

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

На правах рукописи

ПАНФИЛОВ СЕРГЕЙ ЮРЬЕВИЧ

**Разработка технологии получения промышленных эмульсионных
взрывчатых веществ с использованием регенерированных
исходных компонентов**

2.6.12. Химическая технология топлива и высокоэнергетических веществ

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва – 2025

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева» на кафедре техносферной безопасности

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры техносферной безопасности,
федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Российский химико-технологический университет
имени Д.И. Менделеева»
Мельников Никита Олегович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, заместитель директора по
научной работе Автономной некоммерческой
научной организации «Научно-исследовательский
институт технологий и Безопасности взрывных
работ» (АННО НИИ ТБВР)
Горинов Сергей Александрович

кандидат технических наук, исполнительный
директор АНО «Национальная организация
инженеров-взрывников», ученый секретарь
Научного Совета РАН по проблемам
народнохозяйственного использования взрывов
Болотова Юлия Николаевна

Ведущая организация АО «Государственный научно-исследовательский
институт «Кристалл»

Защита состоится «18» декабря 2025 г. в 12:00 часов на заседании диссертационного
совета РХТУ.2.6.02 федерального государственного бюджетного образовательного
учреждения высшего образования «Российский химико-технологический университет
имени Д.И. Менделеева» (125047, г. Москва, Миусская пл., 9) в Малом актовом зале
имени А.П. Бородина.

С диссертацией можно ознакомиться в Информационно-библиотечном центре
федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего
образования «Российский химико-технологический университет имени
Д.И. Менделеева», а также на официальном сайте:

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

Автореферат разослан «__» _____ 2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета РХТУ.2.6.02
д.х.н., профессор



Р.А. Козловский

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. По данным Ростехнадзора на 2024 г. в Российской Федерации при добыче полезных ископаемых использовано 2,4 млн т промышленных взрывчатых веществ (ПВВ) из них 87 % (2,1 млн т) изготовлено на местах применения из невзрывчатых компонентов. Из них 73 % (1,6 млн т) составили наиболее безопасные промышленные эмульсионные взрывчатые вещества (ПЭВВ), которые производятся в процессе зарядания взрывных скважин смесительно-зарядными машинами на основе эмульсионной матрицы, изготавливаемой в производственных условиях и представляющей собой эмульсию второго рода (обратная эмульсия – «вода-в-масле»), в которой водный раствор аммиачной селитры (дисперсная фаза) диспергирован в смеси нефтепродуктов и эмульгаторов. Эмульсионная матрица представляет собой метастабильную систему и несмотря на использование поверхностно-активных веществ (ПАВ) и различных добавок, повышающих стабильность, в ней всегда происходят процессы деструкции – коалесценции и флокуляции, которые со временем приводят к полному разрушению эмульсии. Как правило, время разрушения превышает срок, требуемый для ее использования по назначению. Однако, при определенных условиях эти процессы значительно ускоряются и происходит образование полностью или частично разрушенной эмульсии. Поэтому при производстве эмульсионной матрицы возможно образование некондиционной, то есть не соответствующей нормативно-технической документации эмульсии. Она может образовываться вследствие ошибок технологического процесса производства, использования некачественного сырья и из-за свойств самой эмульсионной системы. Ориентировочно объем таких отходов производства может достигать 5 %, что составляет более 70 тыс. т в год.

В российском законодательстве такие отходы определены приказом Росприроднадзора № 242 от 22.05.2017 как «отходы эмульсии диспергирования раствора аммиачной и натриевой селитр в индустриальном масле» и подлежат утилизации. Законодательно в РФ предписывается только утилизация уже сенсibilизированных эмульсий, которые являются ПЭВВ. Утилизация самой эмульсионной матрицы не прописана и осуществляется изготовителем по принятым внутренним документам.

Сегодня такие отходы в основном уничтожаются подрывом или сжиганием в виду отсутствия требований и промышленных способов переработки. Поэтому вопросы регенерации некондиционных эмульсий ПВВ в исходные компоненты для повторного их

использования имеют не только научно-технический интерес, но и большое экономическое и экологическое значение.

Степень разработанности темы. ПЭВВ типа «вода-в-масле» известны с 1969 г., когда был опубликован первый патент США, но по сей день исследования по совершенствованию рецептур, процессов получения и свойств проводятся весьма активно как учеными, так и производителями ПЭВВ. Вопросам утилизации некондиционных продуктов и отходов эмульсионных ВВ в разных странах посвящено достаточно много научных работ и нормативно-технических документов. Существуют иностранные патенты и различные технические решения по разрушению и утилизации отходов эмульсионных производств.

Однако, вопросы эффективной утилизации, регенерации некондиционных эмульсионных матриц и извлечения из них исходных компонентов для последующего их применения является новым для химической технологии, поэтому в отечественной научно-технической литературе не представлены работы по исследованию данных процессов и не имеется технологий, применяемых сегодня в России.

Цель работы заключается в рециклинге отходов, получении на их основе промышленных эмульсионных взрывчатых веществ и снижении вредных выбросов в окружающую среду при их производстве.

Задачи работы:

1. Разработка способа деэмульгирования эмульсионных матриц типа «вода-в-масле», являющихся основой для получения ПЭВВ.
2. Переработка некондиционной эмульсионной матрицы с получением регенератов раствора окислителя и масляной фазы.
3. Разработка и конструирование лабораторной установки по получению регенератов из некондиционных эмульсионных матриц.
4. Исследование свойств и подтверждение соответствия нормативно техническим требованиям эмульсионных матриц и ПЭВВ, полученных с применением регенератов.
5. Разработка промышленной технологии рециклинга некондиционных эмульсионных матриц и получения ПЭВВ с использованием регенерированных исходных компонентов.

Научная новизна.

Экспериментально подтверждена возможность получения регенератов раствора

окислителя и масляной фазы из эмульсионных матриц типа «вода-в-масле» являющихся основой ПЭВВ.

Получена эмпирическая зависимость необходимой концентрации раствора деэмульгатора для эффективного проведения процесса полного разрушения эмульсионной матрицы в зависимости от её состояния, определяемого по вязкости и закристаллизованности.

Впервые исследованы физико-химические и эксплуатационные свойства эмульсионных матриц и ПЭВВ, полученных с частичным и полным замещением исходных компонентов на их регенераты, извлекаемые из некондиционных полупродуктов.

Определена зависимость вязкости от температуры исходных эмульсионных матриц и полученных с применением регенерированных исходных компонентов.

Впервые исследованы параметры детонации ПЭВВ на основе регенерированных исходных компонентов электромагнитным методом. Получены значения скорости детонации, профили массовой скорости и давление взрыва.

Впервые получены характеристики чувствительности к удару некондиционной эмульсии, вновь произведенной эмульсии, подкисленной уксусной кислотой и ПЭВВ, полученных из исходных компонентов и регенерированных из некондиционных полуфабрикатов, в зависимости от времени хранения после проведения газификации.

Теоретическая и практическая значимость.

Разработан химический способ разрушения, разделения и извлечения регенератов из эмульсионной матрицы типа «вода-в-масле» основы ПЭВВ.

Разработана и сконструирована лабораторная установка для разделения и извлечения регенератов из некондиционных эмульсионных матриц ПЭВВ.

Получены эмульсионные матрицы и ПЭВВ с частичным и полным замещением исходных компонентов на регенерированные растворы окислителя и масляную фазу.

Подтверждено соответствие физико-химических и эксплуатационных свойств, а также требований безопасности нормативно-техническим документам эмульсионной матрицы и ПЭВВ, полученных с применением регенерированных исходных компонентов.

Спроектирован мобильный пункт переработки некондиционной эмульсионной матрицы, которым может оснащаться действующие производства ПЭВВ без

дополнительного изменения технологических параметров. Разработан технологический регламент переработки некондиционных эмульсионных матриц в регенераты исходных компонентов.

Получен патент на способ разрушения и утилизации некондиционных эмульсионных полуфабрикатов ПЭВВ (№ 2848106 от 16.10.2025).

Методология и методы исследования. В работе использовались методы определения плотности, вязкости, электроемкости, электронной микроскопии, водоустойчивости для исследования физико-химических свойств эмульсионных матриц; гравиметрический, газовый и ВЖХ анализ для определения содержания получаемых регенератов; электромагнитный метод исследования детонации для проверки взрывчатых характеристик ПЭВВ; чувствительность к удару определялась по ГОСТ 4545-88 и методу критических давлений.

Положения, выносимые на защиту:

1. Химический метод разрушения эмульсий типа «вода-в-масле», применяемых для получения ПЭВВ.
2. Разработка лабораторной установки и экспериментальное получение регенератов из некондиционных эмульсионных матриц ПЭВВ для последующего использования.
3. Получение и свойства образцов эмульсионных матриц и ПЭВВ с применением регенерированных исходных компонентов.
4. Технология промышленной переработки некондиционных эмульсионных матриц и производства ПЭВВ с использованием регенерированных исходных компонентов.

Степень достоверности результатов. Достоверность результатов обеспечивается применением стандартных методов испытаний, апробированных методик исследования, а также современных методов анализа и обработки полученных результатов.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы представлены и обсуждены на конференциях: VIII международная научно-техническая конференция «Промышленные взрывчатые вещества (ПВВ): состояние, перспективы разработки и применения» (г. Дзержинск, 2023 г.), XIX, XX, XXI Международный конгресс молодых учёных по химии и химической технологии (Москва, 2023, 2024, 2025 гг.), Международный научный симпозиум «Неделя горняка» (Москва, 2024, 2025 гг.), VI Международная научно-практическая конференция молодых ученых по проблемам техносферной безопасности (Москва, 2024 г.), XI Международная научно-практическая

конференция «Инновационные направления в проектировании горнодобывающих предприятий. Безопасное и эффективное освоение месторождений полезных ископаемых» (Санкт-Петербург, 2024 г.), Всероссийская научно-техническая конференция «Успехи в специальной химии и химической технологии» (Москва, 2025 г.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 12 научных работ, в том числе 6 статей в изданиях, индексируемых в международных базах данных Scopus и ChemAbs. Результаты научного исследования подтверждены участием на научных мероприятиях всероссийского и международного уровня: опубликовано 5 работ по материалам всероссийских и международных конференций и симпозиумов. Получен 1 патент РФ.

Личный вклад автора. Принимал активное участие в получении перечисленных выше результатов – от постановки задач, планирования и проведения ключевых экспериментов до обсуждения и оформления публикаций. Часть экспериментальных результатов была получена сотрудниками кафедры техносферной безопасности, а именно параметры чувствительности и взрывчатые характеристики. В этом случае вклад соискателя являлся в постановке задач, обсуждении и интерпретации результатов и в написании статей.

Объем и структура диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы и приложений. Работа изложена на 193 страницах, содержит 36 рисунков, 22 таблицы. Список литературы включает 204 источника.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, сформулированы цели исследования, изложена научная новизна и практическая значимость.

В первой главе проведен анализ научно-технической литературы. Представлено современное состояние вопроса производства и применения ПЭВВ в горной промышленности. Рассмотрены способы получения, физико-химические свойства и показатели качества эмульсий типа «вода-в-масле», а также разрушение их и образование некондиции. Проанализирована практика утилизации отходов ПЭВВ на основе аммиачной селитры, а также методы разрушения и разделения эмульсий. На основе литературного обзора были сформулированы задачи диссертационного исследования и предложены пути их решения.

Во второй главе приведены основные объекты исследования и изложены

методические основы лабораторного получения эмульсионных матриц, определения их физико-химических показателей, качественного и количественного анализа регенератов, водоустойчивости, чувствительности к удару и взрывчатых характеристик.

Исследования проводились на образцах эмульсии «Березит®» марки СБ1, которая представляет собой эмульсию второго рода «вода-в-масле» и состоит из раствора солей азотной кислоты, эмульгатора и нефтепродуктов. Дисперсной фазой являются капли концентрированного раствора аммиачной селитры, а дисперсионной средой – топливная фаза. В состав эмульсионной матрицы на стадии приготовления раствора аммиачной селитры добавляли уксусную кислоту, необходимую для получения в дальнейшем стабильной газогенерации. В качестве газогенерирующей добавки при получении ПЭВВ «Березит®» использовали раствор нитрита натрия. Полный состав эмульсии представлен в таблице 1.

Таблица 1 – Компонентный состав эмульсии «Березит®» марки СБ1

Компоненты (наименование)		Содержание, масс. %
1.	Раствор окислителя	92,0
	Аммиачная селитра (ГОСТ 2-2013)	75,5
	Вода техническая	16,5
2.	Топливная фаза	8,0
	Масло промышленное И-20А (ГОСТ 20799-2022)	3,0
	Дизельное топливо (ГОСТ 305-2013)	3,0
	Эмульгатор «Березит®» (ТУ 2432-002-66506333-2013)	2,0
3.	Компоненты для газогенерации	
	30 масс. % раствор уксусной кислоты (ГОСТ 61-75) (сверх 100 % по отношению к эмульсионной матрице)	0,2
	10 масс. % раствор нитрита натрия (ГОСТ 4197-74) (сверх 100 % по отношению к подкисленной эмульсионной матрице)	1,3

Внешний вид объектов исследования представлен на рисунке 1.



а



б



в

Рисунок 1 – Внешний вид объектов исследования:

а) эмульсионная матрица; б) газифицированная эмульсия (ПЭВВ);

в) некондиционная закристаллизовавшаяся эмульсия

В третьей главе приведены результаты экспериментальных исследований по

разработке химического способа разрушения эмульсионной матрицы ПЭВВ, разделению и извлечению регенератов, анализу их состава и оценки пригодности для вторичного использования. Создана лабораторная установка извлечения регенератов из некондиционной эмульсионной матрицы.

Первоначально исследовались два способа разрушения кондиционной эмульсии. Физико-химический заключался в термоциклировании эмульсии и позволял ускорить процесс состаривания и разрушения дисперсионной системы. Данный метод был признан не эффективным из-за длительности разрушения эмульсии (более 7 полных циклов нагрева и охлаждения, что соответствует 14 суткам) и при необходимости разрушения большого количества эмульсии в промышленных масштабах отсутствием такого рода оборудования.

Химическое разрушение проводилось смешением с подогревом до 50 °С эмульсионной матрицы с раствором вещества деэмульгатора в необходимой пропорции и дальнейшем перемешивании до полного разрушения эмульсионной матрицы. В работе было исследовано 4 самых доступных ПАВ различного типа являющихся потенциальными деэмульгаторами, а именно «Катамин АБ», ОС-20, ОП-10, натрийлаурилсульфат. Также была исследована деэмульгирующая способность изопропилового спирта (ИПС), так как известно, что спирты обладают высокой поверхностной активностью и вытесняют молекулы стабилизатора с поверхности раздела фаз, но не способны к образованию механически устойчивых слоев. Вещества использовались при разных концентрациях и массовых соотношениях к используемой эмульсионной матрице.

Все деэмульгаторы приводили к разрушению эмульсии и образованию различных фаз. Схематично они представлены на рисунке 2.

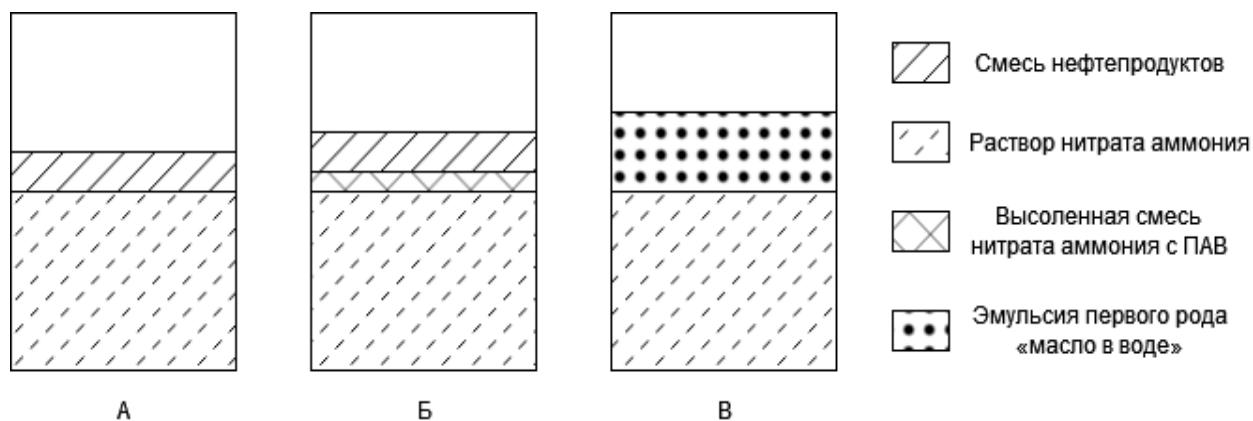


Рисунок 2 – Схематичное изображение образцов при разрушении эмульсии

Приемлемым результатом для последующего выделения регенератов считалось получение образцов первой группы, так как они разделялись на две фазы в виде раствора окислителя и смеси нефтепродуктов с ПАВ.

Наилучший результат по разрушению эмульсии показали «Катамин АБ» и ИПС. Последующее разделение образовавшихся регенератов проводилось с помощью делительной воронки. Далее необходимо было провести очистку регенератов от деэмульгатора. Доступными и простыми методами провести отделение «Катамин АБ» не удалось. Поэтому в качестве наиболее эффективного деэмульгатора был выбран ИПС, который полностью переходил в раствор нитрата аммония и отгонялся из него на роторном испарителе. Анализ регенератов проводили гравиметрически и при помощи высокоэффективной жидкостной хроматографии. Содержание ИПС при отгонке в паровой фазе определяли газовым анализом.

При определении эффективной концентрации и соотношения ИПС было установлено, что при проведении деэмульгирования растворами в массовом соотношении 1:1 к эмульсии с концентрацией выше 30 % происходит разложение эмульсии с образованием масляной фазы и выделением водно-спиртовой фазы с осадком соли аммиачной селитры (рисунок 3а) в следствии недостатка воды. Концентрации от 1 % до 10 % показали неэффективное разрушение эмульсии, она либо не разрушалась, либо разрушалась не полностью и оставался третий слой (рисунок 3б). Поэтому был выбран диапазон концентраций от 10 % до 30 %, при котором эмульсия разрушалась с образованием двух четко не смешивающихся фаз (рисунок 3в).

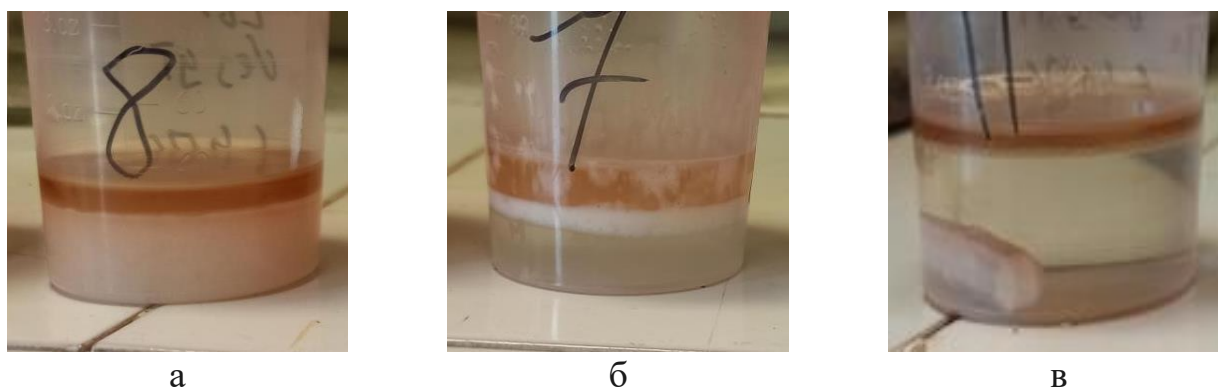


Рисунок 3 – Разрушение эмульсии при различных концентрациях ИПС

По результатам экспериментальных исследований установлено, что регенерат масляной фазы (РМФ) – не содержит ИПС и может далее быть использован без специальной подготовки. Регенерат раствора окислителя (РРО) – после отделения ИПС на роторном испарителе представляет собой разбавленный раствор окислителя. Для

дальнейшего использования РРО при производстве новой эмульсионной матрицы в него нужно добавлять необходимое количество нитрата аммония для получения требуемого содержания в 75,5 масс. %, поэтому была получена зависимость плотности РРО от концентрации (рисунок 4).

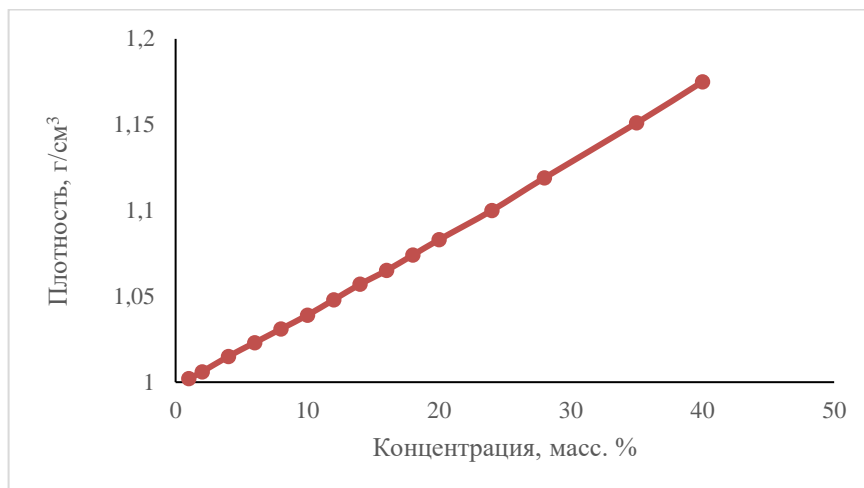


Рисунок 4 – Зависимость плотности РРО от концентрации нитрата аммония

По результатам проведенных исследований была сконструирована лабораторная установка (рисунок 5) и разработан временный технологический регламент.

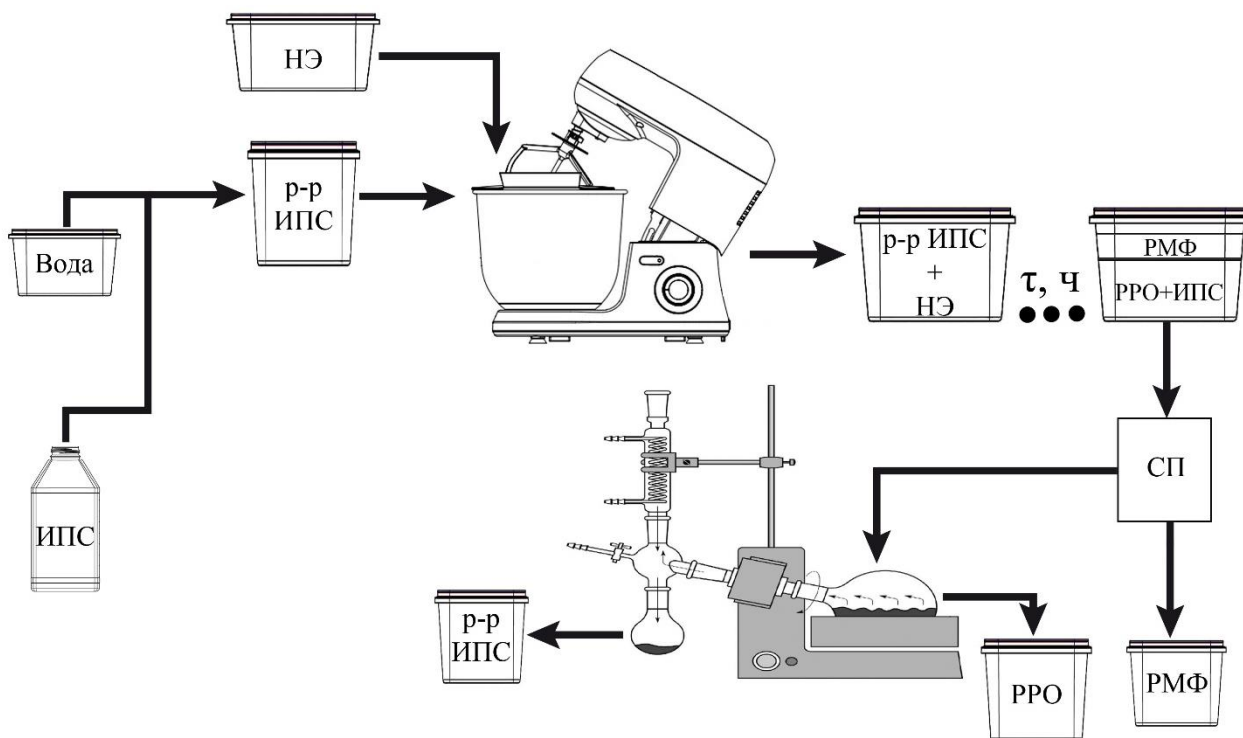


Рисунок 5 – Схема лабораторной установки выделения регенератов

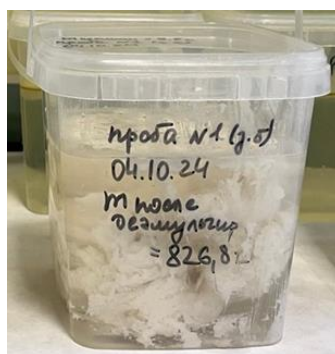
Проведение деэмульгирования проводится в следующем порядке. Первоначально готовится раствор ИПС и загружается в перемешивающее устройство в соотношении 1:1 с эмульсией и перемешивается при нагревании до 50 °С до полного разрушения эмульсии. Далее полученная смесь отстаивается до разделения её на две несмешивающиеся фазы и

разделяется в воронке-сепараторе на РМФ и РРО. РРО очищается в роторном испарителе от ИПС, который снова используется в качестве деэмульгатора. На лабораторной установке потери ИПС составили 5,6 %. На основе полученных регенератов произведена новая эмульсия и оценены её свойства.

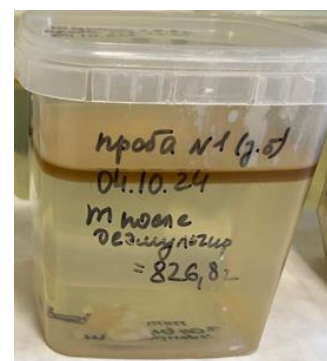
Отработка метода и разработка лабораторной установки проводилась на кондиционной свежеприготовленной эмульсионной матрице. Для апробации данной методики и разделения некондиционной эмульсии на лабораторной установке проведено разложение 10 кг закристаллизовавшейся эмульсии, доставленной с Ковдорского ГОКа, и получены регенераты исходных компонентов для получения новой эмульсии и проведения сравнительных исследований соответствия её физико-химических и эксплуатационных свойств заявленным требованиям. Образцы в процессе разделения представлены на рисунке 6.



а



б



в

Рисунок 6 – Процесс разделения некондиционной эмульсии на регенераты:
а – исходная некондиционная эмульсия; б – смешение с деэмульгатором;
в – разделение на фазы

При опытах с некондиционной эмульсией установлено, что концентрацию ИПС в его водном растворе необходимо выбирать исходя из её состояния. Если разрушаемая эмульсия твердая и/или содержит кристаллы в своей структуре, то есть переходит в суспензию, и вязкость её не измерить, то необходимо использовать 10 % раствор ИПС. Иначе необходимо измерять вязкость эмульсии и концентрацию ИПС в водном растворе определять согласно формуле (1):

$$Y = -1/9000 \cdot X + 290/9 \quad (1)$$

где Y – концентрация спирта (масс. %) в растворе деэмульгатора, X – вязкость эмульсии (сП).

В четвертой главе приведены результаты экспериментального получения опытных образцов эмульсионных матриц на основе регенерированных исходных компонентов.

Проведены сравнительные исследования физико-химических, эксплуатационных и взрывчатых свойств.

На основе полученных регенератов производилась новая эмульсия с полным и частичным замещением исходных компонентов. Для определения стабильности полученных эмульсий были проведены определения нормируемых показателей качества. Зачастую устойчивость эмульсии характеризуется только ее электроемкостью. В данной работе применен более широкий подход для оценки физико-химической стабильности эмульсионной матрицы, учитывающий ее многокомпонентную сложную природу и присутствие регенератов. В виду чего для полученных образцов стабильность определялась не одним, а совокупностью показателей – вязкостью, электроемкостью, размером частиц и плотностью. В таблице 2 представлены значения контролируемых параметров эмульсий в зависимости от количества регенератов в их составе.

Таблица 2 – Параметры эмульсионной матрицы

Образец	Кол-во РРО, масс. %	Кол-во РМФ, масс. %	Вязкость, сП	Электро- емкость, пФ	Размер частиц, мкм	Плотность, г/см ³
Контрольный	0	0	25000	137	9	1,311
Опытный 1	5	5	25400	141	11	1,312
Опытный 2	10	10	25600	140	11	1,316
Опытный 3	20	20	26000	144	10	1,318
Опытный 4	100	100	26100	146	11	1,321

На рисунке 7 представлен внешний вид эмульсий через семь суток после их приготовления.



Опытный 1

Опытный 2

Опытный 3

Опытный 4

Рисунок 7 – Внешний вид образцов эмульсий приготовленных с использованием регенератов через 7 суток

Параметры полученных эмульсий соответствуют требованиям ТУ 2241-002-431204295932-2010 «Невзрывчатые компоненты эмульсионных промышленных взрывчатых веществ «Эмульсия «Березит®» даже при полной замене компонентов на регенераты. Стабильность эмульсий при хранении сохраняется.

Дополнительно проведены сравнительные исследования зависимости вязкости эмульсионной матрицы от температуры, так как она влияет на возможность перекачивания при производстве работ в различных климатических условиях. Результаты представлены на рисунке 8.

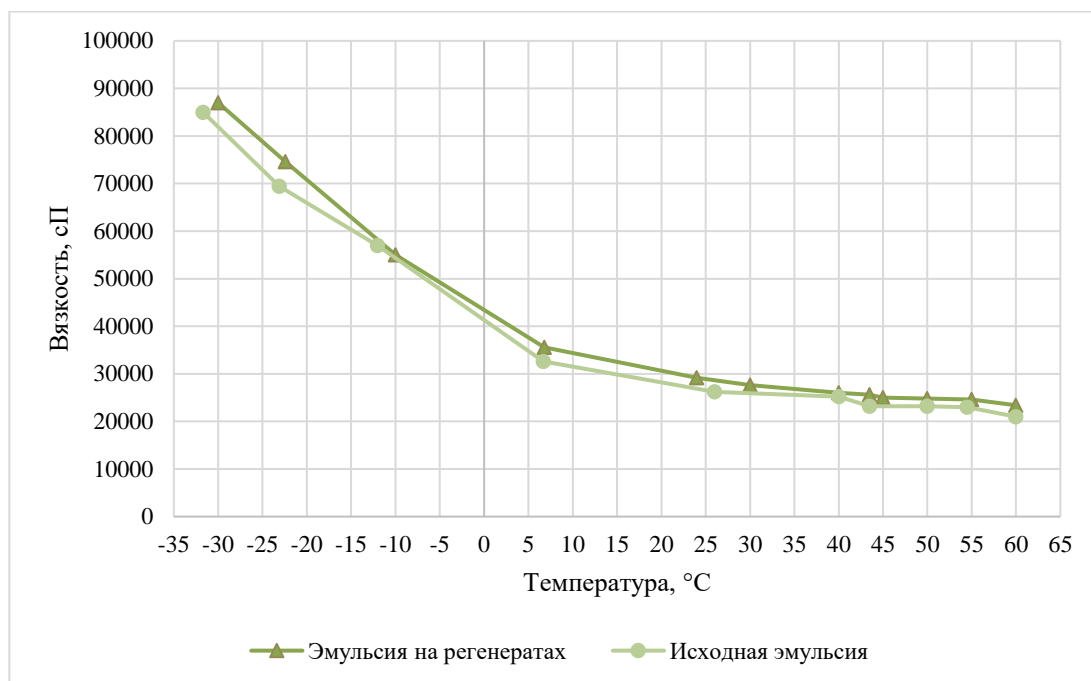


Рисунок 8 – Зависимость вязкости эмульсии от температуры

Исходя из полученных данных видно, что регенераты не влияют на свойства эмульсии при изменении температуры.

Обязательным контролируемым показателем, подлежащим количественному определению, является водоустойчивость, по сути это количество нитрат-ионов, выделяющихся с единицы поверхности заряда ПЭВВ за определенное время контакта с водой. Оценка водоустойчивости проведена по ГОСТ 32411-2013. Результаты представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Водоустойчивость образцов эмульсий

Время выдержки	Наименование образца	Водоустойчивость, кг/м ²	Нормируемый показатель, кг/м ²
4 часа	Исходная эмульсия	0,00076	не более 0,03
	Эмульсия на регенератах	0,00083	
24 часа	Исходная эмульсия	0,00180	не более 0,06
	Эмульсия на регенератах	0,00193	

Значения водоустойчивости сравнимы и много меньше нормируемых показателей.

Эмульсионная матрица становится ПЭВВ после проведения газификации

(сенсibilизации). Поэтому проведены исследования влияния различного содержания регенератов на способность матрицы к сенсibilизации. Эмульсионную матрицу, предварительно подкисленную 30 % раствором уксусной кислоты, сенсibilизировали 10 % раствором нитрита натрия в количестве 1,3 %. Результаты газификации с различным содержанием регенератов в эмульсионной матрице представлены в таблице 4.

Таблица 4 – Результаты газификации эмульсионной матрицы

Образец	Кол-во РРО, масс. %	Кол-во РМФ, масс. %	Плотность, г/см ³
Контрольный	0	0	0,889
Опытный 1	25	25	0,892
Опытный 2	50	50	0,882
Опытный 3	75	75	0,888
Опытный 4	100	100	0,891

Показателем того, что эмульсия газифицирована качественно и способна к дальнейшей детонации, является плотность, равная 0,9–1,0 г/см³, спустя 60 минут после начала газификации. Установлено, что параметры сенсibilизации сохраняются даже при полном замещении исходных компонентов на регенерированные в рецептуре эмульсионной матрицы.

Способность к взрыву оценена на ПЭВВ «Березит®» марки Э-100, полученном на основе эмульсионной матрицы СБ1 из регенератов. Исследования детонации проведены электромагнитным методом в зарядах с ПВХ оболочкой диаметром 45 и 60 мм. Промежуточный заряд изготавливался из пенталита, обеспечивая формирование плоской ударной волны в веществе со скоростью на выходе из промежуточного заряда порядка 7 км/с. Внешний вид собранного заряда, исследуемого электромагнитным методом во взрывной камере, представлен на рисунке 9.

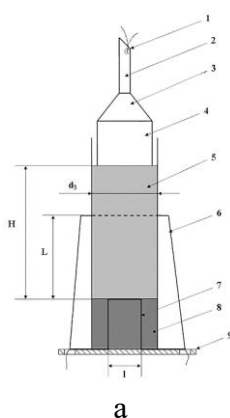


Рисунок 9 – Схема (а) и внешний вид (б) подготовленного к эксперименту заряда:
 1 – инициатор; 2 – промежуточный заряд для генерации плоской детонационной волны;
 3 – исследуемая эмульсия; 4 – «рвущийся» дополнительный датчик; 5 – «П»-образный датчик; 6 – парафин; Н – длина заряда, мм; d_3 – диаметр заряда, мм;
 L – расстояние между датчиками, мм; l – длина проводящего датчика, мм.

Скорость детонации составила около 3,7 км/с, что несколько ниже полученной при испытаниях исходного ПЭВВ (4,8 км/с). Падение скорости детонации возможно связано с повышенным влиянием параметров заряда, вероятно, приходящихся на диаметры нарастающей скорости детонации. Повышение диаметра заряда до 60 мм привело к росту скорости детонации, достигающей значений, сопоставимых с значениями указанными в нормативных документах на ПЭВВ «Березит®». Параметры детонации представлены в таблице 5.

Таблица 5 – Параметры детонации, исследуемых ПЭВВ

Наименование образца	Плотность, г/см ³	Диаметр заряда, мм	Скорость детонации, км/с	Максимальная массовая скорость, м/с	Максимальное давление взрыва, ГПа
Исходный образец	0,987	45	4,80	1435	6,80
Образец на основе регенератов	0,990	45	3,70	1347	5,07
	0,950	60	5,15	1383	7,32

На рисунке 10 представлено сравнение профилей массовой скорости исследованных составов.

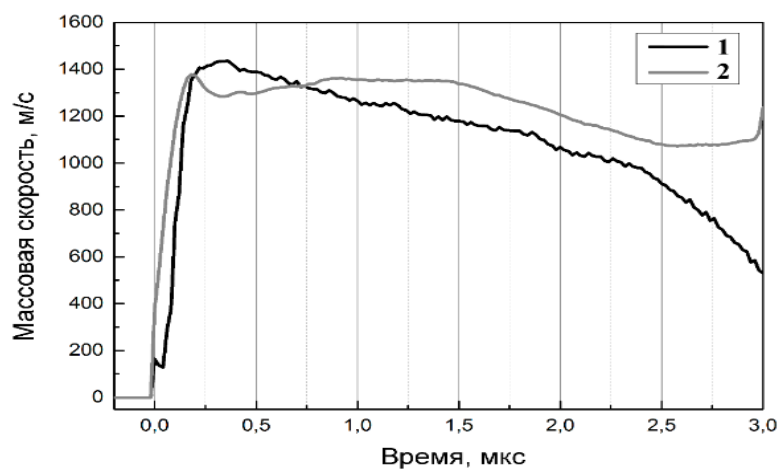


Рисунок 10 – Профили массовой скорости ПЭВВ «Березит» марки Э-100 исходного (1) и приготовленного на регенератах (2)

Из сравнения профилей можно сделать вывод о сходном протекании процесса детонации в обоих составах, отмечая практически идентичное нарастание и достигаемые предельные значения. Выраженный провал на интервале 0,3-0,8 мкс вероятно связан с локальными структурными особенностями газифицированной эмульсии и, учитывая последующий рост, не оказывает выраженного влияния на протекание детонационного процесса.

Полная детонация ПЭВВ, изготовленного на основе регенерированного сырья, и зафиксированные параметры детонационного процесса указывают на относительно

эквивалентную работоспособность исследованного состава на основе регенерированных компонентов в сравнении с кондиционной продукцией.

С целью оценки безопасности при производстве и применении эмульсии и ПЭВВ исследована чувствительность к удару по ГОСТ 4545-88. В рамках этого стандарта определяются показатели частоты взрывов и нижнего предела чувствительности к удару твердых и жидких ВВ. Для проведения испытаний использовался копер Козлова (К-44-П). Масса груза во всех экспериментах была фиксированной и составляла 10 кг.

В результате проведенных экспериментов получены характеристики чувствительности к удару некондиционной эмульсии, эмульсии, подкисленной уксусной кислотой и ПЭВВ. В таблице 6 приведены результаты определения частоты взрывов и нижнего предела чувствительности к удару как по стандартной методике, так и с отклонениями от стандартной методики в виде использования прибора с затрудненным истечением вещества.

Таблица 6 – Частость взрывов и нижний предел чувствительности к удару

Параметр	Некондиционная эмульсия	Эмульсия, подкисленная уксусной кислотой	Газифицированная эмульсия с плотностью $\sim 0,9 \text{ г/см}^3$
Частость взрывов по ГОСТ 4545-88	0 %	0 %	(16-24) %
Нижний предел чувствительности к удару по ГОСТ 4545-88	> 500 мм	> 500 мм	> 500 мм
Нижний предел чувствительности к удару, 100 мг, затрудненное истечение вещества	не определялся	300 мм	120 мм

По ГОСТ 4545-88 чувствительной к удару оказалась только газифицированная эмульсия частотой взрывов которой в двух экспериментальных сериях составила 16 % и 24 %. Кроме того, были проведены дополнительные испытания через 7 часов после газификации эмульсии (плотность $\sim 0,86 \text{ г/см}^3$), а также спустя 1 неделю. Частотой взрывов с высоты 500 мм в приборе 1 составила 10 % в сериях испытаний из 10 ударов.

Подводя итог можно сказать, что технологические операции по продавливанию эмульсии «Березит®» через узкие щели или отверстия в различных аппаратах по ее переработке могут представлять повышенную опасность, что обязательно необходимо учитывать при разработке технологической документации.

Согласно пункту 2.4 статьи 5 ТР ТС 028/2012: «Не допускаются для применения

взрывчатые вещества, по результатам испытаний которых на чувствительность к удару нижний предел составляет менее 100 мм, а при испытаниях на чувствительность к трению нижний предел менее 200 МПа». Поэтому можно говорить о соответствии полученных ПЭВВ на регенерированных компонентах требованиям безопасности нормативных документов.

В пятой главе представлена разработка промышленной технологии переработки некондиционной эмульсионной матрицы на регенераты и получение новых ПЭВВ на их основе. Подготовлены основные технические решения, описаны основные технологические операции. Спроектирована технологическая схема мобильного пункта переработки некондиционной эмульсионной матрицы (рисунок 11) с основным оборудованием и разработан технологический регламент.

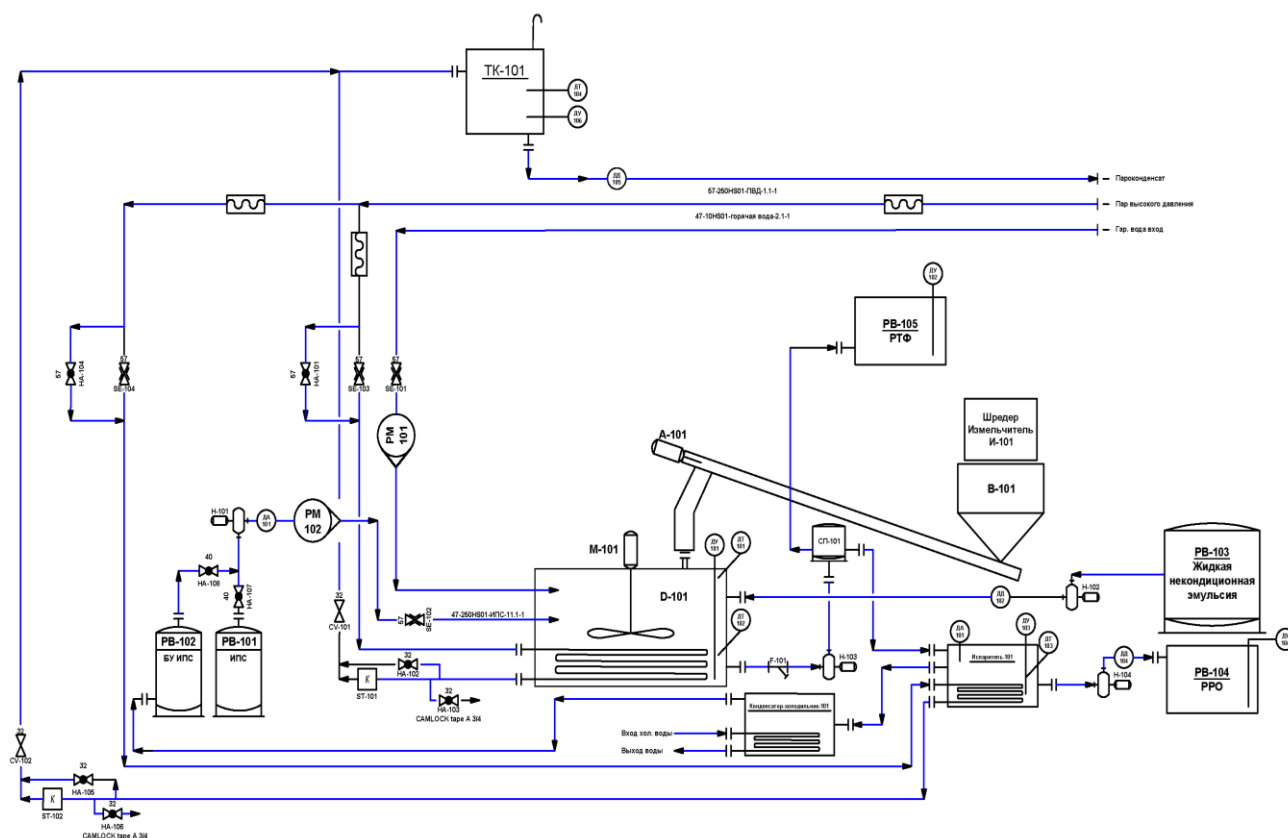


Рисунок 11 – Технологическая схема мобильного пункта переработки некондиционной эмульсионной матрицы:

В-101 – приемный бункер шнекового транспортёра; И-101– измельчитель твердой НЭ; А-101 – шнековый транспортер; D-101 – аппарат деэмульгирования; М-101 – мешалка; RB-101 – емкость с ИПС; RB-102 – емкость хранения дистиллята ИПС; RB-103 – емкость хранения жидкой НЭ; Н-101 – насос для подачи ИПС; Н-102 – насос для подачи жидкой НЭ; Н-103 – насос из аппарата деэмульгирования; СП-101 – сепаратор для отделения водной фазы от топливной; И-101 – испаритель для отгонки ИПС из РРО; F-101 – фильтр от абразивных частиц; К-Х-101 – конденсатор-холодильник паров ИПС; RB-104 – емкость хранения РРО; Н-104 – насос для очищенного РРО; RB-105 – емкость хранения РМФ;

Процесс переработки некондиционной эмульсионной матрицы является периодическим. Максимальная разовая загрузка технологической линии рассчитана на переработку 1 тонны некондиции. Процесс деэмульгирования проводится в аппарате с мешалкой и подогревом при 50 °С в течение 2-4 часов и зависит от исходного состояния некондиции. Разделение фаз проводится в сепараторе, после чего РРО очищается в испарителе от ИПС. Технологическая схема спроектирована с учетом размещения её в 20-футовом контейнере, которым могут дополняться действующие технологии производства ПЭВВ без их общего переоснащения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках выполненной диссертационной работы комплексно исследованы вопросы утилизации и регенерации некондиционных эмульсионных матриц промышленных взрывчатых веществ (ПВВ) типа «вода-в-масле», что имеет актуальное научное, техническое и экологическое значение для горнодобывающей промышленности. Впервые в отечественной практики разработана и апробирована эффективная химическая технология разрушения некондиционных эмульсионных матриц с последующим разделением на регенераты водно-солевой и масляной фаз, пригодных для повторного использования в производстве новых ПЭВВ.

По результатам выполненных исследований сформулированы следующие **выводы**:

1. Предложен и экспериментально обоснован способ деэмульгирования эмульсий второго рода «вода-в-масле», в которых водный раствор аммиачной селитры диспергирован в смеси нефтепродуктов и эмульгаторов, являющихся основой ПЭВВ. Установлено, что наиболее эффективным деэмульгатором для таких систем является изопропиловый спирт.
2. Разработан химический способ разделения и извлечения регенератов раствора окислителя и масляной фазы, содержащей смесь нефтепродуктов и эмульгаторов, из некондиционных эмульсионных систем. Получен патент № 2848106 от 16.10.2025.
3. Разработана и реализована лабораторная установка, позволившая не только экспериментально подтвердить принципиальную возможность получения чистых регенератов, но и провести масштабируемые испытания на промышленных отходах.
4. Экспериментально определены эффективная концентрация от 10 до 30 масс. % и соотношение 1:1 деэмульгатора к разделяемой некондиционной эмульсионной матрицы

в зависимости от её физико-химических характеристик и состояния. Получена эмпирическая зависимость между вязкостью эмульсии и концентрацией применяемого раствора деэмульгатора.

5. Впервые получена эмульсионная матрица с частичным и полным замещением исходных компонентов на регенерированные, для которой подтверждены соответствие нормативным требованиям, сохранность физико-химических и эксплуатационных свойств, а также безопасность применения.

6. Проведены сравнительные исследования полученных ПЭВВ по широкому комплексу характеристик: вязкость, электроёмкость, водоустойчивость, детонационные параметры, чувствительность к удару, стабильность при хранении. Показано, что даже при полном замещении исходных компонентов на регенераты новые эмульсии и ПЭВВ остаются работоспособными и безопасными.

7. Разработана и спроектирована технология рециклинга некондиционного эмульсионного полуфабриката, представляющего собой основу ПЭВВ. Подготовлены основные технические решения, описаны основные технологические операции, разработана технологическая схема с основным оборудованием, реализуемая без значительных изменений действующих технологических цепочек на производствах. Разработан технологический регламент мобильного пункта переработки некондиционной эмульсионной матрицы с разовой загрузкой в 1 тонну.

Результаты работы представляют собой значимый вклад в совершенствование процессов обращения с отходами взрывчатых производств, минимизацию экологических рисков и снижение производственных затрат за счёт возврата ценных компонентов в технологический цикл. Практическая апробация, публикации, а также патент свидетельствуют о высокой степени внедрения разработанных решений.

Полученные научные и технические результаты могут быть использованы при разработке нормативных документов и технологических регламентов по утилизации некондиционных эмульсионных матриц ПВВ, а предложенные подходы открывают новые направления для дальнейших исследований и развития химической технологии взрывчатых веществ в России.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ

Публикации в изданиях, индексируемых в международных базах данных:

1. Панфилов С.Ю. История создания, состояние, проблемы и перспективы развития производства и применения взрывчатых материалов в Российской Федерации / **С.Ю. Панфилов** // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2011. – № S10. – С. 42-56. (**Scopus**)

2. Тихонов В.А. Особенности ведения взрывных работ при освоении минеральных ресурсов северных и арктических районов России / В.А. Тихонов, Г.А. Дудник, **С.Ю. Панфилов**, В.В. Жуликов // Горная промышленность. – 2021. – №2. – С. 102-106. DOI:10.30686/1609-9192-2021-2-102-106 (**Scopus**)

3. Панфилов С.Ю. Разработка способа переработки эмульсионного полуфабриката промышленных эмульсионных взрывчатых веществ / **С.Ю. Панфилов**, Г.А. Дудник, Е.В. Султанов, Д.А. Булушев, Н.О. Мельников, Н.И. Акинин // Химическая промышленность сегодня. – 2024. – №1. – С.13-17 (**Chemical Abstracts**).

4. Панфилов С.Ю. Разработка технологии регенерации некондиционных эмульсионных полуфабрикатов промышленных взрывчатых веществ/ **С.Ю. Панфилов**, Г.А. Дудник, В.А. Тихонов, С.С. Назаров, Н.О. Мельников, Н.И. Акинин // Горная промышленность. – 2024. – №2. – С. 57-62. DOI:10.30686/1609-9192-2024-2-57-62 (**Scopus**)

5. Панфилов С.Ю. Исследование детонации промышленных эмульсионных взрывчатых веществ электромагнитным методом / С.Ю. Панфилов, Г.А. Дудник, В.А. Тихонов, Д.И. Михеев, Н.О. Мельников, Н.И. Акинин // Горная промышленность. – 2024. – № 6. – С. 111-115. DOI:10.30686/1609-9192-2024-6-111-115 (**Scopus**)

6. Панфилов С.Ю. Чувствительность к удару промышленных эмульсионных взрывчатых веществ / **С.Ю. Панфилов**, Г.Г. Гаджиев, Н.О. Мельников, Н.И. Акинин // Горная промышленность. – 2025. – № 5. – С. 91-97. DOI: 10.30686/1609-9192-2025-5-91-97 (**Scopus**)

Публикации в прочих изданиях:

7. Панфилов С.Ю. Пути решения проблемы утилизации эмульсии / **С.Ю. Панфилов**, Е.В. Султанов, Д.А. Булушев, Н.О. Мельников, Н.И. Акинин // Взрывное дело. – 2023. – № 140/97. – С. 49-62. DOI:10.18698/0372-7009-2023-9

Публичные доклады на всероссийских и международных научных мероприятиях (конференциях, съездах, симпозиумах, конгрессах):

8. Степанов М.Е. О разработке способа утилизации полуфабрикатов промышленных эмульсионных взрывчатых веществ / М.Е. Степанов, Е.В. Султанов, Д.А. Булушев, Н.О. Мельников, **С.Ю. Панфилов** // Успехи в химии и химической технологии. – 2023. – Т. 37, № 10. – С. 86-89.

9. Терентьева А.А. Получение и свойства промышленных взрывчатых веществ на основе утилизируемых эмульсионных полуфабрикатов / А.А. Терентьева, **С.Ю. Панфилов**, Н.О. Мельников, Н.И. Акинин, Д.И. Михеев, Г.Г. Гаджиев // Успехи в химии и химической технологии. – 2024. – Т. 38. № 10 (289). – С. 141-143.

10. Сергунова А.Э. Схема опытной технологии переработки некондиционного эмульсионного полуфабриката / А.Э. Сергунова, А.А. Терентьева, **С.Ю. Панфилов**, Н.О. Мельников, Г.Г. Гаджиев // VI международная научно-практическая конференция молодых ученых по проблемам техносферной безопасности: материалы конференции, Москва, 25 – 26 апреля 2024 года. – Москва: РХТУ им. Д.И. Менделеева, 2024. – С. 181-184.

11. Панфилов С.Ю. Получение промышленных эмульсионных взрывчатых веществ с использованием регенерированных исходных компонентов / **С.Ю. Панфилов**, Н.О. Мельников, А.А. Терентьева, Н.И. Акинин // Успехи в специальной химии и химической технологии: материалы Всероссийской научно-технической конференции, посвященной 90-летию Инженерного химико-технологического факультета РХТУ им. Д.И. Менделеева, 120-летию профессора К.К. Андреева, 130-летию профессора А.С. Бакаева, Москва, 24 – 25 апреля 2025 года. – Москва: Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, 2025. – С.289-301.

12. Панфилов С.Ю. Исследование детонации эмульсионных взрывчатых веществ, полученных на основе регенерированных исходных компонентов / **С.Ю. Панфилов**, Н.О. Мельников, А.А. Терентьева, Н.И. Акинин // Успехи в специальной химии и химической технологии: материалы Всероссийской научно-технической конференции, посвященной 90-летию Инженерного химико-технологического факультета РХТУ им. Д.И. Менделеева, 120-летию профессора К.К. Андреева, 130-летию профессора А.С. Бакаева, Москва, 24 – 25 апреля 2025 года. – Москва: Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, 2025. – С.295-298.

ПАТЕНТЫ

1. Патент № 2848106 С1 Российская Федерация, МПК C06B21/00, F24D5/04. Способ разрушения и утилизации некондиционных эмульсионных полуфабрикатов промышленных эмульсионных взрывчатых веществ: № 2025104336: заявл. 26.02.2025: опубл. 16.10.2025 / Н.И. Акинин, Г.Г. Гаджиев, Г.А. Дудник, Н.О. Мельников, **С.Ю. Панфилов**, В.А. Тихонов; заявитель Общество с ограниченной ответственностью «АЗОТТЕХ».