

*На правах рукописи*

*Локш*

ЛОКШИНА ЕВГЕНИЯ АЛЕКСАНДРОВНА

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ СТРОИТЕЛЬСТВА ПОДЗЕМНЫХ  
ХРАНИЛИЩ УГЛЕВОДОРОДОВ В СОЛЯНЫХ ПЛАСТАХ**

Специальность: 2.8.5. Строительство и эксплуатация  
нефтегазопроводов, баз и хранилищ (технические науки)

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Уфа 2024

Работа выполнена на кафедре «Транспорт и хранение нефти и газа» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет».

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор  
**Мастобаев Борис Николаевич**

Официальные оппоненты: **Агиней Руслан Викторович**  
доктор технических наук, профессор  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ухтинский государственный технический университет» / ректор (г. Ухта)

**Подорожников Сергей Юрьевич**  
кандидат технических наук, доцент  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тюменский индустриальный университет» / кафедра «Транспорт углеводородных ресурсов», доцент (г. Тюмень)

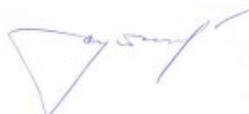
Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина» (г. Москва)

Защита состоится «16» мая 2024 года в 11-30 на заседании диссертационного совета 24.2.428.03 при ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет» по адресу: 450064, Республика Башкортостан, г. Уфа, ул. Космонавтов, 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Уфимский нефтяной технический университет» и на сайте [www.rusoil.net](http://www.rusoil.net).

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2024 года.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Султанов Шамиль Ханифович

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** Транспорт энергоносителей переориентируется с Запада на Восток. Все ранее сооружаемые подземные газохранилища находятся в западной части страны, в связи с чем появляется проблема нехватки хранилищ углеводородов на Востоке. В соответствии с приказом №32 ПАО «Газпром» «О развитии системы ПХГ на территории Российской Федерации» от 29.01.2019, в структуре компании запланировано развитие строительства подземных газохранилищ в соляных пластах. Рост числа ПХГ в отложениях каменной соли не только способствует решению проблем пикового газопотребления, но и способствует выполнению задачи, поставленной Правлением ПАО «Газпром», по выходу к осенне-зимнему периоду 2028/2029 годов на максимальную суточную производительность 1014,27 млн. м<sup>3</sup>.

В числе ключевых задач для ПАО «Газпром» в области подземного хранения на 2020-2030 гг. является повышение гибкости работы системы ПХГ за счет создания пиковых хранилищ относительно небольшого объема, но обладающих высокой производительностью. Эту возможность дают ПХГ, созданные в отложениях каменной соли. Также «Газпром ПХГ» проводит геологоразведочные работы для обеспечения бесперебойной эксплуатации газопровода «Сила Сибири» на Дальнем Востоке, а также для реализации потребности в оперативном объеме газа для западного маршрута поставок газа в Китай и регулирования неравномерности газопотребления на юге Западной Сибири, отметил И.А. Сафонов Генеральный директор ООО «Газпром ПХГ».

При строительстве подземных хранилищ углеводородов в соляных пластах требуется значительное количество пресной (маломинерализованной) воды, которая используется для растворения соли и образования полости. Соответствующим образом подготовленная вода для процессов растворения и разбавления позволяет интенсифицировать эти процессы и оптимизировать условия их протекания.

Согласно СП 123.13330.2012 «Подземные хранилища газа, нефти и продуктов их переработки», при разработке ПХГ в отложениях солей необходимо предусмотреть на стадии строительства водорассольный комплекс. Образующийся в процессе размыва пласта строительный рассол необходимо использовать путем его передачи рассолопотребляющим предприятиям или получения соли естественной или искусственной выпаркой рассола. При разработке технологических решений по строительству подземного резервуара следует учитывать требования к передаваемому рассолу, предъявляемые рассолопотребляющим предприятием или ограничениями выпарных установок. По РД 34.40.102 при проектировании схем с выпарными установками необходимо учитывать следующие показатели вод: минерализация, количество взвешенных веществ, жесткость общая, щелочность, ионный состав, рН, содержание органических веществ. Реки Восточной Сибири и Дальнего Востока, которые являются потенциальными источниками воды для подпитки процесса размыва пласта каменной соли для создания подземных хранилищ углеводородов, а также рассматриваются как источники технической воды для других нефтегазовых объектов, низкоминерализованы, с

низкой жесткостью и щелочностью, но имеют высокое содержание органических веществ (высокую цветность).

Низкая температура, которая наблюдается в течение большей части года в данных регионах усложняет подготовку воды для строительства ПХГ в соляных пластах, в том числе реагентную. Таким образом, совершенствование технологии строительства подземных хранилищ углеводородов в соляных пластах в настоящее время является актуальной темой исследования.

**Соответствие паспорту заявленной специальности.** Диссертационная работа посвящена оптимизации водопотребления при разработке подземных газохранилищ в соляных пластах, за счет создания замкнутого цикла, а также подготовке природных высокоцветных вод в условиях низких температур для дальнейшего использования в процессе размыва пласта. Таким образом, тема работы и содержание исследований соответствуют паспорту специальности 2.8.5. Строительство и эксплуатация нефтегазопроводов, баз и хранилищ: пункту 1 «Технологические процессы и технические средства для проектирования, сооружения, эксплуатации, теоретические и практические основы взаимодействия объектов трубопроводного транспорта с окружающей средой с целью создания высокоэффективных, энерго- и ресурсосберегающих, надежных, механически и экологически безопасных сухопутных и морских систем трубопроводного транспорта для добычи, сбора, подготовки, транспортировки и хранения углеводородов, распределения, газоснабжения и нефтепродуктообеспечения, а также других газовых, жидкостных и многофазных сред, гидро- и пневмоконтейнерного транспорта» и пункту 2 «Научные основы системного комплексного (мультидисциплинарного) проектирования конструкций, прочностных, гидромеханических, газодинамических и теплофизических расчетов сухопутных и морских систем трубопроводного транспорта для добычи, сбора, подготовки, транспортировки и хранения углеводородов, распределения, газоснабжения и нефтепродуктообеспечения, подземных и наземных газонефтехранилищ, терминалов, инженерной защиты и защиты от коррозии, организационно-технологических процессов их сооружения, эксплуатации, диагностики, обеспечения системной надежности, механической и экологической безопасности».

**Целью диссертационной работы** является повышение эффективности разработки подземного хранилища углеводородов в соляных пластах путем оптимизации использования водных ресурсов.

В соответствии с целью диссертационной работы были поставлены следующие **основные задачи исследования:**

1) Анализ исследований, в области разработке подземных хранилищ углеводородов и физико-химических основ подготовки технической воды с целью выявления основных параметров, влияющих на эффективность строительства ПХГ в соляных пластах.

3) Разработка замкнутого водооборотного цикла при разработке хранилищ углеводородов в пластах каменной соли.

2) Установление оптимальных параметров размыва пласта каменной соли при строительстве ПХГ с целью сокращения сроков разработки полостей в пластах каменной соли для хранения углеводородов.

4) Разработка и совершенствование методики подготовки технической воды для системы разработки хранилищ углеводородов в соляных пластах с учетом условий использования высокоцветных вод в условиях низких температур (0-5°C).

### **Научная новизна**

1) Установлена новая закономерность в виде уравнения аналитической зависимости времени растворения пласта каменной соли от степени концентрирования рассола, что позволяет обеспечить наиболее эффективный размыв пласта каменной соли для разработки подземного хранилища газа в сложных климатических условиях.

2) Разработан водооборотный цикл с нулевым сбросом при строительстве подземных газохранилищ в соляных пластах, снижающий потребление водных ресурсов в 4 раза по сравнению с традиционными методами разработки.

3) Разработана методика подготовки технической воды для размыва пласта каменной соли при строительстве ПХГ в условиях низких температур (0-5 °С) без предварительного подогрева.

**Теоретическая значимость работы.** Разработанная аналитическая зависимость, позволяет определить оптимальную степень концентрирования рассола, выводимого из процесса растворения при строительстве ПХГ в отложениях солей.

Разработана методика подбора реагентов для подготовки технической воды, используемой при строительстве ПХГ в соляных пластах, позволяющая сократить перечень коагулянтов при испытаниях в условиях низких температур (0-5 °С).

**Практическая значимость работы.** Установленный диапазон допустимого концентрирования воды при размыве пласта каменной соли дает возможность ускорить процесс разработки ПХГ в отложениях солей.

Разработанная технологическая схема размыва соляного пласта при сооружении ПХГ с возвратом обессоленной воды обратно в процесс растворения позволяет снизить стоимость технологии до 4 раз (патент на изобретение RU2023118912 А).

Разработанные рекомендации по подбору реагентов для удаления цветности речных вод позволяют получить техническую воду, соответствующую требованиям к воде при разработке ПХГ в соляных пластах без предварительного подогрева в условиях низких температур (0-5°C).

Разработанные рекомендации по комбинированию различных типов реагентов для условий низких температур (0-5°C) позволяют увеличить эффективность подготовки воды при меньших дозировках реагентов.

Результаты исследований были использованы в ООО «АСП-АКВА» при проектировании «Станции водоподготовки речной воды» для Амурского газохимического комплекса.

Результаты научной работы внедрены в учебный процесс ФГБОУ ВО «УГНТУ».

**Методология и методы исследования.** Решение поставленных задач производилось в соответствии с общепринятой методикой выполнения научных исследований, включающей обобщение и анализ предшествующих исследований, разработку рабочих гипотез и концепций, аналитические исследования. Эмпирические исследования включали в себя измерения необходимых показателей качества воды, сравнения анализируемых проб, эксперименты и моделирование систем. Теоретические исследования включали в себя научный анализ и обобщение современной теории и практики водоподготовки и водоочистки. Также анализировались базы данных зарубежных нормативов. Аналитические исследования включали сравнительный анализ методов и технологий, обработку полученных результатов методами математической статистики в современных программных комплексах.

**Положения, выносимые на защиту:**

- Аналитическая зависимость, учитывающая оптимальную степень концентрирования, позволяет обеспечить наиболее эффективный размыв пласта каменной соли для разработки подземного хранилища газа (ПХГ);

- Метод разработки ПХГ с возвращением отработанной воды обратно в процесс размыва и с получением на выходе товарного продукта хлорида натрия позволяет снизить потребление воды в 4 раза;

- Методика осветления высокоцветных речных вод Восточной Сибири и Дальнего Востока, позволяет получить техническую воду для строительства газохранилищ в пластах каменной соли в условиях низких температур (0-5 °С) без предварительного подогрева.

**Степень достоверности и апробация результатов.** Основные положения и результаты работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях: Международная учебно-научно-практическая конференция «Трубопроводный транспорт-2020» (г. Уфа, 2020), 72-я научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых (г. Уфа, 2021), Международная учебно-научно-практическая конференция «Трубопроводный транспорт-2021» (г. Уфа, 2021), Международная учебно-научно-практическая конференция «Трубопроводный транспорт-2022» (г. Уфа, 2022), II Всероссийская научная конференция «Транспорт и хранение углеводородов-2023» (г. Санкт-Петербург, 2023), Международная научно-практическая конференция, посвященная памяти академика А.Х. Мирзаджанзаде (г. Уфа, 2023), 74-я научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых (г. Уфа, 2023), Международная конференция «Рассохинские чтения» (г. Ухта, 2024). Результаты диссертации легли в основу научной работы, удостоенной первого места в Конкурсе на лучшую научную работу молодых ученых вузов и научных учреждений Республики Башкортостан 2023 год в номинации «Экология. Науки о земле. Ресурсосбережение».

Достоверность результатов диссертационного исследования подтверждается корректным использованием стандартных методов измерения и анализа физико-химических показателей состава воды; экспериментальной проверкой с многократным повторением и положительным опытом применения предложенных методов обессоливания высокоминерализованных рассолов и осветления высокоцветных речных

вод в условиях строительства и эксплуатации объектов транспорта и хранения углеводородов.

**Публикации.** По материалам диссертации опубликованы 22 научные работы, в том числе 9 статей в ведущих рецензируемых журналах, входящих в список ВАК при Министерстве науки и высшего образования в РФ, 6 из них по специальности 2.8.5. Строительство и эксплуатация нефтегазопроводов, баз и хранилищ (технические науки), 2 статьи в журналах, входящих в список Scopus, 1 патент на изобретение.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, основных выводов и списка литературы. Общий объем работы составляет 139 страниц печатного текста, включая список литературы из 208 наименований, 49 рисунков и 22 таблицы.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность работы, сформулированы цель и основные задачи исследования, отражена научная новизна и практическая ценность работы, дана общая характеристика диссертационной работы.

**В первой главе** проведен критический анализ исследований, связанных с разработкой подземных хранилищ углеводородов и физико-химическим основам системам разработки.

Вопросами сооружения подземных хранилищ газа занимались такие ученые, как Агинея Р.В., Васильев Г.Г., Волков И.П., Гвоздев Ю.П., Гимаев Р.Н., Горбанец В.К., Горбунов А.Т., Гуревич Г.Р., Задора Г.И., Закиров С.Н., Земенков Ю.Д., Коротаев Ю.П., Коробков Г.Е., Лурье М.В., Мирзаджанзаде А.Х., Николаевский В.Н., Подорожников С.Ю., Полянский А.П., Пономарев А.И., Раковский Н.Л., Розенберг М.Д., Rid R., Slobod R.L., Токарев М.А., Федоров К.М., Халиков Г.А., Халимов Э.М., Хафизов А.Р., Шиповалов А.Н., Ширковский А.И., Sherwood T. и др. Первое в мире ПХГ было создано в Канаде в 1915 году в истощённом месторождении.

Вопросами технологии сооружения и эксплуатации подземных хранилищ газонефтепродуктов в отложениях каменной соли занимались Аксютин О.Е., Богданов Ю.М., Бочкарева Р.В., Букли Ф., Варданян А.Е., Васюта Ю.С., Гриценко И.А., Гребенников Н.П., Гофмона-Захаров П.Н., Едигаров С.Г., Жарков М.А., Жученко И.А., Зыбинов И.П., Иванцов О.М., Игошин А.И., Ильичев Б.А., Ишков А.Г., Казарян В.А., Котов А.В., Маркюс Ф., Панюков П.Н., Парфенов В.И., Похоруков П.В., Поздняков А.Г., Резуненко В.И., Ремизов В.В., Салохин В.И., Саркисян Б.А., Смирнов В.И., Сохранский В.Б., Теплов М.К., Хан С.А., Цыбульский П.Г., Штилькин Т.Н., Эдиашвили Н.А. и др. В этих работах отражены основные научные и технические положения, связанные с технологией строительства резервуаров методом выщелачивания каменной соли через буровые скважины.

На начальном этапе исследовательских работ проблемами опреснения высокоминерализованных вод, исследованием и описанием процесса занимались Р. Фицджеральд, У. Уилкот (1675-1683 гг), Е. Майгрот и Дж. Сабатес (1890), исторические

хроники приписывают открытие осмоса аббату Ноле. История исследования электродиализа в России начинается с 1932 г., когда И.И. Жуков, Б.П. Никольский, О.Н. Григоров и А.В. Маркович в Санкт-Петербургском государственном университете применили электродиализ с трубчатыми керамическими мембранами для обессоливания воды р. Невы. Далее данным процессом занимались Н.И. Гаврилов, В.Е. Балабуха-Попцова, Б.И. Ласкорин, Н.М. Смирнова и М.Н. Гантман, В.С. Титов, А.Б. Пашков и К.М. Салдадзе (1930-1960 гг). Мембранные технологии в настоящее время исследуются следующими специалистами: Л. Новак, Э.М. Мовсумзаде, О.Х. Каримов, Э.Х. Каримов.

На сегодняшний день в ПАО «Газпром» эксплуатируется 26 ПХГ, из которых семь расположены в водоносных пластах, одно в соляных кавернах, а оставшиеся 17 в истощенных газоконденсатных месторождениях с оперативным резервом 72,842 млрд м<sup>3</sup> и максимальным суточным отбором газа 858,8 млн м<sup>3</sup>. Эксплуатационный фонд скважин на ПХГ насчитывает 2683 единицы. Строятся и проектируются шесть объектов ПХГ, для девяти ПХГ разведываются площади под соответствующие объекты (Рисунок 1).



Рисунок 1 – Схема расположения ПХГ в России

На территории России в настоящее время имеются 3 газохранилища в соляных кавернах: Калининградское (Калининградская область), Волгоградское (Волгоградская область) и Березняковское (Пермская область). Однако перспективы строительства ПХГ в каменной соли не ограничиваются этими регионами.

Залежи каменной и калийной соли располагаются по всему миру, в том числе большое их количество находится на территории России (Рисунок 2). Залежи каменной соли находятся на Чукотке, в Иркутской области и на Дальнем Востоке, на Крымском полуострове, а также на территории Бурятии, в Калининградской и Донецкой областях.

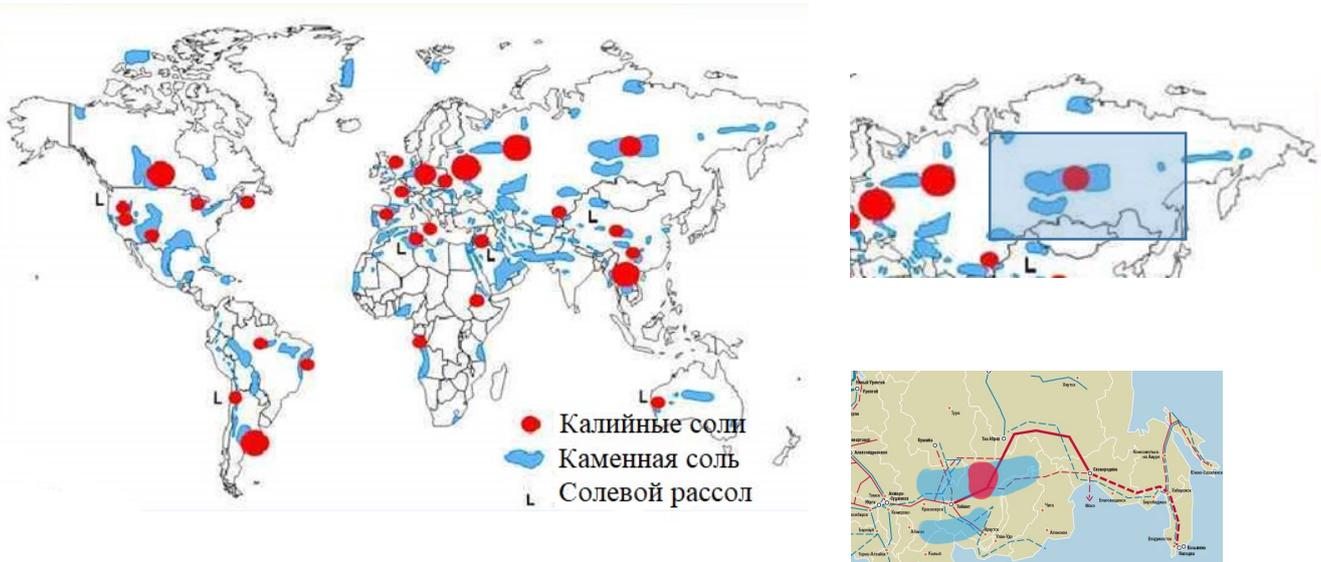


Рисунок 2 – Распределение месторождений соляных пластов

В работе проведен анализ существующих технологий размыва полости в залежах каменной соли для сооружения подземных хранилищ углеводородов. Размыв пласта соли заключается в непрерывной подаче по одной из рабочих колонн труб воды, которая, размывая соляной пласт, насыщается солью и по другой колонне труб выдается на поверхность (Рисунок 3).

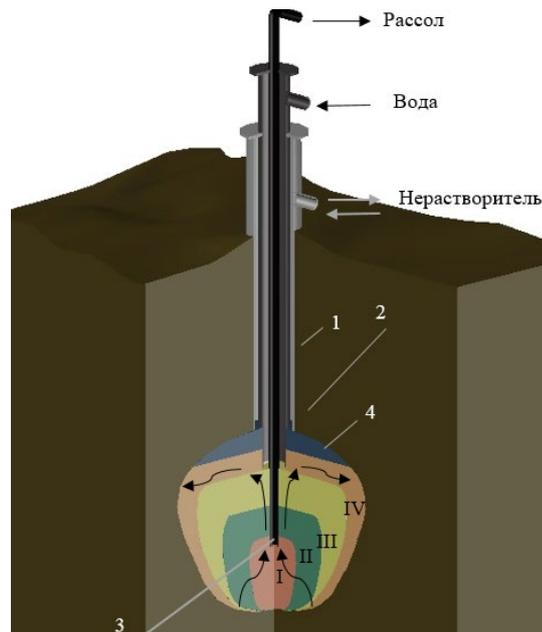


Рисунок 3 – Процесс размыва пласта каменной соли для создания ПХГ

I-IV – стадии развития емкости; 1, 2, 3 – соответственно обсадная водоподающая и рассолоподъемная колонны труб; 4 – нерастворитель

Разработка ПХГ в соляных кавернах требует использования большого количества пресной воды в связи с этим в данной работе будут рассмотрены аспекты водоподготовки и создания водооборотной системы при размыве пласта каменной соли. Основная цель – сокращение водопотребления при сооружении ПХГ за счет повторного использования очищенной воды. Кроме того, необходимо оптимизировать процесс подготовки воды, используемой в процессе растворения соляной залежи.

Таким образом в результате проведенного анализа современных технологий и исследований по разработке полостей в отложениях каменных солей показал тенденцию по использованию процессов выпарки в разомкнутом цикле водоподготовки. При этом изменяющиеся потребители и грузопотоки природного газа требуют обеспеченность транспортной системы дополнительным резервом за счет создания новых подземных хранилищ газа. Таким образом выявлена необходимость в разработке новых подходов в решении данной задачи с учетом нахождения залежей каменной соли на путях, проектируемых и уже существующих транспортных потоков природного газа. Ввиду общемирового внедрения ресурсосберегающих технологий по использованию оборотных систем, а также отраслевых требований минимизации загрязнений окружающей среды, наиболее перспективным является разработка технологической схемы водооборотного цикла с нулевым сбросом при сооружении ПХГ в пластах каменной соли.

**Вторая глава посвящена** созданию водооборотного цикла с нулевым сбросом при разработке подземных газохранилищ в соляных пластах.

При строительстве ПХГ в соляных пластах требуется значительное количество пресной (маломинерализованной) воды, которая используется для растворения соли и образования полости. На основе изученных технологий разработки ПХГ в пластах каменной соли представлены две основные схемы: с забором рассола на выпарную установку (Рисунок 4а) (вариант 1), с последующим получением соли на выходе или же закачка рассола в пласты, насыщенные высокоминерализованными водами (Рисунок 4б).

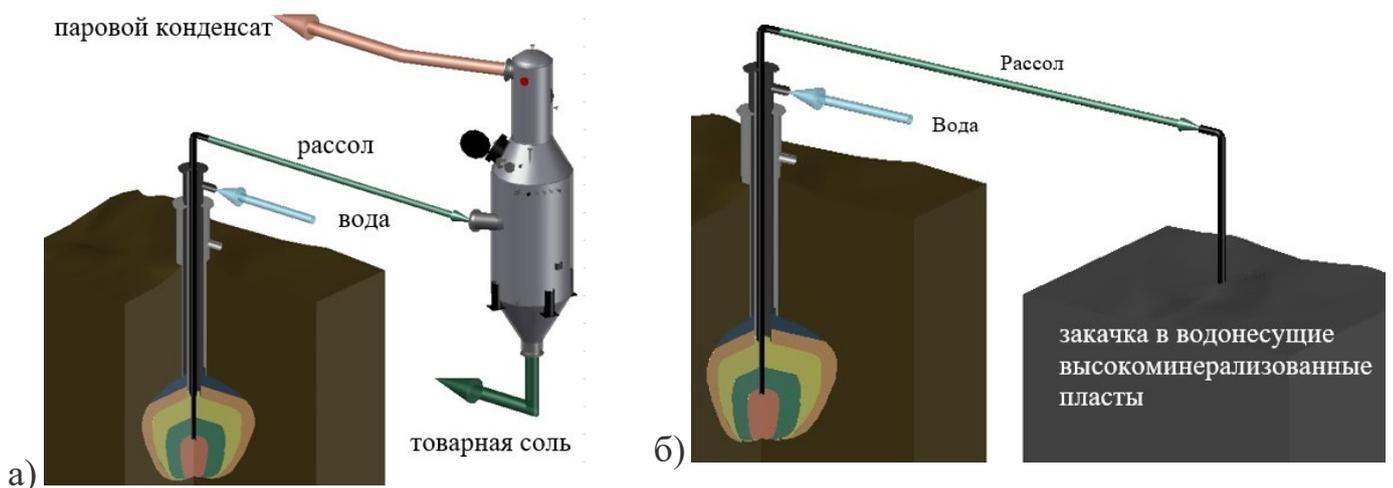


Рисунок 4 – Блок-схема технологии процесса размыва пласта каменной соли:

а) с отправкой рассола на выпарку; б) с закачкой рассола в пласт

Строительство ПХГ в соляных пластах требует большого потребления пресной воды на осуществление процесса растворения, а утилизация рассола по данным схемам требует большого потребления электроэнергии при выпарке или неблагоприятно сказывается на окружающей среде. В связи с этим было принято решение усовершенствовать технологию строительства газохранилищ в соляных пластах.

Осуществление этой задачи возможно при создании замкнутого водооборотного цикла с использованием мембранных обессоливающих технологий для опреснения рассола и возврата его в процесс размыва, а количество рассола за счет использования такой технологии сократится, тем самым сократится нагрузка на выпарку и уменьшится потребление электроэнергии. Произведено качественное сравнение двух наиболее технологичных мембранных процессов: электродиализа и обратного осмоса (Таблица 1).

Таблица 1 – Резюме сравнения по основным параметрам

	Электродиализ (ЭДР)	Обратный осмос (ОО)
Солесодержание исходной воды	Эффективно до 60 г/л	До 40 г/л (обессоливание морской воды)
Восстановление, %	В основном (85-94) %	В основном (60-85) %
Операционные лимиты	До SDI <6 не требуется предочистка (соответствует мутности 0,5 NTU), SDI >6 конвенциональная предочистка (коагуляция, осаждение, песочная фильтрация, активированный уголь) (соответствует мутности до 5 NTU)	До SDI <3 не требуется предочистка, SDI >5 стандартная предочистка + ультрафильтрация, не допускается свободный хлор и наличие масел, всегда требуется дозирование антискаланта, мутность максимальная до 1 NTU
Удаление отложений	Благодаря изменению полярности (реверсивности) более высокая устойчивость к образованию отложений	Необходимость в постоянной дозировке антискаланта
Уровень концентрирования	До 200 г/л	Ниже, чем при электродиализе даже у высоконапорного ОО (200 Бар)
Селективность, %	50-90	95-98
Уровень обессоливания	Частичное обессоливание (до 200 мг/л)	Глубокое обессоливание (до 99%)
Потребление энергии (на 1 м <sup>3</sup> продукта)	Зависит от солесодержания исходной воды, вода с низкой соленостью (0,3-2,0) кВтч/м <sup>3</sup> , при высоком солесодержании (5-25) кВтч/м <sup>3</sup>	Зависит от типа мембран и солесодержания исходной воды, эффективно от (1,5-2,0) г/л и до (35-40) г/л (морская вода)
Потребление химикатов	Для очистки и регенерации мембран, обычно ниже, чем для обратного осмоса - HCl и NaOH - Антискалант (при необходимости)	Для очистки и регенерации мембран, дополнительное потребление для предварительной обработки и химической корректировки pH после процесса обратного осмоса - Кислота- Бицид- Антискалант
Регенерация мембран	Изменение полярности, химически, механически	Достигается только химическим способом
Срок службы мембран	10 лет	3-4 года для стандартных применений

Преимуществами использования электродиализной установки являются: толерантность мембран к хлорид-ионам, большой процент восстановления (более 90%), устойчивость мембран к солям и различным pH.

САРЕХ – ЭДР примерно в 3 раза дороже, чем ОО. Но обратный осмос совместно с ультрафильтрацией примерно совместимы по стоимости с ЭДР со стандартной предочисткой.

ОРЕХ – потребление энергии ЭДР примерно  $(0,9-1,0)$  кВтч/м<sup>3</sup> в зависимости от соледержания, низкое потребление реагентов, низкая потребность в замене мембран. Потребление энергии обратного осмоса с ультрафильтрацией  $0,7$  кВтч/м<sup>3</sup> в зависимости от соледержания, среднее потребление реагентов, высокая потребность в замене мембран.

По результатам качественного сравнения было принято решение использовать технологию электродиализа при строительстве газохранилищ в соляных кавернах.

При обессоливании рассола на электродиализной установке произойдет его разделение на дилуат (пресную воду) и концентрат (сильно минерализованный остаток). Из концентрата возможно получение товарного продукта – поваренной соли, а дилуат можно использовать для повторного растворения. Таким образом, можно сделать замкнутый водооборотный цикл с минимальной подпиткой пресной водой и товарным продуктом на выходе. Помимо этого, увеличивается скорость разработки полости в соляном пласте.

Используя низко-минерализованную исходную воду, увеличивается разность концентраций насыщения и начальной концентрации. Это увеличивает массу растворенного вещества (по расчетным формулам) за одну и ту же единицу времени, следовательно, возрастает скорость растворения.

Принципиальная схема оборота воды при разработке газохранилища показана на Рисунке 5. После установки электродиализа концентрат направляется на выпарную установку, где происходит выпаривание соли. На выходе мы получаем рапу (влажную соль) с влажностью приблизительно 70%, которая идет в центрифугу для избавления от избыточной влаги. После центрифуги соленая вода возвращается в цикл процесса и повторно подается на выпарную установку со следующей порцией концентрата, а влажную соль направляют на сушку. В конечном итоге на выходе мы получаем сухую товарную соль (NaCl). Количество обессоленной воды составит 93% от исходного рассола.

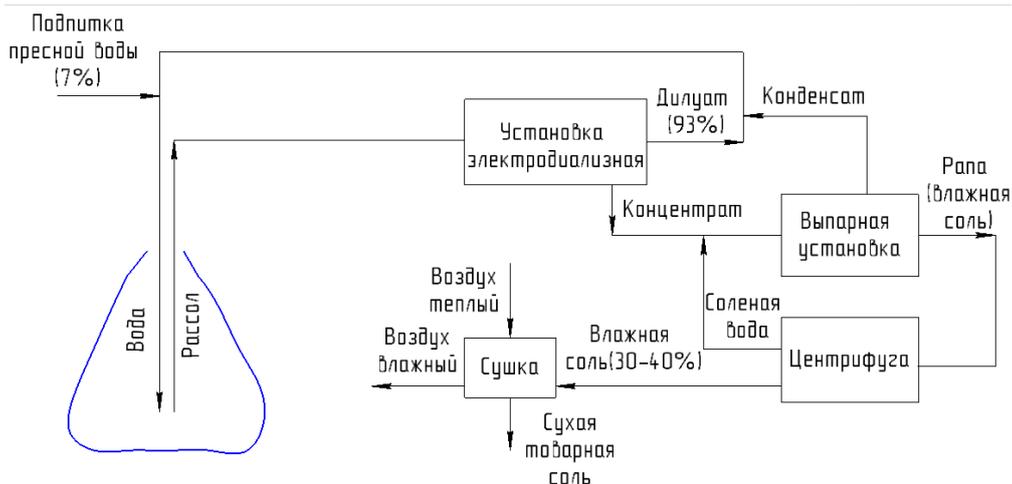


Рисунок 5 – Блок-схема оборота воды при размыве пласта

В работе были рассмотрены две схемы размыва полости для строительства ПХГ:

1. Неподготовленная вода (высокое содержание растворенной органики в виде цветности) – размыв с получением рассола неконтролируемой концентрацией (в среднем 175 г/л) – подготовка рассола к выпарке – выпарка рассола (Рисунок 4а);

2. Подготовка воды – размыв, с получением рассола заданной концентрации (50 г/л) – обессоливание воды на ЭДР для повторного использования (концентрирование рассола) – выпарка (Рисунок 5).

По схеме 1 на 1 м<sup>3</sup> объема ПХГ в соляных пластах (2,17 т соли) требуется 12,5 м<sup>3</sup> воды, коэффициент скорости растворения при данной концентрации ( $K$ ) равен 0,016, объем рассола для выпарки (с подготовкой рассола) 12,5 м<sup>3</sup> с 1 м<sup>3</sup> объема соли (концентрация 175 г/л).

По схеме 2 на 1 м<sup>3</sup> объема ПХГ в соляных пластах (2,17 т соли) требуется 43 м<sup>3</sup> воды, с учетом повторного использования (коэффициент возврата 0,93) 3 м<sup>3</sup>, коэффициент скорости растворения ( $K$ ) при данной концентрации равен 0,052; объем рассола для выпарки (без подготовки рассола) 3 м<sup>3</sup> с 1 м<sup>3</sup> объема соли. Сравнение двух технологий приведено в Таблице 2.

Таблица 2 – Сравнение использования классической схемы с выпаркой (вариант 1) и предложенной (вариант 2)

№ п/п	Показатели	Вариант 1	Вариант 2
1	Расход свежей воды на 1 м <sup>3</sup> объема ПХГ	12,5 м <sup>3</sup>	3 м <sup>3</sup> , с учетом повторного использования
2	Объем рассола на утилизацию на 1 м <sup>3</sup> объема ПХГ	12,5 м <sup>3</sup>	3 м <sup>3</sup>
3	Стоимость подготовки воды на 1 м <sup>3</sup> объема ПХГ	0	49,5 руб. (16,5 руб./м <sup>3</sup> за 1 м <sup>3</sup> )
4	Стоимость подготовки рассола на 1 м <sup>3</sup> объема ПХГ	621 руб. (49,7 руб./м <sup>3</sup> за 1 м <sup>3</sup> )	3740 руб. (93,5 руб./м <sup>3</sup> за 1 м <sup>3</sup> ) с учетом расхода дилуата 40 м <sup>3</sup>
5	Стоимость выпаривание рассола на 1 м <sup>3</sup> объема ПХГ	16895,6 рублей (1351,65 руб./м <sup>3</sup> за 1 м <sup>3</sup> )	4055,0 руб. (1351,65 руб./м <sup>3</sup> за 1 м <sup>3</sup> )
	Стоимость итого	16957,7 руб.	7844,5 руб.

Таким образом, предлагаемая схема размыва пласта каменной соли для строительства ПХГ выгоднее классической схемы на 9133,2 рублей на 1 м<sup>3</sup> соли, в 2,16 раз.

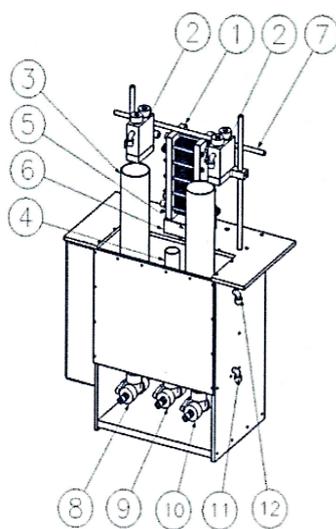
Строительство таких крупных сооружений как газохранилища требует большого количества воды. Проблема рационального ее использования при строительстве ПХГ в пластах каменной соли предполагает её многократное использование в процессе растворения. Эта задача решается путем совершенствования технологии строительства за счет концентрирования извлекаемого рассола на ЭДР. В результате получаем 93 % обессоленной воды с солесодержанием на уровне 200 мг/л и 7 % концентрированного рассола с солесодержанием 250000 мг/л. Потребление свежей воды сокращается в 4 раза.

**Третья глава посвящена** определению оптимальных параметров процессов растворения и обессоливания при строительстве ПХГ в соляных пластах.

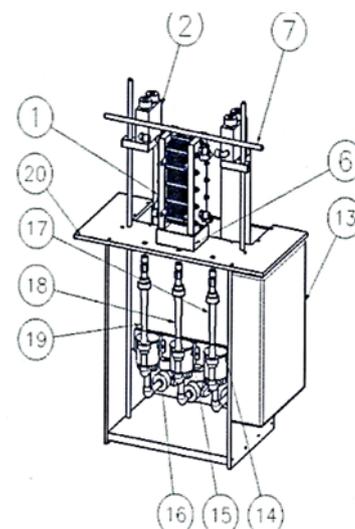
Для проведения экспериментов были приготовлены (1,0–5,0) % масс. растворы хлорида натрия (NaCl) с шагом концентрации 0,5 % масс. С помощью этих растворов был смоделирован процесс получения пресной воды для повторного направления на размытие пласта и концентрата для подачи на выпарную установку. Перед проведением эксперимента было проведено его планирование. Объектом исследования являются модельные растворы хлорида натрия. Общее количество опытов составило 27, число уровней равно 9 (различные концентрации), были произведены серии экспериментов для обеспечения воспроизводимости. Растворы были пропущены через пилотную установку электродиализа (Рисунок 6).



а) фото установки



б) вид спереди



в) вид сзади

Рисунок 6 – Конструкция пилотной установки электродиализа

1 – комплект мембран; 2 – камера для измерения рН и проводимости; 3 – емкость для дилуата; 4 – емкость для электродного раствора; 5 – емкость для концентрата; 6 – подставка; 7 – перекладина с направляющими стержнями; 8,9,10 – трехходовые вентили; 11,12 – проток; 13 – источник тока; 14,15,16 – насосы; 17,18,19 – ротаметры; 20 – кожух

Проводились начальные, промежуточные и конечные измерения рН, проводимости, солесодержания, также учитывались сила тока и напряжение.

По результатам проведенного эксперимента была построена зависимость времени обессоливания от концентрации рассола, выводимого из процесса растворения. На Рисунке 7 сопоставлены время растворения и время обессоливания. По данному графику найдены оптимальные диапазоны концентраций рассола (40-50) г/л и времени (36-48) минут, при которых эти процессы можно совместить в непрерывном цикле.

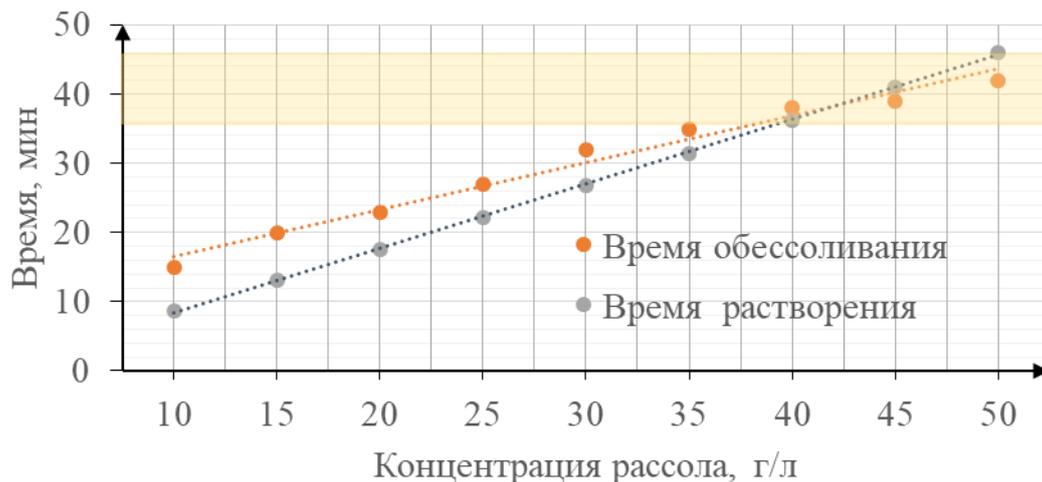


Рисунок 7 – Сопоставление времени процесса растворения и обессоливания

По зависимости стоимости обессоливания  $1 \text{ м}^3$  рассола и коэффициента скорости растворения от концентрации рассола, построенной на Рисунке 8, определен оптимальный диапазон концентрирования (40-60) г/л. Вывод рассола в найденном диапазоне из процесса размыва пласта при строительстве ПХГ обеспечит высокую скорость растворения и среднюю стоимость процесса опреснения.

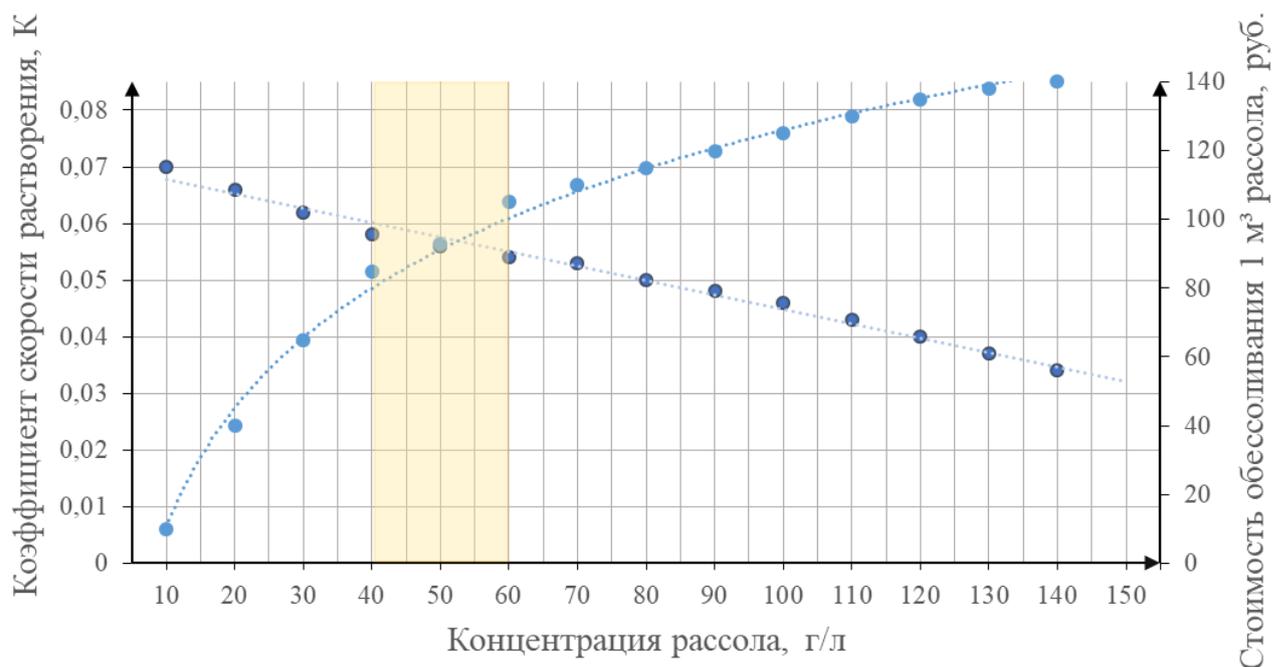


Рисунок 8 – Зависимость времени опреснения от концентрации подаваемого рассола

Полученные зависимости имеют пересечения значений концентраций (40-50) г/л, таким образом, найдены оптимальные значения концентрирования.

По результатам проведенных исследований выведена математическая зависимость, позволяющая определить время растворения пласта каменной соли с учетом концентрации рассола, выводимого из процесса растворения и объема, размываемого пласта:

$$t = \ln\left(\frac{C_H - C_L}{C_H - C_0}\right) \cdot \frac{V}{K \cdot S} \quad (1)$$

где  $t$  – время растворения, мин;

$V$  – объем размыва, м<sup>3</sup>;

$C_n$  – концентрация насыщения раствора, для NaCl  $C_n = 371$  г/л при температуре 60 °С;

$K$  – коэффициент скорости растворения;

$S$  – площадь поверхности контакта воды и соли, м<sup>2</sup>;

$C_0$  – концентрация воды, подаваемой в процесс растворения, г/л;

$C_1$  – концентрация рассола, выводимого из процесса растворения, г/л.

Очень важным и экономически целесообразным является сокращение объёма рассола, подлежащего выпарке. При высоких концентрациях рассола, получаемом при разработке ПХГ скорость растворения падает (при концентрации рассола 50 г/л коэффициент скорости ( $K$ ) растворения 0,056, а при концентрации 250 г/л  $K = 0,0001$ ). Поэтому растворение с откачкой рассолов низкой концентрации и последующим их доконцентрированием с помощью мембранных процессов позволяет увеличить скорость растворения и утилизацию рассолов на выпарных аппаратах.

В результате проведенных исследований найден диапазон наиболее оптимальных концентраций рассола (40-50) г/л, при которых его следует выводить из процесса размыва пласта при разработке ПХГ, чтобы обеспечить наиболее высокую скорость размыва пласта каменной соли и обеспечить непрерывность двух процессов: растворения и обессоливания. Это позволяет проводить растворение пласта с большими циркуляционными расходами воды и незначительными объемами высококонцентрированных рассолов, подлежащих утилизации. Выведена математическая зависимость, позволяющая определить наименьшее время растворения пласта каменной соли для строительства ПХГ.

**В четвертой главе** разработана методика подготовки технической воды, необходимой при строительстве ПХГ в пластах каменной соли.

Реки Сибири, которые являются потенциальными источниками технической воды, необходимой для строительства ПХГ в пластах каменной соли (Рисунок 2), а также рассматриваются как источники технической воды для других нефтегазовых объектов, низкоминерализованы (не более 300 мг/л), с низкой жесткостью и щелочностью, но имеют высокое содержание органических веществ (высокую цветность). Согласно СП 123.13330.2012 при разработке технологических решений по строительству подземных газохранилищ следует учитывать требования к передаваемому рассолу, предъявляемые рассолопотребляющим предприятием. Эти требования определяются по РД 34.40.102 и учитывают следующие показатели вод: минерализация, количество взвешенных веществ, жесткость общая, щелочность, ионный состав, рН, содержание органических веществ. Для снижения цветности воду обрабатывают химическими реагентами – коагулянтами и флокулянтами.

В работе рассматривались источники вблизи газопровода «Сила Сибири», а также рядом с залежами соли (Рисунок 2). Такими примерами являются реки Восточной Сибири и Дальнего Востока, в связи с чем они рассмотрены в работе как потенциальные источники технической воды (Рисунок 5) для образования полости при строительстве ПХГ. Низкая температура, которая наблюдается в течение большей части года в данных регионах

усложняет реагентную очистку воды.

Низкое качество технической воды, используемой в процессе разработки ПХГ в пластах каменной могут привести к различным проблемам: солеотложения, коррозия, биообрастание (Рисунок 9).



а) солеотложения



б) коррозия



в) биообрастание

Рисунок 9 – Основные проблемы использования некачественной технической воды

Наличие проблем в системах подачи (трубопроводах) пресной воды для размыва соли для сооружения ПХГ приведет к снижению производительности, а, следовательно, скорости разработки. Кроме того, для удовлетворения требований СП 123.13330.2012 необходимо удалять органические соединения и готовить техническую воду.

По классической схеме осветления воды ее необходимо подогреть до (20-30) °С перед реагентной обработкой. Сложностью подготовки речных вод Сибири и Дальнего Востока является удаление цветности речных вод со среднегодовой температурой не более 5 °С.

На примере р. Лена (Восточная Сибирь) и р. Зея (Дальний Восток) проведены эксперименты по снижению цветности (осветлению) вод. Проба воды р. Лена взята в паводковый период, т.к. данный период предусматривает высокую цветность. Проба воды р. Зея имеет невысокую цветность, т.к. она была взята в период перед ледоставом, но вода имеет низкую температуру, что позволяет подобрать реагенты при температуре 2 °С. Перед проведением эксперимента было проведено его планирование. Объектом исследования являются модельные растворы хлорида натрия. Общее количество опытов составило 72, влияющими факторами выявлены концентрации коагулянтов, вид коагулянта, вид флокулянта, были произведены серии экспериментов для обеспечения воспроизводимости.

Перечень коагулянтов, участвующих в эксперименте по удалению цветности воды реки Лена:

- полиоксихлорид алюминия;
- алюминат натрия;
- сульфат трехвалентного железа;
- хлорид железа.

Наилучшие результаты показали коагулянты полиоксихлорид алюминия и сульфат трехвалентного железа. Дальнейшие эксперименты проводятся по выбору оптимальной дозировки. Проведены исследования с дозировками 10, 20 и 30 мг/л (Рисунок 10).



а) коагулирование полиоксихлоридом алюминия в дозах 10, 20, 30 мг/л по активному веществу (слева направо)

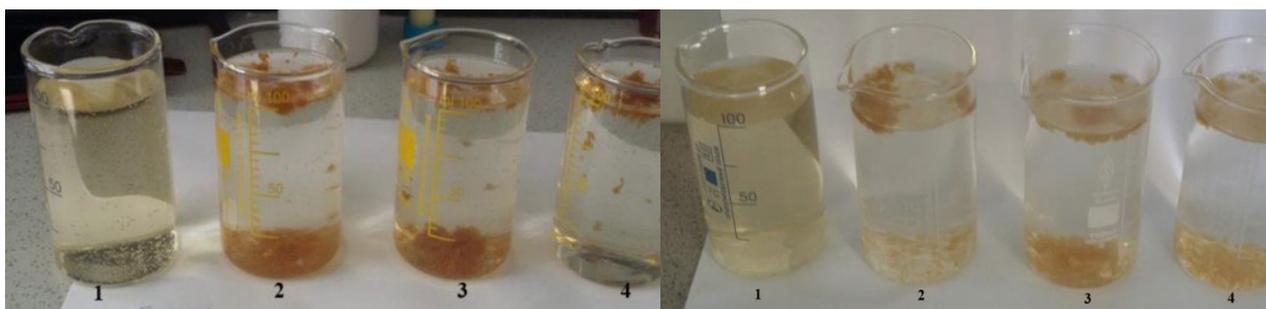
б) коагулирование сульфатом железа в дозах 10, 20, 30 мг/л по активному веществу (слева направо)

Рисунок 10 – Определение эффективных дозировок

Наилучшие результаты показали дозировки в 30 мг/л по активному веществу.

Провели экспериментальное исследование по выбору флокулянтов.

Выбор флокулянта для обработки с коагулянт сернокислосое железо (коагулянт 1) и полиоксихлоридом алюминия (коагулянт 2) в дозировке 30 мг/л приведен на Рисунке 11.



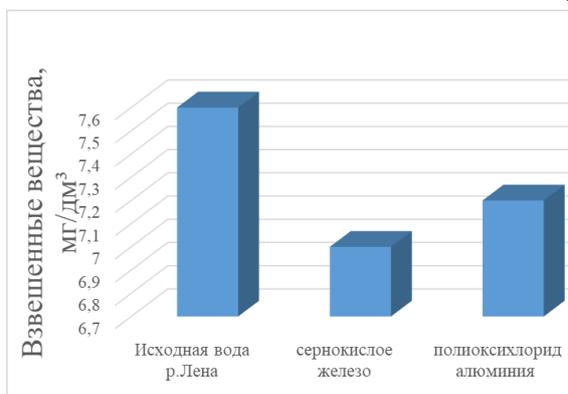
а)

б)

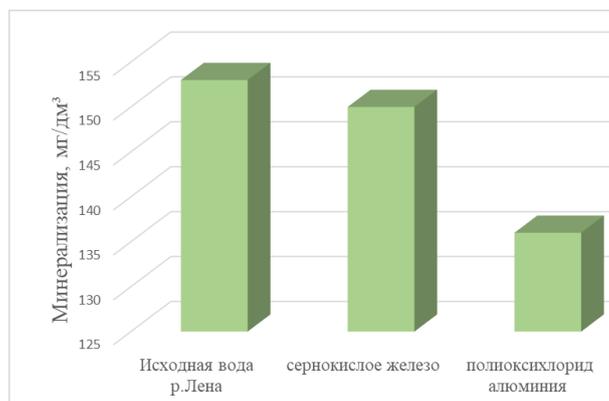
Рисунок 11 – Сравнение обработки коагулянт 1 (а) и коагулянт 2 (б) с различными флокулянтами с исходной речной водой; 1 – исходная речная вода; 2 – с неионогенным флокулянтом; 3 – с анионным флокулянтом; 4 – с катионным флокулянтом

Эксперименты, проведенные с различными флокулянтами показали, что наилучшую степень осветления при применении обоих типов коагулянтов произошло в пробе номер 4 (Рисунок 11) с добавлением катионного флокулянта.

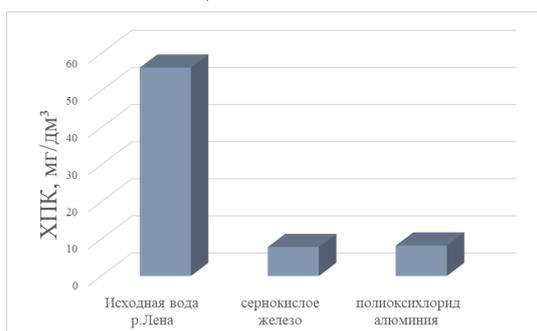
Результаты реagentной обработки по основным показателям приведены на диаграммах (Рисунок 12). По результатам сравнения следует обратить внимание, что обработка реагентами дополнительно снизила минерализацию, что позволит подавать в процесс растворения соли для разработки ПХГ еще менее минерализованную воду, следовательно, увеличится скорость растворения.



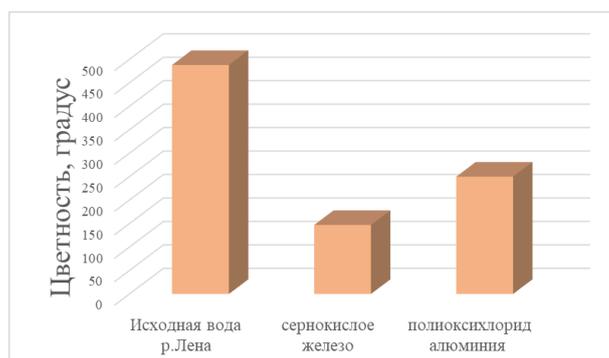
а) сравнение по взвешенным веществам



б) сравнение по минерализации



в) сравнение по ХПК

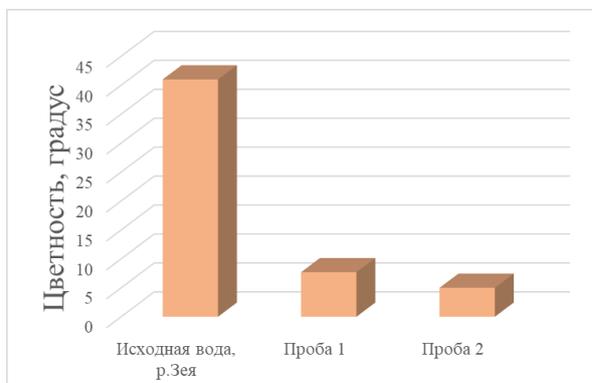


г) сравнение по цветности

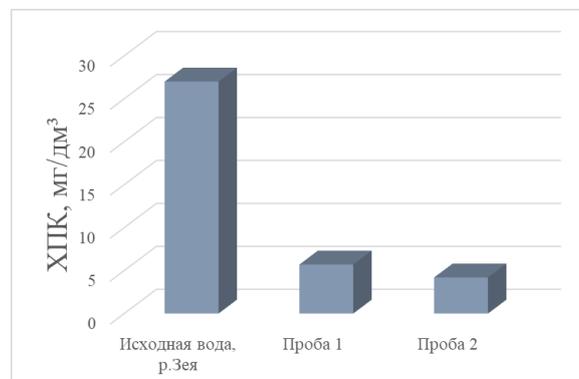
Рисунок 12 – Сравнение результатов обработки коагулянтom сернокислое железо (с катионным флокулянтom) и полиоксихлоридом алюминия (с катионным флокулянтom) с исходной речной водой

По показателю цветности наибольшего снижения добились с обработкой коагулянтom сернокислое железо, что подтвердили показатели взвешенных веществ и ХПК. Удаление органических соединений позволит снизить риск биообрастания в системах подачи воды при разработке ПХГ в пластах каменной соли.

Аналогичные эксперименты были проведены с водой, отобранной из реки Зeya.



а) сравнение по цветности



б) сравнение по ХПК

Рисунок 13 – Сравнение результатов обработки Пробы 1, Пробы 2 с исходной водой реки Зeya

По результатам обработки было принято решение использовать смесь реагентов полиоксихлорид алюминия и алюминат натрия с добавлением катионного флокулянта. Проба 1 (10 мг/л алюмината натрия и 20 мг/л полиоксихлорида алюминия) и Проба 2 (5 мг/л алюмината натрия и 10 мг/л полиоксихлорида алюминия с катионным флокулянтом 1 мг/л). Результаты анализа на аналогичные показатели изображены на Рисунке 13. Из результатов следует, что проба 2 снизила цветность и ХПК лучше при меньших дозировках коагулянтов в 2 раза благодаря использованию флокулянта.

Таким образом, при строительстве ПХГ в соляных пластах с использованием подготовленной технической воды, будет получен рассол, удовлетворяющий требованиям рассолопотребляющим предприятием, что позволит производить товарный продукт на выходе после выпарки.

В результате проведенных экспериментов был разработан алгоритм выбора реагентов для осветления поверхностных низкоминерализованных вод в условиях низких температур с учетом особенностей цветности (наличие большого содержания фульвовых или гуминовых кислот) (Рисунок 14) по требованиям к подпиточной воде для процесса сооружения подземного газохранилищ в пластах каменной соли.

На основе проведенной серии экспериментов по подбору реагентов, работающих при низких температурах, а также наиболее оптимальных дозировок разработана технологическая схема подготовки воды для подпитки процесса размыва пласта при сооружении ПХГ (Рисунок 15). Произведен расчет стоимости предложенной технологической схемы подготовки высокоцветных вод для использования в качестве подпиточной воды для процесса размыва пласта каменной соли (Таблица 3).

Таблица 3 – Стоимость осветления 1 м<sup>3</sup> воды:

	Стоимость тепловой энергии, на 1 м <sup>3</sup> воды	Стоимость обработки 1 м <sup>3</sup> воды коагулянтами	Стоимость обработки 1 м <sup>3</sup> воды флокулянтами	Итого, на 1 м <sup>3</sup> воды
С подогревом	33,17руб.	4,2 руб.	2,5руб.	39,87руб.
Без подогрева на основе алюмината натрия	0	7 руб.	9,5руб.	16,5руб.

Экономия составит 23,37 рубля на 1 м<sup>3</sup> воды при использовании предложенной схемы реагентной обработки без подогрева.

Отличительной особенностью предложенной схемы является упрощение технологического процесса за счет обеспечения соответствия высокоцветных вод требованиям к технической воде при разработке ПХГ в отложениях солей без предварительной стадии подогрева.

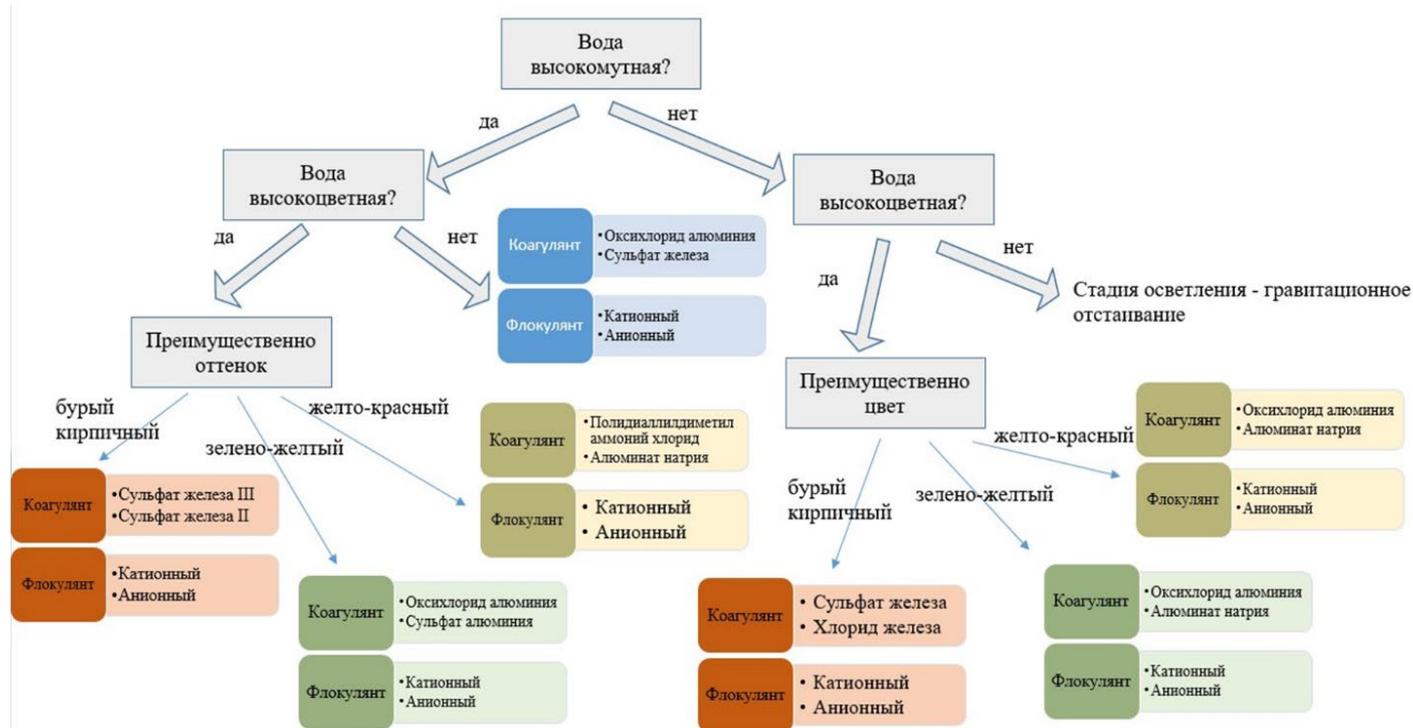


Рисунок 14– Алгоритм по подбору реагентов для осветления поверхностных низкоминерализованных вод в условиях низких температур



Рисунок 15 – Технологическая схема осветления высокоцветных вод без стадии подогрева

Как правило, в одном коридоре располагаются газопроводы и нефтепроводы.

Разработанные решения можно применять и на нефтетранспортных объектах рассматриваемых регионов. НПС относится к взрывоопасным объектам и противопожарное водоснабжение – обязательная часть этих станций. Необходима вода питьевого качества для питьевых и хозяйственно-бытовых нужд обслуживающего персонала станции. Кроме требований к химическому составу питьевая вода должна удовлетворять требованиям гигиенической безопасности в соответствии с санитарно-эпидемиологическими правилами и нормативами. Вода для технических нужд (промывки технологического оборудования, продувка, гидроиспытания) помимо требований к

ионному составу должна иметь солесодержание до 500 мг/л, низкую цветность, низкое содержание взвешенных веществ, органики (Рисунок 16).

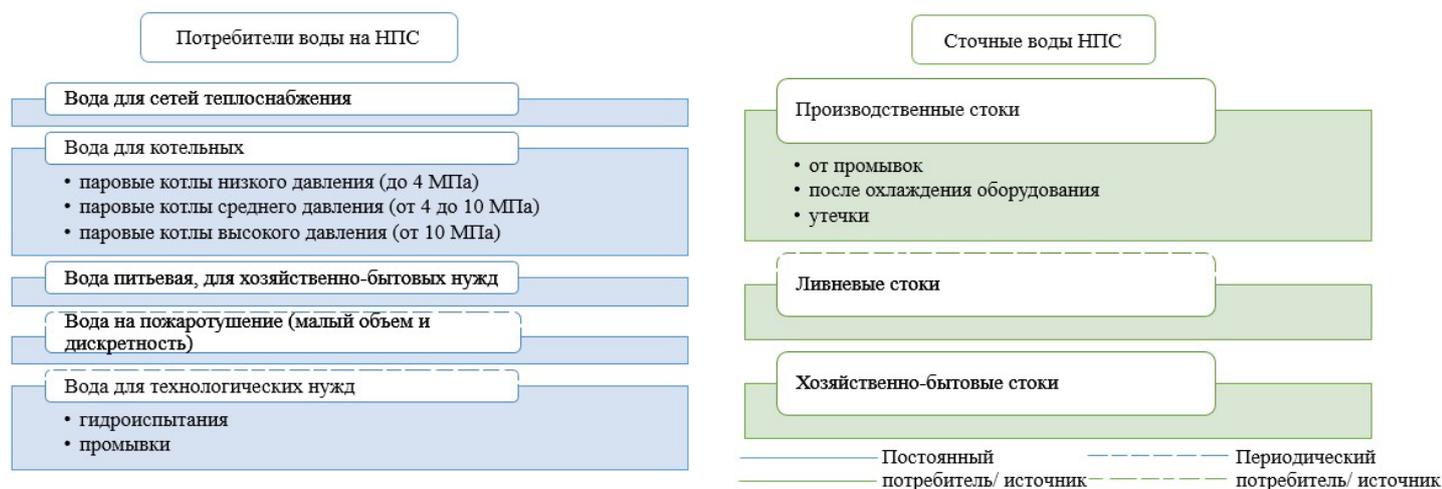


Рисунок 16 – Основные потребители воды и виды сточных вод на НПС и КС

Вспомогательные системы объектов транспорта и хранения нефти и газа являются залогом надежной и продолжительной работы основных узлов НПС и КС.

Таким образом, в 4 главе показана возможность адаптации данной методики и на других объектах транспорта и хранения нефти и газа.

При строительстве ПХГ в соляных пластах с использованием подготовленной технической воды, будет получен рассол, удовлетворяющий требованиям рассолопотребляющих предприятий, которые предусмотрены в СП 123.13330.2012 «Подземные хранилища газа, нефти и продуктов их переработки», что позволит производить товарный продукт на выходе в процессе утилизации получаемого рассола.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Проведен анализ исследований, посвященных разработке подземных хранилищ углеводородов в пластах каменной соли, физико-химическим основам подготовки технической воды и обессоливающим мембранным процессам. В результате были выявлены несовершенства существующих технологий строительства ПХГ в соляных пластах.

2. Для совершенствования технологии строительства ПХГ в отложениях каменной соли разработан замкнутый водооборотный цикл с нулевым сбросом и минимальным потреблением пресной воды, за счет опреснения рассола на установке электродиализа и возврата дилуата в цикл размыва, который составит (90-93) % от объема низкоминерализованной воды, расходуемой на каждый новый цикл растворения. Разработанная схема размыва пласта каменной соли для строительства ПХГ выгоднее классической схемы на 9133,2 рублей на 1 м<sup>3</sup> соли, в 2,16 раз.

3. Найден диапазон концентраций рассола (40-50 г/л), который позволяет обеспечить наиболее эффективную скорость размыва пласта каменной соли для разработки ПХГ.

Определено время обессоливания рассола (40 минут), выводимого на установку электродиализа в предложенном диапазоне концентраций, доказано, что оно сопоставимо с эффективным временем контакта воды и породы. Что подтверждает оптимальность создания замкнутого непрерывного водооборотного цикла размыва пласта соли для создания ПХГ. Установлена аналитическая зависимость конечной концентрации рассола от времени, позволяющая увеличить скорость растворения с учетом оптимальной степени концентрирования рассола.

4. Определены и экспериментально подобраны реагенты для эффективного осветления высокоцветных вод, используемых при строительстве газохранилищ в пластах каменной соли, без подогрева в условиях низких температур (0-5 °С). Представлен алгоритм по подбору реагентов с учетом исходного качества воды, позволяющий сократить количество реагентов, участвующих в эксперименте. Представленная схема подготовки воды позволяет экономить 0,02 Гкал тепловой энергии и не менее 20 рублей на каждый 1 м<sup>3</sup> воды. Предложены основные мероприятия по внедрению полученных технологических решений во вспомогательные системы существующих и проектируемых объектов транспорта и хранения углеводородов, позволяющие сократить перечень коагулянтов при испытаниях по подбору реагентов для осветления воды в условиях низких температур (0-5 °С).

Результаты исследований подтверждены положительным результатом при проектировании «Станции водоподготовки речной воды» для Амурского газохимического комплекса.

#### **Основные результаты работы опубликованы в следующих научных трудах:**

– в изданиях, индексируемые в Scopus и/или WebOfScience:

1. Lokshina E.A., Kolchin A.V., Mastobaev B.N. (2021). Zero-Emission Water Cycle When Developing Underground Gas Storage in Rock Salt Formation. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 22-30.
2. Lokshina E.A., Kolchin A.V., Mastobaev B.N. (2021). Process Water Production for Oil and Gas Utility Systems at High Water Color Index Conditions. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 31-41.

– в ведущих рецензируемых журналах и изданиях, утверждённых ВАК РФ:

3. Локшина Е.А., Мастобаев Б.Н. Повышение эффективности растворения солей и сокращение потребления воды при разработке газохранилищ в соляных пластах // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. – 2023. - № 5-6. – С.80-84.
4. Локшина Е.А., Борзов А.А., Локшин А.А. Очистка маломутных высокоцветных вод сибирских рек для технологического водоснабжения // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. – 2021. - № 1. – С.46-50.
5. Мастобаев Б.Н., Павлов В.Н., Валеев А.Р., Ташбулатов Р.Р., Каримов Р.М., Колчин А.В., Локшина Е.А. Об использовании системы магистральных трубопроводов для транспорта и

снабжения пресной водой. Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. – 2021. - № 5-6. – С.31-36.

6. Каримов О.Х., Новак Л., Мастобаев Б.Н., Локшина Е.А., Каримов Э.Х., Колчин А.В., Четвертнева И.А., Тептерева Г.А., Мовсумзаде Э.М. Полимерные мембранные материалы: история появления, их свойства. этапы развития мембранных технологий // Промышленное производство и использование эластомеров. – 2020. - № 2. – С. 17-24.

7. Мовсумзаде Э.М., Каримов Э.Х., Новак Л., Локшина Е.А., Лаврова О.М., Тептерева Г.А., Тивас Н.С., Колчин А.В., Рольник Л.З. Ионнообменные мембраны. перспективы применения полимерных материалов // Промышленное производство и использование эластомеров. – 2020. - № 3-4. – С. 33-38.

8. Локшина Е.А, Колчин А.В., Мастобаев Б.Н. Подготовка воды для систем транспорта и хранения нефти и газа в условиях высокоцветных вод Восточной Сибири и Дальнего Востока // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. – 2020. - № 1. – С.29-33.

9. Мастобаев Б.Н., Новак Л., Каримов О.Х., Локшина Е.А., Тептерева Г.А., Колчин А.В., Четвертнева И.А., Мовсумзаде Э.М., Каримов Э.Х. Полистирольные мембраны: от этапов становления химии полистирола до сополимеров с растительными углеводами // История и педагогика естествознания, № 3-4, 2020 – С. 49-54.

10. Локшина Е.А, Мастобаев Б.Н. Повторное использование рассолов при устройстве подземных газохранилищ в соляных пластах // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. – 2019. - № 1. – С.36-39.

11. Иванов А.И., Локшина Е.А., Локшин А.А. Получение низкоминерализованной технической воды для эксплуатации объектов подготовки и транспорта нефти // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. 2018. № 1. С. 15-18.

– в других изданиях:

12. Mastobaev B.N., Karimov R.M., Lokshina E.A., Tashbulatov R.R., Valeev A.R., Kolchin A.V. On the use of a network of trunk pipelines to compensate for the shortage of water resources at the expense of the country's deep Siberian rivers. // Liquid and Gaseous Energy Resources, 2022. - 20-30.

### **По результатам исследований получен патент на следующие РИД**

Патент № 2023118912 А Российская Федерация, МПК В65G 5/00. Способ сооружения подземных резервуаров в отложениях каменной соли: заявл. 17.07.2023 / Е.А. Локшина, А.В. Колчин, А.А. Локшин, Б.Н. Мастобаев; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет».