



На правах рукописи

**Михеев Денис Иголевич**

**Особенности детонации водно-гелевых  
взрывчатых составов на основе  
утилизируемых зерненных пироксилиновых  
порохов**

05.17.07 – Химия и технология топлива и высокоэнергетических веществ

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

**Москва – 2019**

Работа выполнена на кафедре техносферной безопасности Российского химико-технологического университета имени 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**, ведущий научный сотрудник отдела №5 «Отдел проблем геомеханики и разрушения горных пород» Института проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова Российской академии наук (ИПКОН РАН)

кандидат технических наук  
**Старшинов Александр Васильевич**, технический директор группы компаний «Нитро-технологии»

Ведущая организация: Общество с ограниченной ответственностью  
«Научно-технический центр  
«Взрывобезопасность»

Защита состоится 27 августа 2019 г. в 10:00 на заседании диссертационного совета Д 212.204.08 при РХТУ им. Д. И. Менделеева (125047 г. Москва, Миусская пл., д. 9) в конференц-зале (ауд. 443).

С диссертацией можно ознакомиться в Информационно-библиотечном центре РХТУ им. Д.И. Менделеева и на официальном сайте организации по ссылке: <https://diss.muctr.ru/author/1117/>

Автореферат диссертации разослан « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2019 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
Д 212.204.08



С.В. Вержичинская

## 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, что ведет к накоплению продуктов расщепления боеприпасов.

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 рецептур подобных взрывчатых составов, допущенных надзорными органами к постоянному применению. Большинство рецептур разрабатывалось эмпирически, основываясь на теоретических предположениях физики и химии детонационного процесса, а также целесообразно эксплуатационным показателям промышленных взрывчатых веществ (ПВВ). При этом практически не учитывалась специфичность протекания детонации при использовании в качестве компонентов утилизируемых энергоемких материалов, что необходимо для расширения области применения и повышения эффективности реализации потенциала конверсионной продукции.

В группу наиболее сложных с точки зрения вовлечения во вторичный оборот энергонасыщенных компонентов входят пироксилиновые пороха (ПП), повышающие способность к взрывному превращению при определенных условиях, в частности использовании 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.

Исследование процесса детонации подобных пороховых водно-гелевых составов (ПВГС) необходимо для формирования научных основ разработки рецептур взрывчатых составов и конструкций зарядов на их основе.

## **Цель и задачи работы**

Цель настоящей работы заключалась в исследовании детонации пороховых водно-гелевых взрывчатых составов на основе утилизируемых зерненных пироксилиновых порохов.

Для достижения цели решались следующие задачи:

- 1) Экспериментальное определение граничных условий возбуждения детонации в ПВГС на основе утилизируемого зерненого пироксилинового пороха с учетом химического состава водных гелей;
- 2) Экспериментальное определение влияния химического состава водных гелей на параметры детонации ПВГС;
- 3) Экспериментальное определение влияния размеров пороховых элементов утилизируемых зерненных пироксилиновых порохов на параметры детонации ПВГС;
- 4) Анализ закономерностей течения детонационного процесса в ПВГС с учетом химической активности используемых водных гелей;
- 5) Разработка рекомендаций для создания рецептур ПВГС на основе полученных сведений о течении детонационного процесса.

## **Научная новизна**

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 впервые получены профили массовой скорости ПВГС, отличающиеся рядом особенностей в части отсутствия выраженного пика максимально достигаемого избыточного давления, неоднородности в зоне химического пика, а также проявления вторичных пиков у составов на основе крупнозерненных пироксилиновых порохов.

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.

Установлено характерное для крупных марок порохов проявление потоков продуктов взрыва, опережающих фронт детонации через каналы пороховых элементов, и, вероятно, способствующих распространению детонации.

Предложен экспериментально обоснованный механизм протекания детонационного процесса в ПВГС.

### **Практическая ценность**

Установлены параметры детонации, особенности протекания и распространения детонационного процесса, характерные для ПВГС, с учетом химического состава водных гелей и размеров пороховых элементов пироксилиновых порохов.

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

### **На защиту выносятся следующие положения**

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

Результаты экспериментального исследования влияния повышения 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, выводы и рекомендации на основе полученных экспериментальных данных.

### **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., Международный научный симпозиум «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 Инженерного химико-технологического 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 10 печатных работ, в том числе 8 работ в изданиях, индексируемых РИНЦ, 5 из которых входят в перечень рецензируемых научных журналов, рекомендованных ВАК.

### **Структура и объем диссертации**

Диссертация состоит из Введения, 3<sup>х</sup> глав, выводов, списка литературы, включающего 97 источников, и 3 приложений. Работа изложена на 145 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, демонстрирующие эффективность применения таких материалов в качестве компонентов промышленных взрывчатых составов. Описываются выявленные особенности детонации пироксилиновых порохов и их использование в качестве компонентов взрывчатых составов промышленного назначения. Рассматриваются водно-гелевые взрывчатые составы, как самостоятельный класс взрывчатых составов промышленного назначения и как перспективные наполнители ПВГС, а также

выявленные особенности взрывного воздействия подобных промышленных взрывчатых составов на объекты разрушения.

Во **второй главе** приводятся результаты оценочных расчетов детонационных характеристик ПВГС. Полученные данные позволяют проводить разработку рецептов ПВГС с предварительной оценкой итоговых параметров взрывного превращения 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 граничных условий распространения детонационного процесса и параметров детонации.

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 взрывчатых 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 <sub>4</sub> NO <sub>3</sub>	NaNO <sub>3</sub>	(NH <sub>2</sub> ) <sub>2</sub> CO	H <sub>2</sub> O	CaCl <sub>2</sub>	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%

Рецептура Составы № 1 включает окислительный и топливный компоненты, в количествах, достаточных для развития собственного детонационного процесса в водном геле. Рецептuru Составы №2 исключает топливный компонент, что уменьшает собственную детонационную способность водного геля, однако повышает энергетический потенциал ПВГС на его основе в сравнении с Составом №1. Рецептuru водного геля Составы №3 предусматривает инертные относительно детонационного процесса компоненты в соотношении, позволяющем достигать плотности, идентичной двум другим водным гелям.

Раздел 3.4 посвящен описанию полученных результатов и их обсуждению.

Экспериментальное исследование влияние 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 (коэффициент заполнения пустот между пороховыми элементами 1,0). Сравнительные результаты представлены в таблице 2. Расчет теплоты взрывного превращения ПВГС произведен с помощью программ SD и REAL.

Таблица 2

Сравнительные значения критического диаметра детонации ПВГС

Водный гель	$\rho$ водного геля, г/см <sup>3</sup>	$S_{пп}$ , масс. %	КБ, %	$\rho$ ПВГС, г/см <sup>3</sup>	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 большую детонационную способность, связанную с режимом энерговыведения 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 зерненных ПП в сухом ненаполненном состоянии указывает на выраженную роль наличия наполнителя на детонационную способность ПП, проявляющуюся в том числе у зерненных 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), в то время как 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 демонстрируют самую 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 ПП марки 14/7 в ходе детонационного процесса образуются мощные струи продуктов взрыва, опережающие основной ударный фронт, и, вероятно, обладающие достаточной энерги-



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



**Рисунок 2. Фотография пластины-свидетеля после взрыва ПВГС**

ей 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 пороховых элементов**



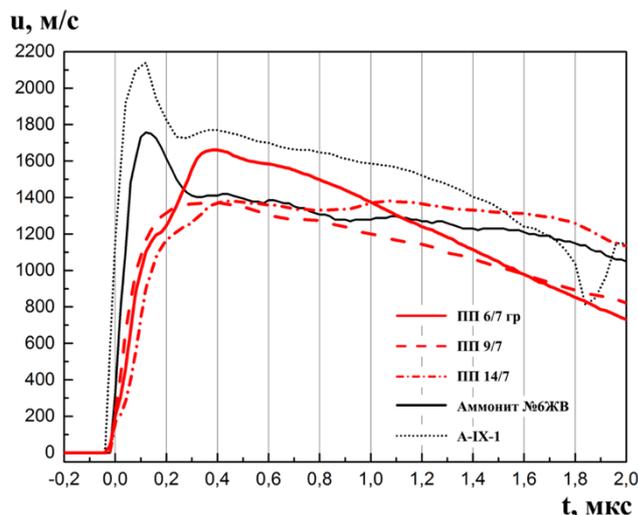
**Рисунок 4. Фотография пластины-свидетеля после взрыва ПВГС с заполненными каналами пороховых элементов**

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.

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 мас-



**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**

совой скорости и давления в ударном фронте. Подобные «завалы» фронта вероятнее всего связаны с присутствием в составе водного геля, оказывающего некоторое флегматизирующее действие, что в целом является характерным для водно-гелевых взрывчатых составов. Различный наклон указывает на неравномерность фронта детонационной волны ПВГС, наиболее вероятной причиной которого является выраженная гетерогенность составов. 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 пороховым 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, полученными в ходе 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.

Таблица 3

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

С <sub>ПП</sub> , масс. %	$\rho$ , г/см <sup>3</sup>	d <sub>з</sub> , мм	D, км/с	u <sub>max</sub> , м/с	P <sub>max</sub> , ГПа
50	1,40	20,5	5,84	1378	11,26
40	1,39	20,5	4,98	1149	7,96

При этом на профилях в целом сохраняется наличие максимумов массовой скорости и слабая выраженность «химпиков».

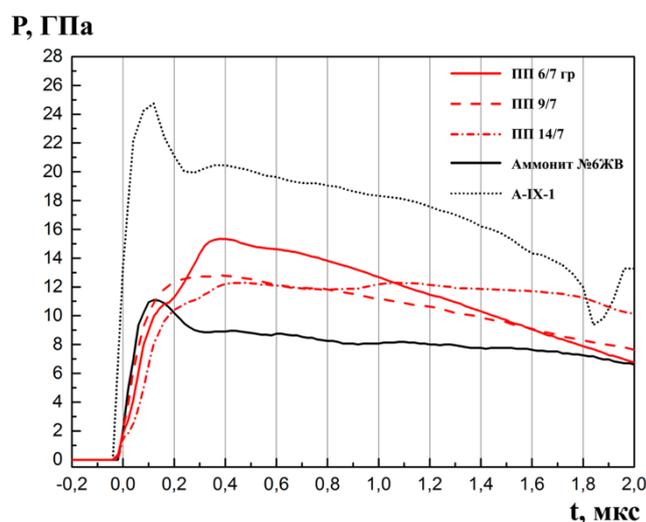
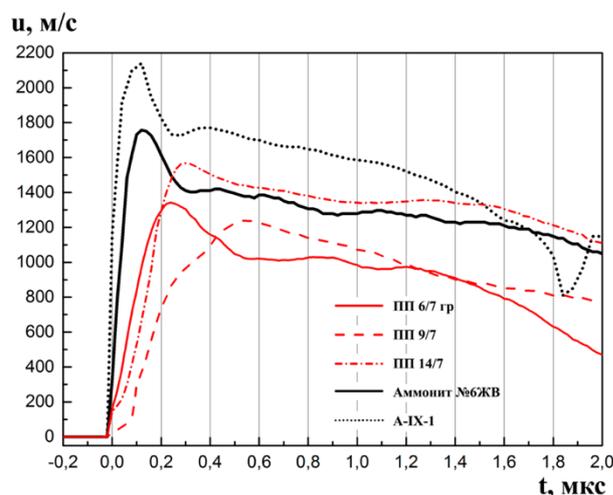


Рисунок 6. Профили P(t) для ПВГС на основе ПП марок 6/7 гр, 9/7, 14/7 и водного геля Составы №1 в сравнении с А-IX-1 и Аммонитом №6ЖВ

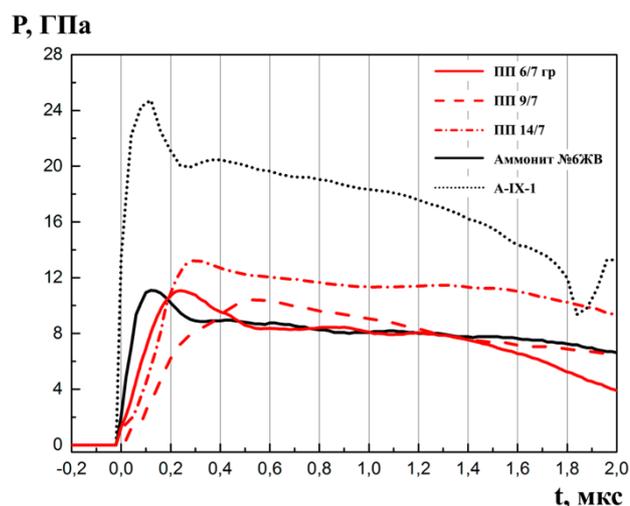
чаемое уменьшенным выходом мелких некондиционных фракций. В тоже время развиваемые значения давления и их продолжительность в сравнении с типовыми ПВВ на примере Аммонита №6ЖВ обеспечивают достаточное разрушающее воздействие на объекты, что наблюдается при промышленных испытаниях.

На рисунке 7 приводится сравнение типовых профилей u(t) ПВГС на основе водного геля Составы №2 и различных марок ПП с взрывчатыми составами военного (А-IX-1) и промышленного назначения (Аммонит №6ЖВ).

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 несколько 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.



**Рисунок 7. Профили  $u(t)$  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**



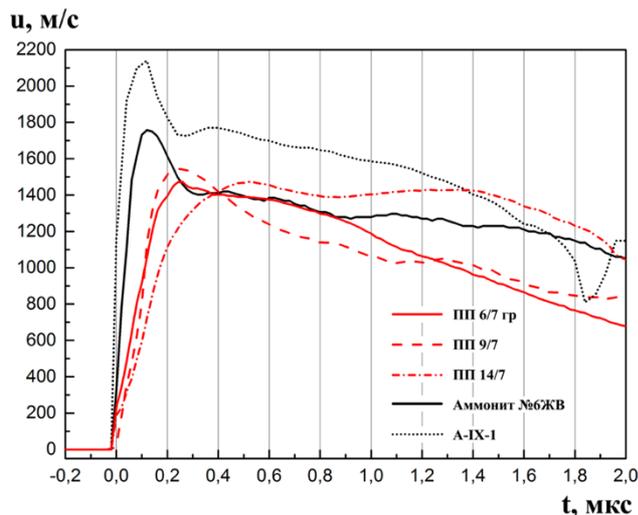
**Рисунок 8. Профили  $P(t)$  для ПВГС на основе ПП марок 6/7 гр, 9/7, 14/7 и водного геля Составы №2 в сравнении с А-IX-1 и Аммонитом №6ЖВ**

Полученные значения массовой скорости в целом меньше значений для ПВГС на основе Составы №1, что с учетом более высоких расчетных значений теплоты взрыва ПВГС на основе Составы №2 указывает на раздельное течение детонационного процесса в порохе и водном геле на начальном этапе детонации.

На рисунке 8 представлены сравнительные профили изменения давления в детонационной волне, рассчитанные на основе полученных скоростей детонации, массовой скорости и плотности состава, позволяющие оценить эффективность ПВГС.

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.

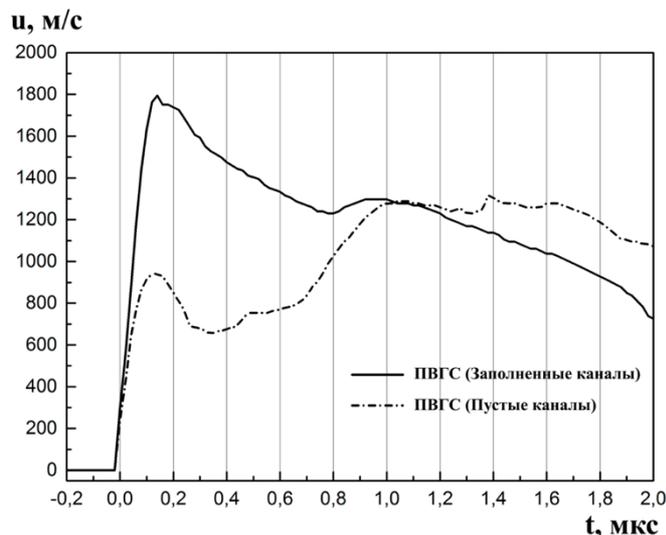
На рисунке 9 приводится сравнение типовых профилей  $u(t)$  на основе водного геля Составы №3 и различными марками ПП с профилями взрывчатых составов военного (А-IX-1) и промышленного назначения (Аммонит №6ЖВ). У ПВГС наблюдается выраженное замедление роста массовой скорости в ударном фронте, характерное для всех исследуемых составов, и, вероятнее всего, связаны с некоторым флегматизирующим



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

лесообразным, в виду широкой доступности более дешевых, хотя и несколько менее эффективных наполнителей, в частности обычной воды.

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 10.



**Рисунок 10. Профили  $u(t)$  для ПВГС на основе ПП марки 14/7 и водного геля Состава №1 с различным заполнением каналов пороховых элементов**

детонационной волной. Для ПП меньших размеров подобные проявления и их вклад в детонацию могут быть менее значительными, поскольку непосредственно связаны с размерами пороховых элементов.

действием водной составляющей. Примечательным фактом являются высокие значения массовой скорости, превышающие идентичные для ПВГС на основе Состава №2, что вероятно связано с увеличенным содержанием воды, обеспечивающей эффективное распространение детонации по заряду. Использование

инертных водных гелей в качестве наполнителей ПВГС не является це-

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

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

Экспериментальные данные свидетельствуют о росте скорости детонации исследуемых составов с увеличением размеров пороховых элементов, несмотря на снижение удельного количества ПП в составе, что указывает на повышение собственной детонационной способности отдельного элемента с ростом его размеров. Снижение скорости детонации в случае с ПВГС на основе водного геля Составы №1, по-видимому, связано с особенностями структуры заряда, поскольку в случае экспериментов с заполнением каналов, предусматривавших специальное расположение пороховых элементов в заряде, зафиксированные скорости детонации выше установленных при их хаотичном расположении.

Для всех марок ПП наблюдается высокая сходимость профилей независимо от химического состава используемого водного геля, что подтверждает инициирование и начальное развитие детонационного процесса преимущественно в пороховых элементах. Практически все ПВГС вне зависимости от используемых ПП и водных гелей достигают значений массовой скорости порядка 1200 м/с в течение 0,1-0,3 мкс, после чего развитие процесса несколько изменяется в зависимости от химического состава водного геля, подтверждая ведущую роль ПП в детонационном процессе и участие водного геля в момент прохождения детонационной волны.

Для ПП марки 14/7 практически во всех случаях наблюдается появление вторичного пика. В составах с порохами других марок подобные явления имеют частный характер, либо не выражены или отсутствуют. С ростом размера пороховых элементов частота появления вторичного пика увеличивается, что связано с особенностями внутренней структуры элемента, благоприятствующей развитию детонации.

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 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.

С практической точки зрения раздельное течение детонационного процесса необходимо учитывать при разработке взрывчатых составов, включая в состав водных гелей умеренные количества топливного компонента, поддерживающего развитие детонации в составе. Рекомендуется не повышать кислородный баланс водного геля выше +10 %.

Количество используемого в рецептуре состава водного геля и его химический состав могут выступать инструментом регулирования параметров детонации, позволяя изготавливать состав под конкретные виды взрывных работ и для определенных объектов разрушения, с учетом достигаемых параметров скорости и максимального давления детонации.

Принимая во внимание ведущую роль ПП в детонационном процессе ПВГС и возможность отказов детонации по причине их некондиционных состояний существует

необходимость разработки критериев пригодности утилизируемых ПП к использованию в ПВГС, включая методы их оценки.

## ВЫВОДЫ

1. Определены критические диаметры детонации ПВГС на основе зеренных ПП с истекшими ГСХ марки 6/7 гр с учетом химической активности водных гелей. Показано уменьшение критического диаметра детонации при использовании водных гелей, содержащих окислительный и топливный компоненты, до 7,8-10,1 мм в сравнении с ПВГС на основе окислительного или инертного водного геля с критическими диаметрами 10,1-12,5 мм и 13,3-20,5 мм соответственно, что указывает на усиление детонационной способности при использовании энергоемких водных гелей.

2. Получены зависимости снижения детонационной способности ПВГС на основе зеренных ПП с истекшими ГСХ марки 6/7 гр от содержания водного геля и с учетом его химической активности. ПВГС на основе химически инертного водного геля утрачивают детонационную способность при коэффициенте разбавления 1,14, ПВГС на основе водного геля с окислителем - до значений коэффициента разбавления 1,35, ПВГС на основе водного геля, содержащего окислитель и топливный компонент устойчиво детонируют при коэффициенте разбавления 1,65, указывая на значительную роль химической активности водного геля в поддержании детонационного процесса.

3. Выявлено выраженное влияние химического состава водного геля на параметры детонации ПВГС. Инертные водные гели обеспечивают детонацию ПВГС со средними значениями скорости детонации 5,95 км/с, массовой скорости 1523 м/с и давления 12,81 ГПа. Водные гели, включающие окислительные компоненты, обеспечивают детонацию ПВГС со средними значениями скорости детонации 5,92 км/с, массовой скорости 1402 м/с и давления 11,70 ГПа, демонстрируя некоторое снижение показателей относительно инертного водного геля. Водные гели, содержащие окислительные и топливные компоненты, обеспечивают детонацию ПВГС со средними значениями скорости детонации 6,40 км/с, массовой скорости 1560 м/с и давления 14,15 ГПа, повышая параметры детонации на 10-20%.

4. Установлено влияние размеров и состояния 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. Увеличением размеров пороховых элементов повышает частоту проявления вторичных пиков в детонационной волне.

5. 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.

6. 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 достаточного количества окислительного и топливного компонентов, в противном случае значительных отличий от химически инертного водного геля не наблюдается.

7. Разработаны рекомендации для научно обоснованного проектирования пороховых водно-гелевых составов с учетом особенностей механизма распространения и течения детонационного процесса. Рекомендации направлены и приняты к внедрению буровзрывной компанией ООО «Промстройвзрыв» (г. Санкт-Петербург) и заводом по утилизации боеприпасов ООО «Гефест-М» (г. Реж, Свердловская область).

### **ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ РАБОТЫ**

1. Анников В.Э., Акинин Н.И., Михеев Д.И., Ротенберг Е.В. Оценка экологической безопасности при утилизации артиллерийских боеприпасов // Взрывное дело. Выпуск №111/68. М.: ЗАО «МВК по взрывному делу». 2014. с. 275-282;
2. 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;
3. 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;
4. 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;
5. Акинин Н. И., Анников В. Э., Михеев Д. И., Трунин В. В. Разработка пороховых водно-гелевых составов пониженной экотоксичности // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2018. № 2. С. 81–88;
6. 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;
7. Анников В.Э., Михеев Д.И., Акинин Н.И. и др. Исследование детонации водно-гелевых взрывчатых составов типа гельпор // 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;
8. 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;
9. Mikheev Denis, Annikov Vladimir, Soboleva Lubov, 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;
10. 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 // Proc. of the 2018 European Rock Mechanics Symposium. Vol. 1. Taylor&Francis Group London, 2018. pp. 587–593.

Заказ №

Объем 1,0 п.л.

Тираж 100 экз.

Издательский центр РХТУ им. Д.И. Менделеева