достаточной энергией для инициирования детонации последующих пороховых элементов. Подобные эффекты наблюдались в работах Дремина А.Н. с нитроглицериновыми порохами, имеющими внутренние каналы. Также можно выделить следы, оставленные ударной волной отдельных пороховых элементов, что указывает на некоторое ускорение процесса детонации при прохождении по пороховому элементу относительно общей детонационной волны состава. Для оценки влияния выявленных эффектов на детонационный процесс был изготовлен аналогичный заряд с заполненными каналами пороховых элементов.

Фотография торца заряда и пластины-свидетеля после эксперимента представлены на рисунках 3 и 4.



Рисунок 3 - Фотография торца заряда ПВГС на основе ПП марки 14/7 с заполненными каналами



Рисунок 4 - Фотография пластины-свидетеля после взрыва ПВГС с заполненными каналами

Заполнение каналов привело к исчезновению струй, но при этом сохранились следы, позволяющие выделить детонацию отдельных пороховых элементов. Для более подробного изучения влияния состава наполнителя на параметры детонации проведены экспериментальные исследования ПВГС на основе различных марок ПП с истекшими ГСХ и водных гелей указанных составов электромагнитным методом определения параметров детонации.

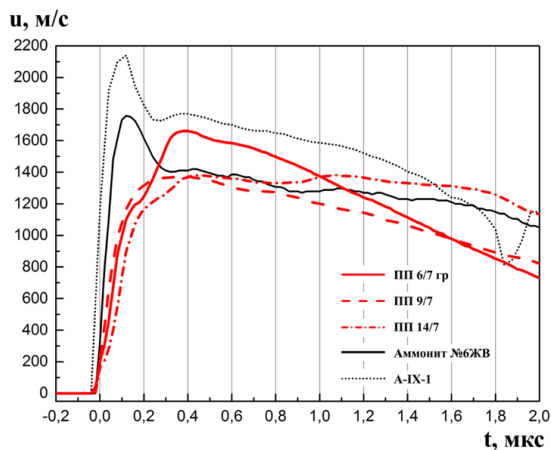


Рисунок 5 - Профили $u(t)$ для ПВГС на основе ПП марок 6/7 гр, 9/7, 14/7 и водного геля Состава №1 в сравнении с А-IX-1 и Аммонитом №6ЖВ

На рисунке 5 приводится сравнение типовых профилей $u(t)$ ПВГС на основе водного геля Состава №1 и различных марок ПП с профилями взрывчатых составов военного (А-IX-1) и промышленного назначения (Аммонит №6ЖВ). В сравнении с профилями массовой скорости взрывчатых составов военного и промышленного назначения у ПВГС наблюдается выраженное замедление роста массовой скорости и давления в ударном фронте. Подобные «завалы» фронта вероятнее всего связаны с присутствием в составе водного геля, оказывающего некоторое флегматизирующее действие. Различный наклон указывает на неравномерность фронта детонационной волны ПВГС, наиболее вероятной причиной которого является выраженная гетерогенность составов.

На рисунке 5 приводится сравнение типовых профилей $u(t)$ ПВГС на основе водного геля Состава №1 и различных марок ПП с профилями взрывчатых составов военного (А-IX-1) и промышленного назначения (Аммонит №6ЖВ). В сравнении с профилями массовой скорости взрывчатых составов военного и промышленного назначения у ПВГС наблюдается выраженное замедление роста массовой скорости и давления

В частности, улавливаемые датчиком воздействия, наблюдаемые в виде ступенчатых смещений во фронте волны, вероятно, являются проявлениями локальных возмущений, образующихся в следствие детонации, ускоренно распространяющейся по порохам элементам относительно основного фронта ПВГС, в результате чего формируется комплексная структура, подобная «двуслойной» детонации, характерной для схожих гетерогенных систем, описанных в работах Митрофанова В.В.

Полученные значения скорости детонации в зарядах диаметром 20,5 и 28 мм демонстрируют высокую сходимость со значениями лабораторных и полигонных испытаний в диаметрах 36 и 60 мм, что указывает на достижение предельной скорости детонации в исследованных зарядах и подтверждается результатами исследований зависимости скорости детонации от диаметра для других водно-гелевых систем.

Исследование влияния разбавления ПВГС относительно оптимального содержания ПП на параметры детонации показало выраженное снижение скорости детонации и массовой скорости с ростом содержания водного геля, результаты представлены в таблице 3. При этом на профилях в целом сохраняется наличие максимумов массовой скорости и слабая выраженность «химпиков».

Таблица 3 - Параметры детонации ПВГС на основе ПП марки 6/7 гр и водного геля Составы №1

$S_{ПП}$, масс. %	ρ , г/см ³	d_z , мм	D , км/с	u_{max} , м/с	P_{max} , ГПа
50	1,40	20,5	5,84	1378	11,26
40	1,39	20,5	4,98	1149	7,96

Эффективность практического применения ПВГС на основе водного геля Составы №1 можно оценить по профилям давления взрыва $P(t)$, представленным на рисунке 6. Профили давления ПВГС демонстрируют более плавный рост давления в ударном фронте, что обеспечивает наблюдаемое в ходе испытаний более мягкое дробление твердых пород в ближней зоне, отмечаемое уменьшенным выходом мелких некондиционных фракций. В тоже время развиваемые значения давления и их продолжительность в сравнении с типовыми ПВВ на примере Аммонита №6ЖВ обеспечивают достаточное разрушающее воздействие на объекты, что наблюдается при промышленных испытаниях.

На рисунке 7 представлены сравнительные профили изменения давления в детонационной волне, рассчитанные на основе полученных скоростей детонации, массовой скорости и плотности состава, позволяющие оценить эффективность ПВГС.

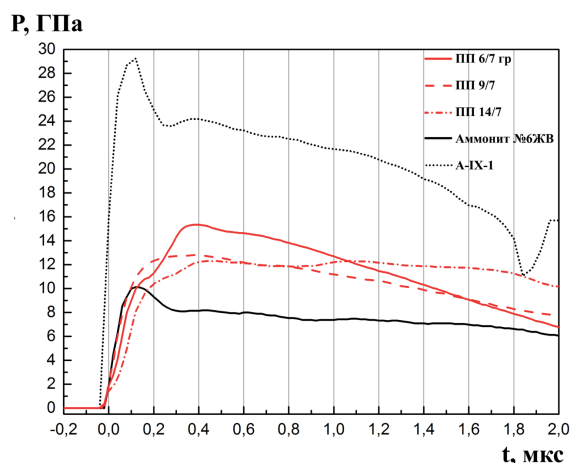


Рисунок 6 - Профили $P(t)$ для ПВГС на основе ПП марок 6/7 гр, 9/7, 14/7 и водного геля Составы №1 в сравнении с А-IX-1 и Аммонитом №6ЖВ

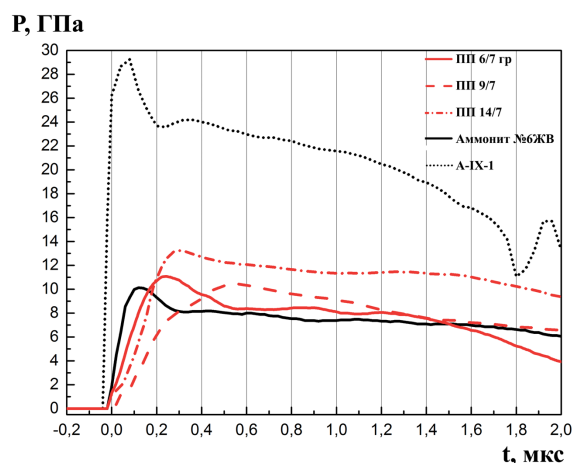


Рисунок 7 - Профили $P(t)$ для ПВГС на основе ПП марок 6/7 гр, 9/7, 14/7 и водного геля Составы №2 в сравнении с А-IX-1 и Аммонитом №6ЖВ

При использовании водного геля Составы №2 параметры детонации ПВГС в сравнении с водным гелем Составы №1 существенно снижаются, приближаясь к показателям Аммонита №6ЖВ, что с практической точки зрения ведет к увеличению удельного расхода ПВВ. При необходимости использования ПВВ мощностью, приближенной к показателям Аммонита №6ЖВ более целесообразным будет использование ПВГС на основе Составы №1 с повышенным содержанием водного геля, обеспечивая более рациональное использование энергоемкого потенциала утилизируемых ПП.

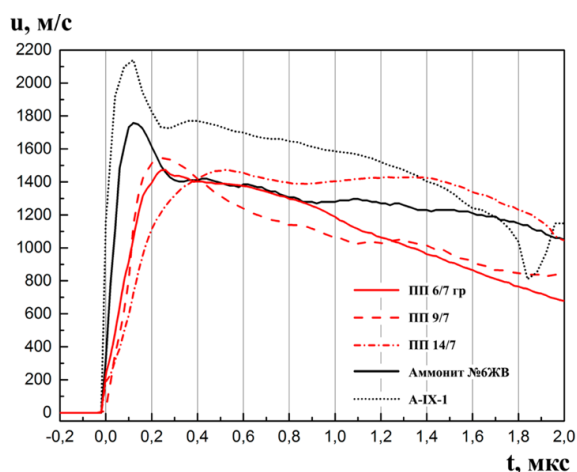


Рисунок 8 - Профили $u(t)$ для ПВГС на основе ПП марок 6/7 гр, 9/7, 14/7 и водного геля Составы №3 в сравнении с А-IX-1 и Аммонитом №6ЖВ

На рисунке 8 приводится сравнение типовых профилей $u(t)$ на основе водного геля Составы №3 и различными марками ПП с профилями взрывчатых составов военного (А-IX-1) и промышленного назначения (Аммонит №6ЖВ). У ПВГС наблюдается выраженное замедление роста массовой скорости в ударном фронте, характерное для всех исследуемых составов, и, вероятнее всего, связаны с некоторым флегматизирующим действием водной составляющей.

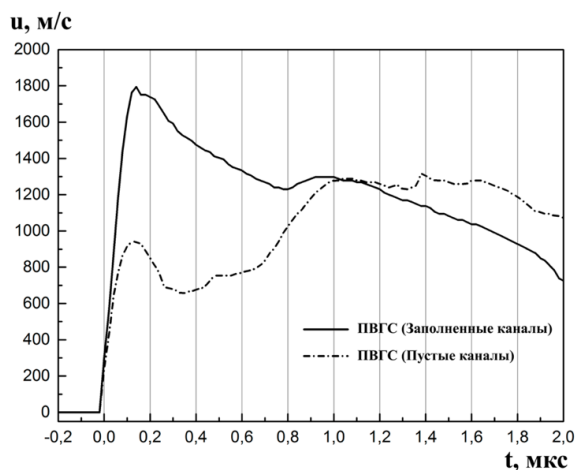


Рисунок 9 - Профили $u(t)$ для ПВГС на основе ПП марки 14/7 и водного геля Состава №1 с различным заполнением каналов пороховых элементов

марки 14/7. При этом фиксируемая скорость процесса в случае пустых каналов составляет 7,18 км/с, в случае заполненных 6,42 км/с. Данное явление объясняет появление вторичных пиков, по сути являющихся основной детонационной волной. Для ПП меньших размеров подобные проявления и их вклад в детонацию могут быть менее значительными, поскольку непосредственно связаны с размерами пороховых элементов.

Сравнительные результаты измерений скорости детонации ПВГС в зависимости от размеров (марки) ПП представлены в таблице 4.

Таблица 4 - Усредненные значения скорости детонации ПВГС в зависимости от размеров ПП

Марка ПП	D, км/с		
	Состав №1	Состав №2	Состав №3
6/7 гр	6,49±0,36	5,85±0,35	5,68±0,03
9/7	6,55±0,18	5,92±0,04	6,00
14/7	6,15±0,19	5,99±0,10	6,22±0,25

Совокупность полученных экспериментальных данных с учетом анализа сведений о детонационных процессах подобных систем и наблюдаемых эффектах при их применении позволяют сделать предположения о механизме течения детонационного процесса в ПВГС. Детонационный процесс в макрокомпонентах ПВГС – пороховых элементах ПП и водном геле развивается несколько обособлено друг от друга. В частности, благодаря пористой микроструктуре и струйным эффектам в каналах, детонация в пороховом элементе в первую очередь распространяется по внутренней его части, значительно ускоряя детонацию в случае наличия прямого контакта с другими

С учетом выраженного влияния на детонационный процесс заполнения каналов пороховых элементов, проведена оценка его влияния на параметры детонации ПВГС. Полученные профили $u(t)$ представлены на рисунке 9.

Результаты показывают, что в случае пустых каналов в пороховых элементах фиксируется опережающая детонация, обгоняющая основной фронт приблизительно на 0,88 мкс в случае ПП

пороховыми элементами. Детонационный процесс в водном геле возникает в момент прохождения детонационной волны только в случае наличия в составе водного геля достаточного объема топливного компонента, в противном случае оказываемый эффект практически не отличается от эффектов инертного наполнителя. Смешение компонентов ПВГС под воздействием ударной волны и последующее совместное энерговыделение на начальном этапе детонационного процесса практически не наблюдается в виду малой интенсивности или отсутствия. Водный гель, содержащий только окислитель, обладает некоторым энергетическим потенциалом в результате окисления своих компонентов и растворенного гелеобразователя (полиакриламида), что объясняет его некоторую активность в отличие от инертного водного геля.

Анализ результатов влияния химического состава водного геля на детонационный процесс и наблюдаемый механизм течения детонации позволяют сформулировать научные аспекты, способствующие оптимизации подходов и технологических решений при разработке рецептур ПВГС, обеспечивающих необходимые параметры детонации. После каждого пункта приводятся варианты практической реализации.

1. Ведущую роль в развитии взрывчатого превращения выполняет пироксилиновый порох, влияние которого на детонационный процесс определяется его концентрацией в составе, размерами и структурой пороховых элементов. Устойчивая детонация ПВГС обеспечивается только пороховыми элементами, способными к взрывчатому превращению в режиме детонации, что определяется геометрическими размерами отдельного порохового элемента и его внутренней структурой.

Возможность использования конкретных марок пироксилиновых порохов в качестве основного взрывчатого компонента рекомендуется определять экспериментально в части возможности реализации взрывчатого превращения в режиме детонации в пороховых элементах. В данной работе экспериментально подтверждена детонационная способность пироксилиновых порохов с истекшими ГСХ для пороховых элементов диаметром более 3,50 мм, для пороховых элементов меньшего диаметра рекомендуется проводить дополнительные исследования.

2. Увеличение размеров пороховых элементов ведет к ускорению процесса распространения детонации за счет особенностей строения пороховых элементов пироксилинового пороха, в частности пористой микроструктуры и струйных эффектов в каналах пороховых элементов. Нарушения внутренней структуры пороховых элементов снижают их детонационную способность.

Возможность использования конкретных партий пироксилиновых порохов, в особенности с истекшими ГСХ, с нарушением или отсутствием подтверждения соблюдения условий хранения рекомендуется определять экспериментально относительно возможности реализации взрывчатого превращения в режиме детонации в пороховых элементах. При проектировании зарядов на основе ПВГС возможно использование струйных эффектов в каналах пороховых элементов, как дополнительных элементов воздействия на объекты разрушения.

3. Детонационная способность ПВГС определяется детонационной способностью пороховых элементов и возможностью передачи достаточного инициирующего импульса между ними.

Разработку рецептур ПВГС рекомендуется вести с учетом фактической структуры получаемого состава, контролируя обеспечение прямого контакта или достаточного для передачи инициирующего импульса через наполнитель расстояния между пороховыми элементами. Сохранение равномерного распределения пороховых элементов в составе необходимо обеспечивать по средствам структурирования гелеобразующего компонента, что позволяет избежать расслоения в случае значительной разницы в плотностях компонентов.

4. Сохранение инициирующего импульса достаточной мощности обеспечивается прямой его передачей между пороховыми элементами или передачей через водный гель, в том числе за счет взрывчатого превращения водного геля, возникающего под действием передаваемого инициирующего импульса.

Для достижения наибольшей мощности ПВГС рекомендуется контролировать сохранение прямого контакта между пороховыми элементами после заполнения водным гелем пустот между пороховыми элементами. Изменение расстояния между пороховыми элементами по средствам увеличения доли водного геля в составе позволяет в некоторой мере изменять итоговые детонационные параметры ПВГС, что может служить эффективным инструментом обеспечения необходимых параметров детонации.

5. Способность водного геля на основе нитратов к взрывчатому превращению обеспечивается наличием в его составе окислительных и топливных компонентов. Взаимодействие компонентов водного геля с пироксилиновым пороховым в детонационной волне не значительно, либо отсутствует.

Выбор используемого водного геля необходимо осуществлять с учетом его влияния на детонационную способность и параметры детонации разрабатываемых ПВГС.

Использование водного геля способного к взрывчатому превращению позволяет поддерживать высокую мощность инициирующего импульса за счет компенсации потерь при передаче к последующим пороховым элементам через водный гель, что обеспечивает повышение детонационной способности ПВГС. Использование дополнительных окислителей для повышения полноты взрывчатого превращения пироксилинового пороха в детонационной волне не эффективно.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные итоги проведенных исследований

1. Сформулированы научно-обоснованные подходы создания и модифицирования рецептур ПВГС с учетом особенностей течения детонационного процесса и влияния компонентов ПВГС на параметры детонации.

2. Определено влияние химической активности водных гелей на критические диаметры детонации ПВГС на основе зерненных ПП с истёкшими ГСХ. Установлено уменьшение критического диаметра детонации ПВГС при повышении энергоёмкости используемых водных гелей.

3. Получены зависимости снижения детонационной способности ПВГС от содержания водного геля. Установлен рост пределов сохранения детонационной способности при увеличении энергоёмкости используемого водного геля.

4. Выявлено выраженное влияние химического состава водного геля на параметры детонации ПВГС. Использование инертного водного геля продемонстрировало повышение средних значений параметров массовой скорости и давления до 9 % относительно значений ПВГС на основе окислительного водного геля при идентичных средних значениях скоростей детонации. Водные гели, содержащие окислительные и топливные компоненты, обеспечивают детонацию ПВГС с повышением всех измеренных параметров детонации на 10-20 % относительно других водных гелей.

5. Установлено влияние размеров и внутренней структуры пороховых элементов ПП на детонационный процесс в ПВГС. Все исследованные в работе ПП с истекшими ГСХ при детонации ПВГС обеспечивают достижение массовой скорости не менее 1200 м/с вне зависимости от состава водного геля, что указывает на обособленное протекание детонации в ПП, как макрокомпоненте ПВГС. Увеличение размеров пороховых элементов способствует ускорению распространения по ним детонационного процесса.

6. Обнаружено влияние внутренних каналов пороховых элементов на течение детонационного процесса и параметры детонации. В случае полых внутренних каналов вероятно развитие ускорения детонации ПП за счет образующихся потоков продуктов детонации, опережающих детонационную волну и способных инициировать детонацию в подлежащем веществе.

7. Предложен механизм течения детонационного процесса в ПВГС, заключающийся в обособленном развитии детонационных процессов в пороховых элементах ПП и водном геле. Развитие детонации в ПП протекает с ускорением внутрь порохового элемента благодаря пористой микроструктуре и незаполненным каналам. Развитие детонации в водном геле реализуется только в случае наличия в его составе достаточного количества окислительного и топливного компонентов.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ РАБОТЫ

1. Akinin, N.I., Annikov, V.E., Mikheev, D.I., Trunin, V.V Hypotoxic powder–water gel compositions // Mining Informational and Analytical Bulletin, -2018, -Volume 2018, Issue 2, pp. 81-88;
2. Annikov V. E., Akinin N. I., Belin V. A., Mikheev D.I. et al. Gel explosives—a tool to improve the efficiency of drilling and blasting operations // Geomechanics and Geodynamics of Rock Masses: Proc. of the 2018 European Rock Mechanics Symposium. Vol. 1. Taylor&Francis Group London, - 2018. - pp. 587–593.
3. Анников В.Э., Акинин Н.И., Михеев Д.И., Ротенберг Е.В. Оценка экологической безопасности при утилизации артиллерийских боеприпасов // Взрывное дело. - 2014. - №111/68. - с. 275-282;
4. Акинин Н. И., Анников В. Э., Михеев Д. И. и др. Об особенностях детонации и взрывного воздействия на горные породы пороховых взрывчатых веществ на гелевой основе // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). - 2015. - № 12. - С. 318–324;
5. Михеев Д.И., Акинин Н.И., Анников В.Э., Бригадин И.В. Эффективность использования подлежащих утилизации пироксилиновых порохов в качестве компонентов промышленных взрывчатых составов // Химическая промышленность сегодня. - 2017. - №8. - С. 18–23;
6. Акинин Н.И., Анников В.Э., Михеев Д.И., Соболева Л.И., Бригадин И.В. Детонация водно-гелевых взрывчатых составов на основе зерненного пироксилинового пороха // Взрывное дело. - 2017. - № 118 75. - С. 19-28;

7. Артемьев А.А., Архипов М.С., Губайдуллин В.М., Бригадин И.В., Дорошенко С.И., Краснов С.А., Трофимов А.В., Михеев Д.И. Особенности разрушения массивов горных пород шпуровыми зарядами на основе геляпора // Взрывное дело. — 2019. — № 122/79. — С. 45–58;
8. Анников В.Э., Акинин Н.И., Михеев Д.И., Белин В.А., Архипов М.С., Бригадин И.В., Дорошенко С.И., Краснов С.А., Хазов А.Н., Кудрявцев А.А., Мытарев В.М. Совершенствование гелепоров и технологии их применения для повышения эффективности буровзрывных работ // Взрывное дело. — 2019. — № 124/81. — С. 84–97;
9. Акинин Н.И., Анников В.Э., Михеев Д.И. Научно-практические аспекты использования гелеобразных промышленных взрывчатых составов // XIV Международная научно-практическая конференция по взрывному делу. Сборник докладов. М. - 2014. - с. 28–30;
10. Анников В.Э., Михеев Д.И., Акинин Н.И. и др. Исследование детонации водно-гелевых взрывчатых составов типа гелепор // Успехи в специальной химии и химической технологии. Труды Всероссийской научно-технической конференции, посвященной 80-летию основания Инженерного химико-технологического факультета РХТУ им. Д.И. Менделеева, 18-20 ноября 2015 года. Москва. - 2015. - С. 238–242;
11. Соболева Л. И., Михеев Д. И., Анников В. Э., Акинин Н. И. Влияние размеров утилизируемых порохов на детонационные характеристики безопасных в обращении пороховых водно-гелевых составов // Успехи в химии и химической технологии. - 2017. - Т. 31. - С. 68–70;
12. Mikheev Denis, Annikov Vladimir, Soboleva Lubov, and Akinin Nikolay Influence of the sizes of gunpowder units reused in industrial water-gel explosives on detonation characteristics // Proc. 21st Seminar of the New Trends in Research of Energetic Materials. vol. 2. - Pardubice. Czech Republic. - 2018. - pp. 891–894.