

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
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
пироксилиновых порохов для обеспечения
необходимых параметров детонации**

Специальность - 05.17.07 Химическая технология топлива и
высокоэнергетических веществ

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:
Доктор технических наук, профессор
Акинин Николай Иванович

Москва – 2020

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	4
Глава 1. Литературный обзор.....	10
1.1. Утилизация энергоемких компонентов боеприпасов.....	10
1.1.1. Общие принципы утилизации боеприпасов с истекшими сроками хранения.....	10
1.1.2. Использование энергоемких компонентов боеприпасов в промышленных взрывчатых составах.....	14
1.2. Промышленные взрывчатые составы на основе пироксилиновых порохов.....	21
1.2.1. Пироксилиновые пороха, их строение и свойства.....	21
1.2.2. Применение пироксилиновых порохов в качестве компонентов промышленных взрывчатых составов.....	30
1.3. Водно-гелевые промышленные взрывчатые составы.....	36
1.3.1. Состав, свойства и характеристики водно-гелевых взрывчатых составов.....	37
1.3.2. Водно-гелевые взрывчатые составы, сенсibiliзируемые энергоемкими компонентами утилизируемых боеприпасов.....	43
1.4. Заключение по обзору и постановка задачи исследования.....	47
Глава 2. Оценочный расчет параметров детонации пороховых водно-гелевых составов.....	49
2.1. Методика проведения расчетов.....	49
2.2. Расчет параметров детонации взрывчатых составов на основе пироксилиновых порохов.....	51
2.3. Заключение по результатам оценочных расчетов.....	55
Глава 3. Экспериментальное исследование детонационных характеристик пороховых водно-гелевых составов на основе энергоемких компонентов утилизируемых боеприпасов.....	57
3.1. Объекты исследования.....	57
3.2. Методики изготовления пороховых водно-гелевых составов.....	58
3.2.1. Методика изготовления водных гелей.....	58
3.2.2. Методика изготовления взрывчатых составов.....	60
3.3. Методы и методики проведения исследований.....	61
3.3.1. Исследование критических условий детонации.....	61
3.3.2. Исследование слеодообразования взрыва.....	64
3.3.3. Исследование параметров детонационных и ударных волн электромагнитным методом.....	66
3.3.3.1. Методические основы.....	66

3.3.3.2 Методика проведения исследований.....	69
3.4. Результаты и обсуждения.....	77
3.4.1. Влияние состава водного геля на критические условия детонации пороховых водно-гелевых составов.....	77
3.4.1.1. Влияние состава водного геля на критический диаметр детонации пороховых водно-гелевых составов.....	77
3.4.1.2. Влияние содержания водного геля на детонационную способность пороховых водно-гелевых взрывчатых составов.....	82
3.4.1.3. Исследование слеодообразования пороховых водно-гелевых взрывчатых составов.....	87
3.4.2. Влияние состава водного геля на параметры детонации пороховых водно-гелевых составов.....	89
3.4.2.1. Влияние водного геля, содержащего окислитель и горючее на параметры детонации пороховых водно-гелевых составов.....	90
3.4.2.2. Влияние водного геля, содержащего окислитель на параметры детонации пороховых водно-гелевых составов.....	102
3.4.2.3. Влияние химически инертного водного геля на параметры детонации пороховых водно-гелевых составов.....	108
3.4.3. Влияние размеров пороховых элементов на параметры детонации пороховых водно-гелевых составов.....	114
3.4.4. Заключение по результатам экспериментального исследования.....	117
3.4.5. Научные аспекты разработки рецептур пороховых водно- гелевых составов.....	118
Заключение.....	122
Список литературы.....	125
Приложения.....	137

Введение

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 [1, 2]. Переход к промышленной утилизации безусловно снизил опасность обращения энергоемких компонентов, однако экологическая и экономическая составляющие практически не претерпели изменений, поскольку утилизация предусматривала преимущественно уничтожение сжиганием 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 [3-6].

Одним из наиболее перспективных наполнителей, позволяющих не только снизить опасность в обращении, но и повысить эффективность взрывного воздействия являются энергоемкие водные гели [7].

Однако, при разработке рецептур 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 работы: совершенствование 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 пороховых водно-гелевых составах на основе утилизируемого зерненого пироксилинового пороха на граничные условия возбуждения детонации;

2) Экспериментальное определение влияния химического состава водных гелей и их содержания в пороховых водно-гелевых составах на параметры детонации;

3) Экспериментальное определение влияния размеров пороховых элементов утилизируемых зерненных пироксилиновых порохов на параметры детонации пороховых водно-гелевых составов;

4) Анализ влияния химической активности используемых водных гелей на закономерности течения детонационного процесса в пороховых водно-гелевых составах;

5) Формирование научно-обоснованного подхода и разработка рекомендаций для создания и совершенствования рецептур пороховых водно-гелевых составов 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 пороховых водно-гелевых составов на основе утилизируемых пироксилиновых порохов для обеспечения необходимых параметров детонации.

Впервые определены скорости детонации, массовые скорости и давления детонации пороховых водно-гелевых составов 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 пороховых водно-гелевых составов. 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 пороховых водно-гелевых составов. 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 пороховых водно-гелевых составов.

Предложен экспериментально обоснованный механизм протекания детонационного процесса в пороховых водно-гелевых составах. 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 пороховых водно-гелевых составов на основе утилизируемых зерненных пироксилиновых порохов с учетом размеров пороховых элементов для водных гелей на основе нитратов.

По результатам исследований подготовлены практические рекомендации по разработке рецептур пороховых водно-гелевых составов, направленные промышленным 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:

Результаты экспериментального исследования влияния химического состава водного геля на критический диаметр детонации пороховых водно-гелевых составов;

Результаты экспериментального исследования влияния содержания водных гелей в пороховых водно-гелевых составах на их детонационную способность;

Результаты экспериментального исследования влияния химического состава водных гелей на параметры детонации пороховых водно-гелевых составов;

Результаты экспериментального исследования влияния размеров пороховых элементов на параметры детонации пороховых водно-гелевых составов;

Результаты анализа процессов, происходящих в детонационной волне, определяющих течение детонации в пороховых водно-гелевых составах;

Рекомендации по разработке рецептур пороховых водно-гелевых составов на основе утилизируемых пироксилиновых порохов для обеспечения необходимых параметров детонации.

Степень достоверности полученных результатов подтверждается большим объемом проведенных исследований с применением современных измерительных приборов, а также высокой сходимостью результатов, полученных использованными в работе методами исследования, для типовых взрывчатых составов с литературными данными.

Апробация работы. Основные результаты работы доложены 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 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 планировании эксперимента, проведении экспериментальных исследований и обработке полученных результатов. Обсуждение результатов и написание научных публикаций проведено автором при участии научного руководителя.

Благодарности

Автор выражает благодарность сотрудникам РХТУ им Д.И. Менделеева В.Э. Анникову и В.В. Трунину, а также научному консультанту ООО «Промстройвзрыв» (г. Санкт-Петербург) И.В. Бригадину за помощь в организации экспериментальной деятельности.

1. Литературный обзор

1.1. Утилизация энергоемких компонентов боеприпасов

С момента возникновения в современной России задачи утилизации боеприпасов, ее решение эволюционировало с простейшего подхода в виде непосредственного уничтожения сжиганием или подрывом, что помимо очевидных опасностей для населения и окружающей среды, имело отрицательный экономический эффект, до комплексной промышленной утилизации с максимально возможной реализацией возвратного потенциала, в том числе от наиболее сложных в этом отношении компонентов боеприпасов – взрывчатых веществ (ВВ) и составов. Ввиду достаточно большой реакционной способности и относительно невысокой стабильности по истечении гарантийных сроков, считается не рациональным их повторное использование в боеприпасах, и основным путем промышленной утилизации является их переработка в промышленные взрывчатые составы [8-14].

1.1.1. Общие принципы утилизации боеприпасов с истекшими сроками хранения

Применявшиеся в 90-х годах Министерством обороны методы утилизации устаревших и списанных боеприпасов заключались, преимущественно, в уничтожении боеприпасов методами затопления, захоронения, сжигания или подрыва. Применение подобных методов в первую очередь несло негативные последствия для окружающей среды, отравляя токсичными веществами водные ресурсы, почву и воздух, что единодушно признавалось неприемлемым и требовало поиска альтернативных методов утилизации.

В июне 1995 года состоялась первая Российская научно-техническая конференция по комплексной утилизации обычных видов боеприпасов,

организованная государственными военными и научными структурами с привлечением представителей частного коммерческого сектора с целью разработки и организации фактически новой отрасли промышленности. В рамках работы конференции участниками был принят ряд принципов, заложивших концепцию утилизации боеприпасов в России, в качестве основного направления которой является выполнение задач переработки боеприпасов, списанных из-за окончания сроков хранения или при снятии с вооружения устаревших систем, а также систем, подлежащих ликвидации в соответствии с международными договорами и соглашениями по разоружению, в изделия гражданского назначения.

Принцип комплексности переработки боеприпасов и их компонентов заключается в обязательной переработке всех элементов изделий (боевых частей, метательных зарядов и двигателей, средств инициирования, систем управления, тары и других компонентов). При этом продукты демонтажа изделий и их компонентов должны быть максимально адаптированы к технологическим процессам последующей переработки вторичного сырья (взрывчатых веществ, порохов, топлив и других материалов, подходящих и допущенных для применения в композициях и рецептурах гражданского назначения).

Принцип безопасности ведения процессов утилизации, которые в большинстве случаев более опасны, чем процессы снаряжения и сборки, как по ряду объективных причин (разнообразие конструкций, различия в условиях хранения и эксплуатации конкретных изделий, трудности разборки и извлечения взрывчатых веществ), так и в силу субъективных причин, вызванных меньшей изученностью процессов расснаряжения, малым производственным опытом отечественной промышленности, организационными вопросами поставки боеприпасов на утилизацию. Поэтому для обеспечения должной безопасности утилизации должны подготавливаться как специальные технологии и оборудование, так и соответствующие специалисты. Современный подход к производству военных изделий включает планирование конструкторами методов промышленной утилизации, в том числе и боеприпасов. К сожалению, методы

промышленной утилизации для большинства боеприпасов, подлежащих утилизации в ближайшее время, не проработаны на достаточном уровне, что в некоторой степени оправдывает продолжение утилизации традиционными методами, в частности уничтожение сжиганием или подрывом, однако их применение должно быть научно обосновано и, по возможности, минимизировано.

Принцип экологической безопасности процессов утилизации включает соответствие установленным нормам защиты атмосферного воздуха, водных ресурсов и почвы. Прямое сжигание взрывчатых веществ и составов на открытом воздухе или при подрывах на открытых площадях сопровождается выделением большого количества токсичных соединений.—При этом помимо непосредственного загрязнения атмосферного воздуха продуктами взрыва, в местах проведения подобных работ в больших объемах в почве накапливаются частично или полностью не прореагировавшие остатки взрывчатых веществ, в свою очередь переносимые грунтовыми водами в водные бассейны. Рекультивация подобных объектов требует длительных и дорогостоящих работ, в связи с чем технологии утилизации должны предусматривать предотвращение урона окружающей среде.

Принцип максимизации экономической выгоды указывает на стремление проведения процессов утилизации с учетом возможности получения экономической выгоды, за исключением переработки отдельных классов и видов боеприпасов. Утилизацию боеприпасов практически невозможно сделать прибыльной, однако существуют методы утилизации, применение которых может значительно компенсировать экономические издержки. В случае утилизации боеприпасов положительный экономический эффект достигается сохранением ценных компонентов боеприпасов в приемлемом для дальнейшей переработки виде. В первую очередь это касается именно энергонасыщенных веществ [15-17].

Технология и оборудование, обеспечивающие расснаряжение боеприпасов с извлечением энергонасыщенных компонентов, должны быть организованы с

учетом их дальнейших направлений переработки и применения как в военных, так и в гражданских целях.

Разработку продукции гражданского назначения на основе извлекаемых взрывчатых веществ, составов, порохов и топлив утилизируемых боеприпасов необходимо осуществлять с учетом ряда целесообразных требований.

В первую очередь необходимо учитывать потенциальные направления применения. Наиболее вероятным потребителем подобной продукции являются предприятия, осуществляющие добычу полезных ископаемых, взрывное разрушение зданий и конструкций, геологоразведку и другие работы, связанные с использованием полезной работы взрыва.

Важным фактором переработки извлекаемых энергонасыщенных материалов в промышленные взрывчатые составы является их конкурентоспособность в сравнении с существующими промышленными взрывчатыми составами массового применения по эффективности, технологической и экологической безопасности. При этом важно понимать, что получаемые из утилизируемых энергонасыщенных материалов промышленные взрывчатые составы, даже после переработки обладая сравнительно высокой мощностью, являются не заменой традиционным промышленным взрывчатым составам, а дополнительным инструментом для повышения эффективности взрывных работ [18].

Разработка и проектирование отдельных производств для изготовления продукции из взрывчатых материалов утилизируемых боеприпасов не целесообразна, и лишь повысит стоимость конечной продукции. При разработке рецептур и технологии изготовления необходимо максимально адаптировать технологические процессы к существующим производствам штатных промышленных взрывчатых составов и снаряжения зарядов на их основе. В ряде случаев изготовление промышленных взрывчатых составов может осуществляться не только на специализированных предприятиях утилизации, но и может быть организовано непосредственно на арсеналах и даже складах хранения боеприпасов.

Безусловно, любые вновь разрабатываемые промышленные взрывчатые составы должны проходить предварительную процедуру испытаний в соответствии с требованиями надзорных органов РФ [7, 19].

1.1.2. Использование энергоемких компонентов боеприпасов в промышленных взрывчатых составах

Извлекаемые из боеприпасов энергоемкие компоненты зачастую представляют собой специальные составы на основе определенного взрывчатого вещества. На основании вышеперечисленных подходов и принципов весь перечень извлекаемых из боеприпасов взрывчатых материалов, используемых в промышленных взрывчатых составах, принято разделять именно по основному компоненту. Данный подход обусловлен физико-химическими особенностями индивидуальных взрывчатых веществ, которые необходимо учитывать при последующей переработке.

Весь спектр энергоемких компонентов можно разделить на две укрупненные группы по основной форме взрывчатого превращения:

– бризантные взрывчатые вещества и составы, применяемые преимущественно в боевых частях (снарядах) и изначально предназначенные для реализации энергетического потенциала в режиме детонации;

- метательные взрывчатые составы и ракетные топлива, применяемые преимущественно с целью доставки боевых частей боеприпасов до цели, предназначенные для реализации энергетического потенциала в форме горения.

В группе бризантных веществ и составов выделяют подгруппы по определяющему взрывчатые характеристики компоненту [19, 20].

К первой подгруппе относят Тротил и тротилсодержащие взрывчатые составы, такие как Тротил-алюминий и Тротил-динитронафталин. Техническими условиями на тротил для промышленных взрывчатых веществ (ГОСТ 4117-78) предусматривается использование тротила, полученного при расснаряжении

боеприпасов (марки В и ВП). Такой тротил имеет несколько повышенные значения массовой доли влаги и летучих веществ (не более 0,2 масс. %), допускается наличие в составе совместимых с тринитротолуолом примесей лаков, эмалей, грунтовок (не более 0,7 масс. %) и парафина (для марки ВП) (не более 0,5 масс. %), а в остальном не отличающийся от вновь изготовленного [21]. В случае превышения установленных ГОСТом нормативных значений влаги и примесей, извлекаемый из боеприпасов тротил относят к марке У, часто даже выделяемый как отдельное взрывчатое вещество Тротил-У, выпускаемый под марками УД (дробленный с размером кусков до 45-50 мм) и УГ (гранулированный, с размером гранул 3-5 мм). Тротил-У имеет расширенный допуск примесей и отличающиеся от «ГОСТового» тротила взрывчатые характеристики. Сравнительные характеристики различных марок тротила представлены в Таблице 1.1.

Таблица 1.1 - Сравнительные характеристики тротила различных марок[19-23]

Характеристика	Тротил марки А	Тротил марки УД
Плотность, кг/м ³	1,45	1,45
Теплота взрыва, кДж/кг	4103-4605	3640-4058
Температура вспышки, °С	293	295-305
Чувствительность к удару (ГОСТ 4545) в приборе №1, %	0-20%	48%
Чувствительность к трению (ГОСТ Р 50835), МПа	>686	>686,5
Критический диаметр детонации (бумажная оболочка), мм	8-10	30
Скорость детонации, км/с	6,50	4,0-5,5
Кислородный баланс, %	-74	-74
Объем токсичных продуктов, м ³ /кг	0,331	0,345

Помимо непосредственного использования Тротила марок У как взрывчатого вещества промышленного назначения на его основе изготавливаются смесевые взрывчатые составы:

- Граммониты марок 30/70 и 40/60, представляющие собой механическую смесь Тротила-УГ с 30-40 масс. % аммиачной селитры, применяемые для поверхностных взрывных работ;

- Нитротолы – смеси тротила марки УД с зерненными или дроблеными пироксилиновыми и баллиститными порохами и флегматизирующей гидрофобной добавкой;

- Шашки детонаторы Т-400Г (смесь тротилов марки У и А), ПТУ-800Л, ПТУ-1000Л (залитый расплавом тротила марки УД зерненный пироксилиновый порох);

- Алюмотол, взрывчатый состав на основе утилизируемого взрывчатого состава ТА, перерабатываемый в виде сферических и полусферических гранул [19, 20].

Во вторую подгруппу входят литьевые взрывчатые составы, включающие гексоген, такие как ТГ, ТГА-16, ТГАФ-5М и МС различных модификаций. Первичные операции сводятся к выплавке или вымыванию составов из корпусов боеприпасов, с последующим смешением с тротилом и другими компонентами. На основе литьевых взрывчатых составов изготавливаются преимущественно альгетолы различных марок (15, 25 и 35 в зависимости от масс. процентного содержания гексогена), которые отличаются высокой мощностью (теплота взрыва порядка 4900 кДж/кг) и водостойкостью, находя свое применение в буровзрывных работах с крепкими горными породами. Выпускаются альгетолы преимущественно в гранулированном виде с размерами гранул до 8 мм. На основе гексогенсодержащих литьевых составов выпускаются различные взрывные источники сейсмических колебаний (ИС-500ТГА, ИС-1000ТГА, ЗГСЛ-70-1000), применяемые в геологоразведке [19, 20].

К третьей подгруппе относят сухие или увлажненные гексогенсодержащие составы – А-IX-1 и А-IX-2 и их модификации. Они также могут использоваться

для производства альгетолов или в виде увлажненной крошки в вододисперсионных составах типа «Эмульсен-ГА».

Сравнительные характеристики промышленных взрывчатых составов на основе извлекаемых из боеприпасов энергонасыщенных компонентов с типовым промышленным взрывчатым составом Аммонит №6ЖВ представлены в таблице 1.2. Большинство разработанных взрывчатых составов обладают несколько повышенными энергетическими и детонационными характеристиками относительно типового взрывчатого состава, что определяет их использование в качестве промышленных взрывчатых составов повышенной мощности. Достижимые в ходе переработки параметры безопасности в обращении являются допустимыми для их применения в гражданских целях. Сравнительно низкие показатели экологической безопасности требуют дополнительных разработок и исследований в области управления составом продуктов взрыва.

В группе метательных взрывчатых составов и ракетных топлив, предназначенных для реализации энергетического потенциала в форме горения, прямого внутреннего разделения на подгруппы не представлено, в результате чего не учитываются структурные особенности ряда энергонасыщенных материалов, которые непосредственно влияют на их взрывчатые свойства. Логичным было бы выделение в разные группы пироксилиновых (одноосновных) порохов, баллиститных (двухосновных) порохов и ракетных топлив.

Пороха и дробленые ракетные топлива используются как энергонасыщенные добавки, способные при достаточном инициирующем импульсе поддерживать взрывной процесс в форме детонации [24]. Дополнительными компонентами обычно являются окислители, зачастую в виде нитратов и их растворов, и различные флегматизирующие добавки, повышающие безопасность составов в обращении.

Пороха и измельченные ракетные топлива могут служить компонентами вододисперсионных взрывчатых составов (Эмульсен-П, Эмульсен-ГАП), водно-гелевых взрывчатых составов (Гельпоры марок ГП, ГПС), смесей с тротилом (Поротол), нефтепродуктами (Зерниты, Дибазит, Гранипоры), часто с

добавлением окислителей в виде нитратов [19, 20, 25]. Сравнительные характеристики промышленных взрывчатых составов на основе извлекаемых из боеприпасов порохов и ракетных топлив с типовым промышленным взрывчатым составом Аммонит №6ЖВ представлены в таблице 1.3. Примечательным фактом является то, что преимущественно пониженные по отношению к аммониту теплоты взрыва практически не снижают скорость детонации. Невысокая восприимчивость к удару, за исключением композиций с бризантными взрывчатыми веществами, является положительным фактором, повышающим эксплуатационную безопасность, однако низкие температуры вспышки и чувствительность к трению требуют принятия дополнительных мер предосторожности. Обеспечение экологической безопасности также требует модифицирования рецептур составов с целью создания условий для более полного окисления углерода и восстановления азота.

В целом можно обратить внимание на отсутствие в литературе и технических документах сведений о критических диаметрах детонации, что объясняется отсутствием необходимости данных сведений для практического применения промышленных взрывчатых составов, а также сведений об экологическом ущербе окружающей среде, в виду того, что данный вопрос довольно сложен с точки зрения корректной оценки, поскольку требует учитывать условия и обстоятельства применения взрывчатых составов, значительно влияющих на результаты, получаемые расчетным методом.

Таблица 1.2 - Сравнительные характеристики промышленных взрывчатых составов на основе утилизируемых бризантных взрывчатых составов [19,20,26-32]

Характеристика	Тротил марки УД	Граммонит 30/70	Нитротол	Алюмотол	Альгетол	Эмульсен-ГА	Аммонит №6ЖВ
Насыпная плотность, кг/м ³	0,75-0,80	0,80-0,90	0,90-1,30	0,95-1,00	0,90-1,00	1,45	1,00-1,20
Теплота взрыва, кДж/кг	3640-4058	3768	3828	5183	4735-4986	4297	4312
Температура вспышки, °С	295-305	315-320	200-210	296-300	210	230-240	330-336
Чувствительность к удару (ГОСТ 4545) в приборе №1, %	48	12-24	60	32	8-16	0-8	16-32
Чувствительность к трению (ГОСТ Р 50835), МПа	>686	216-284	>200	>500	294	>350	230
Критический диаметр детонации (бумажная оболочка), мм	30	40-60	80-100	70-80	-	40-60	10-13
Скорость детонации, км/с	4,0-5,5	3,8-4,5	5,9-6,1	4,3-4,8	4,6-5,0	5,4-6,0	3,6-4,8
Кислородный баланс, %	-74,0	-45,9	-54...-65	-76,3	-75,9...-80,8	-10,0...-16,0	-0,5
Объем токсичных продуктов, м ³ /кг	0,345	0,085	0,330	-	-	0,120	0,022

Таблица 1.3 - Сравнительные характеристики промышленных взрывчатых составов на основе утилизируемых метательных взрывчатых составов [19,20,30,32,33]

Характеристика	Эмульсен-П	Эмульсен-ГАП	Гельпор ГП-1	Поротол	Дибазит	Гранипор БП-1	Аммонит №6ЖВ
Насыпная плотность, кг/м ³	1,50	1,45-1,48	1,42	1,50	0,75-0,85	0,80-0,85	1,00-1,20
Теплота взрыва, кДж/кг	3200	4188-4297	3860	3875	3347-3766	3347-3766	4312
Температура вспышки, °С	190	230-240	170-185	170-180	170	170-180	330-336
Чувствительность к удару (ГОСТ 4545) в приборе №1, %	0	60	0	52	8-16	8-24	16-32
Чувствительность к трению (ГОСТ Р 50835), МПа	>300	>216	220-250	109	294	200-250	230
Критический диаметр детонации (бумажная оболочка), мм	-	50-70	8-10	-	100-120	50-170	10-13
Скорость детонации, км/с	5,2-5,6	5,4-6,2	6,2-6,8	6,5	5,8-6,0	5,3-5,5	3,6-4,8
Кислородный баланс, %	-15,6	-10,0...-16,0	-18,2	-59,4	-30...-45	-59,4	-0,5
Объем токсичных продуктов, м ³ /кг	-	-	0,125	-	0,250-0,350	0,290	0,022

1.2. Промышленные взрывчатые составы на основе пироксилиновых порохов

Одной из крупнейших групп утилизируемых взрывчатых материалов извлекаемых из боеприпасов являются пироксилиновые пороха, обладающие рядом специфических свойств, позволяющих эффективно использовать их в качестве основного компонента взрывчатых составов различного назначения, что не характерно для других групп метательных взрывчатых составов – баллистических порохов и ракетных топлив.

1.2.1. Пироксилиновые пороха, их строение и свойства

Пироксилиновые пороха представляют собой разновидность бездымных порохов, преимущественно применяющихся в артиллерии и огнестрельном оружии. Пироксилиновый порох изобретён в 1884 году Ж. Вьелем совместно П. Бертело. В России пироксилиновые пороха и технология их изготовления созданы в 1887-90 гг. Д.И. Менделеевым совместно с инженерами Охтенского порохового завода [34, 35].

Основным компонентом пироксилиновых порохов являются нитраты целлюлозы высокой степени нитрования, содержащие от 12,05 масс. % азота, что пропорционально среднему числу нитрогрупп. Удельный вес нитроцеллюлозы составляет 1,58-1,66 г/см³, она не растворима в воде, температура вспышки составляет 180-185 °С [36].

Детонационные параметры нитроцеллюлозы преимущественно определяются плотностью вещества и содержанием влаги, достигая скорости детонации 6,9 км/с в увлажненном состоянии. При этом в результате увлажнения чувствительность к детонационному импульсу снижается.

Чувствительность к механическому воздействию различных сортов нитроцеллюлозы изменчива в зависимости от содержания азота и влаги, а также условий воздействия. Сухой пироксилин обладает высокой чувствительностью к удару (до 85-88% взрывов при ударе 10 кг груза с высоты 250 мм), в увлажненном состоянии при нормальных условиях чувствительность пироксилинов значительно снижается, но при замерзании вновь резко возрастает. Бризантность пироксилинов возрастает с ростом числа нитрогрупп, достигая в увлажненном состоянии 8 мм. Сухой пироксилин демонстрирует обжатие свинцового цилиндра до 14 мм, превышая по этому показателю тротил (12,5-13 мм). Фугасность пироксилинов, определяемая пробой Трауцля, логично демонстрирует растущую зависимость от содержания азота от 255 до 330 см³ [37].

Для стабилизации пироксилиновых порохов преимущественно применяется дифениламин, взаимодействующий с первичными продуктами распада нитратов целлюлозы (оксиды азота, азотная и азотистая кислоты) с образованием стойких нитро- и нитрозосоединений.

Современные пироксилиновые пороха изготавливаются из смесевой нитроцеллюлозы с содержанием азота 12,7-13,1 %, пластифицированной путем воздействия летучих растворителей (спиртэфирных смесей, ацетона) и давления, иногда с добавлением веществ, для придания пороху специальных свойств.

В зависимости от используемых видов нитроцеллюлозы удельный вес пироксилиновых порохов колеблется в диапазоне от 1,54 до 1,63 г/см³, что с учетом собственной плотности нитроцеллюлозы указывает на пористую структуру с заполнением воздухом и остатками растворителей. Гравиметрическая плотность пироксилиновых порохов в значительной степени зависит не только от удельного веса, но и от формы и размера пороховых элементов. Для наиболее распространенных зерненных пироксилиновых порохов гравиметрическая плотность составляет от 0,6 до 0,9 кг/дм³ [35, 36, 38].

В зависимости от необходимого типа горения и с учетом особенностей применения пироксилиновые пороха изготавливаются в виде цилиндров, пластинок, таблеток, лент, колец, спиралей и других форм. Размеры пороховых элементов колеблются от сотен микрон до нескольких сантиметров в диаметре и длиной до метра. Типовые формы пироксилиновых порохов представлены на рисунке 1.1.

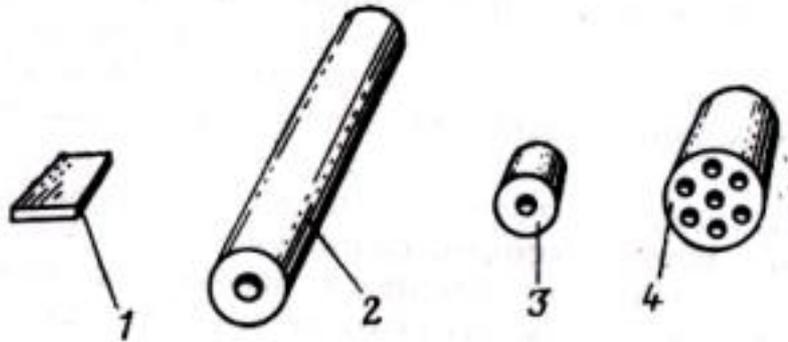


Рисунок 1.1 - Конфигурации пироксилиновых пороховых элементов [35]:

1 - пластинчатый порох; 2 - трубчатый порох; 3 - одноканальный зерненный порох; 4 - семиканальный зерненный порох.

В зависимости от назначения изготавливаются пороха различных марок, название которых преимущественно отражает основные баллистические характеристики – состав, форму пороховых элементов и толщину горящего свода, хотя иногда используется старое обозначение, указывающие на тип орудий применения. В действующей системе обозначений пироксилиновых порохов марка пороха представляется дробью, в числителе которой указывается толщина горящего слоя в десятых долях миллиметра, а в знаменателе количество каналов в зерне (например, для зерненных порохов 4/7, 9/7, 14/7) [35].

Детонационные свойства пироксилиновых порохов во многом соответствуют свойствам нитроцеллюлозы, однако проявляется ряд

факторов, связанных с формой и структурой пороховых элементов и окружающим их наполнением внутри заряда.

Апиным А.Я. были проведены масштабные исследования влияния наполнителей различной плотности и химического состава на бризантность пироксилиновых и нитроглицериновых порохов. В ходе исследования обнаружено, что пироксилиновые пороха повышают свою бризантность и детонационную способность в присутствии наполнителей с выраженной тенденцией к росту этих параметров по мере увеличения собственной плотности наполнителя. Нитроглицериновые пороха напротив продемонстрировали снижение бризантности и детонационной способности при использовании тех же самых наполнителей в аналогичных условиях. Сравнительные результаты представлены в таблице 1.4.

Таблица 1.4 - Бризантность пироксилиновых и нитроглицериновых порохов в воде [5]

Тип пороха	Размер порохового элемента, мм	Количество воды в заряде, %	Плотность заряда, г/см ³		Бризантность, мм	
			Без воды	С водой	Без воды	С водой
Нитроглицериновый порох	d=2,9 l=3,0	28,6	0,93	1,30	3,0	0,4
Нитроглицериновый порох	d=0,4 l=3,0	37,5	0,80	1,28	14,0	0,6
Нитроглицериновый порох	1,0x1,0x0,15	33,3	0,83	1,25	22,0	2,2
Пироксилиновый порох	d=0,8/1,5 l=7,5	36,7	0,80	1,26	2,4	22,2
Пироксилиновый порох	d=0,2/0,9 l=1,5	28,6	0,95	1,33	13,5	24,0

Аналогичное явление наблюдалось и с другими инертными наполнителями, указывая на преимущественную роль пороха в детонации подобных составов и характерные особенности проявления в зависимости от типа используемого пороха. Учитывая идентичную роль наполнителя в заполнении пустот между пороховыми элементами, были сделаны выводы о влиянии внутренних факторов пороховых элементов, в частности особенностей структуры на детонационную способность в присутствии наполнителей.

Основным структурным отличием нитроглицериновых и пироксилиновых порохов является образование в последних микропористой структуры за счет испарения спиртоэфирного растворителя. Подобная структура порохового элемента способствует распространению детонации внутрь зерна, увеличивая детонационную способность, не только за счет увеличения объема вовлеченного в процесс вещества, но и за счет более благоприятных условий внутри порохового элемента, в частности снижения потерь в виду отсутствия контакта с инертным наполнителем. Нитроглицериновые пороха имеют преимущественно сплошную непрерывную внутреннюю структуру, замедляющую распространения процесса превращения вглубь элемента, что не позволяет процессу эффективно распространяться, приводя к затуханию, не смотря на зачастую более высокую калорийность нитроглицериновых порохов [5, 6].

Сотрудниками РФЯЦ-ВНИИ технической физики имени академика Е.И. Забабахина И.В. Занегиным и С.И. Карачинским в рамках оценки возможности использования пироксилиновых порохов в промышленных целях проведены исследования физико-химических и детонационных свойств пироксилиновых порохов [39]. Исследования свелись к определению характеристик безопасности в обращении пироксилиновых порохов различных марок относительно показателя толщины горящего слоя t в сравнении с гексогеном. Работа проводилась с малыми навесками, для чего

пороха измельчались до размера частиц 0,3-1,0 мм. Результаты исследования представлены в таблице 1.5.

Таблица 1.5 - Сравнительные характеристики безопасности порохов [39]

Взрывчатый материал	Чувствительность к удару			Чувствительность к трению, кгс/см ²		Температура вспышки (T ₁), °С	Химическая стойкость
	№ прибора	Масса груза, кг	Частота взрывов, %	с песком	без песка		
Одноканальный порох, t=0,6 мм	1	10	100	400	2000	213	0,0012
	1	2	24				
	2	2	84				
Семиканальный порох, t=1,2 мм	1	2	68	300	1600	212	0,0014
	2	2	48				
Четырнадцатиканальный порох, t=0,7 мм	1	2	92	350	1600	212	0,0017
	2	2	88				
Нитроглицериновый порох t=1,8 мм	1	10	100	450	3000	212	0,0038
	1	2	36				
	2	10	8				
Гексоген	1	10	72	300	2400	235	0,0006
	2	10	60				

Пироксилиновые пороха продемонстрировали повышенную чувствительность к удару и трению, а также более низкие значения температуры вспышки и химической стабильности, что указывает на необходимость использования дополнительных средств повышения безопасности при использовании пироксилиновых порохов в качестве компонентов промышленных взрывчатых составов.

Результаты исследований детонационных свойств представлены на рисунках 1.2 и 1.3.

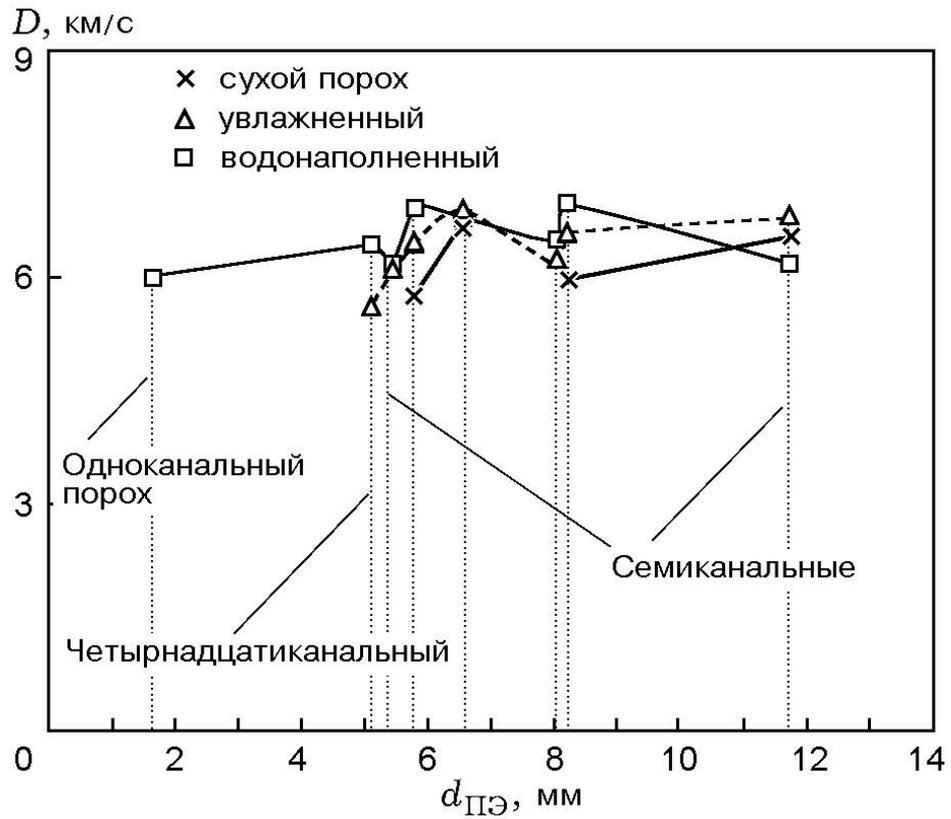


Рисунок 1.2 - Зависимость скорости детонации порохового заряда от диаметра порохового элемента при диаметре заряда 60 мм [39]

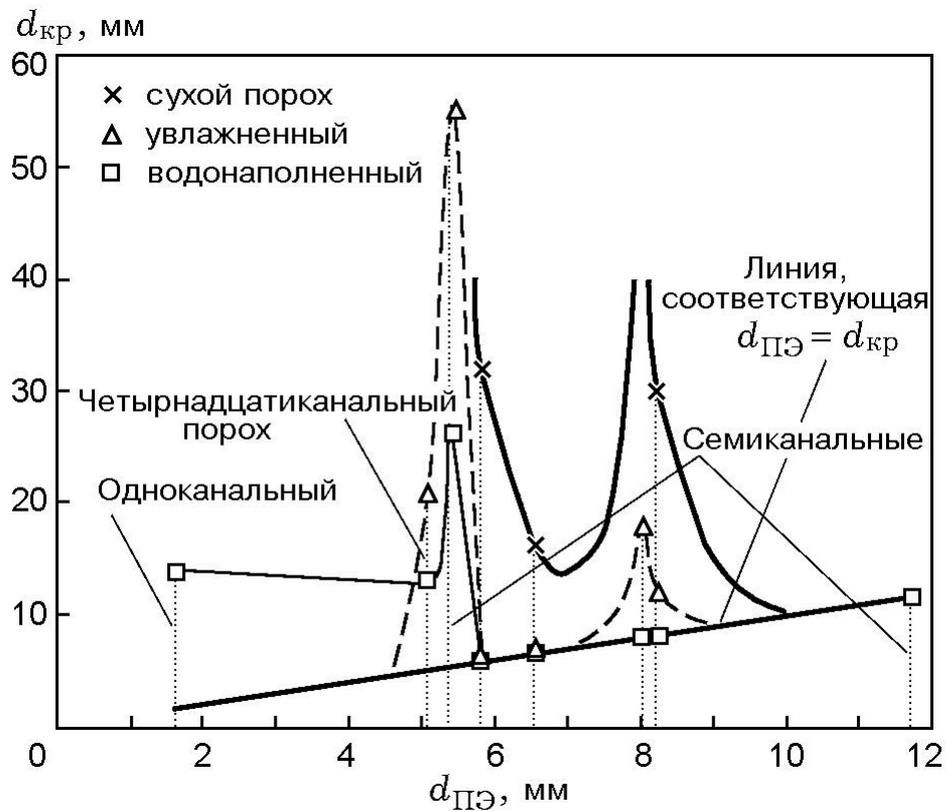


Рисунок 1.3 - Зависимость критического диаметра порохового заряда от диаметра порохового элемента [39]

По представленным результатам видно, что наличие в составе заряда наполнителя оказывает выраженное влияние на детонационную способность пироксилиновых порохов, подтверждая выводы Апина А.Я. В частности наблюдались не только рост скорости детонации при использовании увлажнённого или водонаполненного пироксилинового пороха средних ($d = 5-8$ мм) и крупных ($d > 8$ мм) размеров пороховых элементов, но и вовлечение в детонационный процесс мелких ($d < 5$ мм) порохов, не детонирующих в сухом состоянии. Повышение детонационной способности при использовании воды в качестве наполнителя также сказывается на критическом диаметре детонации, снижая его для водонаполненных и увлажненных зарядов, а также вовлекая в детонационный процесс заряды с пороховыми элементами малых размеров, не детонирующие в сухом виде.

Отдельно рассматривалось влияние на детонационную способность порохов используемого наполнителя, как в зависимости от физико-химических характеристик самого наполнителя, так и от итоговой структуры заряда.

В частности, Апиным А.Я. проведена экспериментальная оценка бризантности взрывчатых составов на основе порохов в зависимости от содержания в заряде наполнителя, рассмотренное с точки зрения заполнения воздушного пространства между пороховыми элементами, для чего, использовались высоковязкие вещества (вазелин, глицерин), с целью обеспечения равномерного распределения наполнителя по заряду и препятствовавшие расслоению состава. Оценивались идентичные по бризантности в отсутствие наполнителя пироксилиновый и нитроглицериновый пороха. Результаты представлены на рисунке 1.4.

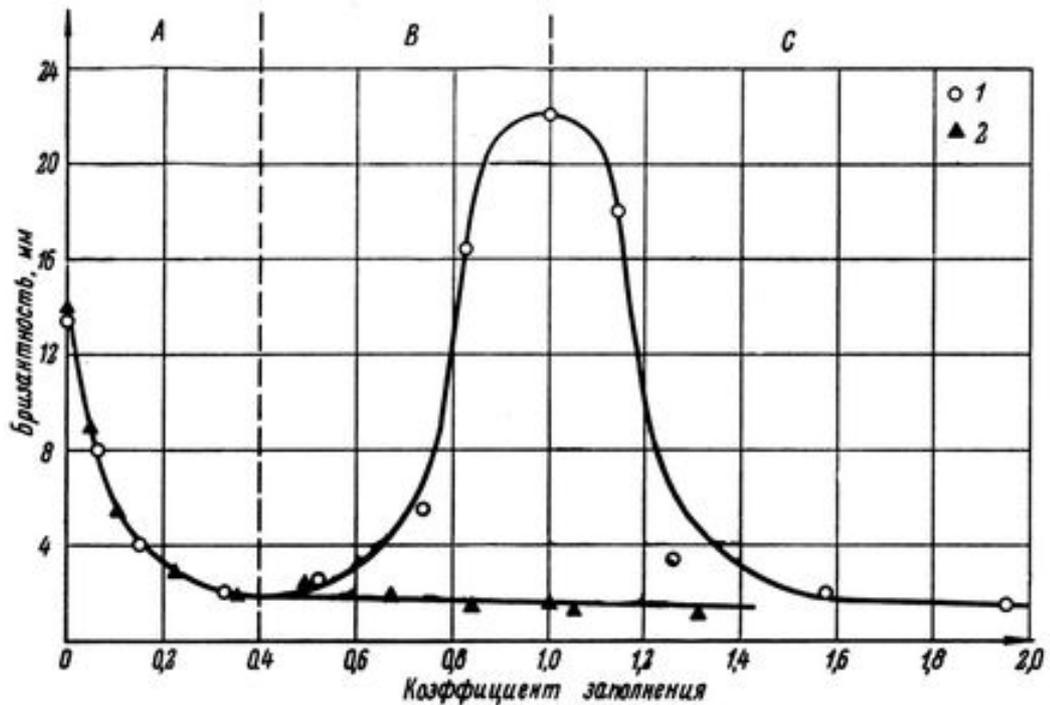


Рисунок 1.4 - Зависимость бризантности порохов от содержания вазелина в заряде [5,6]:

1 – пироксилитовый порох; 2 – нитроглицериновый порох.

На полученной зависимости выделяются 3 области, характеризующие действие наполнителя на детонационный процесс. В области «А» при коэффициенте заполнения пространства между пороховыми элементами наполнителем от 0 до 0,4 наблюдается падение бризантности обоих видов порохов, что вполне естественно ввиду флегматизирующего действия вазелина в качестве наполнителя. В области «В» с коэффициентом заполнения пространства от 0,4 до 1,0 для нитроглицериновых порохов значительных изменений не наблюдается, в отличие от пироксилитовых порохов, составы с которыми демонстрируют рост бризантности в зависимости от полноты заполнения пространства между пороховыми элементами достигая максимума при полном заполнении. Автор объясняет подобное явление обеспечением высокой эффективности распространения детонационного процесса по заряду не только в местах прямого контакта между пороховыми элементами, но и в подключении к распространению

передачи импульса малосжимаемого высокоплотного наполнителя. В области «С» падение бризантности объясняется повышением количества наполнителя в заряде, приводящем к уменьшению площади контакта между пороховыми элементами и соответствующему росту потерь энергии на передачу детонации через наполнитель [5, 6].

При изучении процесса распространения детонационной волны с учетом взаимного расположения пороховых элементов относительно друг друга и фронта детонационной волны было установлено возникновение между пороховыми элементами и в их каналах интенсивных воздушных ударных волн, распространяющихся со скоростями до 50% превышающими скорость детонационной волны в пороховом элементе. Данные волны, способны инициировать детонацию в последующих пороховых элементах до прихода основной детонационной волны заряда, формируя пульсирующий режим детонации со скоростью до 25% превышающей скорость детонации отдельного порохового элемента [39].

Совокупность представленных исследований указывает на специфический режим детонации пороховых составов на основе пироксилиновых порохов, обусловленный как структурными особенностями пороховых элементов, обеспечивающими собственную детонацию благодаря микропористой структуре, так и физическими свойствами наполнителя, в случае высокой плотности и малой сжимаемости обеспечивающего эффективное распространение детонационной волны по заряду порохового состава.

1.2.2. Промышленные взрывчатые составы на основе пироксилиновых порохов

Пироксилиновые пороха способны сохранять свои детонационные свойства даже в случае утраты ими стабильных внутрибаллистических

свойств, являющейся определяющим критерием снятия их с вооружения по истечении гарантийных сроков хранения (ГСХ). Большинство подобных порохов при соблюдении условий хранения остаются чувствительны к инициированию от промежуточного детонатора и могут применяться в качестве компонентов взрывчатых составов для ведения буро-взрывных работ.

Учитывая достаточно высокую чувствительность пироксилиновых порохов к внешним воздействиям (удар, трение, высокие температуры) при их использовании в качестве энергоемкого компонента взрывчатого состава промышленного назначения необходимо применение различных средств и методов повышения безопасности в обращении. Обычно для этого используются различные флегматизирующие добавки – индустриальные масла, эмульсии, водные и водосодержащие раствор и гели [19, 40-50].

Наиболее технологически простым способом является покрытие пороховых элементов слоем масла или идентичных по действию соединений для снижения чувствительности пороховых элементов к удару и трению, а также защиты от накопления статического заряда на поверхности. Подобные взрывчатые составы обычно объединяются под названием «Гранипор». Детальный анализ рецептур позволяет выделить различные модификации (марки). Сравнение рецептур «Гранипоров» представлено в таблице 1.6.

Таблица 1.6 - Рецептуры взрывчатых составов типа «Гранипор» [40, 42, 45, 50]

Компонент, масс. %	Марки Гранипоров												
	ФМ	ПЗФ	№1	№2	№3	№4	№5	№6	№7	№8	№9	БП-1	БПС-1
Пироксилиновый порох, зерненный семиканальный, типа 4/7, 9/7, 12/7	100	100	95	85	75	65	55	45	80	70	60	50	35
Порох артиллерийский баллиститный типа ДГ, НДТ	-	-	-	-	-	-	-	-	20	30	40	50	35
БРТ марки РБФ, РСИ, НМФ	-	-	-	-	-	-	-	-				-	-
Аммиачная селитра, ГОСТ 2 - 85	-	-	5	15	25	35	45	55	-	-	-	-	30
Масло индустриальное*	0,8-2,0												

*Сверх 100%

В рассматриваемых составах предусматривается использование преимущественно индустриальных или приборных масел, в ряде рецептов уточняется о допущении использования дизельного, солярового масла, встречаются варианты с обобщением в виде «жидкого нефтепродукта», а также альтернативы углеродным маслам в виде полисилоксанов.

Введение в состав баллистных порохов обосновано повышением энергоемкости взрывчатого состава, однако в связи с их пониженной детонационной способностью разработчики предпочитают комбинирование с пироксилиновыми порохами, выполняющими роль сенсбилизатора.

Из представленного перечня можно выделить «Гранипоры», рецептура которых включает дополнительный окислитель в виде нитрата аммония. Введение дополнительного окислителя повышает кислородный баланс, энерговыделение и экологичность. Это несколько компенсирует увеличение отрицательного кислородного баланса введением жидких нефтепродуктов, но ввиду высокой растворимости нитратов, снижает водоустойчивость таких составов, ограничивая область их применения. Существуют варианты рецептов с добавлением металлов (алюминия, железа) в виде порошков или кремниевых сплавов для повышения энерговыделения (взрывчатый состав «Алюмопор») [51].

Более технологически сложным является переработка порохов с использованием обратных эмульсий (Эмульсен-П, Эмульсен-ГАП), составы которых представлены в таблице 1.7.

Таблица 1.7 - Рецептуры взрывчатых составов типа «Эмульсен» [19,52]

Компонент, масс. %	Эмульсен-П	Эмульсен-ГАП
Пироксилиновый порох	50,0-65,0	25,0
Аммиачная селитра	24,2-34,5	34,5
Натриевая селитра	3,5-5,0	5,0
Эмульгатор	0,7-1,0	1,0
Индустриальное масло	1,8-2,5	2,5
Вода	4,9-7,0	7,0
Гексогенсодержащий состав Г-2У или крошка гексогенсодержащего состава А-IX-2	-	25

Введение в состав эмульсий пироксилиновых порохов значительно повышает детонационную способность, снижает критический диаметр, позволяя изготавливать заряды меньших диаметров. За счет использования в составе эмульсий нитратов натрия и аммония достигается повышение водоустойчивости и более полное окисление топливных компонентов взрывчатого состава, благоприятно сказывающееся не только на работоспособности, но и на экотоксичности продуктов взрыва. При введении гексогенсодержащих компонентов в пороховые эмульсионные составы (Эмульсен-ГАП) наблюдается значительный (более 1000 кДж/кг) прирост теплоты взрывчатого превращения, однако введение мощных бризантных веществ неизбежно повышает чувствительность к механическим воздействиям [19, 20, 50, 52].

Еще одним примером совместного использования порохов и бризантных взрывчатых веществ является промышленный взрывчатый состав «Поротол», представляющий собой расплав тротила с введенными в него пороховыми элементами. «Поротол» в первую очередь разрабатывался в качестве водостойкой альтернативы тротил-аммиачноселитренным взрывчатым составам. В данном случае тротил оказывает флегматизирующее действие в виду его более низкой чувствительности к механическим

воздействиям, и именно содержание пороха определяет чувствительность к инициирующему импульсу, что позволяет обеспечить достаточную чувствительность при соблюдении необходимых требований в области безопасности [53]. Такие составы активно применяются для изготовления промежуточных детонаторов, а также, при добавлении гексогенсодержащих составов (А-IX-2), в качестве сейсмических зарядов [20]. Основным недостатком данных составов является их резко отрицательный кислородный баланс, указывающий на высокую токсичность продуктов взрыва.

Крупным направлением является флегматизация порохов водой или водными растворами окислителей. В качестве окислителей обычно используются нитраты аммония и натрия, к которым для обеспечения морозоустойчивости добавляются незамерзающие агенты, преимущественно многоатомные спирты (этиленгликоль, глицерин). Рецептуры подобных составов представлены в таблице 1.8.

Таблица 1.8 - Рецептуры взрывчатых составов на основе водно-спиртовых растворов [43,44]

Компонент, масс. %	Гидропор	Нитропор
Зерненный пироксилиновый порох	64,0-68,0	94,0-98,0
Порошкообразный пироксилиновый или баллистинный порох	22,0-26,0	-
Этиленгликоль	3,0-7,0	1,4-2,7
Вода	3,0-7,0	
Аммиачная селитра	-	1,4-3,0
Жидкий нефтепродукт	1,0-2,0	-

Простейшим вариантом, без применения нитратов является взрывчатый состав «Гидропор», представляющий собой смесь пироксилиновых зерненных порохов с добавлением измельченных

пироксилиновых или баллиститных порохов и водного раствора этиленгликоля, часто с добавлением жидкого нефтепродукта. Взрывчатые составы «Нитропор» отличаются использованием нитратных, преимущественно аммиачноселитренных, водно-гликолевых растворов, при этом из состава исключается жидкий нефтепродукт. Добавление мочевины в состав «Нитропоров» позволяет использовать их при буровзрывных работах в сульфидных рудах. Подобные составы также могут включать гексогенсодержащие добавки, в результате чего получают взрывчатый состав «Гексопор» [51].

Сравнительно высокая детонационная способность пироксилиновых порохов, сохраняющаяся даже после истечения ГСХ, позволяет эффективно использовать их в качестве энергоемких компонентов промышленных взрывчатых составов, в том числе как сенсibiliзирующую добавку. Однако, большинство рецептур практически не учитывает выявленные особенности детонации пироксилиновых порохов, в частности механизмы протекания и распространения детонации в пороховых зарядах, и направлено преимущественно на обеспечение максимально широких условий эксплуатации, а также повышения эффективности введением высокоэнергетических добавок, зачастую ухудшающих экотоксичность продуктов взрыва.

1.3. Водно-гелевые промышленные взрывчатые составы

Активное использование в промышленности в 50-х годах прошлого века игданитов, заменивших динамиты, выявило существенные проблемы - низкую скорость детонации и слабое сопротивление воздействию воды. Однако ученые обратили внимание, что можно заставить воду выполнять полезную работу во взрывчатом составе, тем самым заложив основы водонаполненных взрывчатых систем.

Водно-гелевые взрывчатые составы представляют собой смесь раствора окислителя и топлива, основными компонентами которых являются аммиачная селитра и вода, а в качестве топливного компонента используются преимущественно органические азотсодержащие вещества, такие как карбамид, уротропин. Ключевыми этапами изготовления подобных взрывчатых составов является достижение достаточной степени смешения топлива и окислителя и формирование в составе микропузырьков, являющихся центрами начала химического превращения при детонации.

Масштабные исследования привели к созданию множества рецептов с различным сочетанием компонентов и технологий изготовления водно-гелевых взрывчатых составов. Решались задачи создания наиболее эффективных сочетаний окислителя, в качестве которого обычно выступал нитрат аммония, с топливным компонентом. Вода в таких составах выступала в роли флегматизатора, повышая безопасность в обращении, а во время детонационного процесса - в качестве посредника, обеспечивающего распространение детонационного импульса. В результате разработаны основы создания подобных составов, позволяющие в достаточной степени управлять детонационными характеристиками водно-гелевых взрывчатых составов на этапе проектирования их химического состава и структуры [54].

1.3.1. Состав, свойства и характеристики водно-гелевых взрывчатых составов

Водно-гелевые взрывчатые составы обычно состоят из раствора окислителей, в качестве которых используют комбинации нитратов аммония, натрия и кальция из-за относительно низкой точки кристаллизации их растворов, и топливного компонента, в роли которых выступают различные органические соединения, например сахара или многоатомные спирты.

В случае непосредственного использования водного геля в качестве взрывчатого состава дополнительно проводится сенсбилизация пузырьками воздуха посредством крайне быстрого перемешивания компонентов. На практике подобный процесс аэрации обладает низкой эффективностью, не позволяющей довести водный гель до полноценного детонационноспособного состояния. Гораздо более эффективным способом является сенсбилизация газами, образующимися внутри состава в ходе химических реакций. Предварительное введение газогенерирующих добавок компенсирует недостаточную и неравномерную аэрацию состава по средством быстрого перемешивания, обеспечивая высокие объемные концентрации потенциальных очагов детонационного процесса. В ряде случаев возможно применение искусственных заменителей «горячих точек» - полимерных или стеклянных микросфер.

Помимо базовых компонентов водно-гелевые взрывчатые составы могут содержать различные химически активные добавки. Применение таких добавок для модифицирования детонационных характеристик, в зависимости от требуемого эффекта, широко применяется на практике при изготовлении водно-гелевых систем. Помимо модифицирования состава добавлением окислителей, таких как перхлораты натрия и аммония, широко используется добавление высоко диспергированных металлов. В этом качестве из-за своей доступности и химических свойств чаще других используется алюминий в виде порошка или пудры, однако встречаются рецептуры, включающие железо. Иногда в качестве топливного компонента используется сера. Для повышения энергоемкости и чувствительности к инициирующему импульсу часто применяются азотсодержащие органические соединения (амино- и нитро- углеводороды).

Рецептуры водных гелей крайне разнообразны. Обычно итоговый состав рассчитывается таким образом, чтобы собственный кислородный баланс водного геля был нулевым или слегка отрицательным. В случае изготовления зарядов малого диаметра, требуется учитывать влияние

материала оболочки при расчетах кислородного баланса. Исследования подтверждают влияние оболочки, участвующей в процессе в качестве горючего, приводящее к смещению в сторону отрицательного кислородного баланса. В результате взрыва таких зарядов наблюдается неполное окисление, повышающее токсичность образующихся газов, что является негативным эффектом, в особенности для применения в стесненных условиях (при шахтной добыче). Примеры типовых рецептов водных гелей представлены в таблице 1.9 [54].

Таблица 1.9 - Рецептуры взрывчатых составов на основе водно-спиртовых растворов [54]

Компонент, масс. %	Неалюминизированные	Алюминизированный	Капсюле-чувствительный	Литьевой
Аммиачная селитра	57,5	62,5	57,5	67,0
Натриевая селитра	10,0	8,0	10,0	5,0
Вода	15,0-18,0	15,0	12,0-14,0	16,0
Гелеобразователь	1,5	1,2	1,2	0,8
Сахар	13,0	8,0	-	-
Этиленгликоль	-	-	6,0	2,0
Мочевина	-	2,0	4,0	6,0
Алюминий	-	6,0	4,0	1,0
Сера	-	-	3,0	2,0

Вода во взрывчатых веществах обычно ассоциируется с негативным эффектом. Однако в водно-гелевых составах вода выполняет множество полезных функций – обеспечивает эффективное смешение компонентов состава, увеличивает объем газов при детонации, служит матрицей для сохранения очагов детонации, а также является тепловым рабочим телом [54].

Особенностью большинства водно-гелевых составов является их малый срок годности, обычно не превышающий недели. Для повышения сроков эксплуатации существует необходимость эффективного сшивания

состава, для сохранения его структуры, обеспечивающей устойчивую детонацию от стандартных средств инициирования. Заряды структурированных составов применяют для добычи в шахтах, ведения сейсморазведки и иных буровзрывных работах, с большой разницей во времени между моментами заряжания и подрыва. Также составы могут частично структурироваться (сшиваться) для повышения сопротивляемости воде, часто находящейся в скважинах.

Одной из проблем при изготовлении отдельных зарядов является время структурирования водно-гелевой матрицы. В зависимости от эмульгатора и сшивающего компонента время структурирования от текучего до желеобразного состояния может быть различным, что должно обязательно учитываться.

Конечная спецификация водно-гелевого взрывчатого состава основывается на реологии, чувствительности к детонации и времени хранения. В случае получения продукта низкой вязкости его относят к гидросмесям, которые необходимо использовать в течение ближайших дней с момента изготовления. При получении составов высокой вязкости – их относят к водно-гелевым составам, способным храниться длительное время, сохраняя свои взрывчатые свойства.

Эффективность водно-гелевых взрывчатых составов преимущественно характеризуется значением скорости детонации, также важными характеристиками являются, диаметр заряда, чувствительность к инициирующему импульсу. Для практического применения важным показателем является водоустойчивость взрывчатого состава. В таблице 1.10 представлены сравнительные характеристики водно-гелевых взрывчатых составов различных марок.

Таблица 1.10 - Характеристики водно-гелевых взрывчатых составов различного назначения [55-57]

Характеристика	Марка взрывчатого состава			
	Detagel™	TOVEX® SEISMIC EXPLOSIVE	TOVEX® COALMINER	RIOFLEX RAPID
Плотность, г/см ³	1,20	1,23-1,30	1,13	0,80-1,25
Скорость детонации (d=50 мм), км/с	4,9	>5,0	4,4	3,0-6,9
Водоустойчивость	Отличная	Отличная	Отличная	Отличная
Минимальный диаметр заряда, мм	25	58	25	25
Минимальный инициатор	Капсюль 8 мм	Капсюль 8 мм	Капсюль 8 мм	Промежуточный детонатор

Плотность состава оказывает значительное влияние на множество детонационных параметров, отчасти характеризую работоспособность. Для большинства водных гелей она колеблется в пределах 1,20-1,40 г/см³, но аэрация и газогенерирование снижают итоговую плотность на 10-30 %.

Скорость детонации является одной из наиболее информативных характеристик, описывающих мощность взрывчатого состава. Для промышленных взрывчатых составов характерна средняя скорость детонации 3,5-5,0 км/с. Для водно-гелевых взрывчатых составов скорость детонации сильно зависит от химического состава и структуры, и может колебаться в достаточно широких пределах, что повышает важность контроля процесса изготовления и конечной продукции.

Водоустойчивость взрывчатых составов характеризуется относительно времени между процедурой заряжания и подрывом. Отличная водоустойчивость указывает на высокую сохраняемость химического состава и структуры водно-гелевого взрывчатого состава, не менее 36 часов с

момента заряжания в условиях проточной воды, и не менее 72 часов с момента заряжания в стоячей воде.

Минимальный диаметр заряда основывается на показателе экспериментально устанавливаемого критического диаметра детонации и выбирается с учетом типовых размеров шпуров и скважин. Также важным фактором является влияние диаметра на скорость детонации, что необходимо учитывать при выборе конфигурации зарядов.

Чувствительность к инициирующему импульсу на практике описывается относительно стандартных средств инициирования. Большинство производителей разрабатывает рецептуры и технологию производства таким образом, чтобы конечный продукт был чувствителен к инициированию стандартным 8 мм капсульным детонатором. В ряде случаев, когда по различным причинам невозможно создать или поддерживать достаточную чувствительность, используются промежуточные детонаторы.

Водно-гелевые взрывчатые составы являются удобным и эффективным инструментом ведения взрывных работ, благодаря множественным возможностям управления итоговыми детонационными параметрами. Они активно применяются в горнодобывающей промышленности таких стран как Россия, США, Китай, Индия. Согласно отчетам, научным статьям и отзывам, водно-гелевые составы являются достаточно хорошей альтернативой нитроглицериновым взрывчатым составам, являясь более дешевыми, безопасными и удобными в использовании, даже несмотря на их меньшую взрывчатую эффективность [9, 54, 58-60].

1.3.2. Водно-гелевые взрывчатые составы, сенсibiliзируемые энергоемкими компонентами утилизируемых боеприпасов

Одной из основных проблем водно-гелевых взрывчатых составов является создание и поддержание на необходимом уровне детонационной способности. Альтернативным методом является сенсibiliзация водных гелей энергоемкими наполнителями – взрывчатыми веществами и составами военного назначения. Их совместное использование с водными гелями позволяет достичь достаточного уровня безопасности в обращении, что особенно важно при промышленной утилизации.

Первые упоминания о сенсibiliзации водных гелей бризантными взрывчатыми составами и порохами встречаются в коммерческих взрывчатых веществах компании Hercules Incorporated (США). В то время подобные составы дали серьезный толчок горной добыче в Мичигане и Миннесоте. В дальнейшем компания совершенствовала рецептуру, обеспечивая возможность механизации зарядания [61].

Данное направление повысило свою актуальность после окончания Холодной войны, сопровождавшегося активной демилитаризацией и высвобождением большого количества боеприпасов, требовавших утилизации. С целью высвобождения возвратного потенциала активно обсуждалось применение получаемых при расснаряжении энергонасыщенных материалов [7, 19].

Наиболее перспективными сенсibiliзаторами водных гелей выглядели гексогенсодержащие взрывчатые составы (А-IX-1, А-IX-2), однако их массовое извлечение из боеприпасов до сих пор представляет технологические сложности [62].

Другой группой энергоемких компонентов, получаемых из утилизируемых боеприпасов, обладающих большой перспективой переработки в промышленные водно-гелевые составы, являются метательные взрывчатые вещества. Пороха и ракетные топлива принципиально способны

к превращению в форме детонации, а водные гели способны обеспечить достаточную степень безопасности в обращении.

В большинстве случаев, применение порохов и твердых ракетных топлив в качестве энергоемкого компонента требует процедуры измельчения, с целью увеличения контакта с дополнительным окислителем из водного геля. При этом процедура измельчения зачастую не является безопасной, поскольку вещества подвергаются серьезным механическим нагрузкам, которые впоследствии могут привести к их реакционному разложению, тем более для веществ с истекшим сроком годности, обычно как раз и ограниченным стабильностью состава. В связи с этим наиболее эффективным решением является применение зерновых порохов. Основной задачей разработки подобных взрывчатых составов является создание условий для взрывчатого превращения пороха в режиме детонации несмотря на то, что одним из требований при создании оружейных порохов является минимизация вероятности детонационного режима взрывчатого превращения. Водные гели, обладая достаточно высокой плотностью (1,20-1,40 г/см³), способствуют созданию условий для детонации пороховых зерен.

В период действия первой Федеральной целевой программы «Промышленной утилизации вооружения и военной техники» при участии сотрудников РХТУ им. Д.И. Менделеева В.Э. Анникова и Б.Н. Кондрикова были разработаны промышленные взрывчатые составы на основе энергонасыщенных водных гелей, сенсibilизированных утилизируемым зерненным пироксилиновым порохом, получившие название Гельпор. Составы прошли все необходимые процедуры и были допущены надзорными органами к производству и применению. Химически Гельпор представляет собой композицию зерненного пироксилинового пороха с гелеобразным водным раствором, содержащим аммиачную и натриевую селитры и карбамид (Гель ВИА) [63]. Примеры современных рецептов представлены в таблице 1.11.

Таблица 1.11 - Составы на основе геля ВИА [47-49, 64]

Компонент, масс. %	ГП-2	ГПС-1	ГП-Т	ГП-1
Пироксилиновый порошок	48±4	50±1	55±5	65±6
Гель ВИА	33±3	40±1	40±4	35±3
Аммиачная селитра	19±1	10±2	5±3	-
Структурирующие добавки*	0,2±0,05	0,2±0,02	1±0,5	0,2±0,05
Кислородный Баланс, %	-10,5	-12,1	-15	-18,2

*Сверх 100%

Детонационные характеристики этих составов приведены в таблице 1.12.

Таблица 1.12 - Сравнительные детонационные характеристики пороховых водно-гелевых составов [47-49, 64]

Взрывчатый состав	Плотность г/см ³	D, км/с	Q _{взр} , кДж/кг	Критический диаметр, мм
Гельпор ГП-1	1,4	6,5±0,2	3860	8-10
Гельпор ГП-2	1,4	5,6±0,2	3776	12-14
Гельпор ГПС-1	1,5	5,6±0,2	3580	12-14
Гельпор ГП-Т	1,46	6,4±0,2	3580	12-14

Гельпор ГП-1, ввиду большего содержания пороха, обладает высокой детонационной способностью – критический диаметр составляет 8-10 мм. При введении в составы аммиачной селитры критический диаметр незначительно повышается. При этом теплота взрыва и скорость детонации практически не меняется.

Стабильность структуры взрывчатого состава Гельпора и формы заряда обеспечивается введением в гелеобразный раствор ионов трёхвалентных металлов – алюминия, железа или хрома, при этом ионы хрома являются наиболее эффективными. Установлено, что для получения резиноподобной структуры, обеспечивающей стабильность формы заряда и высокую водостойчивость Гельпора, могут быть использованы ион трёхвалентных металлов при концентрации в геле порядка 0,071 масс. %. При одномоментном введении ионов в такой концентрации, в виде навески раствора соли, процесс структурирования заканчивается в течение трёх-пяти минут, при этом технологически невозможно обеспечить изготовление состава и тем более зарядов на его основе. В связи с этим используется методика структурирования путём получения трёхвалентного иона в результате химической реакции бихромата калия, содержащего шестивалентный ион хрома, с тиосульфатом натрия, протекающей непосредственно в гелеобразном растворе. В этом случае скорость образования трёхвалентного иона легко регулируется, позволяя изменять время структурирования от пятнадцати минут до 24-х часов. Для получения Гельпора в виде льющейся массы содержание ионов должно быть снижено до 0,0037 масс. %. В этом случае для структурирования состава можно использовать соли, содержащие трёхвалентные ионы алюминия и хрома – $Al_2(SO_4)_3$ и $KCr(SO_4)_2$.

В ходе полигонных испытаний, организованных при участии сотрудников РХТУ им. Д.И. Менделеева, установлена высокая степень безопасности Гельпоров, обеспечиваемая негорючестью состава, и, как следствие, отсутствием перехода горения в детонацию, а также невосприимчивостью к механическим воздействиям, таким как прострел пулей калибра 7,62 из Снайперской Винтовки Драгунова. Заряды Гельпора не воспламенялись даже при выгорании помещенного внутрь заряда баллиститного пороха. Следует отметить, что сочетание высокой детонационной способности и безопасности позволяет использовать составы

типа Гельпор при утилизации веществ, обладающих как низкой детонационной способностью (баллиститные пороха, ТРТ), так и веществ с высокой чувствительностью к механическим воздействиям (шашки А-IX-2).

Эффективность применения пороховых водно-гелевых составов (ПВГС) в качестве промышленных взрывчатых веществ описана в работах [65-70]. В частности, наблюдается повышенная по сравнению с большинством промышленных ВВ эффективность, что позволяет значительно уменьшить как удельный расход взрывчатых материалов, так и снизить время подготовки к буровзрывным работам. Также специалистами горного дела отмечаются некоторые особенности взрывного нагружения пород, в частности наблюдаются неестественные увеличения длительностей фаз сжатия, выгодно отличающие ПВГС от большинства промышленных ВВ [71].

1.4 Заключение по литературному обзору

Анализ литературы показал, что в настоящее время в России сохраняется актуальность промышленной утилизации энергоемких компонентов, извлекаемых из утилизируемых боеприпасов. Введенный действующей Федеральной целевой программой «Промышленной утилизации вооружения и военной техники» запрет на уничтожение потенциально подлежащих переработке материалов ведет к накоплению энергоемких компонентов. Группа получаемых в результате утилизации метательных взрывчатых составов, в частности пироксилиновые пороха, могут быть с высокой эффективностью вовлечены во вторичное использование в качестве энергоемкого компонента промышленных взрывчатых составов.

Исходя из существующих рецептур составов и результатов их испытаний установлено проявление особенностей течения детонационного процесса пороховых водно-гелевых составов. В частности, отмечается

повышенная работоспособность относительно идентичных по массе взрывчатых составов и эффективное взрывное воздействие на горные породы с минимизацией негативных последствий.

При этом литературный обзор демонстрирует отсутствие в настоящее время научно-обоснованного подхода к созданию рецептур водно-гелевых составов, сенсibilизированных пироксилиновыми порохами. Именно этому вопросу и посвящено настоящее диссертационное исследование, в ходе которого также были определены причины повышенной эффективности взрывного воздействия подобных составов.

2. Оценочный расчет детонации пороховых водно-гелевых составов

Посредством компьютерного программного комплекса Shock and Detonation (SD) проведен оценочный расчет параметров детонации продуктов взрыва пороховых водонаполненных взрывчатых составов.

2.1 Методика проведения расчетов

Расчет осуществлялся с помощью программного комплекса Shock and Detonation (SD), разработанного под руководством Б.Н. Кондрикова и А.И. Сумина в 90-е годы прошлого столетия. Программный комплекс предназначен для расчета основных термо- и гидродинамических параметров состояния детонации Чепмена-Жуге в конденсированных веществах и смесях, состоящих из элементов С, Н, N, О, Al, Cl. Также программный комплекс SD позволяет получить зависимости этих параметров от начальной плотности заряда и состава взрывчатой смеси [72, 73].

Термодинамические расчеты в программном комплексе SD [74] выполняются на основе уравнения состояния Кондрикова - Сумина для газообразных продуктов детонации, которое имеет следующий вид:

$$P=P_p + \frac{\gamma RT}{V} \quad (2.1)$$

где P – давление;

V - удельный объем;

T – температура;

R - газовая постоянная,

$P_p = -dE_p/dV$ - потенциальная составляющая давления.

Параметр γ определяется уравнением (2.2):

$$\gamma = \frac{a_1 - a_2}{e^{a_3 t} + a_5} \quad (2.2)$$

где $t = \left(\frac{V_0}{V}\right) \cdot \left(\frac{T_0}{T}\right)^{a_4}$,

$$V_0 = 1 \text{ см}^3/\text{г},$$

$$T_0 = 1000 \text{ К};$$

$a_1 - a_5$ – константы.

Внутренняя энергия рассчитывается по уравнению (2.3):

$$E = E_{id} + E_p + 0,3 \cdot RT(\gamma - 1) \quad (2.3)$$

Потенциальная составляющая внутренней энергии описывается (2.4).

$$E_p = E_m \frac{6}{\alpha - 6} \exp\left[\alpha \left(1 - (V/V_m)^{1/3}\right)\right] - \alpha (V_m/V)^2 \quad (2.4)$$

где α , E_m и V_m - постоянные.

Идеальная составляющая внутренней энергии E_{id} определяется теплоемкостью $C_p = dE_{id}/dT$, как функция температуры при нормальном давлении. Эта функция представляется полиномом 5-ой степени:

$$C_p = b_0 + b_1 T + b_2 T^2 + b_3 T^3 + b_4 T^4 + b_5 T^5 \quad (2.5)$$

где $b_0 - b_5$ – константы.

Уравнение состояния конденсированных продуктов детонации описывается уравнением Cowan-Fickett:

$$P = c_1 + c_2/V + c_3/V^2 + c_4/V^3 + c_5/V^4 + c_6 T + c_7 T/V + (c_8 + c_9 V + c_{10} V^2) T^2 \quad (2.6)$$

в котором $c_1 - c_{10}$ – постоянные.

Структура программы SD и порядок работы с ней подробно описаны в методических указаниях [74].

Программный комплекс SD включает в себя две базы данных:

- физико-химических параметров взрывчатых веществ и компонентов взрывчатых систем,
- физико-химических и термодинамических параметров продуктов детонации.

База данных взрывчатых веществ содержит следующие данные: название вещества, брутто-формула, плотность (г/см^3), энтальпия образования (кДж/моль), начальное приближение в точке Чепмена-Жуге для давления (ГПа) и температуры (К). В имеющуюся базу данных ВВ можно вводить новые вещества, для этого необходимо знать его химическую формулу, плотность и энтальпию образования.

База данных продуктов включает в себя информацию о газообразных и конденсированных продуктах детонации. В базе данных содержится 5 конденсированных продуктов: $\text{C}_\text{г}$, $\text{C}_\text{ал}$, Al , Al_2O_3 и NaOH . Все остальные продукты детонации являются газообразными: N_2 , CO , CO_2 , NH_3 , H_2O , H_2 , O_2 , CH_4 , NO , HCl и Cl_2 . Меню расчета параметров детонации позволяет указать активный или неактивный статус продукта. При неактивном статусе продукт не будет включаться в возможный состав продуктов детонации.

Для расчета в программном комплексе SD указывается состав смеси (масс. %) и ее плотность (г/см^3). Результатами расчета являются следующие показатели детонационного процесса: скорость детонации (D_{SD}), давление в точке Чепмена-Жуге (P_{CJSD}), массовая скорость продуктов детонации (u_{CJSD}), температура детонации (T_{SD}), удельный объем ($\text{см}^3/\text{г}$), теплота взрыва (Q_{SD}), объем газообразных продуктов ($V_{\text{ГП SD}}$), показатель политропы (k_{SD}), а также состав продуктов детонации (моль/кг).

2.2. Расчет детонации взрывчатых составов на основе пироксилиновых порохов

Исследование влияния содержания водных гелей на параметры детонации пороховых водосодержащих составов проводилось для двух водных гелей, содержащих нитрат аммония, нитрат натрия, воду и карбамид в соотношении 45/15/30/10 (Состав №1) и нитрат аммония, нитрат натрия и воду в соотношении 50/20/30 (Состав №2). Плотности водных гелей

составляли $\rho_1=1,398 \text{ г/см}^3$ и $\rho_2=1,410 \text{ г/см}^3$ соответственно. Программный комплекс SD не предусматривает расчет с Ca-содержащими компонентами, в связи с чем расчет для водного геля Состава №3 не производился.

Результаты расчета параметров детонации для составов на основе водных гелей Состав №1 и Состав №2 представлены в таблицах 2.1 и 2.2 соответственно.

Таблица 2.1 - Расчетные параметры детонации состава ПП/водный гель (Состав №1)

С _{ПП} , %	С _{ВГ} , %	КБ, %	D _{SD} , км/с	P _{SD} , ГПа	u _{SD} , м/с	Q _{SD} , кДж/кг	V _{газ} , м ³ /кг	k
100	0	-33,5	6,768	16,02	1535	4059	0,689	3,41
95	5	-31,4	6,758	15,79	1524	3940	0,702	3,44
90	10	-29,4	6,747	15,65	1519	3821	0,714	3,44
85	15	-27,3	6,735	15,46	1511	3701	0,726	3,46
80	20	-25,2	6,721	15,33	1510	3580	0,739	3,45
75	25	-23,1	6,707	15,09	1497	3459	0,751	3,48
70	30	-21,1	6,691	14,90	1489	3337	0,764	3,49
65	35	-19,0	6,674	14,71	1481	3215	0,777	3,51
60	40	-16,9	6,653	14,41	1462	3094	0,790	3,55
55	45	-14,8	6,624	14,13	1448	2976	0,803	3,57
50	50	-12,8	6,593	13,86	1434	2858	0,816	3,60
45	55	-10,7	6,560	13,58	1419	2740	0,830	3,62
40	60	-8,6	6,527	13,30	1403	2621	0,843	3,65
35	65	-6,5	6,491	13,02	1388	2503	0,857	3,68
30	70	-4,5	6,454	12,73	1371	2384	0,871	3,71
25	75	-2,4	6,416	12,41	1351	2267	0,885	3,75
20	80	-0,3	6,377	12,15	1338	2155	0,900	3,77
15	85	1,8	6,237	11,41	1290	1816	0,914	3,83
10	90	3,8	6,059	10,43	1221	1433	0,928	3,96
5	95	5,9	5,852	9,41	1144	1051	0,942	4,11
0	100	8,0	5,606	8,32	1062	669	0,956	4,28

Таблица 2.2 - Расчетные параметры детонации состава ПП/водный гель (Состав №2)

$C_{ПП}, \%$	$C_{ВГ}, \%$	КБ, %	$D_{SD},$ км/с	$P_{SD},$ ГПа	$u_{SD},$ м/с	$Q_{SD},$ кДж/кг	$V_{газ},$ м ³ /кг	k
100	0	-33,5	6,768	16,02	1535	4059	0,689	3,41
95	5	-30,9	6,763	15,84	1525	3961	0,701	3,43
90	10	-28,2	6,757	15,78	1529	3864	0,712	3,42
85	15	-25,6	6,749	15,61	1521	3766	0,723	3,44
80	20	-22,9	6,741	15,55	1524	3668	0,734	3,42
75	25	-20,3	6,732	15,37	1516	3569	0,746	3,44
70	30	-17,7	6,722	15,21	1508	3469	0,757	3,46
65	35	-15,0	6,698	14,88	1488	3377	0,769	3,50
60	40	-12,4	6,673	14,64	1476	3285	0,781	3,52
55	45	-9,7	6,647	14,41	1465	3193	0,793	3,54
50	50	-7,1	6,620	14,15	1451	3101	0,805	3,56
45	55	-4,5	6,592	13,90	1438	3010	0,816	3,58
40	60	-1,8	6,562	13,62	1422	2924	0,828	3,62
35	65	0,8	6,489	13,16	1395	2743	0,839	3,65
30	70	3,5	6,329	12,26	1339	2314	0,852	3,73
25	75	6,1	6,150	11,31	1277	1886	0,864	3,82
20	80	8,7	5,944	10,26	1203	1458	0,877	3,94
15	85	11,4	5,701	9,11	1118	1030	0,890	4,10
10	90	14,0	5,407	7,81	1016	602	0,902	4,32
5	95	16,7	5,029	6,28	882	170	0,915	4,70
0	100	19,3	4,532	4,58	716	-257	0,928	5,32

На рисунке 2.1 представлены сравнительные результаты расчетов. Протоколы расчетов приводятся в Приложении 1.

Водный гель Состав №2 содержит большее количество окислителя, чем Состав №1, в связи с чем, как видно из рисунка 2.1 (а), кислородный баланс системы на основе Состава №2 повышается быстрее. Расчетные скорость и давление детонации (рис. 2.1 б, в), а также массовая скорость продуктов детонации и теплота взрыва (рис. 2.1 г, д) для рассматриваемых водных гелей практически идентичны до достижения содержания водного геля, соответствующее составу с нулевым кислородным балансом.

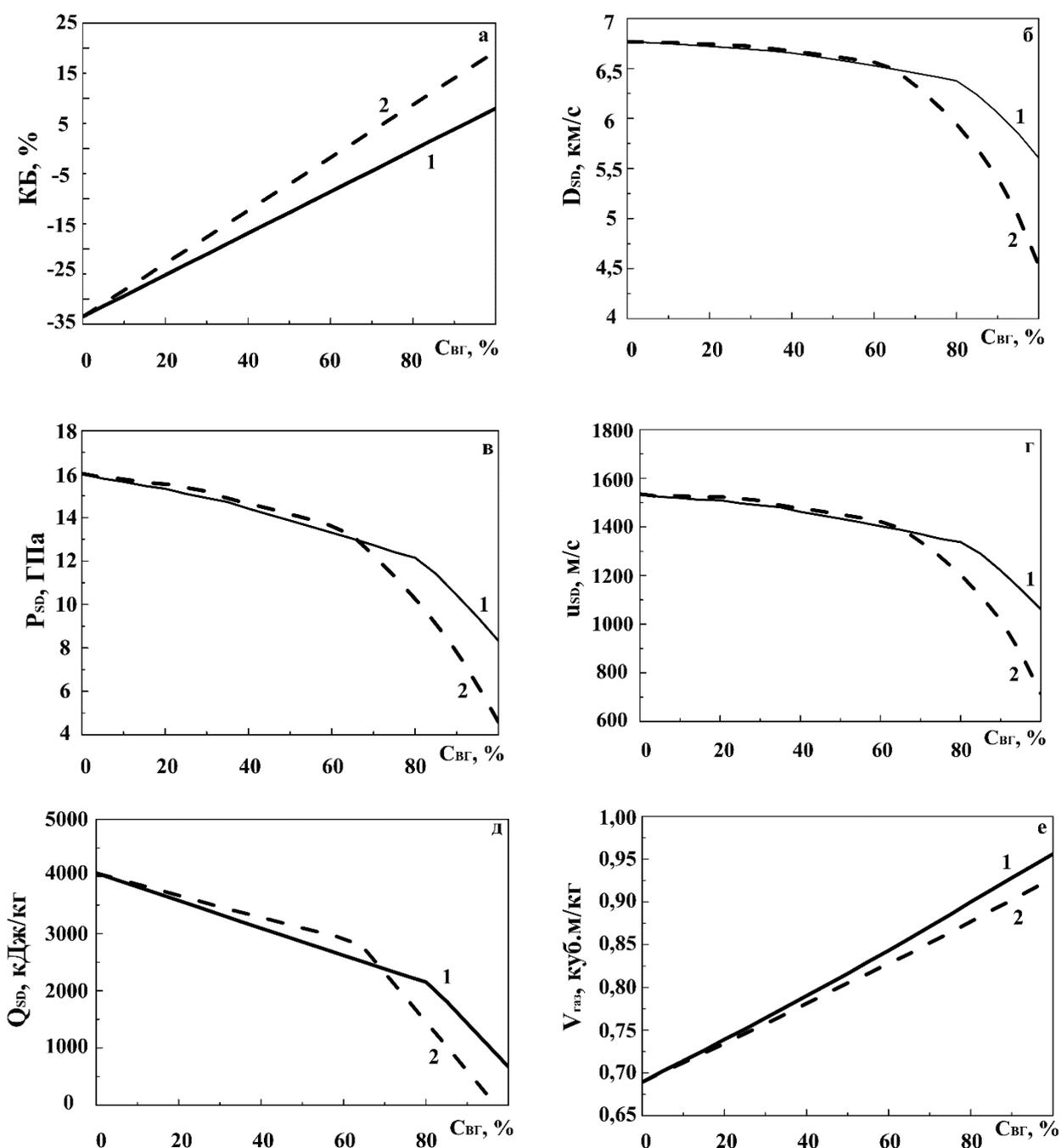


Рисунок 2.1 – Сравнительные результаты расчетов составов ПП/водный гель для водных гелей Состав №1(1) и Состав №2(2):

а) кислородный баланс; б) скорость детонации; в) Давление детонации в точке Чепмена-Жуге; г) массовая скорость в точке Чепмена-Жуге; д) Теплота взрыва; е) объем продуктов взрыва.

После перехода кислородного баланса в положительную область значений наблюдается резкое падение расчетных параметров детонации для

обоих типов составов. Объем газообразных продуктов монотонно возрастает с увеличением содержания водного геля (рис. 2.1 е) и для состава на основе водного геля Состава №1 несколько больше за счет присутствия дополнительного топливного компонента – карбамида.

Состав продуктов детонации состоит преимущественно из азота и оксидов водорода и углерода (II и IV). В случае перехода кислородного баланса состава в положительную область значений в продуктах появляются оксиды азота, резко усугубляющие суммарную эквивалентную экотоксичность, в виду чего рекомендуется удерживать кислородный баланс взрывчатых составов при несколько отрицательных значениях [75].

2.2. Заключение по результатам оценочных расчетов

Разработчиками программного комплекса Shock and Detonation оговаривается его применимость для расчета гомогенных взрывчатых систем, ввиду чего полученные в ходе оценочного расчета значения могут иметь значительные расхождения с реальными значениями, получаемыми в ходе экспериментов. Основной причиной расхождений может являться выраженная гетерогенность исследуемых составов, требующая учета ряда дополнительных процессов и условий, совокупно вносящих ощутимый вклад в течение детонации.

Основной целью оценочного расчета является получение данных для выявления степени расхождения с реальными значениями и оценки применимости использованных программных средств для расчета исследуемых систем в виду отсутствия аналогичного программного обеспечения, применимого к гетерогенным взрывчатым системам. Учитывая широкие возможности создания различных по своей рецептуре и свойствам водных гелей и их достаточно выраженное влияние на итоговые детонационные параметры, необходимость предварительной оценки

детонационных характеристик является важной составляющей процесса разработки взрывчатых составов.

Сравнение результатов оценочного расчета с экспериментально полученными значениями параметров детонации представлено в соответствующих разделах Главы 3.

3. Экспериментальное исследование детонационных характеристик пороховых водно-гелевых составов на основе энергоемких компонентов утилизируемых боеприпасов

3.1 Объекты исследования

Объектами исследования являлись пороховые водно-гелевые составы, изготовленные в лабораторных условиях в РХТУ им. Д.И. Менделеева с использованием следующих компонентов:

В составах водных гелей:

- Аммиачная селитра марки Б ГОСТ 2-85;
- Натрий азотнокислый чистый ГОСТ 4168-66;
- Полиакриламид (ПАА) гранулированный сульфатный ОСТ 95.284-82 (гранулы высушивались при температуре 373-383 К, измельчались в шаровой мельнице и просеивали без остатка через сито с ячейками 400 мкм) [76];
- Карбамид марки Б ГОСТ 2081-92;
- Натрия тиосульфат кристаллический ГОСТ 244-76;
- Калий двуххромовокислый ГОСТ 4220-75;
- Кальций хлористый безводный гранулированный ГОСТ 450-77 с изм. 1-3.;
- Хром (III) азотнокислый 9-водный. ГОСТ 4471-78 с изм. 1.

Пироксилиновые пороха:

- Порох артиллерийский пироксилиновый ОСТ 84-2232 марок 6/7 гр, 9/7, 14/7, извлеченный из утилизируемых боеприпасов, или находившийся на хранении и списанный в связи с превышением ГСХ. Основные характеристики порохов данных марок приведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 - Характеристики различных марок ПП [77]

Марка ПП	Наименование характеристики				
	Форма зерна	Толщина горящего свода, мм	Диаметр зерна, мм	Диаметр канала зерна, мм	Длина зерна, мм
6/7 гр	Цилиндр 7-канал.	0,65-0,80	3,50-4,40	0,30-0,40	4,0-6,0
9/7	Цилиндр 7-канал	0,95-1,10	5,00-6,20	0,40-0,60	11,5-12,6
14/7	Цилиндр 7-канал	1,20-1,40	6,90-8,00	0,70-0,80	16,0-18,0

3.2. Методики изготовления пороховых водно-гелевых составов

Приготовление пороховых водно-гелевых составов включает в себя 2 основных этапа:

1. Приготовление наполнителя - водного геля, на основе водного раствора используемых в исследовании веществ.
2. Введение энергоемкого компонента в виде зерен пироксилинового пороха.

3.2.1. Методика приготовления водных гелей

Для проведения исследований влияния химического состава наполнителя на детонацию исследуемых составов были выбраны и разработаны рецептуры водных гелей, приведенные в таблице 3.2.

Таблица 3.2 - Составы водных гелей

Компонент	Содержание, масс. %		
	Состав №1	Состав №2	Состав №3
NH_4NO_3	45,0	50,0	-
NaNO_3	15,0	20,0	-
$(\text{NH}_2)_2\text{CO}$	10,0	-	-
H_2O	30,0	30,0	61,3
CaCl_2	-	-	38,7
ПАА*	1,2	1,2	1,2
$\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5 \text{H}_2\text{O}^*$	0,2	0,2	0,2

*Сверх 100%

Содержание компонентов в Составе №1 взято из [63] и идентично водному гелю, используемому в [64]. Разработчиками рецептуры поясняется, что подобный состав водного геля близок к эвтектическому составу тройной системы $\text{NH}_4\text{NO}_3\text{-NaNO}_3\text{-(NH}_2)_2\text{CO}$. На практике это позволяет минимизировать кристаллизацию компонентов из раствора в максимально широком диапазоне температур. Рецепт Составы №2 подобрана таким образом, что при исключении топливного компонента (Карбамида) достигается максимально идентичная Составу №1 плотность. Содержание хлорида кальция в Составе №3 выбрано с учетом получения водного геля с плотностью, идентичной для содержащих нитраты гелей.

Состав №1. Навеска гранулированной аммиачной селитры, подаваемая порционно, растворялась в воде, термостатируемой при 40°C. Затем в раствор добавлялись навески карбамида и тиосульфата натрия. После полного растворения карбамида и тиосульфата в раствор при постоянном перемешивании механической мешалкой малыми порциями высыпалась навеска смеси нитрата натрия с ПАА. Раствор термостатировался при 60°C и

постоянном перемешивании до полного растворения всех компонентов. Процесс приготовления занимает от 40 до 60 минут. Плотность полученного геля должна составлять $1,38 \pm 0,2$ г/см³ [63].

Состав №2. Навеска гранулированной аммиачной селитры, подаваемая порционно, растворялась в воде, термостатируемой при 40°C. Затем в раствор добавлялась навеска тиосульфата натрия. Далее процесс приготовления идентичен процессу приготовления Состава №1. Плотность полученного геля должна составлять $1,38 \pm 0,2$ г/см³.

Состав №3. Навеска тиосульфата натрия растворялась в воде комнатной температуры. Затем растертая смесь хлорида кальция с ПАА порционно растворялась в воде, термостатируемой при 60°C и постоянном перемешивании механической мешалкой. Плотность полученного геля должна составлять $1,38 \pm 0,2$ г/см³.

Контроль плотности при температуре гелей 20°C осуществлялся с помощью ареометров и гидростатических весов [78].

3.2.2. Методика изготовления взрывчатых составов

При введении энергоемкого компонента к навеске водного геля добавлялись навески пироксилинового пороха выбранной марки и раствора бихромата калия. Полученная смесь тщательно перемешивалась до получения однородного состава.

Незначительная разница ($0,1-0,2$ г/см³) между плотностями водных гелей и зерен пироксилинового пороха, позволяет достаточно продолжительное время сохраняться однородному распределению пороховых элементов в составе, но для большей надежности производилось структурирование состава трехвалентными ионами.

Бихромат калия, вступая в химическую реакцию с тиосульфатом натрия, постепенно образует в качестве продуктов взаимодействия ионы

Cr^{3+} , которые служат в качестве структурирующих агентов, связывая ПАА в 3-х мерную сетчатую структуру [79]. Образование в растворе трехмерной структурной сети приводит к переходу наполнителя в желеобразное состояние, тем самым сохраняя равномерное распределение зерен пироксилинового пороха по составу и отчасти придавая водоустойчивость.

Порция готового состава помещалась в трубки для определения плотности. Плотность, ρ , рассчитывали, зная вес состава и объем трубки. Измерение проводили не менее трех раз. Истинное значение плотности определяли по среднему значению между всеми измерениями. Точность измерения плотности составляла $\pm 0,02 \text{ г/см}^3$.

3.3. Методы и методики проведения исследований

3.3.1. Исследование критических условий детонации

Для объектов исследования в качестве критериев критических условий, определяющих детонационную способность, были выбраны критический диаметр детонации исследуемого состава и содержание водного геля в составе, как менее чувствительного к инициирующему действию компонента.

Лабораторное определение критического диаметра детонации представляет собой нахождение диаметра заряда, меньше которого распространение процесса взрывного превращения по заряду не позволяет поддерживать детонационный режим.

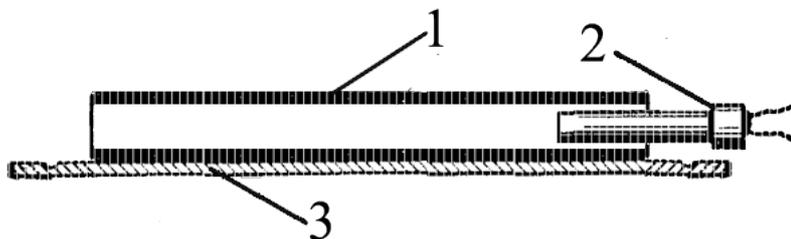
Наиболее удобным для объектов исследования методом является метод цилиндрических зарядов, заключающийся в испытании серии зарядов различного диаметра на полноту детонации. Для изготовления зарядов в качестве оболочки используются трубки из стекла, бумаги или пластика. Длина трубки должна превышать 10 диаметров, а плотность заряда должна быть постоянной по всей длине для обеспечения достаточной надежности

результатов. Готовые заряды крепят к металлической пластине-свидетелю, отмечая на ней начало и окончание заряда. По деформации пластины-свидетеля в результате подрыва заряда оценивают полноту детонации.

Испытывают несколько зарядов, постепенно уменьшая их диаметр, пока не будет получен отказ или затухание детонации. Критическим считают среднее арифметическое между наименьшим диаметром, при котором заряд детонировал до конца, и наибольшим диаметром, при котором произошло затухание [80].

Исследование влияния содержания водного геля на детонацию состава заключалось в определении детонационной способности при повышении массовой доли наполнителя.

Метод заключается в приготовлении составов с различным содержанием наполнителей, из которых формируются заряды с одинаковыми геометрическими параметрами. Изготовленные таким образом заряды крепятся к металлической пластине-свидетелю, переносятся в бронекамеру, где осуществляют инициирование детонации. Схема заряда представлена на рисунке 3.1.



1 - Заряд; 2 - Электродетонатор; 3 - Пластина-свидетель.

Рисунок 3.1 - Схема цилиндрического заряда для определения полноты детонации.

Оценка влияния каждого состава на детонационную способность осуществляется определением полноты протекания взрывного превращения в форме детонации по состоянию пластины-свидетеля после взрыва. Примеры деформации пластин-свидетелей в зависимости от полноты детонации представлены на рисунке 3.2.

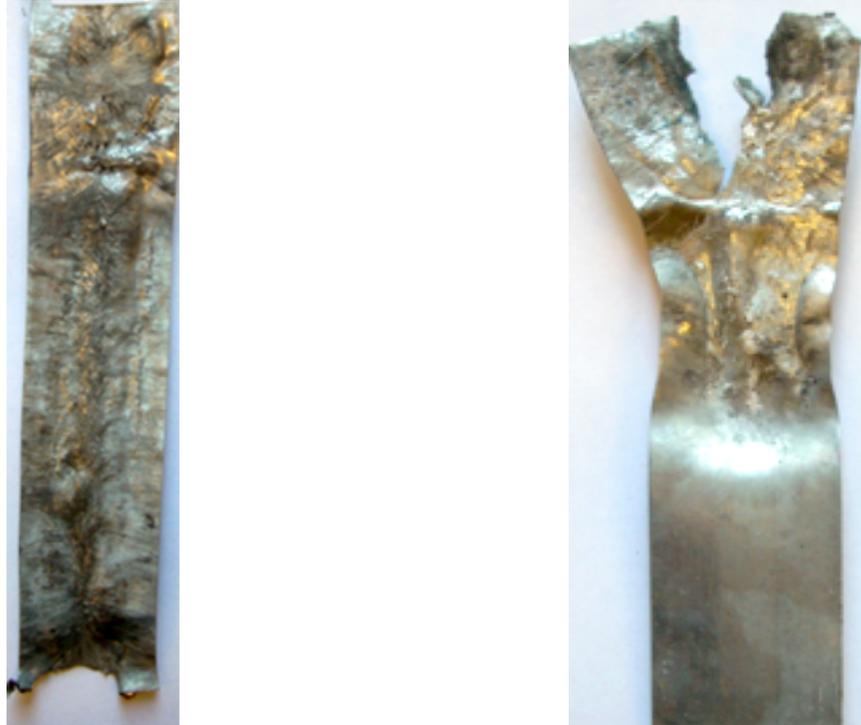


Рисунок 3.2 - Фотографии пластин-свидетелей:

а) полная детонация заряда б) затухающая детонация заряда.

Для исследования критических условий детонации изготавливались заряды цилиндрической формы. В качестве оболочки использовались полимерные трубки внутренним диаметром 20,5 мм (заряды для изучения влияния содержания наполнителя) и стеклянные или полимерные трубки, или пробирки различного диаметра (заряды для изучения критического диаметра), длиной свыше 10 диаметров, толщиной стенок 1,0-1,4 мм. При использовании трубки один конец закрывался пробкой или клейкой лентой. Затем в оболочку помещался исследуемый состав и оставлялся при комнатной температуре до завершения структурирования.

После завершения структурирования заряд прикреплялся к металлической пластине-свидетелю длиной 250-300 мм, шириной 25-40 мм и толщиной 1,0-1,5 мм, на которой наносились метки начала и окончания заряда.

После этого заряд переносился в бронеканеру, где по средствам осуществлялось инициирование капсюлем ЭД-8, ЭД-8А или идентичным по мощности инициатором. После взрыва находили пластину-свидетель, по состоянию которой оценивали детонационную способность.

3.3.2. Исследование следообразования взрыва

Для объектов исследования с целью получения представлений о процессах распространения детонации проводилось исследование следообразования зарядов ПВГС.

Лабораторное исследование следообразования представляет собой получение слепков торцов зарядов на основе исследуемых составов при их взрыве, позволяющее выявить особенности течения детонационного процесса по деформации специально подготовленных пластин-свидетелей.

Для изготовления зарядов в качестве оболочки использовались трубки из картона диаметром 45 мм и длиной 60 мм. Для оценки наличия ускорения распространения процесса детонации по пороховым элементам формировались заряды с соосным расположением пороховых элементов для выявления следов их более раннего воздействия на пластину, до достижения основной ударной волны.

В качестве пластин-свидетелей использовались алюминиевые пластины размерами приблизительно 70x70 мм и толщиной около 8,5 мм, рабочая поверхность которых предварительно подвергалась шлифованию. Пластина-свидетель размещалась на стальной бронеплите, после чего на нее устанавливался заряд ПВГС и детонатор.

Фотографии пластины-свидетеля до испытаний и подготовленного к эксперименту заряда представлены на рисунках 3.3 и 3.4.



Рисунок 3.3 - Фотография пластины-свидетеля для исследования слеодообразования



Рисунок 3.4 - Фотография подготовленного к испытаниям заряда ПВГС

Иницирование производилось детонатором, состоящим из электрического мостика, покрытого слоем азида свинца, детонационного плосковолнового генератора, состоящего из гексогена насыпной плотности, и усилителя из смеси гексогена и октогена.



Рисунок 3.5 - Фотография пластины свидетеля после испытаний

После испытаний находили пластину-свидетель. Фотография примера пластины после испытаний представлена на рисунке 3.5.и проводили анализ по деформации пластины с учетом расположения пороховых элементов в торце заряда до взрыва.

3.3.3. Исследование параметров детонационных и ударных волн электромагнитным методом

3.3.3.1. Методические основы

Для изучения детонационных волн объектов исследования использовался электромагнитный метод [22, 81, 82], позволяющий регистрировать скорость движения среды за фронтом детонационной волны.

Сущность электромагнитного метода заключается в фиксировании изменений электрического сигнала от датчика, вовлекаемого в движение продуктами взрыва в наведенном магнитном поле [83, 84].

Практическая реализация предусматривает введение в заряд проводящего «П»-образного датчика перпендикулярно оси заряда. Заряд помещается в постоянное магнитное поле таким образом, чтобы рабочая плоскость датчика при движении пересекала силовые линии магнитного поля. Схема расположения заряда с датчиком представлена на рисунке 3.6.

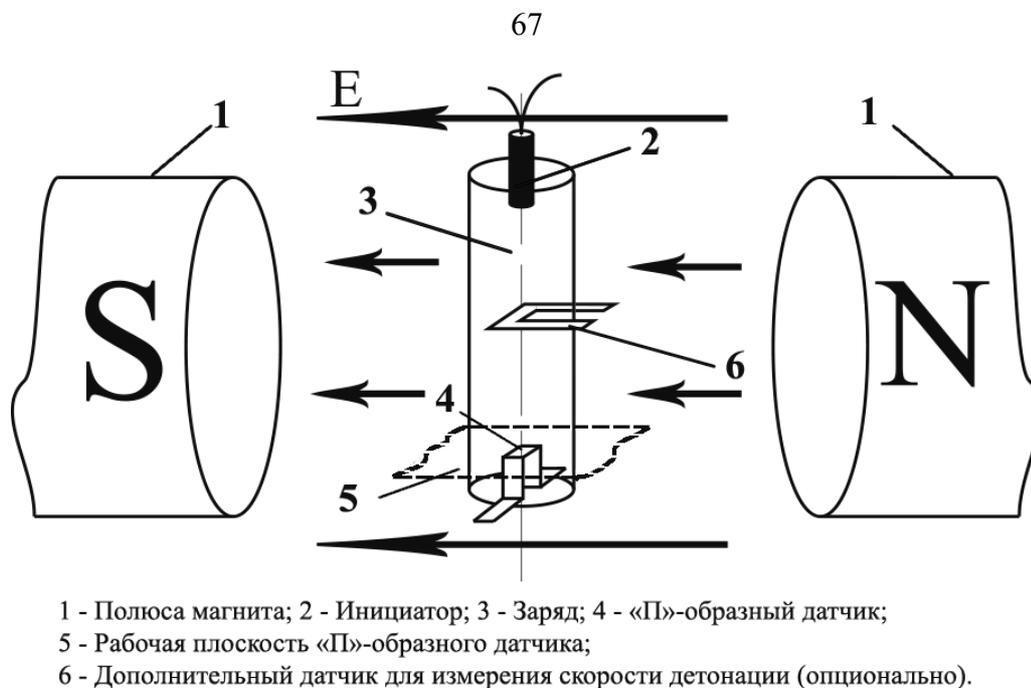


Рисунок 3.6 - Схема расположения заряда с датчиком в магнитном поле

При прохождении детонационной волны по заряду «П»-образный датчик вовлекается в движение продуктами взрыва. При его движении в магнитном поле на концах датчика наводится ЭДС, изменение которой служит аналитическим сигналом и фиксируется цифровым осциллографом. Типовая схема установки для изучения параметров детонационных волн электромагнитным методом представлена на рисунке 3.7. Многие осциллографы не оснащены компенсационным сопротивлением, терминирующим искажения измерительной линии, в виду чего используется дополнительное сопротивление, обозначенное на схеме как **R**.

ЭДС прямо пропорциональна длине аналитической части датчика, его скорости движения и напряженности магнитного поля, что выражается соотношением (3.1).

$$E = B \cdot U \cdot l, \quad (3.1)$$

где E – ЭДС, В;

B – магнитная индукция, Тл;

U – скорость движения проводника, м/с;

l – длина проводника, м.

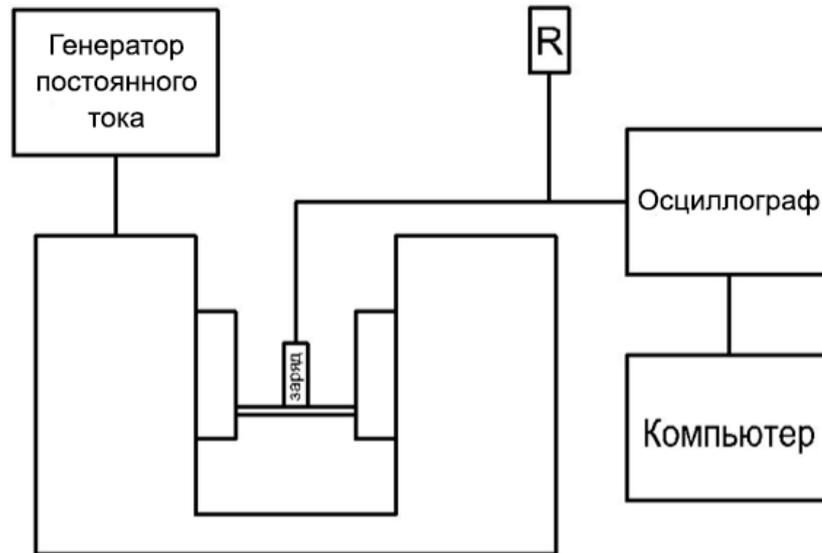


Рисунок 3.7 - Типовая схема установки для определения параметров детонационных волн электромагнитным методом

В случае постоянной магнитной индукции, ЭДС становится функцией только скорости движения датчика. При определенных условиях - размеры датчика, его толщина и плотность материала скорость движения датчика практически совпадает со скоростью движения продуктов взрыва. Время, в течение которого возможно осуществление надежного измерения массовой скорости, определяется характером деформации датчика в детонационной волне [83].

Для определения скорости детонации на известном расстоянии L от основного датчика может быть расположен дополнительный («рвущийся») датчик, выполненный из непрочного токопроводящего материала, например, очень тонкой (0,01 мм) алюминиевой фольги. Дополнительный датчик разрушается в момент прохождения детонационной волны примерно за 0,5 мкс, однако возникший при этом сигнал достаточен для того, чтобы

служить отметкой времени. При известных расстоянии L и времени между сигналами от «рвущегося» и «П»-образного датчика t согласно 3.2 рассчитывается скорость детонации.

$$D = L \div t, \quad (3.2)$$

где D – скорость детонации, м/с;

L – расстояние между датчиками, м;

t – время между сигналами датчиков, с.

3.3.3.2 Методика проведения исследований

Для определения параметров детонации исследуемых составов электромагнитным методом изготавливались заряды цилиндрической формы. В качестве оболочки использовались картонные трубки диаметром 25 мм и толщиной стенки 1,5 мм и полипропиленовые трубки внутренним диаметром $d_{вн}=20,5$ мм и $d_{вн}=28$ мм и длиной $H=100$ мм, толщина стенок 2,3 мм и 2,0 мм соответственно. Влияние материала оболочек на детонационный процесс не обнаружено, в виду чего предпочтение отдавалось полипропиленовым оболочкам, неподверженным смачиванию водным гелем. С одной стороны основания трубка заклеивалась полиэтиленовой пленкой, на уровне 30 мм от заклеенного основания проделывались отверстия для введения дополнительного «рвущегося» датчика с целью параллельного измерения скорости детонации.

В оболочку вводилась часть исследуемого состава, до уровня введения «рвущегося» датчика. Далее в трубку аккуратно внедрялся «рвущийся» датчик представляющий собой полоску алюминиевой фольги толщиной не более 0,05 мм. Во избежание искривлений и смещений внутреннего датчика, его положение фиксировалось порцией геля с ускоренным структурированием, а для сохранения однородности состава в фиксирующий

слой аккуратно, не деформируя «рвущийся» датчик, вводились зерна пороха в соответствующих составу пропорциях. Ускорение структурирования геля обеспечивалось введением дополнительного количества ионов Cr^{3+} в составе раствора нитрата хрома. После структурирования фиксирующего слоя происходит дальнейшее заполнение трубки составом до уровня 60-65 мм от «рвущегося» датчика. По окончании заполнения заряд оставлялся при комнатной температуре до завершения структурирования, определяемого визуально по консистенции взрывчатого состава.

В работах Дремина А.Н. и Шведова К.К. установлено [22, 81] что наибольшее влияние на время завала переднего фронта осциллограммы оказывает толщина датчика и удельный вес материала, из которого он сделан. С учетом этого «П»-образный датчик изготавливался из полоски алюминиевой фольги толщиной 0,12 мм и шириной 3-4 мм в форме буквы «П». Данный материал датчика позволяет обеспечить достаточную минимализацию искажения осциллограммы. Горизонтальная площадка, длиной $l=5$ мм, располагается перпендикулярно оси заряда и служит рабочей поверхностью датчика.

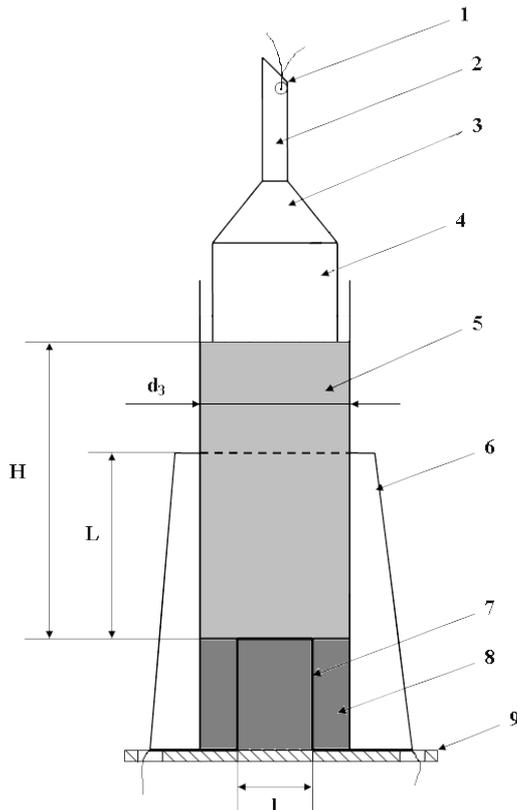
При работе с гетерогенными системами, подобными ПВГС, установка и сохранение от деформации «П»-образного датчика внутри состава труднореализуемы. В связи с этим применялась модифицированная методика, разработанная В.Г. Хотиным [83], в которой электромагнитный датчик устанавливался на границе взрывчатый состав-парафин. Для этого «П»-образный датчик приклеивался на картонную подставку, которая служит основанием заряда, и заливался парафином. Парафин был предварительно вакуумирован для удаления возможных пузырьков воздуха и повышения однородности отлива.

Готовый заряд с исследуемым составом устанавливался вплотную на парафиновую пробку модифицированного «П»-образного датчика и фиксировался. К свободным концам обоих датчиков припаивались

отводящие провода. Надежность контактов проверялась тестером. Схема подготовленного заряда с датчиками представлена на рисунке 3.8.

Подготовленный заряд с датчиками переносился в бронекамеру и укреплялся между полюсами электромагнита строго вертикально. Отводящие провода соединялись спайкой с измерительной линией, подключаемой к осциллографу.

Постоянное и однородное магнитное поле создавалось электромагнитом с диаметром полюсов 80 мм и зазором между ними 85 мм. Обмотка электромагнита защищена от действия взрыва титановыми полуцилиндрами, а с торцов алюминиевыми дисками. Генератор ПН-175 питает электромагнит постоянным током. Величина тока регулировалась в небольших пределах с помощью реостата, включенного в обмотку генератора постоянного тока. Достижимая величина магнитной индукции при токе в 24 А составляла 0,21 Тл (величина магнитной индукции контролируется с помощью прибора ИМИ-1). Сигнал датчика по коаксиальному кабелю измерительной линии поступал на вход одного из каналов цифрового запоминающего осциллографа-приставки Velleman PCS500 (чувствительность от 5 мВ до 15 В, временная развертка от 20 нс до 100 мс) соединенного с компьютером или цифрового осциллографа Rigol DS-4024 (чувствительность от 1 мВ до 1 В, временная развертка от 2 нс до 1000 с). Стабилизатор и блок питания обеспечивают нормальный режим работы осциллографа при включении в сеть переменного тока с напряжением 220 В и частотой 50 Гц.



- 1 – Точечный инициатор;
 2 – Промежуточный детонатор из НМХ;
 3 – Генератор плоской ДВ;
 4 – Шашка прессованного А-IX-1;
 5 – Исследуемый состав;
 6 – «Рвущийся» датчик;
 7 – «П»-образный датчик;
 8 – Парафиновая пробка;
 9 – Картонная подставка;
 d_3 – диаметр заряда, мм;
 H – длина заряда, мм;
 L – расстояние между датчиками, мм;
 l – Горизонтальная площадка датчика, мм.

Рисунок 3.8 - Схема подготовленного заряда для определения параметров детонационных волн электромагнитным методом

Детонацию в исследуемом составе инициировали детонатором, состоящим из электрического мостика, покрытого слоем азида свинца, детонационного плосковолнового генератора, состоящего из гексогена насыпной плотности, и шашки прессованного А-IX-1. Фотография готового к испытаниям заряда представлена на рисунке 3.9.

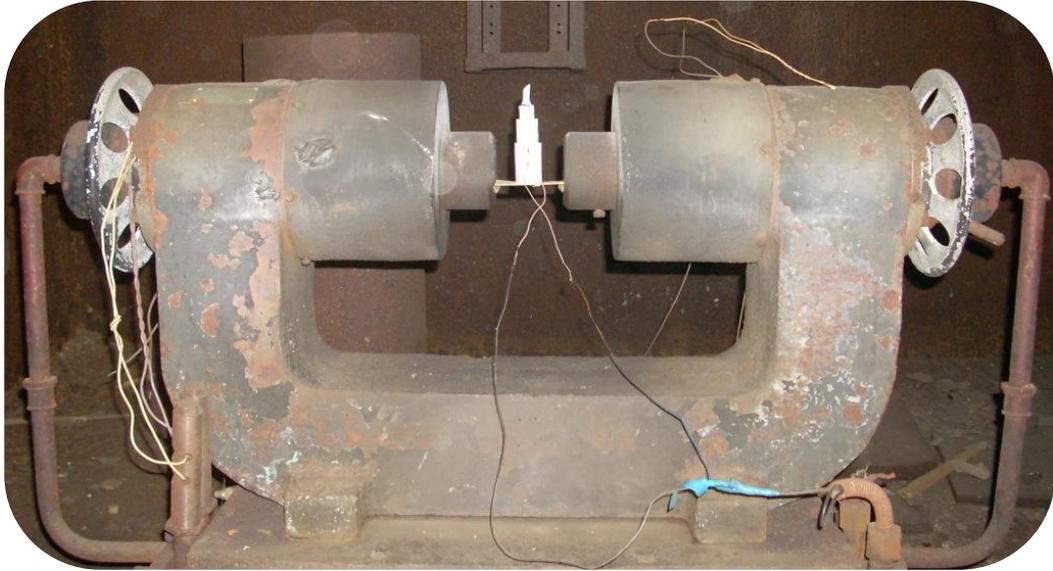


Рисунок 3.9 - Фотография готового к испытаниям электромагнитным методом заряда

Данные о ходе детонационного процесса поступают на экран монитора в виде совокупности точек (осциллограммы), представленных в координатах «ЭДС, В – **Время**, мкс» (**E-t**). Типичная осциллограмма представлена на рисунке 3.10. Полученные осциллограммы обрабатываются в соответствии с соотношением (3.1), переводясь в координаты «**Массовая скорость**, м/с – **Время**, мкс» (**u-t**).

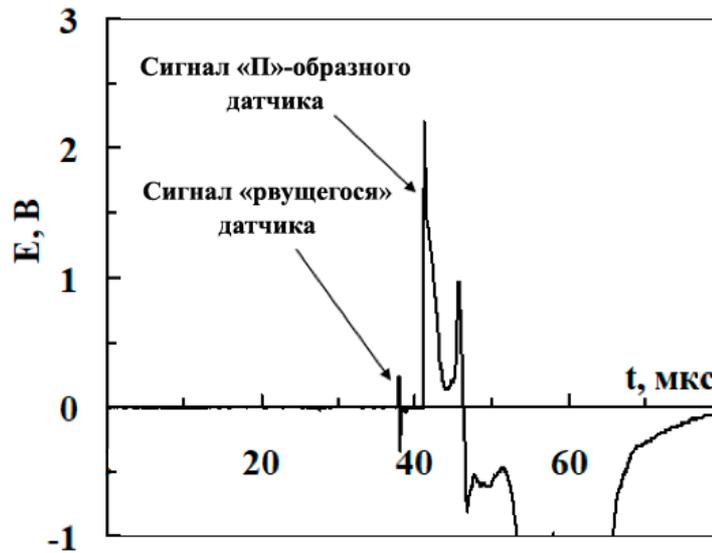


Рисунок 3.10 - Типичная осциллограмма записи изменения ЭДС во времени

Поскольку «П»-образный датчик размещен на границе раздела состав-парафин, то полученную скорость перемещения границы раздела (U), необходимо пересчитать в массовую скорость продуктов детонации в составе (u). Хотиным В.Г. с сотрудниками [85] была экспериментально установлена зависимость между скоростью движения продуктов взрыва во взрывчатом веществе и скоростью движения границы раздела ВВ-парафин, представленная на рисунке 3.11. Полученная кривая носит достаточно общий характер и подтверждается для большого числа взрывчатых составов в широком диапазоне изменения их рецептуры и плотности заряда.

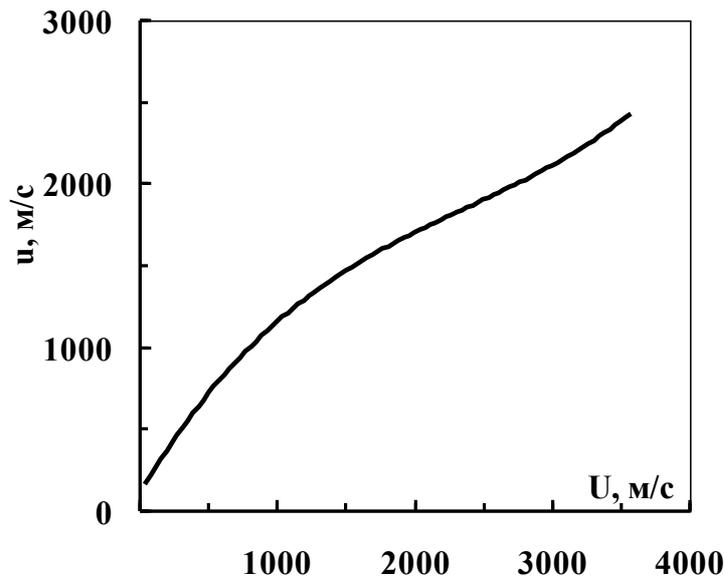


Рисунок 3.11 - Зависимость скорости движения продуктов взрыва (u) от скорости перемещения границы раздела (U)

Представленная на рис. 3.11 зависимость может быть описана полиномом третьей степени (3.3). При этом данная формула применима в интервале массовых скоростей $U=300\div 3600$ м/с, где ошибка вычислений не превышает 3 м/с.

$$u=164,58+1,32\cdot U-3,85\cdot 10^{-4}\cdot U^2+5,49\cdot 10^{-8}\cdot U^3 \quad (3.3)$$

По зависимости (3.3) рассчитывали значения u и выполняли построение графика в координатах « u , м/с – t , мкс».

По осциллограммам, полученным при проведении экспериментов, рассчитывали скорость детонации, D , по времени прохождения детонационной волны между началами сигналов от «рвущегося» и «П»-образного датчиков, t , расположенных на расстоянии L друг от друга (обычно 30 мм), с использованием формулы (3.2).

Для каждого исследуемого состава было проведено не менее 3 параллельных опытов. Полученные зависимости $E(t)$ для одного из

исследуемых составов показаны на рисунке 3.12. Осциллограммы отличаются достаточно хорошей сходимостью аналитической части.

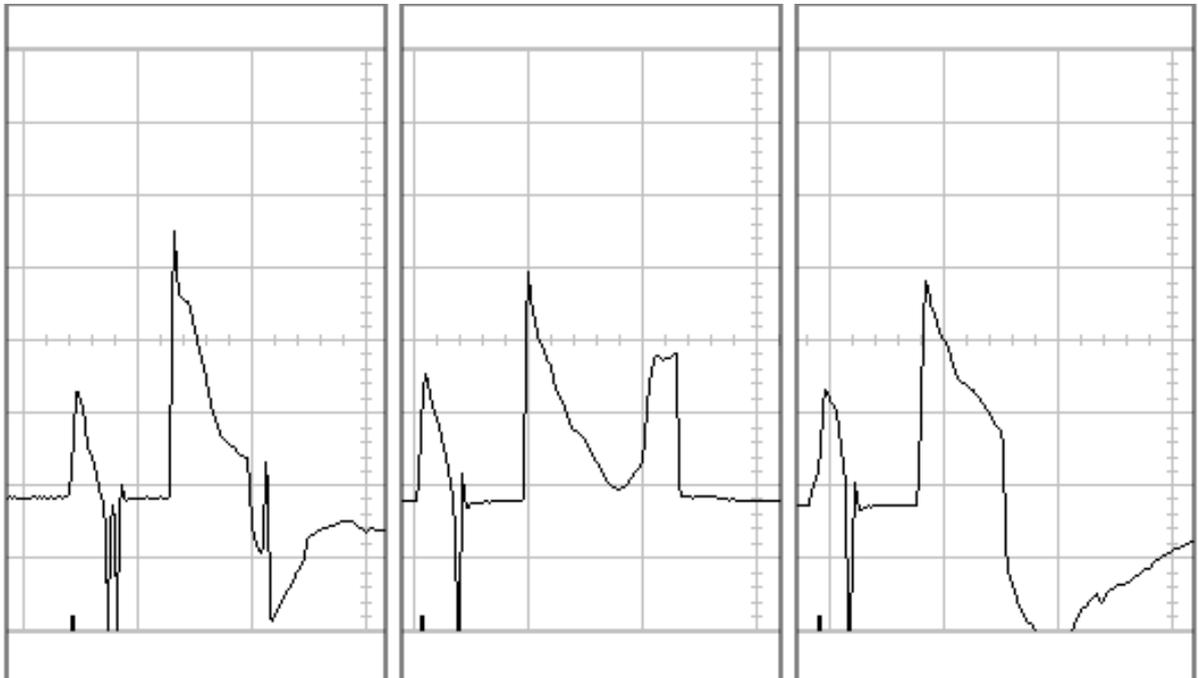


Рисунок 3.12 - Осциллограммы параллельных опытов для водного геля Состава №1 с ПП марки 9/7

Перед каждой серией опытов проводилась проверка надежности работы системы с использованием зарядов из флегматизированного гексогена (состав А-IX-1). Получаемые в ходе проверок данные о параметрах детонационной волны совпадали с ранее определенными [22].

3.4 Результаты и обсуждение

3.4.1. Влияние состава водного геля на критические условия детонации пороховых водно-гелевых составов

Наличие некоторого влияния химически активного наполнителя на параметры детонации порохового состава в сравнении с химически инертным наполнителем упоминается в работах Апина А.Я. [5]. В рамках настоящей работы проведена оценка влияния химического состава водных гелей, используемых в качестве наполнителей ПВГС, на детонационную способность взрывчатых составов на основе ПП, полученных в ходе промышленной утилизации. В качестве критериев критических условий детонации были приняты критический диаметр детонации и концентрация водного геля в составе ПВГС, являющиеся наиболее вероятными факторами, влияющими на способность исследуемых составов к взрывному превращению в форме детонации. Также было исследовано слеодообразование ПВГС, с целью установления проявлений ускоренной детонации пороховых элементов и оценки степени их влияния на распространение детонации.

3.4.1.1. Влияние состава водного геля на критический диаметр детонации пороховых водно-гелевых составов

Экспериментально исследовалось влияние диаметра заряда на детонационную способность ПВГС на основе трех разных водных гелей одинаковой плотности с ПП марки 6/7 гр в оболочках из полипропилена, картона или стекла толщиной 0,9-2,3 мм. Подготовка и проведение

исследований проводилась в лабораториях Тушинского комплекса РХТУ им. Д.И. Менделеева. Результаты экспериментов приведены в таблицах 3.3.-3.5.

Таблица 3.3 - Детонация составов на основе водного геля Состав №1

Содержание ПП, масс. %	ρ , г/см ³	Диаметр заряда, мм		
		Детонация	Затухание	Отказ
63	1,42	20,5	-	-
63		16,2	-	-
63		16,2	-	-
63		13,3	-	-
63		13,3	-	-
63		12,5	-	-
63		-	12,5	-
63		10,1	-	-
63		10,1	-	-
63		-	10,1	-
63		-	-	7,8
63		-	-	7,8
63		-	-	7,8

Таблица 3.4 - Детонация составов на основе водного геля Состав №2

Содержание ПП, масс. %	ρ , г/см ³	Диаметр заряда, мм		
		Детонация	Затухание	Отказ
63	1,42	20,5	-	-
63		16,2	-	-
63		16,2	-	-
63		13,3	-	-
63		13,3	-	-
63		-	13,3	-
63		12,5	-	-
63		-	12,5	-
63		-	10,1	-
63		-	-	10,1
63		-	-	10,1

Таблица 3.5 - Детонация составов на основе водного геля Состав №3

Содержание ПП, масс. %	ρ , г/см ³	Диаметр заряда, мм		
		Детонация	Затухание	Отказ
63	1,42	20,5	-	-
63		-	20,5	-
63		20,5	-	-
63		-	16,2	-
63		-	16,2	-
63		-	13,3	-
63		-	-	13,3
63		-	-	13,3
63		-	-	13,3

Содержание пироксилинового пороха данной марки в ПВГС обусловлено созданием оптимальных условий детонации ПП в присутствии наполнителя с коэффициентом заполнения пустот между пороховыми элементами максимально приближенным к 1,0 [5, 6].

Критерием детонации служило полное прохождение детонационного процесса по заряду. Затуханием признавали прекращение детонации при наличии явных признаков развития детонационного процесса в исследуемом составе, выражающихся в характерных для воздействия ударных волн деформациях металлической пластины-свидетеля, визуально отличимых от подобных следов воздействия инициатора. Наиболее вероятными причинами затухания являются локальные нарушения структуры заряда, обеспечивающей передачу детонации, разрушение микроструктуры некоторых пороховых элементов, приводящие к неспособности развития в пороховом элементе детонационного процесса или особенности распространения детонации, характерные для ПВГС. Отказ определялся присутствием на пластине-свидетеле только характерных следов воздействия ударной волны инициатора.

На рисунке 3.13 представлены сводные результаты по всем исследованным составам.



Рисунок 3.13 - Результаты определения критического диаметра детонации для ПВГС на основе водных гелей различного химического состава

Минимальные значения диаметра, при котором наблюдается устойчивая детонация в ПВГС на основе ПП марки 6/7 гр с наполнителем в виде Состава №1, составляет 10,1 мм при содержании ПП 63 масс. %, отказы получены для диаметра 7,8 мм, таким образом значение критического диаметра находится в интервале 7,8-10,1 мм. В случае использования в качестве наполнителя Состава №2, критический диаметр детонации несколько возрастает до 10,1-12,5 мм. При использовании в качестве наполнителя Состава №3, критический диаметр располагается в интервале 13,3-20,5 мм.

Полученные значения критического диаметра имеют некоторую выраженную особенность при учете расчетной энергоемкости исследованных систем, представленных в таблице 3.6. Расчет теплоты взрывного превращения ПВГС произведен с помощью программных комплексов SD и REAL, протоколы расчетов представлены в Приложении 2.

Таблица 3.6 - Сравнительные значения критического диаметра детонации ПВГС

Водный гель	Содержание ПП, масс. %	ρ водного геля, г/см ³	ρ ПВГС, г/см ³	Критический диаметр, мм	Теплота взрывного превращения, кДж/кг
Состав №1	63	1,38	1,42	7,8-10,1	3149
Состав №2	63			10,1-12,5	3321
Состав №3	63			13,3-20,5	2679

Несмотря на более высокую расчетную теплоту взрыва при использовании Состава №2, ПВГС с Составом №1 демонстрирует большую детонационную способность по критерию критического диаметра детонации. Наиболее вероятным объяснением этого являются особенности режима энерговыделения в детонационном процессе, характерные для детонации гетерогенных систем, в то время как расчетами описываются преимущественно гомогенные составы. В частности, водный гель Состава №1 является более реакционноспособным ввиду наличия в составе растворенного топливного компонента – карбамида, в то время как водный гель Состава №2 не обладает подобной внутренней энергоемкостью и не способен быстро реализовать свой окислительный потенциал. В результате наблюдается пониженное энерговыделение в момент прохождения детонационной волны относительно потенциально возможного при детонации в гомогенной системе, что в свою очередь сказывается на итоговых детонационных параметрах ПВГС. Водный гель Состава №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 [39] о детонации зеренных ПП в сухом ненаполненном состоянии указывает на выраженную роль наличия водосодержащего

наполнителя на детонационную способность ПП, проявляющаяся в том числе у зерненных ПП с истекшими ГСХ.

3.4.1.2 Влияние содержания водного геля на детонационную способность пороховых водно-гелевых взрывчатых составов

Наличие влияния химического состава водного геля на критический диаметр детонации указывает на прямое участие водных гелей в детонационном процессе, помимо обеспечения передачи детонации по пороховым элементам. Влияние содержания водного геля в составе ПВГС с учетом его химического состава на детонационную способность изучалось для взрывчатых составов на основе трех разных водных гелей одинаковой плотности с пироксилиновым порошком марки 6/7 гр. Эксперименты проводились с зарядами в полипропиленовых оболочках с внутренним диаметром $d=20,5$ мм и толщиной стенки 2,3 мм, для которых была получена стабильная детонация ПВГС на основе всех исследуемых водных гелей. Для подтверждения устойчивой детонации проводились испытания минимум 2-х зарядов для каждого состава. В случае проявления в одном из зарядов неполной детонации (затухания) или отказа детонации, проводились испытания дополнительных зарядов тех же геометрических параметров и того же состава для уточнения детонационной способности. Подготовка и проведение исследований проводилась в лабораториях Тушинского комплекса РХТУ им. Д.И. Менделеева. Результаты экспериментов приведены в таблицах 3.7-3.9.

Таблица 3.7 - Детонация ПВГС на основе водного геля Состав №1

Содержание, масс. %		ρ , г/см ³	Детонация
ПП	Состав №1		
63	37	1,42	Полная
63	37	1,42	Полная
60	40	1,41	Полная
60	40	1,41	Полная
55	45	1,41	Полная
55	45	1,41	Полная
50	50	1,41	Полная
50	50	1,41	Полная
45	55	1,40	Полная
45	55	1,40	Полная
40	60	1,39	Полная
40	60	1,39	Затухание
40	60	1,39	Полная
40	60	1,39	Полная
35	65	1,36	Отказ
35	65	1,36	Полная
35	65	1,36	Затухание
35	65	1,36	Отказ
30	70	1,36	Затухание
30	70	1,36	Отказ
30	70	1,35	Отказ
25	75	1,35	Отказ
25	75	1,35	Отказ

Таблица 3.8 - Детонация ПВГС на основе водного геля Состав №2

Содержание, масс. %		ρ , г/см ³	Детонация
ПП	Состав №2		
63	37	1,42	Полная
63	37	1,42	Полная
63	37	1,42	Полная
60	40	1,42	Полная
60	40	1,42	Полная
55	45	1,41	Полная
55	45	1,41	Затухание
55	45	1,41	Полная
50	50	1,41	Отказ
50	50	1,41	Отказ

Таблица 3.9 - Детонация составов на основе водного геля Состав №3

Содержание, масс. %		ρ , г/см ³	Детонация
ПП	Состав №3		
63	37	1,42	Полная
63	37	1,42	Полная
60	40	1,41	Полная
60	40	1,41	Полная
58	42	1,41	Полная
58	42	1,41	Затухание
58	42	1,41	Полная
55	45	1,41	Затухание
55	45	1,41	Отказ
55	45	1,41	Отказ

На рисунке 3.14 представлены сводные результаты по всем исследованным составам.

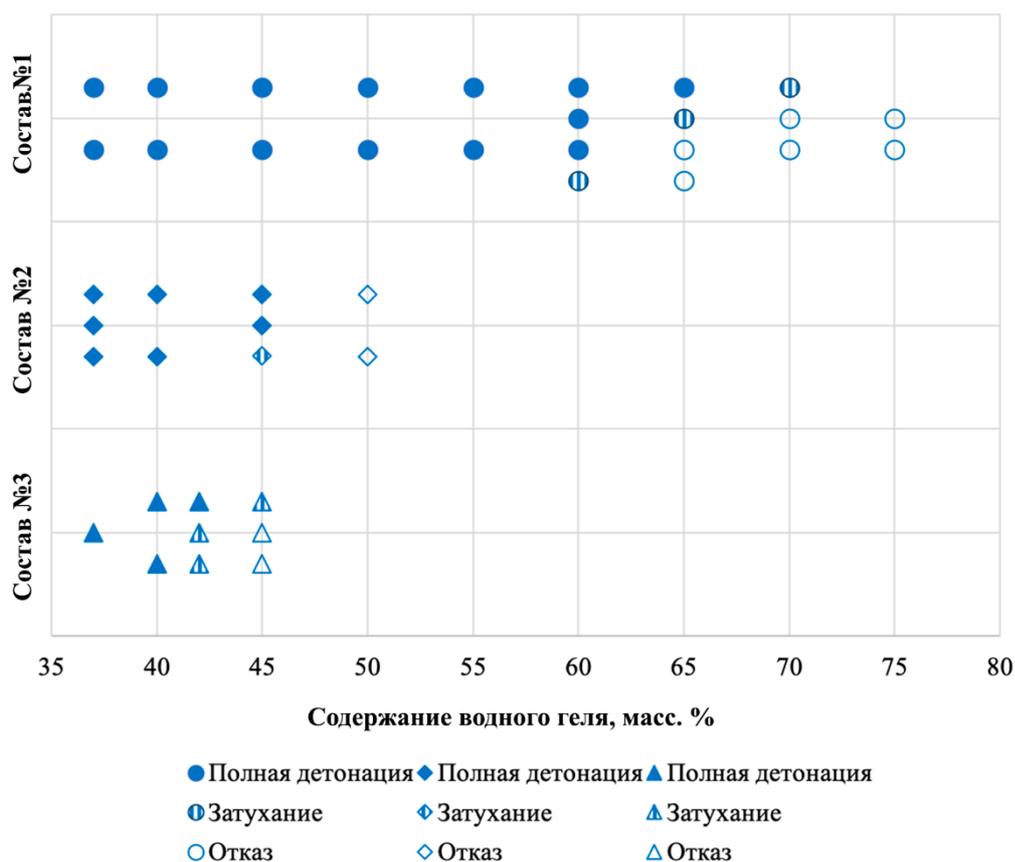


Рисунок 3.14 - Сводные результаты определения детонационной способности ПВГС в зависимости от содержания водного геля различного химического состава

Как видно из таблиц и рисунка, составы с использованием в качестве наполнителя водного геля Составы №1, содержащего топливную добавку в виде карбамида, сохраняют способность к устойчивой детонации при значительном увеличении содержания наполнителя до 60 масс. %. Составы на основе водного геля Составы №2 продемонстрировали устойчивую детонацию при содержании наполнителя до 45 масс. %, составы на основе химически инертного наполнителя (Состав №3) - до 42 масс. %.

В работах [5, 6] 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, способствовавшего эффективной передаче детонации. На рисунках 3.15-3.17 представлены зависимости детонационной способности ПВГС от степени заполнения заряда водными гелями различного химического состава.

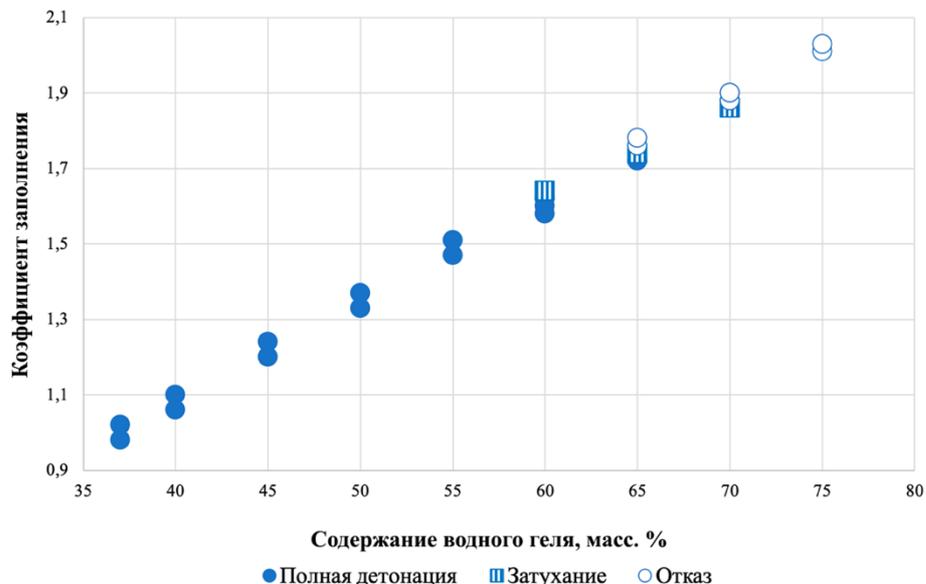


Рисунок 3.15 - Детонационная способность ПВГС на основе водного геля Составы №1

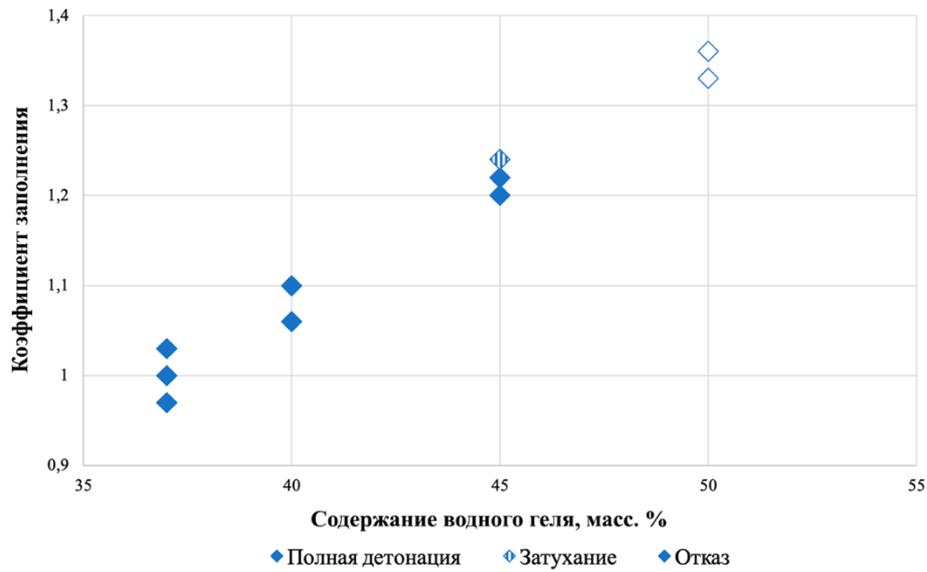


Рисунок 3.16 - Детонационная способность ПВГС на основе водного геля Состава №2

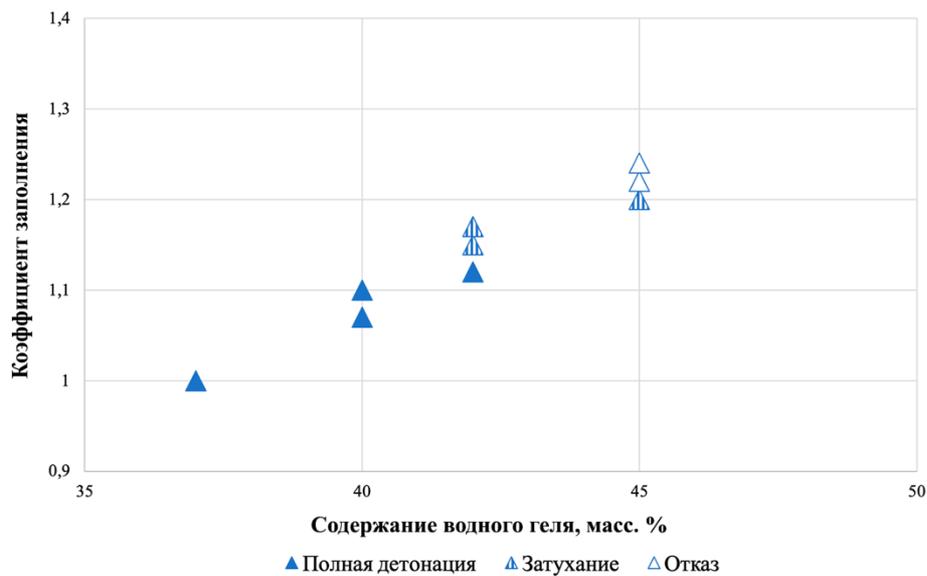


Рисунок 3.17 - Детонационная способность ПВГС на основе водного геля Состава №3

Полученные результаты указывают на неомогенное течение детонационного процесса, поскольку с учетом теплоты гомогенного 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 коэффициенте заполнения 1,35, в то время как ПВГС с Составом №1 значительно превосходит по детонационной способности другие составы, сохраняя способность к детонации при коэффициенте заполнения 1,76. ПВГС с инертным Составом №3 демонстрируют самую быструю утрату детонационной способности при коэффициенте заполнения 1,14.

Наблюдаемая высокая эффективности водного геля, содержащего окислительный и топливный компоненты, указывает на течение детонационного процесса в водном геле отдельно от детонационного процесса в ПП, по крайней мере на начальном этапе.

3.4.1.3 Исследование слеодообразования пороховых водно-гелевых взрывчатых составов

Исследование слеодообразования при детонации проводилось с использованием зарядов ПВГС на основе ПП марки 14/7 со специальным расположением пороховых элементов и водного геля Состава №1.

Фотография торца заряда и пластина-свидетель после его подрыва представлены на рисунках 3.18 и 3.19.

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 энергией для инициирования последующих пороховых элементов. Также можно выделить следы, оставленные ударной волной отдельных пороховых элементов, что также указывает на некоторое ускорение процесса детонации при прохождении по пороховому элементу относительно общей детонационной волны состава.



Рисунок 3.18. Фотография торца заряда ПВГС на основе ПП марки 14/7



Рисунок 3.19. Фотография пластины-свидетеля после взрыва ПВГС

Для оценки влияния выявленных эффектов на детонационный процесс был изготовлен аналогичный заряд с заполненными водным гелем или медной проволокой каналами пороховых элементов. Фотография торца заряда и пластины-свидетеля после эксперимента представлены на рисунках 3.20-3.21.



Рисунок 3.20 - Фотография торца заряда ПВГС на основе ПП марки 14/7 с заполненными каналами пороховых элементов



Рисунок 3.21 - Фотография пластины-свидетеля после взрыва ПВГС с заполненными каналами пороховых элементов

Как видно по пластине-свидетелю, заполнение каналов ведет к исчезновению струй, при этом сохраняются следы, позволяющие выделить детонацию отдельных пороховых элементов, что указывает на некоторую независимость опережения детонационного процесса по пороху относительно всего состава от струйных эффектов в каналах пороховых элементов, вероятнее всего поддерживаемое за счет микропористости их структуры. Подобные эффекты наблюдались в работах [22] с нитроглицериновыми порохами.

Результаты исследования продемонстрировали, что пространство в каналах пороховых элементов, служащих для увеличения площади горения при использовании ПП в качестве метательных ВВ, в виду структурных особенностей водных гелей естественным образом практически не заполняется, что позволяет продуктам детонации формировать струи, распространяющиеся по этим каналам с опережением детонационной волны. Обладая достаточной энергией для вовлечения в детонационный процесс последующих слоев вещества, струи продуктов детонации несколько ускоряют распространение процесса, однако, в виду ограниченности размеров пороховых элементов, данное явление имеет скачкообразный, пульсирующий характер, что наблюдалось в работе [39].

3.4.2. Влияние состава водного геля на параметры детонации пороховых водно-гелевых составов

Исследования критических условий детонации продемонстрировали выраженное влияние химического состава наполнителя на детонационную способность ПВГС. Для определения влияния состава наполнителя на параметры детонации проведены экспериментальные исследования ПВГС на основе различных марок ПП с истекшими ГСХ и водных гелей химически

инертного, окислительного и энергоемкого водного геля. Рецептуры водных гелей представлены в разделе 3.1.2. данной работы.

3.4.2.1. Влияние водного геля, содержащего окислитель и горючее, на параметры детонации пороховых водно-гелевых составов

В качестве водного геля, содержащего окислительные и топливные компоненты, использовался водный гель Состава №1 на основе нитратов аммония и натрия в качестве окислителей и карбамида в качестве горючего плотностью $1,38 \pm 0,2$ г/см³, кислородный баланс 8 %. ПВГС изготавливались на основе ПП марок 6/7 гр, 9/7 и 14/7. Предельное содержание ПП в ПВГС ограничивалось состоянием полного заполнения пространства между зёрнами пороха наполнителем для создания оптимальных условий течения детонационного процесса [5]. Все эксперименты проводились с использованием электромагнитного метода в зарядах в полипропиленовой оболочке диаметром 20,5 мм (марки ПП 6/7 гр и 9/7). В виду крупных размеров пороховых элементов ПП марки 14/7, не позволяющих создать хаотичную структуру заряда имитирующую реальное состояние ПВГС, для зарядов на его основе использовались полипропиленовые оболочки внутренним диаметром 28 мм.

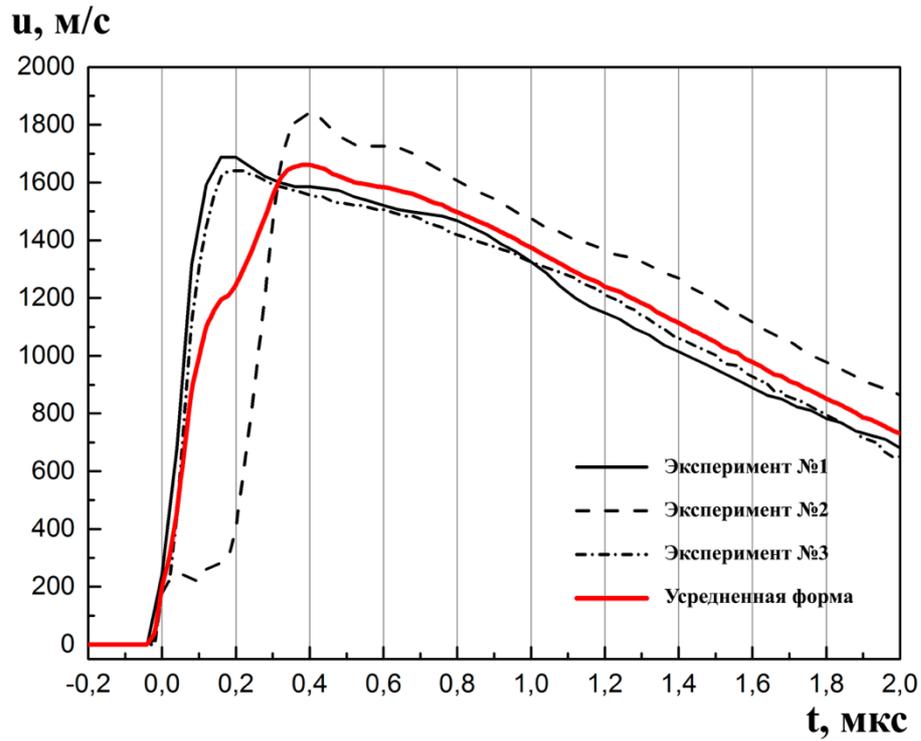


Рисунок 3.22 - Профили $u(t)$ для ПВГС на основе ПП марки 6/7 гр и водного геля Состава №1

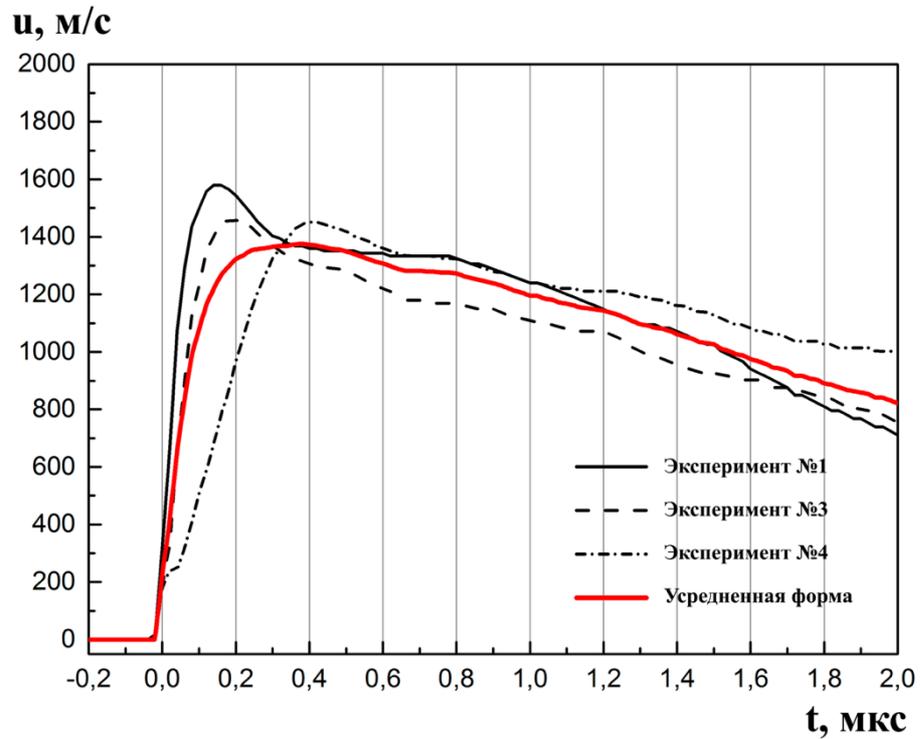


Рисунок 3.23 - Профили $u(t)$ для ПВГС на основе ПП марки 9/7 и водного геля Состава №1

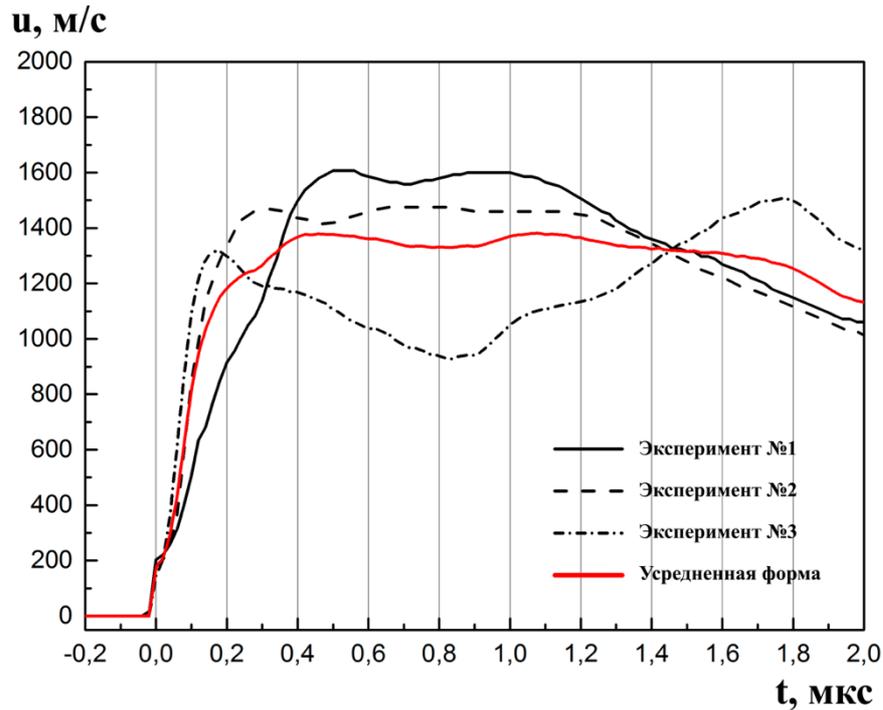


Рисунок 3.24 - Профили $u(t)$ для ПВГС на основе ПП марки 14/7 и водного геля Составы №1

Полученные профили скорости движения границы раздела ВВ-парафин $U(t)$ были пересчитаны в скорость движения продуктов взрыва $u(t)$ согласно ф.3.3.3.3. и представлены на рисунках 3.22-3.24.

Численные результаты испытаний приведены в таблицах 3.10-3.12. Значения t_1 , u_1 , P_1 соответствуют времени и максимально достигнутым в эксперименте значениям массовой скорости и давления до достижения точки перегиба, t_2 , u_2 , P_2 - соответствующим значениям в точке перегиба (предполагаемой точке Чепмена-Жуге).

Таблица 3.10 - Параметры детонации ПВГС на основе ПП марки 6/7 гр и водного геля Составы №1

№	$C_{ПП}$, масс. %	ρ , г/см ³	d_3 , мм	D , км/с	t_1 , мкс	u_1 , м/с	P_1 , ГПа	t_2 , мкс	u_2 , м/с	P_2 , ГПа
1	63	1,42	20,5	6,10	0,16	1687	14,61	0,36	1586	13,74
2				6,82	0,40	1838	17,80	0,54	1726	16,72
3				6,55	0,18	1641	15,26	0,42	1550	14,42

Таблица 3.11 - Параметры детонации ПВГС на основе ПП марки 9/7 и водного геля Состава №1

№	$S_{пп}$, масс. %	ρ , г/см ³	d_3 , мм	D , км/с	t_1 , мкс	u_1 , м/с	P_1 , ГПа	t_2 , мкс	u_2 , м/с	P_2 , ГПа	
1	58	1,42	20,5	6,75	0,14	1579	15,14	0,36	1369	13,12	
2*				-	-	-	-	-	-	-	-
3				6,41	0,40	1451	13,21	0,66	1334	12,14	
4				6,49	0,18	1460	13,46	0,42	1298	11,96	
5*				-	-	-	-	-	-	-	

*-получен отказ или затухание детонации

Таблица 3.12 - Параметры детонации ПВГС на основе ПП марки 14/7 и водного геля Состава №1

№	$S_{пп}$, масс. %	ρ , г/см ³	d_3 , мм	D , км/с	t_1 , мкс	u_1 , м/с	P_1 , ГПа	t_2 , мкс	u_2 , м/с	P_2 , ГПа
1	53	1,40	28	6,38	0,48	1607	14,35	0,64	1565	13,98
2				6,01	0,28	1468	12,35	0,42	1420	11,95
3				6,07	0,14	1316	11,18	0,28	1191	10,12

Первичный анализ обнаруживает высокую сходимость профилей ПВГС на основе ПП марки 6/7 гр между собой, сохраняющих единообразие формы, не смотря на выраженные расхождения в скорости детонации. Достаточно четко прослеживаются максимумы и области течения реакции («химпики»), несмотря на свою слабую выраженность по сравнению с индивидуальными взрывчатыми веществами или гомогенизированными смесями. В эксперименте №2 наблюдается значительное повышение скорости детонации и выраженное смещение максимума на 0,22-0,24 мкс относительно результатов параллельных опытов. На полученном профиле $u(t)$ наблюдается соответствующее по времени смещение, после которой форма профиля восстанавливается.

Профили $u(t)$ для ПВГС на основе ПП марки 9/7 в целом демонстрируют единообразие формы, позволяющее выделить максимумы и точки перегиба, а также схожее с составами на основе ПП марки 6/7 гр проявления смещения

максимумов и ступенчатые изменения в ударном фронте. В данном случае не наблюдается аномального роста скорости детонации, однако присутствует смещение максимума, составляющее 0,24-0,26 мкс относительно параллельных опытов. Для ПВГС на основе ПП марки 9/7 в двух испытаниях были получены отказы. Подобное наблюдалось и для ПВГС с другими водными гелями, и в случае увеличения диаметра заряда. Предоставившей ПП марки 9/7 организацией было уточнено, что данные образцы хранились в условиях значительных сезонных колебаний температур и периодически подвергались воздействию влаги, ввиду чего наиболее вероятной причиной полученных отказов является неудовлетворительное состояние пороховых элементов в следствие нарушения условий хранения, что вероятно привело к разрушению пористой микроструктуры зерна, значительно ухудшив детонационную способность пороховых элементов.

В случае ПВГС на основе ПП марки 14/7 во всех трех экспериментах наблюдается расхождение в процессе роста массовой скорости. В случае второго и третьего экспериментов это расхождение составляет 0,14 мкс и проходит относительно плавно, без выраженного горизонтального смещения. Смещение максимума в эксперименте №1, составляющее 0,20-0,34 мкс, в отличие от составов на основе ПП с пороховыми элементами меньшего размера, сопровождается незначительными горизонтальными смещениями на протяжении всего роста массовой скорости в ударном фронте. При этом в данном эксперименте зафиксирована относительно высокая скорость детонации, хотя в целом наблюдается ее некоторое снижение относительно составов с более мелкими пороховыми элементами. Для всех трех профилей наблюдается излом, позволяющий предположить достижение условия Чепмена-Жуге. Выраженной особенностью детонации ПВГС на основе ПП марки 14/7 являются проявления вторых пиков, в случае эксперимента №3 даже превышающий первичный максимум.

Проведены исследования параметров детонации ПВГС на основе ПП 6/7 гр с увеличенным содержанием водного геля Состава №1 до 50 и 60

масс. %, продемонстрировавших сохраняемость детонационной способности ПВГС при данных содержаниях наполнителя. Результаты представлены на рисунке 3.25.

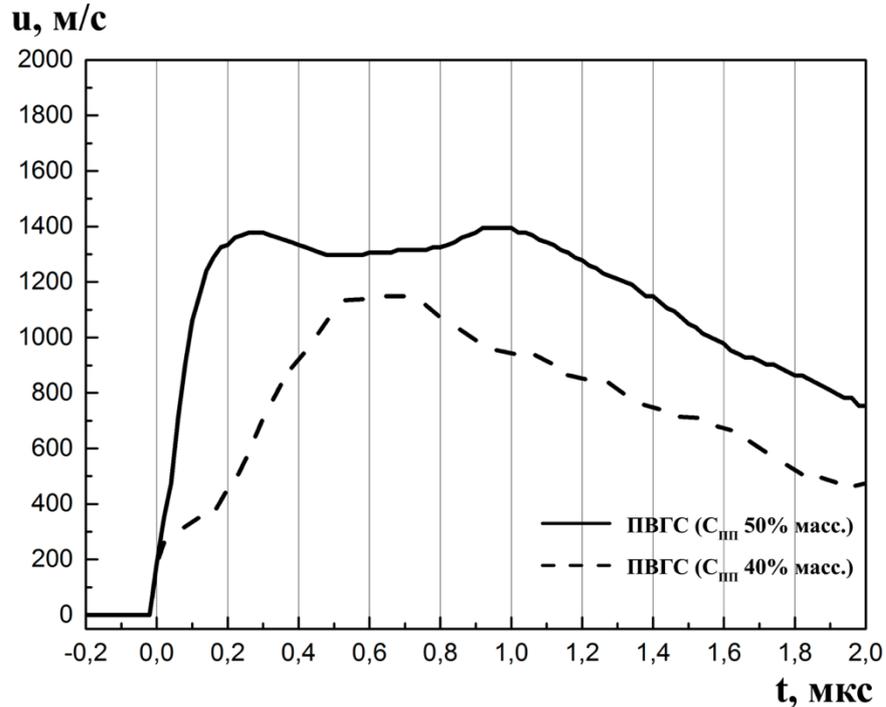


Рисунок 3.25 - Профили $u(t)$ для ПВГС на основе ПП марки 6/7 гр и водного геля Состава №1 с различным содержанием компонентов

Численные результаты испытаний приведены в таблице 3.13 t_1 , u_1 , P_1 соответствуют времени и максимально достигнутым в эксперименте значениям массовой скорости и давления до достижения точки перегиба, t_2 , u_2 , P_2 - соответствующим значениям в точке перегиба (предполагаемой точке Чепмена-Жуге).

Таблица 3.13 - Параметры детонации ПВГС на основе ПП марки 6/7 гр и водного геля Состава №1

$C_{ПП}$, масс. %	ρ , г/см ³	d_z , мм	D , км/с	t_1 , мкс	u_1 , м/с	P_1 , ГПа	t_2 , мкс	u_2 , м/с	P_2 , ГПа
50	1,40	20,5	5,84	0,26	1378	11,26	0,46	1307	10,68
40	1,39	20,5	4,98	0,64	1149	7,96	1,06	941	6,52

Исследование влияния разбавления ПВГС относительно оптимального содержания ПП на параметры детонации показало выраженное снижение скорости детонации и массовой скорости с ростом содержания водного геля. При этом в целом сохраняется наличие максимумов массовой скорости и слабая выраженность «химпиков». Смещение относительно аналогичных составов с $C_{ПП} = 63$ масс. % (коэффициент заполнения 1,0) в случае $C_{ПП} = 50$ масс. % (коэффициент заполнения 1,35) составляет 0,08-0,10 мкс, однако в случае $C_{ПП} = 60$ масс. % (коэффициент заполнения 1,62) уже более значительно и составляет 0,46-0,48 мкс. В форме обоих профилей наблюдаются различные особенности, в частности для ПВГС ($C_{ПП} = 50$ масс. %) присутствует второй максимум массовой скорости в момент 0,92 мкс, незначительно превышающий первично достигнутый (1395 м/с). Для ПВГС ($C_{ПП} = 40$ масс. %) во время роста массовой скорости в ударном фронте присутствуют выраженные смещения, в начале процесса и перед достижением максимума.

С учетом выраженного влияния на детонационный процесс заполненности каналов пороховых элементов, проведена оценка влияния заполнения на параметры детонации ПВГС. Для проведения эксперимента наиболее удобным объектом является ПП марки 14/7 с самыми крупными пороховыми элементами и диаметром каналов, позволяющем организовать их принудительное заполнение водным гелем. В качестве водного геля использовался Состав №1, как обеспечивающий наилучшую детонационную способность. Особенностью структуры зарядов было расположение

центрального порохового элемента непосредственно над «П»-образным датчиком перпендикулярно его плоскости. Результаты представлены на рисунке 3.26.

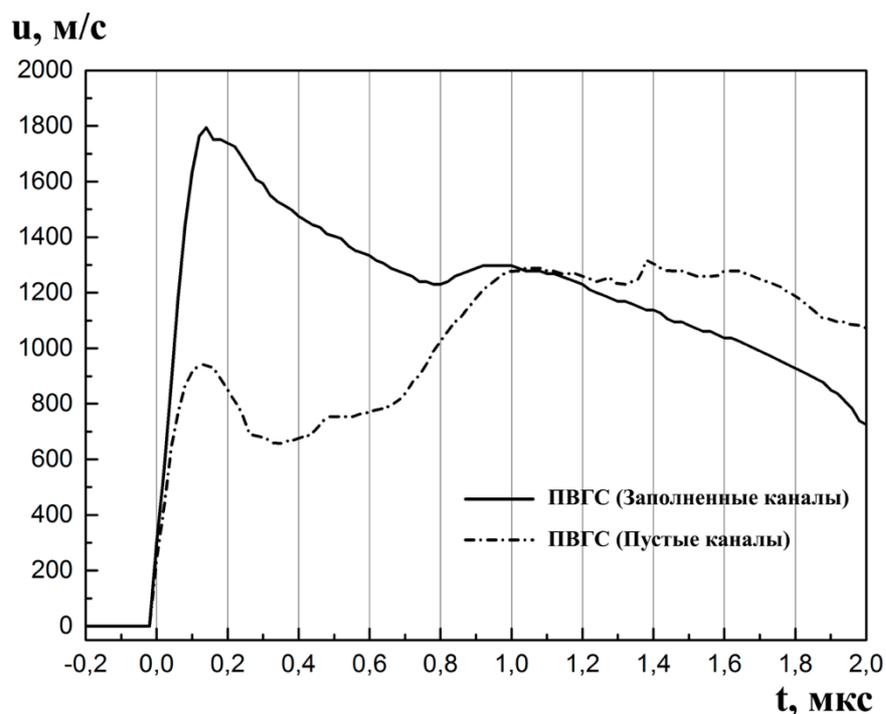


Рисунок 3.26 - Профили $u(t)$ для ПВГС на основе ПП марки 14/7 и водного геля Состава №1 с различным заполнением каналов пороховых элементов

Численные результаты испытаний приведены в таблице 3.14. Значения t_1 , u_1 , P_1 соответствуют времени и максимально достигнутому в эксперименте значениям массовой скорости и давления до достижения точки перегиба, t_2 , u_2 , P_2 - соответствующим значениям в точке перегиба профиля $u(t)$, соответствующего предполагаемой точке Чепмена-Жуге.

Таблица 3.14 - Параметры детонации ПВГС на основе ПП марки 14/7 и водного геля Состава №1 в зависимости от заполнения каналов порохового элемента

Состояние каналов	ρ , г/см ³	d_z , мм	D , км/с	t_1 , мкс	u_1 , м/с	P_1 , ГПа	t_2 , мкс	u_2 , м/с	P_2 , ГПа
Заполненные	1,42	28	6,42	0,14	1797	16,35	0,16	1751	15,95
Пустые	1,42	28	7,18	0,12	941	9,59	0,26	695	7,09

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. Данное явление объясняет появления вторичных пиков, по сути являющихся основной детонационной волной. Для ПП меньших размеров подобные проявления и их вклад в детонацию могут быть менее значительными.

Сравнение результатов экспериментов с расчетными значениями параметров детонации показывает преимущественное превышение усредненных экспериментально полученных значений массовой скорости и давления над рассчитанными в программном комплексе SD на 13-15%, при этом усредненная скорость детонации рассчитывается достаточно точно. С ростом размеров пороховых элементов точность расчетов увеличивается вплоть до неопределенности менее 5% от величины показателя. Однако в случае составов с коэффициентом заполнения больше 1,0 экспериментальные значения резко снижаются по сравнению с расчетными показателями, достигая отклонений в 40 % от значений величины. Таким образом программный комплекс SD позволяет производить оценочный расчет параметров детонации для ПВГС на основе нитрат-карбамидных водных гелей с достаточно высокой точностью при содержании ПП, соответствующего оптимальным условиям детонации.

На рисунке 3.27 приводится сравнение типовых профилей $u(t)$ исследованных составов с профилями взрывчатых составов военного (А-IX-1) и промышленного назначения (Аммонит №6ЖВ) [86, 87].

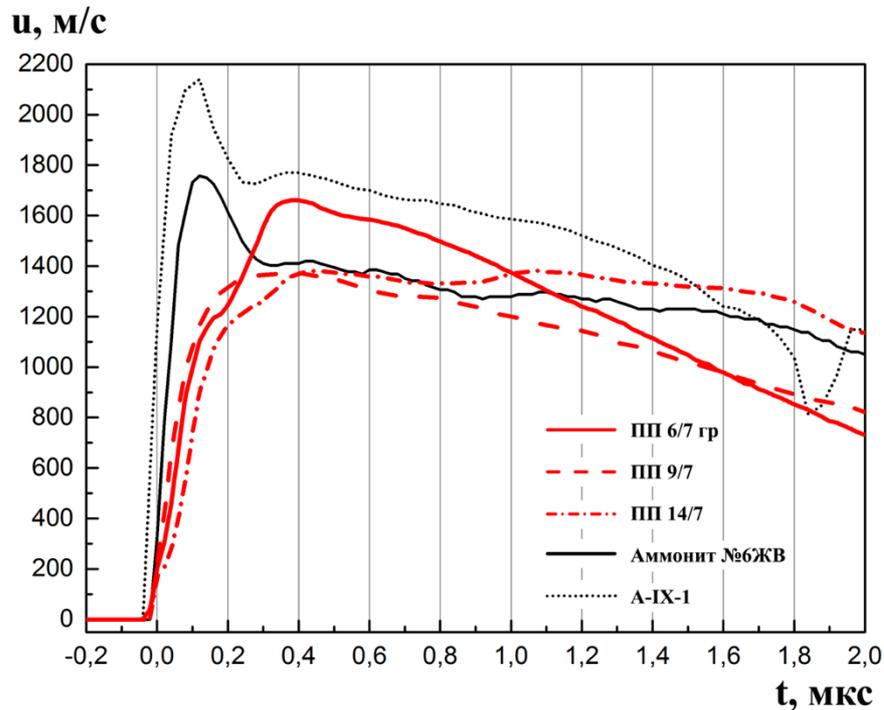


Рисунок 3.27 - Профили $u(t)$ для ПВГС на основе ПП марок 6/7 гр, 9/7, 14/7 и водного геля Состава №1 в сравнении с А-IX-1 и Аммонитом №6ЖВ

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, что в целом является характерным для водногелевых взрывчатых составов [88-90].

Различный наклон указывает на неравномерности фронта детонационной волны ПВГС, наиболее вероятной причиной которых

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 ускоренно распространяющейся по пороховым элементам детонации относительно основного фронта ПВГС, формируя комплексную структуру, подобную «двуслойной» детонации, характерной для схожих гетерогенных систем, описанных в [91]. Эффекты ускорения детонации порохов экспериментально наблюдались в работах [22, 39]. В нашем случае их проявления наблюдаются в менее выраженной форме из-за наполнения водным гелем. С учетом результатов исследования слеодообразования ПВГС значительный вклад в распространение процесса может вноситься струями продуктов детонации, образующихся в каналах пороховых элементов, что также способствует формированию опережающего ударного фронта. Нерегулярность фиксирования подобных явлений естественна для систем с хаотичной структурой заряда.

Таким образом наблюдаемое отставание области достижения максимального давления в ПВГС, составляющее от 0,1 до 0,4 мкс, вероятнее всего является следствием флегматизирующего воздействия водной составляющей состава в сочетании с формированием опережающего фронта. Этим можно объяснить некоторые аномальные значения скорости детонации, например в эксперименте №2 для ПВГС на основе 14/7, рассчитываемые на основании искаженных опережающими волнами данных. В пользу этого также указывает сходная форма профилей после достижения максимального давления, свидетельствующая об однообразии течения детонации.

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 [39, 93]. Это указывает на достижение предельной скорости детонации в исследуемых составах при 20,5 мм и подтверждается результатами исследований

зависимости скорости детонации от диаметра для других водно-гелевых систем [89, 90].

Эффективность практического применения ПВГС можно оценить по профилям давления взрыва $P(t)$, представленном на рисунке 3.28.

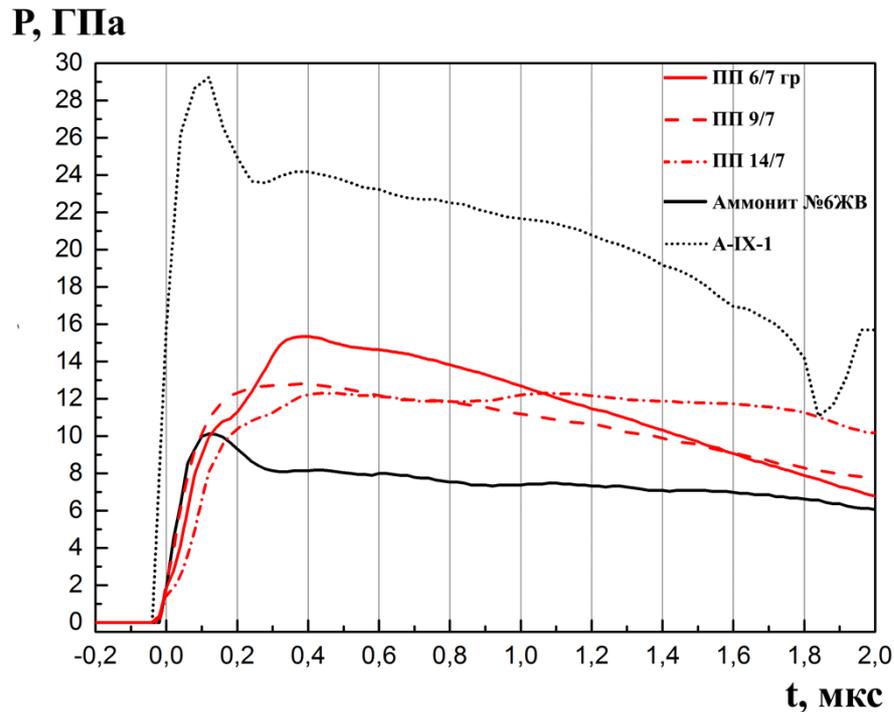


Рисунок 3.28 - Профили $P(t)$ для ПВГС на основе ПП марок 6/7 гр, 9/7,14/7 и водного геля Состава №1 в сравнении с А-IX-1 и Аммонитом №6ЖВ

Наблюдаемые профили давления ПВГС демонстрируют несколько более плавный рост давления в ударном фронте, что обеспечивает более мягкое дробление в ближней зоне, отличаемое 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 [33, 65, 71, 93-95].

3.4.2.2. Влияние водного геля, содержащего окислитель на параметры детонации пороховых водно-гелевых составов

В качестве водного геля, содержащего окислительные компоненты, использовался водный гель Состава №2 на основе нитратов аммония и натрия плотностью $1,38 \pm 0,2 \text{ г/см}^3$, кислородный баланс 19,3 %. ПВГС изготавливались на основе ПП марок 6/7 гр, 9/7 и 14/7. Предельное содержание ПП в ПВГС ограничивалось состоянием полного заполнения пространства между зернами пороха наполнителем для создания оптимальных условий течения детонационного процесса [5]. Все эксперименты проводились с использованием электромагнитного метода в зарядах в полипропиленовой оболочке диаметром 20,5 мм для ПП марок 6/7 гр, 9/7 и диаметром 28 мм для ПП марки 14/7. Полученные профили скорости движения границы раздела ВВ-парафин $U(t)$ были пересчитаны в скорость движения продуктов взрыва $u(t)$ и представлены на рисунках 3.29-3.31.

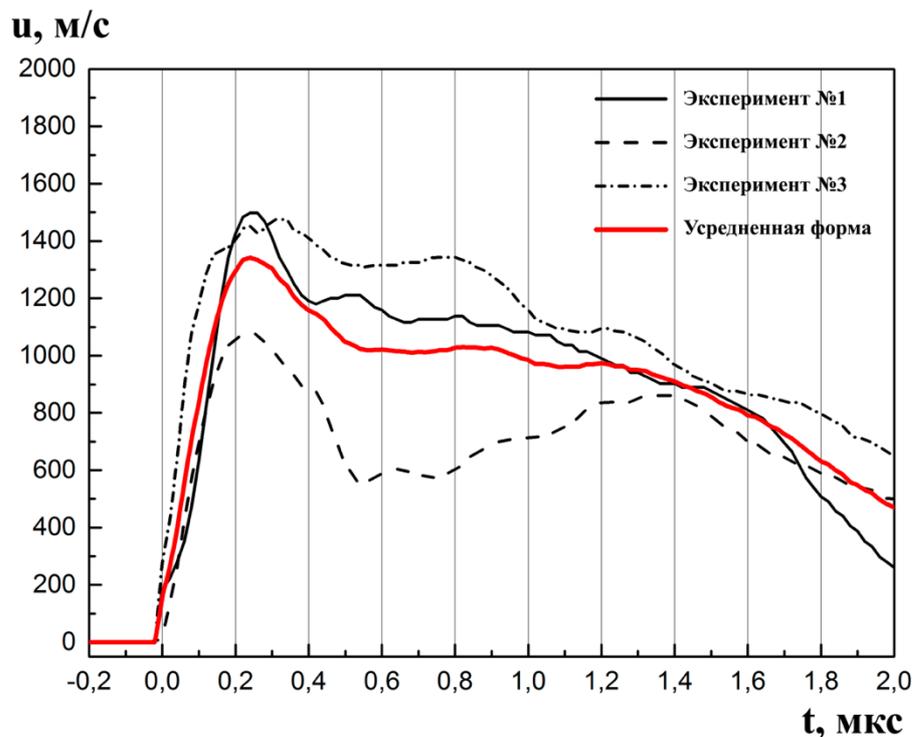


Рисунок 3.29 - Профили $u(t)$ для ПВГС на основе ПП марки 6/7 гр и водного геля Состава №2

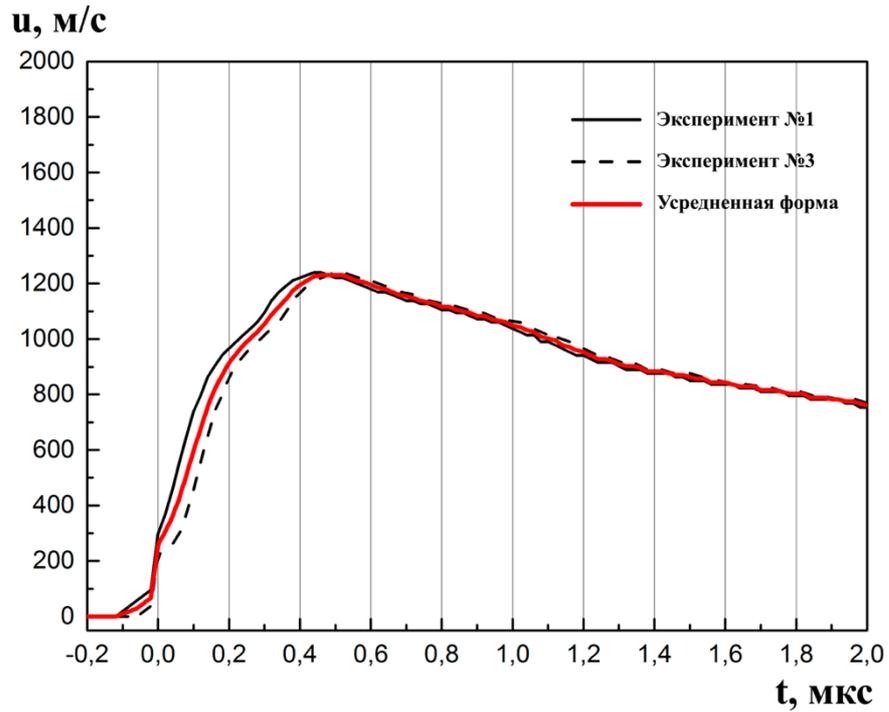


Рисунок 3.30 - Профили $u(t)$ для ПВГС на основе ПП марки 9/7 и водного геля Состава №2

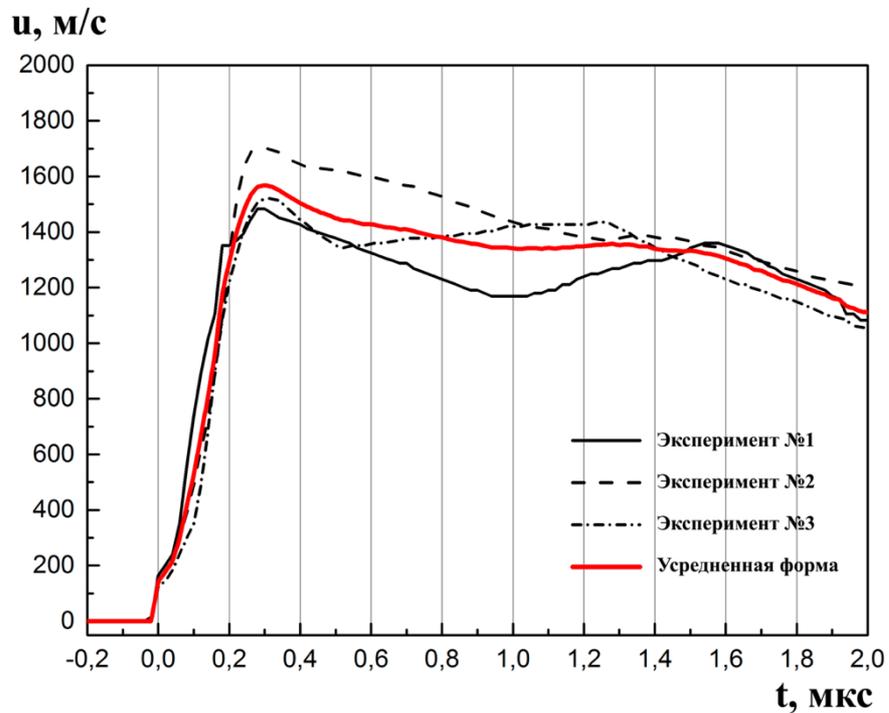


Рисунок 3.31 - Профили $u(t)$ для ПВГС на основе ПП марки 14/7 и водного геля Состава №2

Численные результаты испытаний приведены в таблицах 3.15-3.17. t_1 , u_1 , P_1 соответствуют времени и максимально достигнутым в эксперименте значениям массовой скорости и давления до достижения точки перегиба, t_2 , u_2 , P_2 - значениям в точке перегиба, соответствующим предполагаемой точке Чепмена-Жуге.

Таблица 3.15 - Параметры детонации ПВГС на основе ПП марки 6/7 гр и водного геля Состава №2

№	С _{ПП} , масс. %	ρ , г/см ³	d_3 , мм	D, км/с	t_1 , мкс	u_1 , м/с	P_1 , ГПа	t_2 , мкс	u_2 , м/с	P_2 , ГПа
1	63	1,42	20,5	5,62	0,24	1499	11,96	0,42	1180	9,42
2				6,25	0,22	1076	9,55	0,40	873	7,75
3				5,68	0,30	1476	11,91	0,50	1316	10,61

Таблица 3.16 - Параметры детонации ПВГС на основе ПП марки 9/7 и водного геля Состава №2

№	С _{ПП} , масс. %	ρ , г/см ³	d_3 , мм	D, км/с	t_1 , мкс	u_1 , м/с	P_1 , ГПа	t_2 , мкс	u_2 , м/с	P_2 , ГПа
1	58	1,42	20,5	5,90	0,44	1241	10,40	0,62	1170	9,80
2*				-	-	-	-	-	-	-
3				5,95	0,46	1240	10,47	0,74	1149	9,71
4*				-	-	-	-	-	-	-
5*				-	-	-	-	-	-	-

*-получен отказ или затухание детонации

Таблица 3.17 - Параметры детонации ПВГС на основе ПП марки 14/7 и водного геля Состава №2

№	С _{ПП} , масс. %	ρ , г/см ³	d_3 , мм	D, км/с	t_1 , мкс	u_1 , м/с	P_1 , ГПа	t_2 , мкс	u_2 , м/с	P_2 , ГПа
1	53	1,40	28	5,88	0,26	1483	12,21	0,40	1411	11,62
2				6,01	0,22	1687	14,19	0,38	1634	13,75
3				6,07	0,26	1521	12,93	0,48	1343	11,41

Первичный анализ указывает на единообразие течения детонационного процесса в начальной стадии для ПВГС на основе ПП марки 6/7 гр с некоторыми выраженными отклонениям в отдельных случаях. Четко прослеживаются максимумы и области течения реакции («химпики»), достаточно выражены перегибы в области точки Чепмена-Жуге. В эксперименте №2 получена аномально высокая скорость детонации, при этом наблюдается значительное снижение массовой скорости, с последующим ростом, указывающая на особый детонационный режим в данном эксперименте, отличный от параллельных опытов.

Для ПВГС на основе ПП марки 9/7 в трех испытаниях были получены отказы, вероятной причиной которых является неудовлетворительное состояние пороховых элементов. Полученные профили демонстрируют высокую сходимость. В обоих экспериментах наблюдается выраженное растяжение фронта, достигающего максимума в области 0,44-0,46 мкс, с относительно плавным спадом, в целом указывая на неустойчивость детонационного процесса. Скорости детонации демонстрируют высокую сходимость.

В случае ПВГС на основе ПП марки 14/7 во всех экспериментах наблюдается практически идентичный рост, выраженный скачок в начале профиля и следующий за ним «завал» с достижением максимума при 0,22-0,24 мкс. Достаточно четко прослеживаются химпики, за исключением эксперимента №1, в котором он выражен слабо, однако наблюдается выраженный скачок до достижения максимума, характерный при резком повышении энерговыделения. Скорость детонации демонстрирует сходимые значения. Также в случае первого и третьего экспериментов наблюдается рост массовой скорости с образованием второго пика.

На рисунке 3.32 приводится сравнение типовых профилей $u(t)$ исследованных составов с профилями взрывчатых составов военного (А-IX-1) и промышленного назначения (Аммонит №6ЖВ).

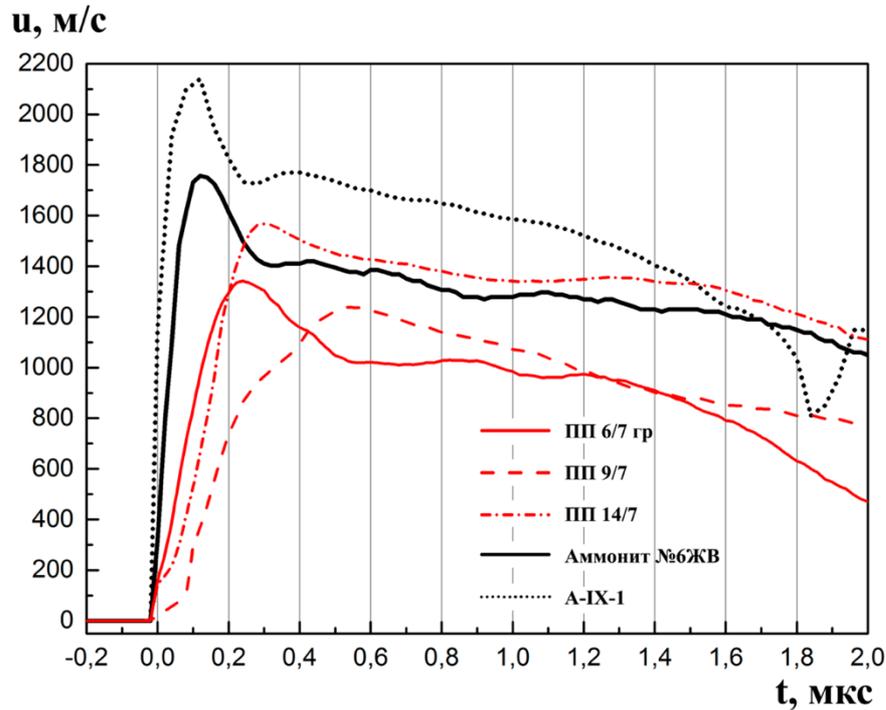


Рисунок 3.32 - Профили $u(t)$ для ПВГС на основе ПП марок 6/7 гр, 9/7, 14/7 и водного геля Состава №2 в сравнении с А-IX-1 и Аммонитом №6ЖВ

Профили массовой скорости исследуемых составов в данном случае также демонстрируют выраженное замедление роста массовой скорости и давления в ударном фронте относительно взрывчатых составов военного и промышленного назначения, связанное с наличием в составе водного геля. С увеличением размера пороховых элементов отчетливее проявляется ступенчатый характер «завала», что вероятно связано с собственной детонационной способностью порохового элемента. Полученные значения массовой скорости в целом меньше значений для ПВГС на основе Состава №1, что с учетом более высоких расчетных значений теплоты взрыва ПВГС на основе Состава №2 указывает на отсутствие гомогенизации в детонационном процессе, используемое для расчетов в программном комплексе SD.

Полученные значения параметров детонации в точке Чепмена-Жуге для составов на основе ПП марки 6/7 гр в среднем на 10-29 % ниже расчетных, при этом с ростом размеров пороховых элементов отклонение расчетных

значений снижается вплоть до 2-6% для ПП марки 14/7. Подобные расхождения расчетных значений с экспериментом указывают на малое взаимодействие водного геля с ПП во время прохождения детонационной волны, вероятнее всего происходящее только у поверхности пороховых элементов.

На рисунке 3.33 представлены сравнительные профили изменения давления в детонационной волне, рассчитанные на основе полученных скоростей детонации, массовой скорости и плотности состава, позволяющие оценить эффективность исследованных ПВГС.

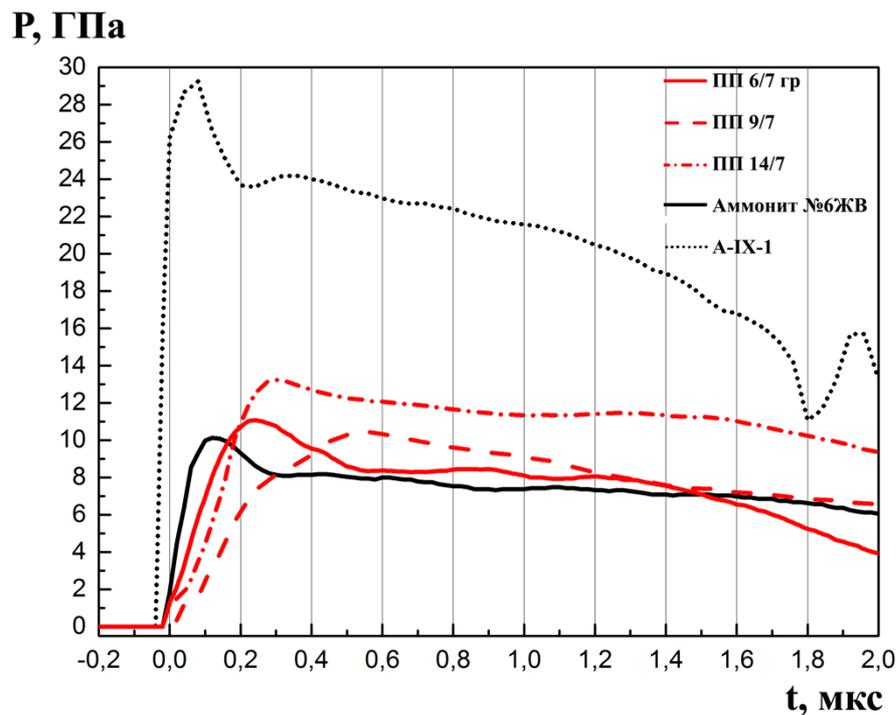


Рисунок 3.33 - Профили $P(t)$ для ПВГС на основе ПП марок 6/7 гр, 9/7, 14/7 и водного геля Состава №2 в сравнении с А-IX-1 и Аммонитом №6ЖВ

При использовании водного геля Состава №2 параметры детонации ПВГС в сравнении с водным гелем Состава №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 использования ПВГС на основе Составы №1 с повышенным содержанием водного геля, обеспечивая более рациональное использование энергоемкого потенциала утилизируемых ПП.

Использование ПВГС на основе водного геля Составы № 2 может быть обоснованным в случае значительного снижения экотоксичности продуктов детонации в сравнении с другими составами водных гелей, однако с учетом наблюдаемых процессов детонации необходимо экспериментальное исследование практической реализации окислительного потенциала окислительных водных гелей в ПВГС.

3.4.2.3. Влияние химически инертного водного геля на параметры детонации пороховых водно-гелевых составов

В качестве химически инертного водного геля использовался водный гель Составы №3 на основе хлорида кальция плотностью $1,38 \pm 0,2$ г/см³, кислородный баланс для подобных систем не определяется. ПВГС изготавливались на основе ПП марок 6/7 гр, 9/7 и 14/7. Предельное содержание ПП в ПВГС ограничивалось состоянием полного заполнения пространства между зёрнами пороха наполнителем для создания оптимальных условий течения детонационного процесса [5]. Все эксперименты проводились с использованием электромагнитного метода в зарядах в полипропиленовой оболочке диаметром 20,5 мм и 28 мм.

Полученные профили скорости движения границы раздела ВВ-парафин $U(t)$ были пересчитаны в скорость движения продуктов взрыва $u(t)$ и представлены на рисунках 3.34-3.36.

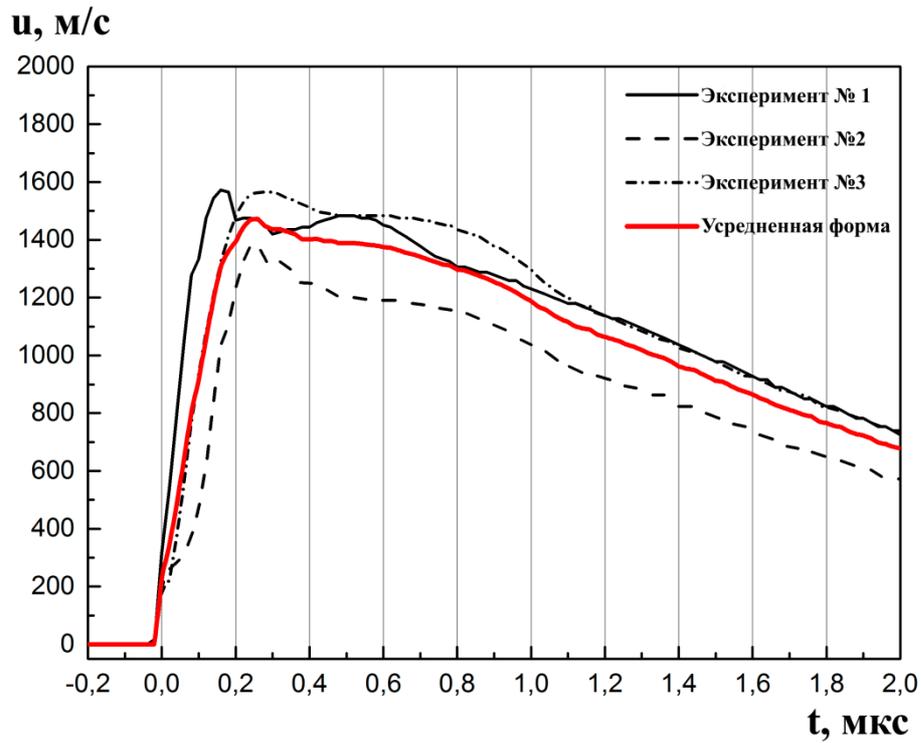


Рисунок 3.34 - Профили $u(t)$ для ПВГС на основе ПП марки 6/7 гр и водного геля Состава №3

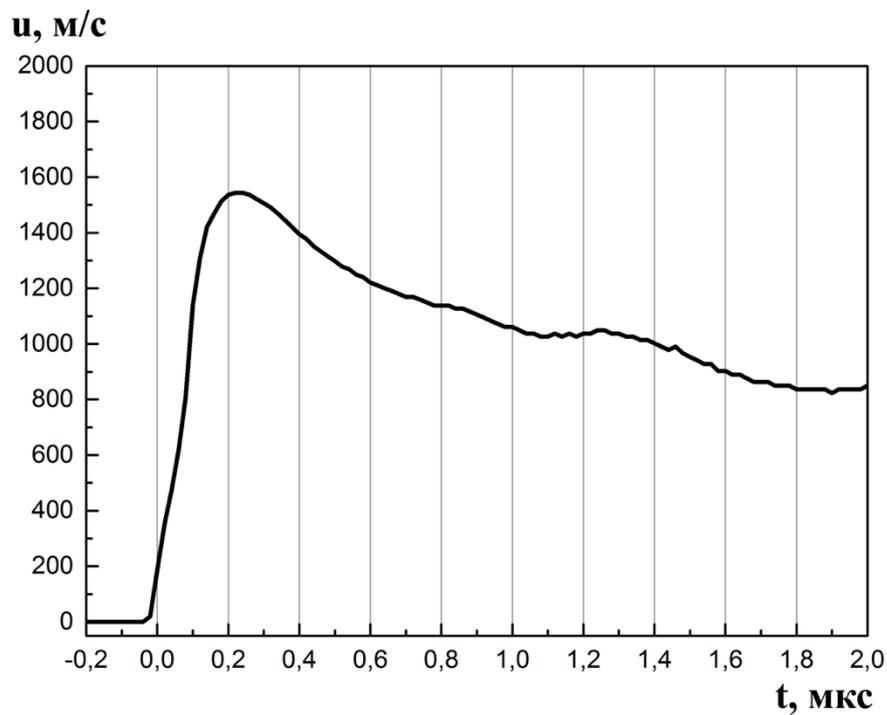


Рисунок 3.35 - Профиль $u(t)$ для ПВГС на основе ПП марки 9/7 и водного геля Состава №3

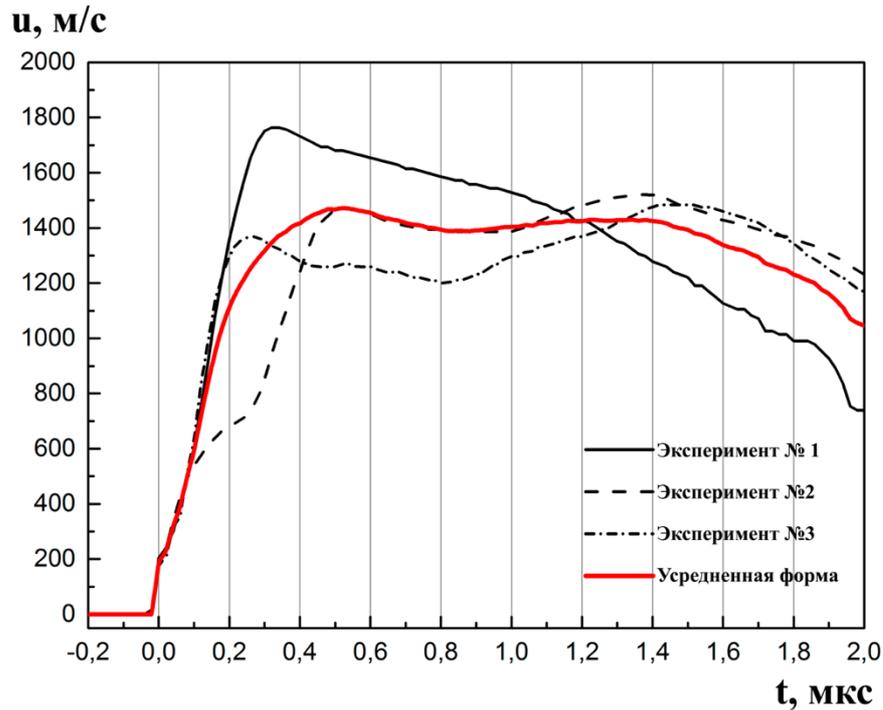


Рисунок 3.36 - Профили $u(t)$ для ПВГС на основе ПП марки 14/7 и водного геля Составы №3

Численные результаты испытаний приведены в таблицах 3.17-3.20. t_1 , u_1 , P_1 соответствуют моменту времени достижения максимальных значений массовой скорости и давления с начала повышения давления, t_2 , u_2 , P_2 - соответствующим значениям в предполагаемой точке Чепмена-Жуге, обычно выражающейся некоторым изломом профиля массовой скорости.

Таблица 3.18 Параметры детонации ПВГС на основе ПП марки 6/7 гр и водного геля Составы №3

№	$C_{ПП}$, масс. %	ρ , г/см ³	d_3 , мм	D , км/с	t_1 , мкс	u_1 , м/с	P_1 , ГПа	t_2 , мкс	u_2 , м/с	P_2 , ГПа
1	63	1,42	20,5	5,68	0,16	1572	12,68	0,20	1467	11,83
2				5,65	0,26	1386	11,12	0,38	1240	9,95
3				5,70	0,26	1564	12,66	0,48	1483	12,00

Таблица 3.19 - Параметры детонации ПВГС на основе ПП марки 9/7 и водного геля Состава №3

№	С _{ПП} , масс. %	ρ, г/см ³	d _з , мм	D, км/с	t ₁ , мкс	u ₁ , м/с	P ₁ , ГПа	t ₂ , мкс	u ₂ , м/с	P ₂ , ГПа
1*	58	1,42	20,5	-	-	-	-	-	-	-
2**				6,00	0,20	1543	13,15	-	-	-
3*				-	-	-	-	-	-	-

*-получен отказ или затухание детонации

**-форма кривой не позволяет выделить точку Чепмена-Жуге

Таблица 3.20 - Параметры детонации ПВГС на основе ПП марки 14/7 и водного геля Состава №3

№	С _{ПП} , масс. %	ρ, г/см ³	d _з , мм	D, км/с	t ₁ , мкс	u ₁ , м/с	P ₁ , ГПа	t ₂ , мкс	u ₂ , м/с	P ₂ , ГПа
1	53	1,40	28	6,12	0,32	1764	15,11	0,46	1694	14,51
2				6,50	0,50	1468	13,36	0,66	1411	12,84
3				6,04	0,22	1369	11,58	0,40	1260	10,65

Первичный анализ позволяет утверждать о явных признаках некоторой индивидуальности течения детонационного процесса в начальной стадии, что в достаточной мере проявляется различным наклоном профилей в ПВГС на основе ПП марки 6/7 гр, хотя в целом профили сохраняют единообразие формы. Достаточно четко прослеживаются максимумы и области течения реакции («химпики»). Полученные скорости детонации демонстрируют высокую сходимость.

Для ПВГС на основе ПП марки 9/7 в двух испытаниях были получены отказы. Единственный полученный профиль демонстрирует некоторый «завал» фронта достигая максимума в области 0,2 мкс, а также не позволяет однозначно выделить характерный для точки Чепмена-Жуге излом.

В случае ПВГС на основе ПП марки 14/7 в первом и третьем экспериментах наблюдается практически идентичный рост, в то время как в эксперименте №2 прослеживается выраженное ступенчатое растяжение, из-

за чего максимальное давление достигается с запозданием в 0,18-0,28 мкс. При этом в данном эксперименте зафиксирована высокая скорость детонации, не характерная для подобных составов, что указывает на ранее выявленные особенности детонации ПП. Для всех трех профилей наблюдается излом, позволяющий предположить достижение условия Чепмена-Жуге, однако для 2-го и 3-го экспериментов после этого наблюдается рост массовой скорости и образование вторых пиков, характерные для ПВГС на основе ПП марки 14/7.

На рисунке 3.37 приводится сравнение типовых профилей $u(t)$ исследованных составов с профилями взрывчатых составов военного (А-IX-1) и промышленного назначения (Аммонит №6ЖВ).

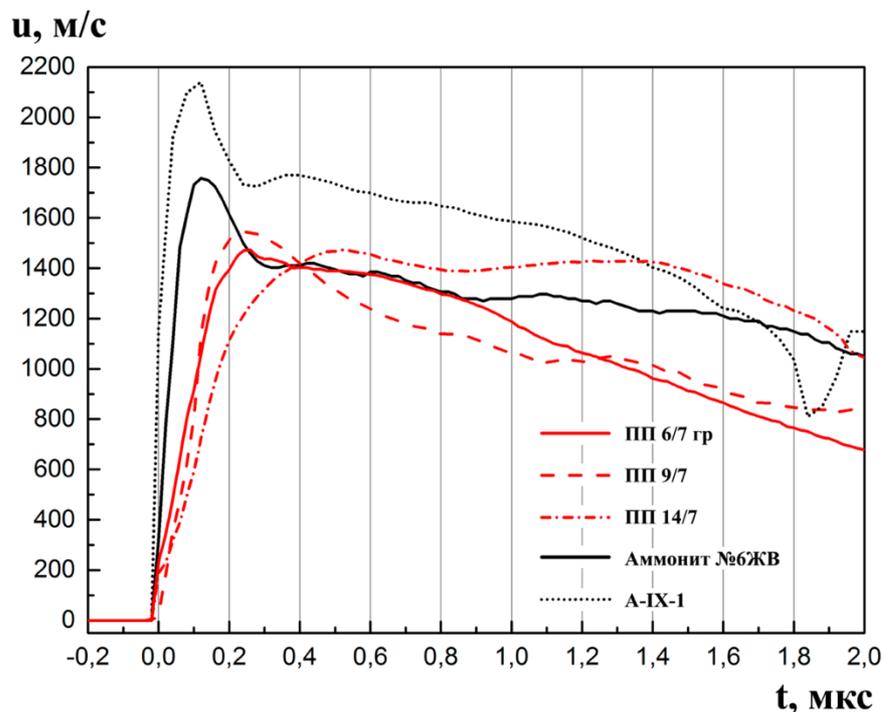


Рисунок 3.37. Профили $u(t)$ для ПВГС на основе ПП марок 6/7 гр, 9/7, 14/7 и водного геля Состава №3 в сравнении с А-IX-1 и Аммонитом №6ЖВ

В сравнении с профилями массовой скорости взрывчатых составов военного и промышленного назначения наблюдается выраженное замедление

роста массовой скорости в ударном фронте, характерные для всех исследуемых составов, и вероятнее всего связаны с некоторым флегматизирующим действием водной составляющей.

Различный наклон указывает на неравномерности фронта детонационной волны ПВГС, подтверждающий ранее выдвинутые предположения о распространении детонационного процесса, результатом чего является наблюдаемое отставание области достижения максимального давления в ПВГС, составляющее от 0,1 до 0,4 мкс. В частности, этим можно объяснить аномальное значение скорости детонации в эксперименте №2 для ПВГС на основе 14/7, рассчитанное на основании искаженных опережающими волнами данных. В пользу этого также указывает сходная форма профилей после достижения максимального давления, свидетельствующая об однообразии прохождения основного ударного фронта, за исключением особенностей, характерных для ПП марки 14/7. Примечательным фактом являются высокие значения массовой скорости, превышающие идентичны для ПВГС на основе Состав №2 и приближающиеся к значениям ПВГС на основе Составы №1. В работах [5, 6] водный раствор на основе хлорида кальция демонстрировал меньшие значения бризантности в сравнении с раствором нитрата аммония идентичной плотности. Наиболее вероятным объяснением является эффективное повышение местной плотности водного геля, что повышает основные регистрируемые параметры детонации.

Использование инертных водных гелей в качестве наполнителей ПВГС не является целесообразным, в виду широкой доступности более дешевых, хотя и менее эффективных наполнителей, в частности обычной воды.

3.4.3. Влияние размеров пороховых элементов на параметры детонации пороховых водно-гелевых составов

В работе использовался ПП марок 6/7 гр, 9/7 и 14/7, средние размеры зерен которых представлены в разделе 3.1.1. данной работы. ПВГС на основе указанных марок ПП изготавливался с учетом полного заполнения пространства между зернами пороха наполнителем для создания оптимальных условий течения детонационного процесса [5]. Для ПП марок 4/7, 6/7 гр и 9/7 использовались заряды диаметром 20,5 и 28 мм в полипропиленовой оболочке.

Сравнительные результаты измерений скорости детонации ПВГС в зависимости от размеров (марки) ПП в таблице 3.21.

Таблица 3.21 - 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, не смотря на снижение удельного количества ПП в составе. Наиболее вероятным объяснением этого является повышение собственной детонационной способности отдельного элемента с ростом его размеров, а также усиление проявления струйных эффектов в каналах ПП, способствующих распространению детонационного процесса как внутри собственного порохового элемента, так и передачу детонации соседним

пороховым элементам. Снижение скорости детонации в случае с ПВГС на основе водного геля Состава №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.

Типовые профили $u(t)$ для каждой марки ПП в составе ПВГС на основе различных водных гелей представлены на рисунках 3.38-3.40.

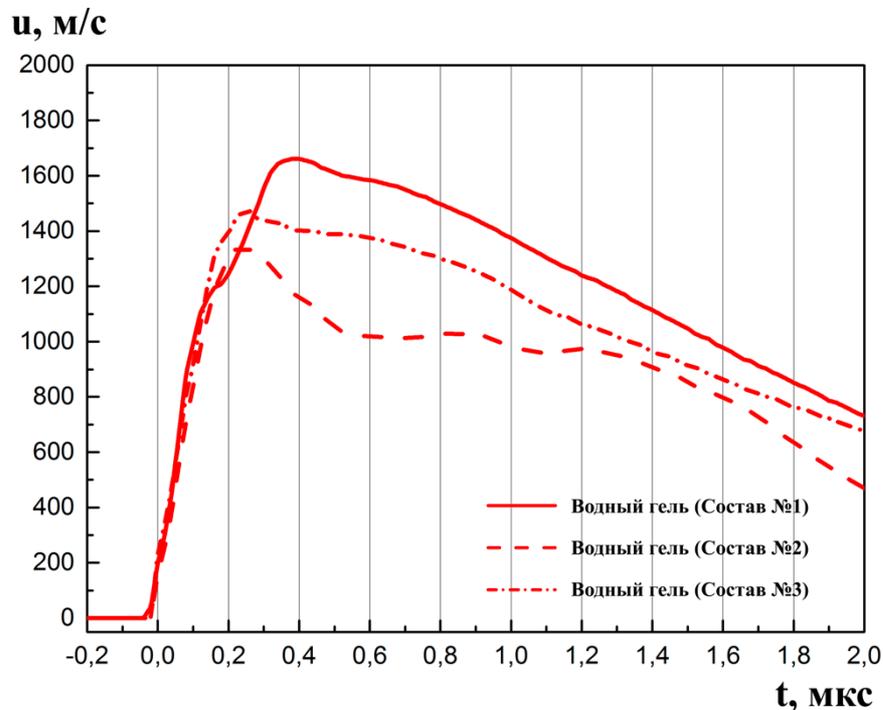


Рисунок 3.38 - Профили $u(t)$ для ПВГС на основе ПП марки 6/7 гр и водных гелей Составов №1, №2 и №3

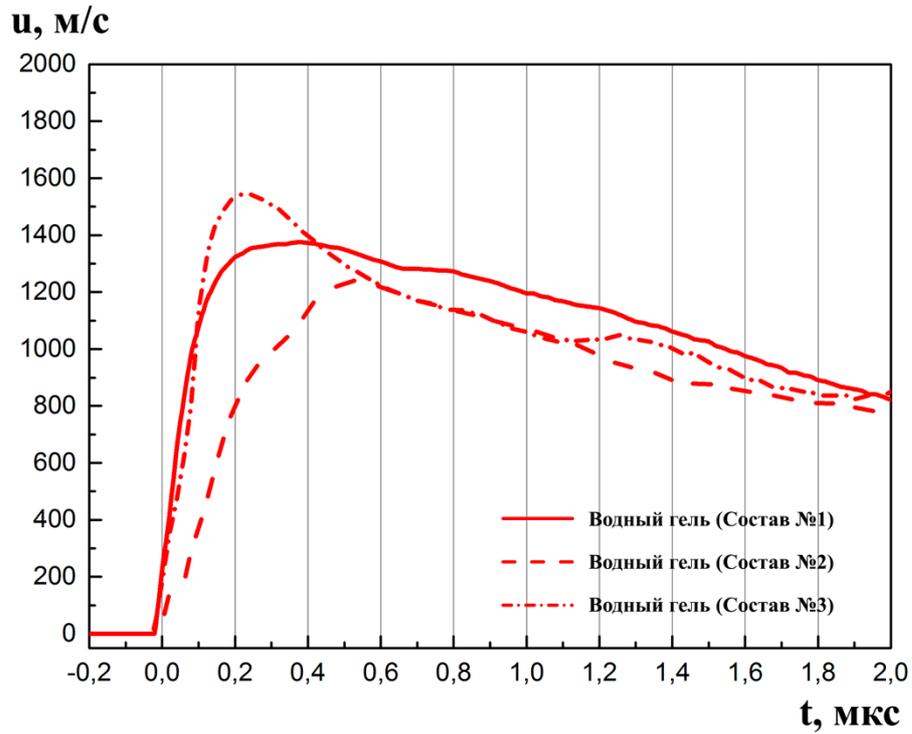


Рисунок 3.39. Профили $u(t)$ для ПВГС на основе ПП марки 9/7 и водных гелей Составов №1, №2 и №3

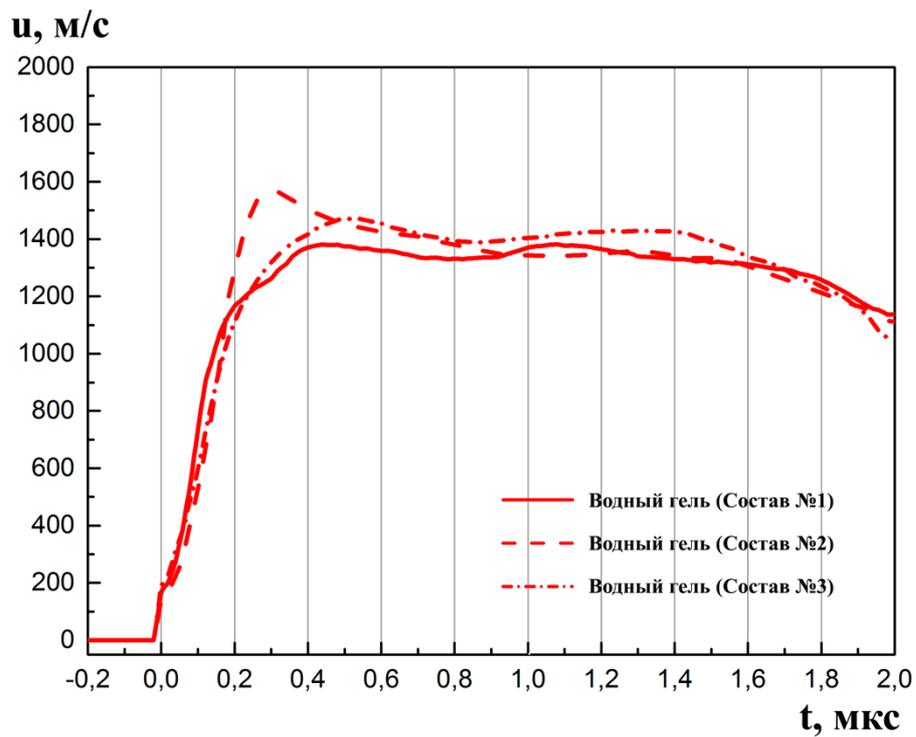


Рисунок 3.40. Профили $u(t)$ для ПВГС на основе ПП марки 14/7 и водных гелей Составов №1, №2 и №3

Для ПП марки 6/7 гр и 14/7 наблюдается высокая сходимость профилей независимо от химического состава используемого водного геля, что подтверждает инициирование и начальное развитие детонационного процесса преимущественно в пороховых элементах. Для ПП марки 9/7 наблюдаются выраженные отклонения для ПВГС на основе водного геля Составы №2, вероятнее всего связанные с неудовлетворительным состоянием использованного ПП, в виду несоблюдения условий хранения.

ПП всех марок за исключением 9/7 в составе ПВГС на основе водного геля Составы №2 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.

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 в целом свидетельствует о выраженном влиянии размеров пороховых элементов на детонационный процесс, косвенно подтверждая предположение о распространении детонационного процесса в составе по пороховым элементам [96, 97].

3.4.4. Заключение по результатам экспериментального исследования

Совокупность полученных экспериментальных данных с учетом анализа сведений о детонационных процессах подобных систем [39, 91, 98] и наблюдаемых эффектах их применения [50, 65, 66, 71, 93, 99, 100] позволяют сделать следующие 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. Смещение 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.

3.4.5. Научные аспекты разработки пороховых водно-гелевых составов

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 рецептов ПВГС рекомендуется вести с учетом фактической структуры получаемого состава, контролируя обеспечение прямого контакта

или достаточного для передачи инициирующего импульса через наполнитель расстояния между порохowymi элементами. Сохранение равномерного распределения порохowych 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 порохowymi 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 порохowymi элементами после заполнения водным гелем пустот между порохowymi элементами. Изменение расстояния между порохowymi 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 порохом 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 порохowymi 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 истекшими ГСХ. Установлено уменьшение критического диаметра детонации ПВГС при повышении энергоемкости используемых водных гелей.

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

Рекомендации, перспективы дальнейшей разработки темы

С практической точки зрения отдельное 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%.

Учитывая способность водных гелей, содержащих топливный и окислительный компоненты, поддерживать детонацию ПВГС в достаточно широких пределах, количество используемого в ПВГС водного геля и его химический состав могут выступать инструментом регулирования параметров детонации.

Разработанные рекомендации для научно обоснованного проектирования пороховых водно-гелевых составов с учетом особенностей механизма распространения и течения детонационного процесса направлены и приняты к внедрению буровзрывной компанией ООО «Промстройвзрыв»

(г. Санкт-Петербург) и заводом по утилизации боеприпасов ООО «Гефест-М» (г. Реж, Свердловская обл.).

Полученные результаты могут использоваться при разработке взрывчатых составов на основе зерненных пироксилиновых порохов и конструкций зарядов на их основе для повышения эффективности использования при ведении взрывных работ различного назначения.

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.

Перспективным направлением дальнейших исследований ПВГС являются экспериментальные исследования объема и токсичности продуктов взрыва с учетом химического состава водного геля и особенности течения детонационного процесса с целью повышения экологической безопасности, в том числе до достижения значений, допустимых при ведении подземных и специальных взрывных работ. Другим перспективным направлением является исследование влияния низких температур на детонацию ПВГС, с целью разработки рецептур взрывчатых составов для использования в климатических условиях Арктики.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сведения о федеральной целевой программе «Промышленная утилизация вооружения и военной техники на 2011 - 2015 годы и на период до 2020 года» [Электронный ресурс] // Министерство обороны Российской Федерации [Официальный сайт]. – 2011. - Режим доступа: <http://stat.mil.ru/pubart.htm?id=11845577@cmsArticle> (Дата обращения 25.02.2019).
2. Заместитель Министра обороны РФ генерал армии Дмитрий Булгаков встретился с представителями ведущих российских СМИ [Электронный ресурс] // Министерство обороны Российской Федерации [Официальный сайт]. – 2012. - Режим доступа: https://function.mil.ru/news_page/country/more.htm?id=11527915@egNews (Дата обращения 25.02.2019).
3. Сытый Н.М. Разработка эффективных методов возбуждения детонации винтовочных пироксилиновых порохов и их отходов (Из доклада на юбилейной сессии Киргизского филиала АН СССР, посвященной дню рождения И.В. Сталина, декабрь 1944 г.) // Известия Киргизского филиала АН СССР. -1945. - вып. 2-3. с. 48.
4. Сытый Н.М. Отходы пироксилиновых порохов как бризантное взрывчатое вещество // Опыт использования пироксилиновых порохов на инженерных работах: сборник статей. - М.: Издательство А.Н. Укр. ССР, 1952. - С. 7-16.
5. Апин А.Я. О детонации порохов // Опыт использования пироксилиновых порохов на инженерных работах: сборник статей. - М.: Издательство А.Н. Укр. ССР, 1952. - С. 83-96.
6. Апин А.Я. Роль наполнителей при детонации взрывчатых веществ и порохов // Физика взрыва. Сборник №2. - М.: Издательство А.Н. СССР, 1953. - С.150–166.
7. Мацевич Б.В. Разработка техники и технологии утилизации боеприпасов и приготовления на основе извлеченных зарядов

- промышленных взрывчатых веществ // *Материалы международной конференции «Взрывное дело-99»*. - М.: МГГУ. 1999. - С. 96-106.
8. Paul L. Miller Recycling propellants and explosives into the commercial explosive industry // *«International Journal of Energetic Materials and Chemical Propulsion»*. - 1997. - Volume 4. - pp. 199-204.
 9. S. Zeman & V. Tamchyna Some applications of demilitarized energetic materials in blasting technique // *Brighton Conference Proceedings*, - 2005, - pp. 499-503.
 10. Франтов А.Е. Конверсионные взрывчатые вещества - условия рационального применения в геотехнологиях. - LAP Lambert Academic Publishing, Германия, 2014. – 136 с..
 11. Мацевич Б.В., Щукин Ю.Г., Коломинов И.А., Чернышов С.Н., Лугов М.С., Федосеев В.В Совершенствование промышленных ВВ за счёт применения высокоэнергетических материалов утилизируемых боеприпасов // *Взрывное дело*. - М.: ИПКОН РАН, 2017. - № 117/75. - с. 157-164.
 12. Andrzej Maranda, Katarzyna Lipińska and Marek Lipiński Demilitarized propellants as ingredients in commercial explosives // *Brighton Conference Proceedings*. - 2005. - pp. 493-498.
 13. Peng Wang, Xiaoran Xei and Weidong He Preparation and Performance of a Novel Water Gel Explosive Containing Expired Propellant Grains // *Central European Journal of Energetic Materials*. - 2013. - 10(4). - pp. 495-507.
 14. Комаров А.В. Промежуточные итоги реализации ФЦП «Промышленная утилизация вооружения и военной техники на 2011–2015 годы и на период до 2020 года». Современные особенности планирования и организации утилизационных процессов // *Актуальные проблемы утилизации ракет и боеприпасов. Безопасность, ресурсосбережение, экология: сб. докл. науч.–практич. конф. Улан–Удэ*. - 2015. - С. 21–28.

15. Мацеевич Б.В. Номенклатура и характеристика промышленных взрывчатых материалов. - М.: Наука, 1986. - 98 с.
16. Васильев С.В. Актуальные проблемы безопасной утилизации ракет и боеприпасов // VIII Международная научно-техническая конференция «Актуальные проблемы утилизации ракет». Сб. докладов. - М.: «Типография ФКП «НИИ «Геодезия», 2012. - С. 8-14.
17. Мацеевич Б.В. Девять прошедших конференций: история, задачи, результаты, перспектива // Актуальные проблемы утилизации ракет и боеприпасов. Безопасность, ресурсосбережение, экология: сб. докл. научн.–практич. конф. Улан–Удэ. - 2015. - С.15–21.
18. Белин В.А. Физико-техническое обоснование взрывного разрушения горных пород на карьерах с применением утилизируемых ВВ: автореферат дисс. ... докт. техн. наук: 05.15.11/ Белин Владимир Арнольдович. -М., 1996. - 37 с.
19. Щукин Ю.Г. Промышленные взрывчатые вещества на основе утилизированных боеприпасов: учебное пособие для ВУЗов // под общей ред. Ю.Г. Щукина. - М.: Издательство «Недра», 1998. - 319 с.
20. Ильющенко А. Ф. Применение в промышленности высокоэнергетических взрывчатых веществ: справ. пособие // под общ. ред. А. Ф. Ильющенко. - Минск: Беларуская навука, 2017. - 283 с.
21. ГОСТ 4117-78. Тротил для промышленных взрывчатых веществ. Технические условия.
22. Дремин А.Н., Савров С.Д., Трофимов В.С., Шведов К.К. Детонационные волны в конденсированных средах. - М.: Издательство «Наука», 1970. - 164 с.
23. Андреев К.К., Беляев А.Ф. Теория взрывчатых веществ. - М.: научно-техническое издательство ОБОРОНГИЗ, 1960. - 596 с.
24. Косточко А.В., Косточко А.А., Ибрагимов Р.А., Храмова Е.В. Проблемные вопросы утилизации порохов и некоторые области

- применения их в народном хозяйстве // Вестник Казанского технологического университета, - 2012. - Т. 15, - № 10. - с. 54-59.
25. Генералов М.Б. Основные процессы и аппараты технологии промышленных взрывчатых веществ: учебное пособие для ВУЗов. - М.: ИКЦ «Академкнига», 2004. - 397 с.
 26. ГОСТ 21988-76 Вещества взрывчатые промышленные. Граммониты. Технические условия (с Изменениями N 1-7).
 27. Доманов В.П., Варнаков Ю. В., Батраков Д. Н., Плешаков К. А., Варнаков К. Ю. Исследования газовой вредности взрывчатых веществ, предназначенных для формирования скважинных зарядов // Вестник Научного центра. - 2012. - №2. - С. 51-57.
 28. ТУ ВУ 100512805.005-2007 Нитротол. Технические условия
 29. ГОСТ 12696-77 Вещества взрывчатые промышленные. Алюмотол. Технические условия (с Изменениями N 1, 2, 3, 4).
 30. Ловля С.А., Каплан Б.Л., Майоров В.В. и др. Взрывное дело. / Ловля С.А. - Изд 2-е, переработанное. - М.: «Недра», 1976. - 272 с.
 31. ТУ 07511819-149-2003 Эмульсен ГА. Технические условия.
 32. ГОСТ 21984-76 Вещества взрывчатые промышленные. Аммонит №6ЖВ и аммонал водоустойчивые. Технические условия (с Изменениями N 1-6).
 33. 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.
 34. Джек Келли Порох. От алхимии до артиллерии: история вещества, которое изменило мир / Джек Келли. - пер. с англ. Александра Турова. - М.: Колибри, 2005. - 340 с.
 35. Горст А.Г. Пороха и взрывчатые вещества: учебное пособие для студентов ВУЗов/ Горст А.Г. – М.: Издательство

«Машиностроение», 1972. – 208 с.

36. Tadeusz Urbanski Chemistry and Technology of Explosives/ Tadeusz Urbanski. - translation Marian Jurecki. - Oxford: Pergamon Press Ltd, 1967. - Vol. 3. - pp. 540-541.
37. Тарасов А.П. Производство бездымных порохов (справочные материалы). - М.: Дом техники, 1963. -302 с.
38. Будников М.А., Левкович Н.А., Быстров И.В. и др. Взрывчатые вещества и пороха/ Будников М.А. - М.: Гос изд. Оборонной промышленности, 1955. - 363 с.
39. Занегин И.В., Карачинский С.И. Детонационные и физико-химические характеристики артиллерийских порохов // Физика горения и взрыва. - 2001, - т.37, - № 5, - с. 81-84.
40. ТУ 07511819-103-97 Гранипоры. Технические условия.
41. ТУ 17131060-03-97 Гранипор ППС. Технические условия.
42. ТУ 361403062-01-95 Гранипор ФМ. Технические условия.
43. ТУ 36 1403062-03-95 Гидропор. Технические условия.
44. ТУ 36 1403062-07-96 Нитропор. Технические условия.
45. ТУ 7276-021-07509505-2001 Гранипоры БП. Технические условия.
46. ТУ 7509009-66-93 Гельпор. Технические условия.
47. ТУ 7276-003-02066492-03. Гельпор ГП-2. Технические условия.
48. ТУ 7276-001-11327508-2012. Гельпор ГПС. Технические условия.
49. ТУ 7276-572-05121441-2011. Гельпор ГП-Т. Технические условия.
50. Викторов С.Д., Франтов А.Е., Закалинский В.М. Теория-техника-технология взрывных работ с применением конверсионных ВВ в процессах горного производства. - М.: ИПКОН РАН, 2019. - 384 с.
51. Белин В. А., Кутузов Б. Н., Ганопольский М. И., Оверченко М. Н. Технология и безопасность взрывных работ. - М.: Изд-во «Горное дело» ООО «Киммерийский центр», 2016. - 424 с.
52. Евменко С.Л., Иванко А.В., Иноземцев И.Н., Евмененко Е.В. Взрывчатый состав // Патент Республики Беларусь №20956. – 2017.

53. Шалыгин Н.К., Калацей В.И., Мардасов О.С., Мацевич Б.В., Глинский В.П., Травов Г.А., Селезнев Н.П., Александрова Е.Ю., Образцова Е.Ф. Промышленный взрывчатый состав «Поротол» // Патент России №2126780. – 1999.
54. Erode G. Mahadevan Ammonium Nitrate Explosives for Civil Applications/ Erode G. Mahadevan. - Weinheim: Wiley-VCH Verlag & Co. KGaA, 2013 - p. 59-86.
55. Technical Data Sheet Detagel™ [Электронный ресурс] // Orica Limited. [Официальный сайт] – 2019. - Режим доступа: http://www.oricamining.com/download/file_id_18538/ (дата обращения: 20.05.2019).
56. TOVEX WATER GEL EXPLOSIVE [Электронный ресурс] // Biaofo Industries Limited [Официальный сайт] – 2019. - Режим доступа: <http://www.biafo.com/tovex.htm> (дата обращения: 20.05.2019).
57. Technical Data Sheet RIOFLEX RAPID [Электронный ресурс] // MaxamCorp Holding, S.L. [Официальный сайт] – 2019. Режим доступа: http://productinformation.maxam-corp.com.au/Product_Information/Bulk_Explosives/TDS/MAXAM_TDS_RIOFLEXRAPIDUG_170111_PRINT.pdf (дата обращения: 20.05.2019).
58. Kevin Tallent, Gary Eck Surplus military propellants as ingredients in commercial explosives // International Society of Explosives Engineers, - 2000, - pp. 1-10.
59. Peng Wang, Xiao-an Wei, Weidong He, Yanlong Shi Applications and technologies of reusing waste gun propellants // «Advanced Materials Research». - 2013, - Vols. 781-784, - pp. 1998-2002.
60. Hemalal P. V. A., Dharmaratne P. G. R. and Kumarage P. I. Use of Dynamites, Water-Gels and Emulsion Explosives in Sri Lankan Quarrying/Mining Practice // «ENGINEER». – 2015. - Vol. XLVII. - № 01. - pp. 31-37.

61. Basil T. Fedoroff, Oliver E. Sheffield Encyclopedia of explosives and related items. - 1975. - Vol. 7. - 639 p.
62. Актуальные проблемы промышленной утилизации ракет и боеприпасов. Безопасность, ресурсосбережение, экология. Сборник докладов. – 2015. – 232 с.
63. ТУ 0254-001-35440020-2010 Гель ВИА. Технические условия.
64. ТУ 7276-572-05121441-2011. Гельпор ГП-1. Технические условия.
65. Дорошенко С.И., Михайлов Н.П. и др. Эффективность применения ПВМ на гелевой основе в инженерном деле // Пятая международная научная конференция «Физические проблемы разрушения горных пород». Записки Горного института. - СПб.: СПГИ (ТУ), 2007. - Т.171. - с. 150-152.
66. Дорошенко С.И., Будков А.М. и др. Сравнительные расчеты сейсмического действия взрывов зарядов ТНТ и гелевых ПВВ // Комплексная утилизация обычных видов боеприпасов: Сборник докладов. - М., ИД «Оружие и технологии», 2007. - с. 268-272.
67. 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.
68. Акинин Н.И., Франтов А.Е., Артемьев А.А., Мытарев В.М., Губайдуллин В.М. Об экономическом эффекте применения геляпора на основе результатов сравнительных испытаний при массовом взрыве. Взрывное дело. - М.: ИПКОН РАН, 2018. - №121/78. - С. 100-110.
69. Анников В.Э., Губайдуллин В.М., Бригадин И.В., Краснов С.А., Голуб М.В. Результаты сравнительного воздействия взрывов зарядов геляпора, нитронита и аммонита при разделке негабаритных блоков Взрывное дело. - М.: ИПКОН РАН, 2018. - №121/78. - С. 111-123.
70. Губайдуллин В.М., Дорошенко А.В., Хазов А.Н., Широков С.И.

Совершенствование технологии применения гелевых взрывчатых веществ для разрушения скальных пород. Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). - 2018. - № 4. - С. 84-90.

71. Семеняк С.Ю. Использование геляпора для взрывоподготовки горной массы в условиях карьеров производства строительного материала // Горный информационно-аналитический бюллетень - 2005. - №8. - С. 172–174.
72. Кондриков Б.Н., Сумин А.И. Уравнение состояния газов при высоком давлении // Физика горения и взрыва. - 1987. - т.23, - №1. - С. 114-122.
73. Sumin A.I., Gamezo V.N., Kondrikov B.N., Raikova V.M. Shock and detonation general kinetics and thermodynamics in reactive systems computer package // Proceedings 11th Int. Symposium on Detonation. Snowmass. Colorado. - 1998. - pp. 30-35.
74. Сумин А.И., Кондриков Б.Н. Методические указания по использованию программного комплекса «Shock and detonation» для расчета ударноволновых и детонационных параметров конденсированных веществ. - М.: РХТУ им. Д.И. Менделеева, 1994. - 26 с.
75. Анников В.Э., Акинин Н.И., Михеев Д.И., Ротенберг Е.В. Оценка экологической безопасности при утилизации артиллерийских боеприпасов // Взрывное дело. - М.: ЗАО «МВК по взрывному делу», 2014. - №111/68. - с. 275-282.
76. Савицкая М.Н., Холодова Ю.Д. Полиакриламид. - Киев: Техника, 1969. - 188 с.
77. Дик В.Н. Взрывчатые вещества, пороха и боеприпасы отечественного производства. Часть 1. Справочные материалы: Справочник / В.Н. Дик. – Минск: Охотконтракт, 2009. – 280 с.
78. Йоганнес Хаммер. Научно-исследовательские приборы

Гидростатические весы для определения плотности жидкости.
Инструкция по применению. – 4 с.

79. Анников В.Э., Кондриков Б.Н., Олейников В.А. Способ изготовления зарядов гелеобразного водосодержащего взрывчатого состава // Патент РФ №2253642. 2005.
80. Козак Г.Д., Райкова В.М., Алешкина Е.И. Критические условия распространения и фоторегистрация детонационных процессов: учеб. пособие. - М.: РХТУ им. Д.И. Менделеева. 2005. - 64 с.
81. Зайцев В.М., Похил П.Ф. и Шведов К.К. Электромагнитный метод измерения скорости продуктов взрыва // Доклады АН СССР, - 1960, - с. 1339-1340.
82. Дремин А.Н., Шведов К.К., Веретенников В.А. Исследование детонации аммонита ПЖВ-20 и некоторых других ВВ // Взрывное дело. - 1963. - №52/9. - С. 10-25.
83. Хотин В.Г., Пономарев В.А., Ахачинский А.В., Бачурин С.П., Козлов А.И. Определение параметров детонационных и ударных волн электромагнитным методом: учеб. пособие. - М.: МХТИ им. Д.И. Менделеева, 1980. - 20 с.
84. Акинин Н.И. Снижение взрывоопасности мощных энергоемких материалов: Учеб. пособие. - М.:РХТУ им. Д.И. Менделеева, 2005. - 60 с.
85. Хотин В.Г., Пономарев В.А., Мясников К.Б. О вычисление параметров ударных волн в инертных средах, граничащих с зарядом смесового взрывчатого вещества // Вопросы теории взрывчатых веществ: труды института. Выпуск 83-й. - М.: МХТИ им. Д.И. Менделеева, 1974. - С. 161-165.
86. Анников В.Э., Михеев Д.И., Акинин Н.И. Трунин В.В., Соболева Л.И. Исследование детонации водно-гелевых взрывчатых составов типа гелпор // 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. - М.: ДеЛи плюс, 2015. - С. 238–242.
87. 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.
88. Веприкова А.А., Трунин В.В., Балабаева Е.В., Тихомиров К.А., Анников В.Э. Определение параметров детонации алюминийсодержащих водонаполненных составов электромагнитным методом // Успехи в химии и химической технологии: Сб. науч. трудов. - М.: РХТУ им. Д.И. Менделеева, 2009. - Том XXIII, - №4. - С. 53-57.
89. Анников В.Э., Веприкова А.А., Райкова В.М., Трунин В.В. Исследование детонации гелеобразных составов, содержащих полидисперсный алюминий // Взрывное дело. - 2010. - №104/61. - С. 205-213.
90. 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.
91. Митрофанов В.В. Детонация гомогенных и гетерогенных систем. – Новосибирск: Изд-во Ин-та гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, 2003, - 200 с.
92. Акт-Отчет по теме «Определение эффективности рецептур геляпора ГПС, соответствующего требованиям ТУ7276-001-11327508-2012, с применением пороха ВУфл ОСТ В84-1943-81 и выдача рекомендаций к технологическому процессу его изготовления», - 11 с.
93. Ненахов И.А. сравнительная оценка работоспособности водно-

гелевых и обычных гранипоров в обводненных условиях. Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). - 2007. - № S5. - с. 230-238.

94. Акинин Н. И., Анников В. Э., Михеев Д. И., Державец А.С., Соболева Л.И., Бригадин И.В., Дорошенко С.И. 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.
95. 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.
96. 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.
97. 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.
98. Дремин А.Н. Открытия в исследовании детонации молекулярных конденсированных взрывчатых веществ в XX веке. // Физика горения и взрыва. - 2000. - Т. 36. - № 6. - С. 31-44.
99. 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.

100. 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.

Протоколы расчетов программного комплекса Shock and Detonation

ПВГС ПП/Состав.№1 в соотношении 100/0

Formula: N9.17H28.97O36.52C21.49
 Oxygen balance: -33.5% Nitrogen content: 12.8%
 Density, g/cc: 1.542
 Enthalpy of formation, kJ/mol: -3712.823
 Equilibrium products composition (mol/kg)

N2	CO	CO2	H2O	H2
4.34E+0000	7.09E-0001	1.34E+0001	8.97E+0000	9.03E-0001
O2	C_GR	NH3	CH4	NO
0.00E+0000	5.43E+0000	4.91E-0001	1.93E+0000	8.24E-0005
NAOH				
0.00E+0000				

Detonation velocity, m/s: 6768
 Particle velocity, m/s: 1535
 Detonation pressure, GPa: 16.02
 Detonation temperature, K: 2934
 Specific volume, cc/g: 0.501
 Heat of detonation (Qv), kJ/kg: 4059
 Volume of gases (n.c), m³/kg: 0.689
 Polytropic exponent: 3.41

ПВГС ПП/Состав.№1 в соотношении 95/5

Formula: N9.53H30.64O36.71C20.50NA0.09
 Oxygen balance: -31.4% Nitrogen content: 0.1%
 Density, g/cc: 1.534
 Enthalpy of formation, kJ/mol: -3936.018
 Equilibrium products composition (mol/kg)

N2	CO	CO2	H2O	H2
4.50E+0000	6.05E-0001	1.32E+0001	9.59E+0000	8.65E-0001
O2	C_GR	NH3	CH4	NO
0.00E+0000	4.66E+0000	5.23E-0001	2.02E+0000	5.66E-0005
NAOH				
8.70E-0002				

Detonation velocity, m/s: 6758
 Particle velocity, m/s: 1524
 Detonation pressure, GPa: 15.79
 Detonation temperature, K: 2845
 Specific volume, cc/g: 0.505
 Heat of detonation (Qv), kJ/kg: 3940
 Volume of gases (n.c), m³/kg: 0.702
 Polytropic exponent: 3.44

ПВГС ПП/Состав.№1 в соотношении 90/10

Formula: N9.88H32.32O36.91C19.51NA0.17
 Oxygen balance: -29.4% Nitrogen content: 0.2%
 Density, g/cc: 1.526
 Enthalpy of formation, kJ/mol: -4159.214
 Equilibrium products composition (mol/kg)

N2	CO	CO2	H2O	H2
4.66E+0000	5.07E-0001	1.30E+0001	1.02E+0001	8.18E-0001
O2	C_GR	NH3	CH4	NO
0.00E+0000	3.92E+0000	5.56E-0001	2.09E+0000	3.86E-0005
NAOH				

1.74E-0001
 Detonation velocity, m/s: 6747
 Particle velocity, m/s: 1519
 Detonation pressure, GPa: 15.65
 Detonation temperature, K: 2761
 Specific volume, cc/g: 0.508
 Heat of detonation (Qv), kJ/kg: 3821
 Volume of gases (n.c), m³/kg: 0.714
 Polytropic exponent: 3.44

ПВГС III/Состав.№1 в соотношении 85/15

Formula: N10.24H33.99O37.10C18.52NA0.26
 Oxygen balance: -27.3% Nitrogen content: 0.3%
 Density, g/cc: 1.519
 Enthalpy of formation, kJ/mol: -4382.409
 Equilibrium products composition (mol/kg)

N2	CO	CO2	H2O	H2
4.83E+0000	4.24E-0001	1.28E+0001	1.09E+0001	7.71E-0001
O2	C_GR	NH3	CH4	NO
0.00E+0000	3.18E+0000	5.87E-0001	2.15E+0000	2.57E-0005
NAOH				
2.61E-0001				

Detonation velocity, m/s: 6735
 Particle velocity, m/s: 1511
 Detonation pressure, GPa: 15.46
 Detonation temperature, K: 2676
 Specific volume, cc/g: 0.511
 Heat of detonation (Qv), kJ/kg: 3701
 Volume of gases (n.c), m³/kg: 0.726
 Polytropic exponent: 3.46

ПВГС III/Состав.№1 в соотношении 80/20

Formula: N10.60H35.66O37.30C17.52NA0.35
 Oxygen balance: -25.2% Nitrogen content: 0.3%
 Density, g/cc: 1.511
 Enthalpy of formation, kJ/mol: -4605.604
 Equilibrium products composition (mol/kg)

N2	CO	CO2	H2O	H2
4.99E+0000	3.49E-0001	1.25E+0001	1.16E+0001	7.17E-0001
O2	C_GR	NH3	CH4	NO
0.00E+0000	2.47E+0000	6.18E-0001	2.20E+0000	1.70E-0005
NAOH				
3.48E-0001				

Detonation velocity, m/s: 6721
 Particle velocity, m/s: 1510
 Detonation pressure, GPa: 15.33
 Detonation temperature, K: 2595
 Specific volume, cc/g: 0.513
 Heat of detonation (Qv), kJ/kg: 3580
 Volume of gases (n.c), m³/kg: 0.739
 Polytropic exponent: 3.45

ПВГС III/Состав.№1 в соотношении 75/25

Formula: N10.96H37.34O37.49C16.53NA0.43
 Oxygen balance: -23.1% Nitrogen content: 0.4%
 Density, g/cc: 1.503
 Enthalpy of formation, kJ/mol: -4828.799

Equilibrium products composition (mol/kg)

N2	CO	CO2	H2O	H2
5.16E+0000	2.87E-0001	1.22E+0001	1.23E+0001	6.66E-0001
O2	C_GR	NH3	CH4	NO
0.00E+0000	1.77E+0000	6.46E-0001	2.25E+0000	1.07E-0005
NAOH				
4.35E-0001				

Detonation velocity, m/s: 6707
 Particle velocity, m/s: 1497
 Detonation pressure, GPa: 15.09
 Detonation temperature, K: 2511
 Specific volume, cc/g: 0.517
 Heat of detonation (Qv), kJ/kg: 3459
 Volume of gases (n.c), m³/kg: 0.751
 Polytropic exponent: 3.48

ПВГС III/Состав.№1 в соотношении 70/30

Formula: N11.31H39.01O37.69C15.54NA0.52
 Oxygen balance: -21.1% Nitrogen content: 0.5%
 Density, g/cc: 1.496
 Enthalpy of formation, kJ/mol: -5051.994

Equilibrium products composition (mol/kg)

N2	CO	CO2	H2O	H2
5.32E+0000	2.32E-0001	1.19E+0001	1.31E+0001	6.12E-0001
O2	C_GR	NH3	CH4	NO
0.00E+0000	1.09E+0000	6.74E-0001	2.28E+0000	6.65E-0006
NAOH				
5.22E-0001				

Detonation velocity, m/s: 6691
 Particle velocity, m/s: 1489
 Detonation pressure, GPa: 14.90
 Detonation temperature, K: 2430
 Specific volume, cc/g: 0.520
 Heat of detonation (Qv), kJ/kg: 3337
 Volume of gases (n.c), m³/kg: 0.764
 Polytropic exponent: 3.49

ПВГС III/Состав.№1 в соотношении 65/35

Formula: N11.67H40.69O37.88C14.55NA0.61
 Oxygen balance: -19.0% Nitrogen content: 0.6%
 Density, g/cc: 1.488
 Enthalpy of formation, kJ/mol: -5275.190

Equilibrium products composition (mol/kg)

N2	CO	CO2	H2O	H2
5.49E+0000	1.86E-0001	1.16E+0001	1.38E+0001	5.57E-0001
O2	C_GR	NH3	CH4	NO
0.00E+0000	4.43E-0001	7.01E-0001	2.30E+0000	4.02E-0006
NAOH				
6.09E-0001				

Detonation velocity, m/s: 6674
 Particle velocity, m/s: 1481
 Detonation pressure, GPa: 14.71
 Detonation temperature, K: 2351
 Specific volume, cc/g: 0.523
 Heat of detonation (Qv), kJ/kg: 3215
 Volume of gases (n.c), m³/kg: 0.777
 Polytropic exponent: 3.51

ПВГС ПП/Состав.№1 в соотношении 60/40

Formula: N12.03H42.36O38.08C13.56NA0.70
 Oxygen balance: -16.9% Nitrogen content: 0.7%
 Density, g/cc: 1.481
 Enthalpy of formation, kJ/mol: -5498.385
 Equilibrium products composition (mol/kg)

N2	CO	CO2	H2O	H2
5.65E+0000	1.46E-0001	1.12E+0001	1.48E+0001	5.09E-0001
O2	C_GR	NH3	CH4	NO
0.00E+0000	0.00E+0000	7.22E-0001	2.21E+0000	2.40E-0006
NAOH				
6.96E-0001				

Detonation velocity, m/s: 6653
 Particle velocity, m/s: 1462
 Detonation pressure, GPa: 14.41
 Detonation temperature, K: 2271
 Specific volume, cc/g: 0.527
 Heat of detonation (Qv), kJ/kg: 3094
 Volume of gases (n.c), m³/kg: 0.790
 Polytropic exponent: 3.55

ПВГС ПП/Состав.№1 в соотношении 55/45

Formula: N12.39H44.03O38.27C12.57NA0.78
 Oxygen balance: -14.8% Nitrogen content: 0.8%
 Density, g/cc: 1.474
 Enthalpy of formation, kJ/mol: -5721.580
 Equilibrium products composition (mol/kg)

N2	CO	CO2	H2O	H2
5.83E+0000	1.09E-0001	1.06E+0001	1.63E+0001	4.64E-0001
O2	C_GR	NH3	CH4	NO
0.00E+0000	0.00E+0000	7.34E-0001	1.90E+0000	1.53E-0006
NAOH				
7.83E-0001				

Detonation velocity, m/s: 6624
 Particle velocity, m/s: 1448
 Detonation pressure, GPa: 14.13
 Detonation temperature, K: 2202
 Specific volume, cc/g: 0.530
 Heat of detonation (Qv), kJ/kg: 2976
 Volume of gases (n.c), m³/kg: 0.803
 Polytropic exponent: 3.57

ПВГС ПП/Состав.№1 в соотношении 50/50

Formula: N12.74H45.71O38.47C11.58NA0.87
 Oxygen balance: -12.8% Nitrogen content: 0.9%
 Density, g/cc: 1.466
 Enthalpy of formation, kJ/mol: -5944.775
 Equilibrium products composition (mol/kg)

N2	CO	CO2	H2O	H2
6.00E+0000	8.02E-0002	9.90E+0000	1.77E+0001	4.16E-0001
O2	C_GR	NH3	CH4	NO
0.00E+0000	0.00E+0000	7.35E-0001	1.59E+0000	9.50E-0007
NAOH				
8.70E-0001				

Detonation velocity, m/s: 6593
 Particle velocity, m/s: 1434
 Detonation pressure, GPa: 13.86

Detonation temperature, K: 2132
 Specific volume, cc/g: 0.534
 Heat of detonation (Qv), kJ/kg: 2858
 Volume of gases (n.c), m³/kg: 0.816
 Polytropic exponent: 3.60

ПВГС III/Состав.№1 в соотношении 45/55

Formula: N13.10H47.38O38.66C10.59NA0.96
 Oxygen balance: -10.7% Nitrogen content: 1.0%
 Density, g/cc: 1.459
 Enthalpy of formation, kJ/mol: -6167.971
 Equilibrium products composition (mol/kg)

N2	CO	CO2	H2O	H2
6.19E+0000	5.79E-0002	9.24E+0000	1.92E+0001	3.67E-0001
O2	C_GR	NH3	CH4	NO
0.00E+0000	0.00E+0000	7.24E-0001	1.29E+0000	5.70E-0007
NAOH				
9.57E-0001				

Detonation velocity, m/s: 6560
 Particle velocity, m/s: 1419
 Detonation pressure, GPa: 13.58
 Detonation temperature, K: 2063
 Specific volume, cc/g: 0.537
 Heat of detonation (Qv), kJ/kg: 2740
 Volume of gases (n.c), m³/kg: 0.830
 Polytropic exponent: 3.62

ПВГС III/Состав.№1 в соотношении 40/60

Formula: N13.46H49.06O38.86C9.60NA1.04
 Oxygen balance: -8.6% Nitrogen content: 1.0%
 Density, g/cc: 1.452
 Enthalpy of formation, kJ/mol: -6391.166
 Equilibrium products composition (mol/kg)

N2	CO	CO2	H2O	H2
6.38E+0000	4.06E-0002	8.56E+0000	2.07E+0001	3.15E-0001
O2	C_GR	NH3	CH4	NO
0.00E+0000	0.00E+0000	6.98E-0001	9.96E-0001	0.00E+0000
NAOH				
1.04E+0000				

Detonation velocity, m/s: 6527
 Particle velocity, m/s: 1403
 Detonation pressure, GPa: 13.30
 Detonation temperature, K: 1994
 Specific volume, cc/g: 0.541
 Heat of detonation (Qv), kJ/kg: 2621
 Volume of gases (n.c), m³/kg: 0.843
 Polytropic exponent: 3.65

ПВГС III/Состав.№1 в соотношении 35/65

Formula: N13.82H50.73O39.05C8.61NA1.13
 Oxygen balance: -6.5% Nitrogen content: 1.1%
 Density, g/cc: 1.445
 Enthalpy of formation, kJ/mol: -6614.361
 Equilibrium products composition (mol/kg)

N2	CO	CO2	H2O	H2
6.58E+0000	2.74E-0002	7.87E+0000	2.21E+0001	2.63E-0001
O2	C_GR	NH3	CH4	NO

0.00E+0000 0.00E+0000 6.51E-0001 7.06E-0001 0.00E+0000
 NAOH
 1.13E+0000
 Detonation velocity, m/s: 6491
 Particle velocity, m/s: 1388
 Detonation pressure, GPa: 13.02
 Detonation temperature, K: 1926
 Specific volume, cc/g: 0.544
 Heat of detonation (Qv), kJ/kg: 2503
 Volume of gases (n.c), m³/kg: 0.857
 Polytropic exponent: 3.68

ПВГС III/Состав.№1 в соотношении 30/70

Formula: N14.17H52.40O39.25C7.62NA1.22
 Oxygen balance: -4.5% Nitrogen content: 1.2%
 Density, g/cc: 1.438
 Enthalpy of formation, kJ/mol: -6837.556
 Equilibrium products composition (mol/kg)
 N2 CO CO2 H2O H2
 6.80E+0000 1.74E-0002 7.17E+0000 2.37E+0001 2.08E-0001
 O2 C_GR NH3 CH4 NO
 0.00E+0000 0.00E+0000 5.71E-0001 4.28E-0001 0.00E+0000
 NAOH
 1.22E+0000
 Detonation velocity, m/s: 6454
 Particle velocity, m/s: 1371
 Detonation pressure, GPa: 12.73
 Detonation temperature, K: 1857
 Specific volume, cc/g: 0.548
 Heat of detonation (Qv), kJ/kg: 2384
 Volume of gases (n.c), m³/kg: 0.871
 Polytropic exponent: 3.71

ПВГС III/Состав.№1 в соотношении 25/75

Formula: N14.53H54.08O39.44C6.62NA1.30
 Oxygen balance: -2.4% Nitrogen content: 1.3%
 Density, g/cc: 1.431
 Enthalpy of formation, kJ/mol: -7060.751
 Equilibrium products composition (mol/kg)
 N2 CO CO2 H2O H2
 7.05E+0000 9.77E-0003 6.44E+0000 2.52E+0001 1.49E-0001
 O2 C_GR NH3 CH4 NO
 0.00E+0000 0.00E+0000 4.32E-0001 1.73E-0001 0.00E+0000
 NAOH
 1.30E+0000
 Detonation velocity, m/s: 6416
 Particle velocity, m/s: 1351
 Detonation pressure, GPa: 12.41
 Detonation temperature, K: 1789
 Specific volume, cc/g: 0.552
 Heat of detonation (Qv), kJ/kg: 2267
 Volume of gases (n.c), m³/kg: 0.885
 Polytropic exponent: 3.75

ПВГС III/Состав.№1 в соотношении 20/80

Formula: N14.89H55.75O39.64C5.63NA1.39
 Oxygen balance: -0.3% Nitrogen content: 1.4%

Density, g/cc: 1.425
 Enthalpy of formation, kJ/mol: -7283.947
 Equilibrium products composition (mol/kg)

N2	CO	CO2	H2O	H2
7.40E+0000	2.32E-0003	5.63E+0000	2.70E+0001	4.61E-0002
O2	C_GR	NH3	CH4	NO
0.00E+0000	0.00E+0000	9.51E-0002	2.47E-0003	0.00E+0000
NAOH				
1.39E+0000				

Detonation velocity, m/s: 6377
 Particle velocity, m/s: 1338
 Detonation pressure, GPa: 12.15
 Detonation temperature, K: 1727
 Specific volume, cc/g: 0.555
 Heat of detonation (Qv), kJ/kg: 2155
 Volume of gases (n.c), m³/kg: 0.900
 Polytropic exponent: 3.77

ПВГС III/Состав№1 в соотношении 15/85

Formula: N15.25H57.43O39.83C4.64NA1.48
 Oxygen balance: 1.8% Nitrogen content: 1.5%
 Density, g/cc: 1.418
 Enthalpy of formation, kJ/mol: -7507.142
 Equilibrium products composition (mol/kg)

N2	CO	CO2	H2O	H2
7.62E+0000	0.00E+0000	4.64E+0000	2.80E+0001	0.00E+0000
O2	C_GR	NH3	CH4	NO
5.45E-0001	0.00E+0000	0.00E+0000	0.00E+0000	5.61E-0003
NAOH				
1.48E+0000				

Detonation velocity, m/s: 6237
 Particle velocity, m/s: 1290
 Detonation pressure, GPa: 11.41
 Detonation temperature, K: 1527
 Specific volume, cc/g: 0.559
 Heat of detonation (Qv), kJ/kg: 1816
 Volume of gases (n.c), m³/kg: 0.914
 Polytropic exponent: 3.83

ПВГС III/Состав№1 в соотношении 10/90

Formula: N15.60H59.10O40.03C3.65NA1.57
 Oxygen balance: 3.8% Nitrogen content: 1.6%
 Density, g/cc: 1.411
 Enthalpy of formation, kJ/mol: -7730.337
 Equilibrium products composition (mol/kg)

N2	CO	CO2	H2O	H2
7.80E+0000	0.00E+0000	3.65E+0000	2.88E+0001	0.00E+0000
O2	C_GR	NH3	CH4	NO
1.19E+0000	0.00E+0000	0.00E+0000	0.00E+0000	2.21E-0003
NAOH				
1.57E+0000				

Detonation velocity, m/s: 6059
 Particle velocity, m/s: 1221
 Detonation pressure, GPa: 10.43
 Detonation temperature, K: 1295
 Specific volume, cc/g: 0.566
 Heat of detonation (Qv), kJ/kg: 1433
 Volume of gases (n.c), m³/kg: 0.928

Polytropic exponent: 3.96

ПВГС III/Состав.№1 в соотношении 5/95

Formula: N15.96H60.77O40.22C2.66NA1.65

Oxygen balance: 5.9% Nitrogen content: 1.7%

Density, g/cc: 1.405

Enthalpy of formation, kJ/mol: -7953.532

Equilibrium products composition (mol/kg)

N2	CO	CO2	H2O	H2
7.98E+0000	0.00E+0000	2.66E+0000	2.96E+0001	0.00E+0000
O2	C_GR	NH3	CH4	NO
1.84E+0000	0.00E+0000	0.00E+0000	0.00E+0000	3.83E-0004
NAOH				
1.65E+0000				

Detonation velocity, m/s: 5852
 Particle velocity, m/s: 1144
 Detonation pressure, GPa: 9.41
 Detonation temperature, K: 1056
 Specific volume, cc/g: 0.573
 Heat of detonation (Qv), kJ/kg: 1051
 Volume of gases (n.c), m³/kg: 0.942
 Polytropic exponent: 4.11

ПВГС III/Состав.№1 в соотношении 0/100

Formula: N16.32H62.45O40.42C1.67NA1.74

Oxygen balance: 8.0% Nitrogen content: 1.7%

Density, g/cc: 1.398

Enthalpy of formation, kJ/mol: -8176.728

Equilibrium products composition (mol/kg)

N2	CO	CO2	H2O	H2
8.16E+0000	0.00E+0000	1.67E+0000	3.04E+0001	0.00E+0000
O2	C_GR	NH3	CH4	NO
2.49E+0000	0.00E+0000	0.00E+0000	0.00E+0000	1.71E-0005
NAOH				
1.74E+0000				

Detonation velocity, m/s: 5606
 Particle velocity, m/s: 1062
 Detonation pressure, GPa: 8.32
 Detonation temperature, K: 810
 Specific volume, cc/g: 0.580
 Heat of detonation (Qv), kJ/kg: 669
 Volume of gases (n.c), m³/kg: 0.956
 Polytropic exponent: 4.28

ПВГС III/Состав.№2 в соотношении 100/0

Formula: N9.17H28.97O36.52

Oxygen balance: -33.5% Nitrogen content: 12.8%

Density, g/cc: 1.542

Enthalpy of formation, kJ/mol: -3712.823

Equilibrium products composition (mol/kg)

N2	CO	CO2	H2O	H2
4.34E+0000	7.09E-0001	1.34E+0001	8.97E+0000	9.03E-0001
O2	C_GR	NH3	CH4	NO
0.00E+0000	5.43E+0000	4.91E-0001	1.93E+0000	8.24E-0005
NAOH				
0.00E+0000				

Detonation velocity, m/s: 6768
 Particle velocity, m/s: 1535
 Detonation pressure, GPa: 16.02
 Detonation temperature, K: 2934
 Specific volume, cc/g: 0.501
 Heat of detonation (Qv), kJ/kg: 4059
 Volume of gases (n.c), m³/kg: 0.689
 Polytropic exponent: 3.41

ПВГС ПП/Состав.№2 в соотношении 95/5

Formula: N9.45H30.43O36.81NA0.12C20.41
 Oxygen balance: -30.9% Nitrogen content: 0.1%
 Density, g/cc: 1.535
 Enthalpy of formation, kJ/mol: -3933.101
 Equilibrium products composition (mol/kg)

N2	CO	CO2	H2O	H2
4.47E+0000	6.26E-0001	1.33E+0001	9.49E+0000	8.75E-0001
O2	C_GR	NH3	CH4	NO
0.00E+0000	4.49E+0000	5.17E-0001	2.01E+0000	6.11E-0005
NAOH				
1.16E-0001				

Detonation velocity, m/s: 6763
 Particle velocity, m/s: 1525
 Detonation pressure, GPa: 15.84
 Detonation temperature, K: 2863
 Specific volume, cc/g: 0.505
 Heat of detonation (Qv), kJ/kg: 3961
 Volume of gases (n.c), m³/kg: 0.701
 Polytropic exponent: 3.43

ПВГС ПП/Состав.№2 в соотношении 90/10

Formula: N9.73H31.90O37.10NA0.23C19.34
 Oxygen balance: -28.2% Nitrogen content: 0.2%
 Density, g/cc: 1.528
 Enthalpy of formation, kJ/mol: -4153.379
 Equilibrium products composition (mol/kg)

N2	CO	CO2	H2O	H2
4.59E+0000	5.43E-0001	1.31E+0001	1.00E+0001	8.38E-0001
O2	C_GR	NH3	CH4	NO
0.00E+0000	3.58E+0000	5.45E-0001	2.07E+0000	4.58E-0005
NAOH				
2.33E-0001				

Detonation velocity, m/s: 6757
 Particle velocity, m/s: 1529
 Detonation pressure, GPa: 15.78
 Detonation temperature, K: 2797
 Specific volume, cc/g: 0.506
 Heat of detonation (Qv), kJ/kg: 3864
 Volume of gases (n.c), m³/kg: 0.712
 Polytropic exponent: 3.42

ПВГС ПП/Состав.№2 в соотношении 85/15

Formula: N10.02H33.37O37.39NA0.35C18.27
 Oxygen balance: -25.6% Nitrogen content: 0.3%
 Density, g/cc: 1.521
 Enthalpy of formation, kJ/mol: -4373.658
 Equilibrium products composition (mol/kg)

N2 CO CO2 H2O H2
 4.72E+0000 4.74E-0001 1.30E+0001 1.06E+0001 8.03E-0001
 O2 C_GR NH3 CH4 NO
 0.00E+0000 2.67E+0000 5.71E-0001 2.13E+0000 3.32E-0005
 NAOH
 3.49E-0001
 Detonation velocity, m/s: 6749
 Particle velocity, m/s: 1521
 Detonation pressure, GPa: 15.61
 Detonation temperature, K: 2728
 Specific volume, cc/g: 0.509
 Heat of detonation (Qv), kJ/kg: 3766
 Volume of gases (n.c), m³/kg: 0.723
 Polytropic exponent: 3.44

ПВГС III/Состав.№2 в соотношении 80/20

Formula: N10.30H34.83O37.69NA0.47C17.19
 Oxygen balance: -22.9% Nitrogen content: 0.5%
 Density, g/cc: 1.514
 Enthalpy of formation, kJ/mol: -4593.936
 Equilibrium products composition (mol/kg)
 N2 CO CO2 H2O H2
 4.85E+0000 4.08E-0001 1.28E+0001 1.12E+0001 7.61E-0001
 O2 C_GR NH3 CH4 NO
 0.00E+0000 1.78E+0000 5.97E-0001 2.18E+0000 2.43E-0005
 NAOH
 4.66E-0001
 Detonation velocity, m/s: 6741
 Particle velocity, m/s: 1524
 Detonation pressure, GPa: 15.55
 Detonation temperature, K: 2664
 Specific volume, cc/g: 0.511
 Heat of detonation (Qv), kJ/kg: 3668
 Volume of gases (n.c), m³/kg: 0.734
 Polytropic exponent: 3.42

ПВГС III/Состав.№2 в соотношении 75/25

Formula: N10.58H36.30O37.98NA0.58C16.12
 Oxygen balance: -20.3% Nitrogen content: 0.6%
 Density, g/cc: 1.507
 Enthalpy of formation, kJ/mol: -4814.214
 Equilibrium products composition (mol/kg)
 N2 CO CO2 H2O H2
 4.98E+0000 3.52E-0001 1.26E+0001 1.17E+0001 7.22E-0001
 O2 C_GR NH3 CH4 NO
 0.00E+0000 8.88E-0001 6.21E-0001 2.23E+0000 1.72E-0005
 NAOH
 5.82E-0001
 Detonation velocity, m/s: 6732
 Particle velocity, m/s: 1516
 Detonation pressure, GPa: 15.37
 Detonation temperature, K: 2596
 Specific volume, cc/g: 0.514
 Heat of detonation (Qv), kJ/kg: 3569
 Volume of gases (n.c), m³/kg: 0.746
 Polytropic exponent: 3.44

ПВГС III/Состав.№2 в соотношении 70/30

Formula: N10.86H37.76O38.27NA0.70C15.04
 Oxygen balance: -17.7% Nitrogen content: 0.7%
 Density, g/cc: 1.500
 Enthalpy of formation, kJ/mol: -5034.492
 Equilibrium products composition (mol/kg)

N2	CO	CO2	H2O	H2
5.11E+0000	3.01E-0001	1.25E+0001	1.23E+0001	6.82E-0001
O2	C_GR	NH3	CH4	NO
0.00E+0000	1.20E-0002	6.45E-0001	2.27E+0000	1.20E-0005
NAOH				
6.99E-0001				

Detonation velocity, m/s: 6722
 Particle velocity, m/s: 1508
 Detonation pressure, GPa: 15.21
 Detonation temperature, K: 2530
 Specific volume, cc/g: 0.517
 Heat of detonation (Qv), kJ/kg: 3469
 Volume of gases (n.c), m³/kg: 0.757
 Polytropic exponent: 3.46

ПВГС III/Состав.№2 в соотношении 65/35

Formula: N11.15H39.23O38.56NA0.82C13.97
 Oxygen balance: -15.0% Nitrogen content: 0.8%
 Density, g/cc: 1.493
 Enthalpy of formation, kJ/mol: -5254.770
 Equilibrium products composition (mol/kg)

N2	CO	CO2	H2O	H2
5.24E+0000	2.42E-0001	1.18E+0001	1.38E+0001	6.60E-0001
O2	C_GR	NH3	CH4	NO
0.00E+0000	0.00E+0000	6.58E-0001	1.88E+0000	9.53E-0006
NAOH				
8.15E-0001				

Detonation velocity, m/s: 6698
 Particle velocity, m/s: 1488
 Detonation pressure, GPa: 14.88
 Detonation temperature, K: 2475
 Specific volume, cc/g: 0.521
 Heat of detonation (Qv), kJ/kg: 3377
 Volume of gases (n.c), m³/kg: 0.769
 Polytropic exponent: 3.50

ПВГС III/Состав.№2 в соотношении 60/40

Formula: N11.43H40.69O38.86NA0.93C12.89
 Oxygen balance: -12.4% Nitrogen content: 0.9%
 Density, g/cc: 1.486
 Enthalpy of formation, kJ/mol: -5475.049
 Equilibrium products composition (mol/kg)

N2	CO	CO2	H2O	H2
5.39E+0000	1.91E-0001	1.12E+0001	1.53E+0001	6.25E-0001
O2	C_GR	NH3	CH4	NO
0.00E+0000	0.00E+0000	6.58E-0001	1.48E+0000	7.66E-0006
NAOH				
9.32E-0001				

Detonation velocity, m/s: 6673
 Particle velocity, m/s: 1476
 Detonation pressure, GPa: 14.64
 Detonation temperature, K: 2423

Specific volume, cc/g: 0.524
 Heat of detonation (Qv), kJ/kg: 3285
 Volume of gases (n.c), m³/kg: 0.781
 Polytropic exponent: 3.52

ПВГС III/Состав.№2 в соотношении 55/45

Formula: N11.71H42.16O39.15NA1.05C11.82
 Oxygen balance: -9.7% Nitrogen content: 1.0%
 Density, g/cc: 1.480
 Enthalpy of formation, kJ/mol: -5695.327
 Equilibrium products composition (mol/kg)

N2	CO	CO2	H2O	H2
5.54E+0000	1.48E-0001	1.06E+0001	1.68E+0001	5.78E-0001
O2	C_GR	NH3	CH4	NO
0.00E+0000	0.00E+0000	6.40E-0001	1.10E+0000	6.16E-0006
NAOH				
1.05E+0000				

Detonation velocity, m/s: 6647
 Particle velocity, m/s: 1465
 Detonation pressure, GPa: 14.41
 Detonation temperature, K: 2372
 Specific volume, cc/g: 0.527
 Heat of detonation (Qv), kJ/kg: 3193
 Volume of gases (n.c), m³/kg: 0.793
 Polytropic exponent: 3.54

ПВГС III/Состав.№2 в соотношении 50/50

Formula: N11.99H43.63O39.44NA1.16C10.74
 Oxygen balance: -7.1% Nitrogen content: 1.2%
 Density, g/cc: 1.473
 Enthalpy of formation, kJ/mol: -5915.605
 Equilibrium products composition (mol/kg)

N2	CO	CO2	H2O	H2
5.70E+0000	1.11E-0001	9.90E+0000	1.84E+0001	5.20E-0001
O2	C_GR	NH3	CH4	NO
0.00E+0000	0.00E+0000	5.94E-0001	7.30E-0001	5.00E-0006
NAOH				
1.16E+0000				

Detonation velocity, m/s: 6620
 Particle velocity, m/s: 1451
 Detonation pressure, GPa: 14.15
 Detonation temperature, K: 2321
 Specific volume, cc/g: 0.530
 Heat of detonation (Qv), kJ/kg: 3101
 Volume of gases (n.c), m³/kg: 0.805
 Polytropic exponent: 3.56

ПВГС III/Состав.№2 в соотношении 45/55

Formula: N12.28H45.09O39.73NA1.28C9.67
 Oxygen balance: -4.5% Nitrogen content: 1.3%
 Density, g/cc: 1.466
 Enthalpy of formation, kJ/mol: -6135.883
 Equilibrium products composition (mol/kg)

N2	CO	CO2	H2O	H2
5.89E+0000	7.80E-0002	9.21E+0000	2.00E+0001	4.38E-0001
O2	C_GR	NH3	CH4	NO
0.00E+0000	0.00E+0000	5.04E-0001	3.80E-0001	4.29E-0006

NAOH
 1.28E+0000
 Detonation velocity, m/s: 6592
 Particle velocity, m/s: 1438
 Detonation pressure, GPa: 13.90
 Detonation temperature, K: 2271
 Specific volume, cc/g: 0.533
 Heat of detonation (Qv), kJ/kg: 3010
 Volume of gases (n.c), m³/kg: 0.816
 Polytropic exponent: 3.58

ПВГС III/Состав.№2 в соотношении 40/60

Formula: N12.56H46.56O40.03NA1.40C8.60
 Oxygen balance: -1.8% Nitrogen content: 1.4%
 Density, g/cc: 1.460
 Enthalpy of formation, kJ/mol: -6356.161
 Equilibrium products composition (mol/kg)

N2	CO	CO2	H2O	H2
6.12E+0000	4.41E-0002	8.47E+0000	2.16E+0001	3.00E-0001
O2	C_GR	NH3	CH4	NO
0.00E+0000	0.00E+0000	3.11E-0001	8.30E-0002	4.57E-0006

NAOH
 1.40E+0000
 Detonation velocity, m/s: 6562
 Particle velocity, m/s: 1422
 Detonation pressure, GPa: 13.62
 Detonation temperature, K: 2223
 Specific volume, cc/g: 0.537
 Heat of detonation (Qv), kJ/kg: 2924
 Volume of gases (n.c), m³/kg: 0.828
 Polytropic exponent: 3.62

ПВГС III/Состав.№2 в соотношении 35/65

Formula: N12.84H48.02O40.32NA1.51C7.52
 Oxygen balance: 0.8% Nitrogen content: 1.5%
 Density, g/cc: 1.454
 Enthalpy of formation, kJ/mol: -6576.440
 Equilibrium products composition (mol/kg)

N2	CO	CO2	H2O	H2
6.41E+0000	2.30E-0006	7.52E+0000	2.33E+0001	2.03E-0005
O2	C_GR	NH3	CH4	NO
2.40E-0001	0.00E+0000	0.00E+0000	0.00E+0000	2.75E-0002

NAOH
 1.51E+0000
 Detonation velocity, m/s: 6489
 Particle velocity, m/s: 1395
 Detonation pressure, GPa: 13.16
 Detonation temperature, K: 2122
 Specific volume, cc/g: 0.540
 Heat of detonation (Qv), kJ/kg: 2743
 Volume of gases (n.c), m³/kg: 0.839
 Polytropic exponent: 3.65

ПВГС III/Состав.№2 в соотношении 30/70

Formula: N13.12H49.49O40.61NA1.63C6.45
 Oxygen balance: 3.5% Nitrogen content: 1.6%
 Density, g/cc: 1.447

Enthalpy of formation , kJ/mol: -6796.718

Equilibrium products composition (mol/kg)

N2	CO	CO2	H2O	H2	
6.55E+0000	0.00E+0000	6.45E+0000	2.39E+0001	1.01E-0006	
O2	C_GR	NH3	CH4	NO	
1.06E+0000	0.00E+0000	0.00E+0000	0.00E+0000	2.83E-0002	
NAOH					
1.63E+0000					
Detonation velocity, m/s: 6329					
Particle velocity, m/s: 1339					
Detonation pressure, GPa: 12.26					
Detonation temperature, K: 1868					
Specific volume, cc/g: 0.545					
Heat of detonation (Qv), kJ/kg: 2314					
Volume of gases (n.c), m ³ /kg: 0.852					
Polytropic exponent: 3.73					

ПВГС III/Состав.№2 в соотношении 25/75

Formula: N13.41H50.95O40.90NA1.75C5.37

Oxygen balance: 6.1% Nitrogen content: 1.7%

Density, g/cc: 1.441

Enthalpy of formation , kJ/mol: -7016.996

Equilibrium products composition (mol/kg)

N2	CO	CO2	H2O	H2	
6.70E+0000	0.00E+0000	5.37E+0000	2.46E+0001	0.00E+0000	
O2	C_GR	NH3	CH4	NO	
1.90E+0000	0.00E+0000	0.00E+0000	0.00E+0000	1.44E-0002	
NAOH					
1.75E+0000					
Detonation velocity, m/s: 6150					
Particle velocity, m/s: 1277					
Detonation pressure, GPa: 11.31					
Detonation temperature, K: 1610					
Specific volume, cc/g: 0.550					
Heat of detonation (Qv), kJ/kg: 1886					
Volume of gases (n.c), m ³ /kg: 0.864					
Polytropic exponent: 3.82					

ПВГС III/Состав.№2 в соотношении 20/80

Formula: N13.69H52.42O41.20NA1.86C4.30

Oxygen balance: 8.7% Nitrogen content: 1.9%

Density, g/cc: 1.435

Enthalpy of formation , kJ/mol: -7237.274

Equilibrium products composition (mol/kg)

N2	CO	CO2	H2O	H2	
6.84E+0000	0.00E+0000	4.30E+0000	2.53E+0001	0.00E+0000	
O2	C_GR	NH3	CH4	NO	
2.73E+0000	0.00E+0000	0.00E+0000	0.00E+0000	4.37E-0003	
NAOH					
1.86E+0000					
Detonation velocity, m/s: 5944					
Particle velocity, m/s: 1203					
Detonation pressure, GPa: 10.26					
Detonation temperature, K: 1346					
Specific volume, cc/g: 0.556					
Heat of detonation (Qv), kJ/kg: 1458					
Volume of gases (n.c), m ³ /kg: 0.877					
Polytropic exponent: 3.94					

ПВГС ПП/Состав.№2 в соотношении 15/85

Formula: N13.97H53.89O41.49NA1.98C3.22
 Oxygen balance: 11.4% Nitrogen content: 2.0%
 Density, g/cc: 1.428
 Enthalpy of formation, kJ/mol: -7457.552
 Equilibrium products composition (mol/kg)

N2	CO	CO2	H2O	H2	O2	C_GR	NH3	CH4	NO	NAOH
6.99E+0000	0.00E+0000	3.22E+0000	2.60E+0001	0.00E+0000						
					3.55E+0000	0.00E+0000	0.00E+0000	0.00E+0000	5.84E-0004	1.98E+0000

Detonation velocity, m/s: 5701
 Particle velocity, m/s: 1118
 Detonation pressure, GPa: 9.11
 Detonation temperature, K: 1072
 Specific volume, cc/g: 0.563
 Heat of detonation (Qv), kJ/kg: 1030
 Volume of gases (n.c), m³/kg: 0.890
 Polytropic exponent: 4.10

ПВГС ПП/Состав.№2 в соотношении 10/90

Formula: N14.25H55.35O41.78NA2.10C2.15
 Oxygen balance: 14.0% Nitrogen content: 2.1%
 Density, g/cc: 1.422
 Enthalpy of formation, kJ/mol: -7677.830
 Equilibrium products composition (mol/kg)

N2	CO	CO2	H2O	H2	O2	C_GR	NH3	CH4	NO	NAOH
7.12E+0000	0.00E+0000	2.15E+0000	2.66E+0001	0.00E+0000						
					4.38E+0000	0.00E+0000	0.00E+0000	0.00E+0000	1.38E-0005	2.10E+0000

Detonation velocity, m/s: 5407
 Particle velocity, m/s: 1016
 Detonation pressure, GPa: 7.81
 Detonation temperature, K: 786
 Specific volume, cc/g: 0.571
 Heat of detonation (Qv), kJ/kg: 602
 Volume of gases (n.c), m³/kg: 0.902
 Polytropic exponent: 4.32

ПВГС ПП/Состав.№2 в соотношении 5/95

Formula: N14.54H56.82O42.07NA2.21C1.07
 Oxygen balance: 16.7% Nitrogen content: 2.2%
 Density, g/cc: 1.416
 Enthalpy of formation, kJ/mol: -7898.109
 Equilibrium products composition (mol/kg)

N2	CO	CO2	H2O	H2	O2	C_GR	NH3	CH4	NO	NAOH
7.27E+0000	0.00E+0000	1.07E+0000	2.73E+0001	0.00E+0000						
					5.21E+0000	0.00E+0000	0.00E+0000	0.00E+0000	0.00E+0000	2.21E+0000

Detonation velocity, m/s: 5029
 Particle velocity, m/s: 882

Detonation pressure, GPa: 6.28
 Detonation temperature, K: 478
 Specific volume, cc/g: 0.582
 Heat of detonation (Qv), kJ/kg: 170
 Volume of gases (n.c), m³/kg: 0.915
 Polytropic exponent: 4.70

ПВГС ПП/Состав.№2 в соотношении 0/100

Formula: N14.82H58.28O42.36NA2.33
 Oxygen balance: 19.3% Nitrogen content: 2.3%
 Density, g/cc: 1.410
 Enthalpy of formation, kJ/mol: -8118.387
 Equilibrium products composition (mol/kg)
 N2 H2O H2 O2 NH3
 7.41E+0000 2.80E+0001 0.00E+0000 6.03E+0000 0.00E+0000
 NO NAOH
 0.00E+0000 2.33E+0000
 Detonation velocity, m/s: 4532
 Particle velocity, m/s: 716
 Detonation pressure, GPa: 4.58
 Detonation temperature, K: 164
 Specific volume, cc/g: 0.597
 Heat of detonation (Qv), kJ/kg: -257
 Volume of gases (n.c), m³/kg: 0.928
 Polytropic exponent: 5.32

Протоколы расчетов программных комплексов Shock and Detonation и

REAL

ПВГС III/Состав.№1 в соотношении 63/37

Formula: N11.81H41.36O37.96C14.16NA0.64

Oxygen balance: -18.2% Nitrogen content: 0.6%

Density, g/cc: 1.420

Enthalpy of formation, kJ/mol: -5364.468

Equilibrium products composition (mol/kg)

N2	CO	CO2	H2O	H2
5.56E+0000	2.61E-0001	1.16E+0001	1.39E+0001	7.41E-0001
O2	C_GR	NH3	CH4	NO
0.00E+0000	0.00E+0000	6.89E-0001	2.33E+0000	4.14E-0006
NAOH				
6.40E-0001				

Detonation velocity, m/s: 6376

Particle velocity, m/s: 1411

Detonation pressure, GPa: 12.78

Detonation temperature, K: 2343

Specific volume, cc/g: 0.548

Heat of detonation (Qv), kJ/kg: 3149

Volume of gases (n.c), m³/kg: 0.786

Polytropic exponent: 3.52

ПВГС III/Состав.№2 в соотношении 63/37

Formula: N11.26H39.81O38.68NA0.86C13.54

Oxygen balance: -14.0% Nitrogen content: 0.9%

Density, g/cc: 1.420

Enthalpy of formation, kJ/mol: -5342.882

Equilibrium products composition (mol/kg)

N2	CO	CO2	H2O	H2
5.31E+0000	3.31E-0001	1.16E+0001	1.44E+0001	8.88E-0001
O2	C_GR	NH3	CH4	NO
0.00E+0000	0.00E+0000	6.35E-0001	1.64E+0000	1.15E-0005
NAOH				
8.60E-0001				

Detonation velocity, m/s: 6378

Particle velocity, m/s: 1422

Detonation pressure, GPa: 12.88

Detonation temperature, K: 2483

Specific volume, cc/g: 0.547

Heat of detonation (Qv), kJ/kg: 3321

Volume of gases (n.c), m³/kg: 0.778

Polytropic exponent: 3.48

ПВГС ПП/Состав.№3 в соотношении 63/37

Calculation of Combustion Heat.

V = 0.10000 cub.m/kg, U = 0 kJ/kg

Mass fractions of source components

Fractions: 63

Formula: C21.194 H25.828 N9.495 O36.653

Enthalpy= -2426.900 kJ/kg

Fractions: 22,68

Formula: H2 O1

Enthalpy= -15866.000 kJ/kg

Fractions: 14,32

Formula: Ca1 Cl2

Enthalpy= -7170.000 kJ/kg

Cut-off value for the concentrations: 1.000E-0003

Ideal gas EOS was used in calculations.

Assigned values of equilibrium parameters :

V = 0.10000 cub.m/kg U = -6154.10010 kJ/kg

Elements in system, mole/kg

[C]= 13.3520 [H]= 41.4500 [N]= 5.9818 [O]= 35.6804 [Ca]= 1.2903

[Cl]= 2.5806

Oxidizer/Fuel ratio: 0.759

Oxygen balance: -18.80 %

Equilibrium parameters :

p = 5.72332 MPa S = 9.13645 kJ/(kg*K)

T = 1835.52954 K H = -5581.76563 kJ/kg

V = 0.10004 cub.m/kg U = -6154.10010 kJ/kg

M = 38.72599 mole/kg Vg = 0.10000 cub.m/kg

Rg = 0.31181 kJ/(kg*K) p*Vg/(R*T) = 1.000

a" = 825.1 m/s k" = 1.19668

Cp" = 2.19449 kJ/(kg*K) Cv" = 1.83381 kJ/(kg*K)

Lt = 0.19318 W/(m*K) Lt" = 0.19852 W/(m*K)

Mu = 0.00005963 N*s/sq.m Mcond = 0.1156

Mg = 37.50206 mole/kg

T * alpha_P = 1.0785 P * beta_T = 1.0064 T * gamma_V = 1.0716

Concentrations of species, mol/kg:

CO 7,16551 CO2 6,18634 CaCl2 0,0437436

CaOHCl 0,0218745 H2 4,58162 H2O 15,75019

HCl 0,7595423 N2 2,99052

CaCl2(c) 0.85577698 CaO(c) 0.36815534

"Frozen" parameters :

Cp = 1.81485 kJ/(kg*K) Cp/Cv = 1.20745

a = 831.3 m/s k = 1.20745

(FROZEN at 1500 K).

Ideal gas EOS was used in calculations.

Assigned values of equilibrium parameters :

V = 0.10000 cub.m/kg T = 298.00000 K

Elements in system, mole/kg

[C]= 13.3520 [H]= 41.4500 [N]= 5.9818 [O]= 35.6804 [Ca]= 1.2903

[Cl]= 2.5806

Oxidizer/Fuel ratio: 0.759

Oxygen balance: -18.80 %

Equilibrium parameters :

p = 0.54383 MPa S = 5.21171 kJ/(kg*K)

T = 298.00000 K H = -8833.30957 kJ/kg

V = 0.10000 cub.m/kg U = -8887.69238 kJ/kg

M = 38.47492 mole/kg Vg = 0.10000 cub.m/kg

Rg = 0.18249 kJ/(kg*K) p*Vg/(R*T) = 1.000

Mcond = 0.4109

Mg = 21.94900 mole/kg

T * alpha_P = 0.1751 P * beta_T = 0.0956 T * gamma_V = 1.8310

Concentrations of species, mol/kg:

CO 6,38061 CO2 6,9708 CaCl2 0,0014898

H2 5,36359 HCl 0,2396131 N2 2,99004

NH3 0,0016684

CaCl2(c) 1.16868708 CaO(c) 0.11949473 H2O(A)(c) 15.23772115

"Frozen" parameters :

Cp = 1.93260 kJ/(kg*K) Cp/Cv = 1.28579

a = 831.3 m/s k = 1.20745

Combustion Heat (FROZEN) = 2679.210 kJ/kg

«УТВЕРЖДАЮ»

Генеральный директор

ООО «Промстройвзрыв»

В.М. Губайдуллин



2019г.

Акт

о внедрении результатов диссертационной работы
Михеева Дениса Иголевича

Настоящим актом ООО «Промстройвзрыв» подтверждает, что результаты, полученные Д.И. Михеевым в ходе подготовки диссертационной работы, использованы при разработке и усовершенствовании рецептур пороховых водно-гелевых взрывчатых составов (Гельпоров), применяемых при проведении буровзрывных работ.

В ходе испытаний и буровзрывных работ, проводившихся в условиях гранитных щебеночных карьеров ООО «Каменногорское карьероуправление», ООО «КНИ-436» и ООО «Рубикон», Гельпоры применялись при проведении массовых взрывов и для разделки негабаритных блоков

По результатам испытаний и работ установлено:

- для условий массовых взрывов применение Гельпоров позволило расширить сетку скважин от 5 до 10%, по средствам установки в скважинах донных усилителей на основе Гельпоров, что привело к ускорению детонации основного взрывчатого состава (эмульсионного ВВ) на 500-800 м/с, увеличив энергию взрыва на 10-20%;

- при разделке негабаритных блоков накладными зарядами на основе Гельпоров удалось добиться значительного снижения удельного расхода по сравнению с зарядами на основе аммонита и нитронита (удельный расход аммонита – 2,1 кг/м³, удельный расход Гельпора – не более 1,0 кг/м³);

- при возведении траншей в скальном грунте взрывами зарядов Гельпора достигается значительное повышение объема вынимаемого грунта.

В целом, усовершенствованные пороховые водно-гелевые составы продемонстрировали повышение собственной работоспособности, что позволило существенно увеличить эффективность буровзрывных работ.

Технический директор

ООО «Промстройвзрыв»



Т.В. Васильев