

На правах рукописи



Тчаро Яна Алексеевна

**Методика обоснования характеристик насосно-эжекторных систем для
нагнетания в пласт водогазовых смесей с использованием выхлопных
газов**

Специальность 2.8.4. Разработка и эксплуатация нефтяных и газовых
месторождений

АВТОРЕФЕРАТ

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва, 2024

Работа выполнена на кафедре недропользования и нефтегазового дела инженерной академии федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы» (РУДН).

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор, профессор кафедры разработки и эксплуатации нефтяных месторождений ФГБОУ ВО «РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина», профессор института экологии РУДН
Дроздов Александр Николаевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II»
Савенок Ольга Вадимовна,

кандидат технических наук, начальник Центра по научно-исследовательским, опытно-конструкторским работам и инновациям ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг»
Дарищев Виктор Иванович.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем нефти и газа Российской академии наук (ИПНГ РАН)

Защита состоится «26» декабря 2024 г. в 11⁰⁰ на заседании диссертационного совета ПДС 2022.014 при РУДН по адресу: г. Москва, ул. Орджоникидзе, д.3.

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке РУДН по адресу: 117198, ул. Миклухо-Маклая, д.6.

Электронная версия диссертации, автореферат и объявление о защите диссертации размещены на официальном сайте Высшей аттестационной комиссии при Министерстве науки и высшего образования Российской Федерации (<https://vak.minobrnauki.gov.ru>) и на сайте <https://www.rudn.ru/science/dissovet>

Автореферат разослан «_____» ноября 2024 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета ПДС 2022.014,
кандидат геолого-минералогических наук, доцент

В.М. Бугина

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Одним из перспективных методов увеличения нефтеотдачи пласта является водогазовое воздействие, осуществляемое посредством закачки водогазовой смеси. Имеется большой опыт по использованию в качестве газового компонента инертных газов (азота), попутного нефтяного газа (ПНГ) и углекислого газа, что позволяет уменьшить углеродный след. Однако, исследований по закачке выхлопных (дымовых) газов крайне мало.

Основными источниками газов горения (выхлопных, дымовых газов) являются факельное сжигание ПНГ, газотурбинные и газопоршневые установки, работающие на ПНГ или природном газе, и других видах топлива. Помимо этого, потенциальными источниками промышленных объемов выхлопных газов могут быть металлургические предприятия, цементные заводы, котельные, расположенные вблизи месторождений углеводородов.

Для снижения вредного воздействия на окружающую среду выхлопные газы или уловленные из них парниковые компоненты возможно нагнетать в выработанные пласты с целью захоронения или использования в методах воздействия на пласт.

Большой потенциал для удаления диоксида углерода CO_2 из газов горения имеет метод улавливания, использования и хранения углерода, в частности, его закачка в глубокие соленые водоносные горизонты, в истощенные нефтяные и газовые резервуары, а также в неосвоенные угольные пласты.

Однако обработка CO_2 из газов горения традиционными методами поглощения считается дорогостоящим и сложным мероприятием. Исходя из чего, в настоящее время, существует необходимость в исследовании возможности и эффективности прямого использования выхлопных (дымовых) газов для повышения нефтеотдачи, поскольку их закачка позволит не только сэкономить ресурсы, но и обеспечить экологически безопасное нефтегазовое производство, а также соответствовать концепциям экологически устойчивого развития.

В зарубежной практике применение газов горения газов в качестве агента, нагнетаемого в продуктивный пласт для повышения нефтеотдачи известно с 60-х годов на различных месторождениях США, преимущественно имеющиеся работы в данном направлении проведены зарубежными учеными и исследователями для высоковязких нефтей. Однако имеются данные о проведении исследований и реализации газовых методов воздействия с закачкой выхлопных газов на пласты с легкой нефтью в США, Иране и Канаде.

Анализ технологий водогазового воздействия показывает, что одним из перспективных способов закачки газов или жидкостно-газовых смесей является применение жидкостно-газовых эжекторов в составе насосно-эжекторных систем.

Использование выхлопных газов для создания водогазовой смеси и её применения в процессе водогазового воздействия на пласт относится к классу экологически чистых технологий, которые обеспечивают безопасные условия разработки и эксплуатации скважин с минимальными энергетическими и экономическими затратами, высокую степень сохранения чистоты воздушного бассейна в районе производства работ и в целом способствуют повышению эффективности процесса нефтегазодобычи.

Степень научной разработанности темы исследования. Возможность и эффективность применения выхлопных газов для увеличения нефтеотдачи также подтверждается работами Козлова В.Б., Грайфера В.И. и др., сведениями о выполнении научно-исследовательских работ по разработке газотурбинной установки сжигания попутного нефтяного газа для реализации водогазового воздействия на нефтяной коллектор исследователем В.А. Астапенком.

Существенный вклад в исследование процессов вытеснения нефти выхлопными газами внесли следующие отечественные ученые Вахитов Г. Г., Намиот А. Ю., Скрипка В. Г., Фаткуллин А. А., Гуревич Г. Р., Зазовский А. Ф., Сургучев М. Л., Гервиц Э.С., Амелин И.Д., Палий А.О., Таиров Д.Н., Ишханова Г.Л., Виноградов К.В., а также зарубежными учеными Koch H.A.Jr., Hutchinson S.A. и др.; в исследование работы струйных аппаратов внесли многие ученые такие как Соколов Е. Я., Зингер Н. М., Лямаев Б. Ф., Аркадов Ю. К., Мищенко И. Т., Донец К. Г., Берман Л. Д. и Ефимочкин Г. И., Кореннов Б. К., Спиридонов Е. К., Подзерко А. В., Дроздов А. Н., Сазонов Ю. А. и др., в развитии и изучение водогазового воздействия на нефтяные пласты – Иванишин В. С., Лискевич Е. И., Лысенко В. Д., Максutow Р. А., Михайлов Н. Н., Михайлов Д. Н., Островский Ю. М., Пияков Г. Н., Степанова Г. С., Фаткуллин А. А., Wilman J.T., Ohkawa Akira, Haidl J., Zhang H., Wang Z., Song X., и др.

Работы как зарубежных, так и отечественных ученых нацелены на исследование характеристик жидкостно-газовых эжекторов для водогазового воздействия на пласт с использованием в качестве пассивного потока воздуха, ПНГ, азота и др. Однако, в существующих работах ранее не исследовались характеристики жидкостно-газовых эжекторов с использованием выхлопных газов в качестве инжектируемой средой.

Цель исследования – исследование работы жидкостно-газового эжектора в составе насосно-эжекторных систем при использовании выхлопных газов в качестве инжектируемой среды для реализации водогазового воздействия на продуктивные нефтенасыщенные пласты.

Объект исследования – технология закачки водогазовой смеси с использованием насосно-эжекторных систем при инъекции выхлопных газов.

Предмет исследования – характеристики жидкостно-газовых эжекторов при использовании выхлопных газов в качестве инжектируемой среды.

Основные задачи исследования:

1. Изучение особенностей применения водогазового воздействия и выхлопных (дымовых) газов от различных источников в нефтегазодобывающей отрасли;
2. Обзор теории и особенностей работы струйных аппаратов при закачке водогазовой смеси в различных условиях;
3. Опытное исследование работы насосно-эжекторных систем при изменяющихся расходах инжектируемого газа;
4. Разработка стенда для исследования работы струйного аппарата при создании водогазовой смеси с использованием выхлопных газов;
5. Опытное исследование напорно-энергетических характеристик жидкостно-газового эжектора при инъекции выхлопных газов и изменении его проточной части;
6. Разработка технологической схемы насосно-эжекторной системы, подходящей для утилизации выхлопных газов в условиях месторождений Арктического региона и определение основных параметров работы системы.

Методы исследования. Поставленные задачи решались на основе комплексного анализа и обобщения научной литературы об использовании выхлопных газов в нефтяной отрасли, проведения теоретических и экспериментальных исследований процесса работы жидкостно-газового эжектора при инъекции выхлопных газов. Для обработки экспериментальных данных использовались методы математической статистики, методики расчета характеристик струйных аппаратов на газожидкостной смеси (ГЖС).

Теоретическая и практическая значимость исследования. Теоретическая значимость работы заключается в получении результатов и зависимостей изменения характеристик

жидкостно-газовых эжекторов, которые способствуют уточнению сведений о характеристиках струйных аппаратов и методиках их расчета, применяющихся в нефтегазовом деле в процессах освоения, добычи и реализации водогазового воздействия как метода повышения нефтеотдачи.

Практическая значимость работы заключается в разработке стенда, который может быть адаптирован под условия проведения опытно-промышленных работ для закачки водогазовых смесей при инжекции выхлопных газов от различных промышленных источников, а также разработке схем использования выхлопных газов в технологии водогазового воздействия, которые позволят сократить их выбросы от разных промышленных источников в окружающую среду за счет эффективной закачки в пласты для увеличения нефтеотдачи.

Положения, выносимые на защиту

1. Установлена возможность адаптации работы насосно-эжекторных систем к изменениям расхода откачиваемого газа за счет изменения рабочего давления и расхода жидкости через сопло, что повышает эффективность эксплуатации насосно-эжекторных систем при реализации водогазового воздействия при изменяющихся расходах, а также позволяет сократить объем выделяемых выхлопных газов в атмосферу.

2. Разработан стенд для исследования работы струйных аппаратов при инжекции выхлопных газов от реального источника – двигателя внутреннего сгорания, позволяющий расширить область применения насосно-эжекторных систем с целью повышения извлечения нефти и уменьшения экологических рисков от выбросов вредных газов в атмосферу.

3. Проведены анализ и интерпретация изменений в параметрах работы жидкостно-газового эжектора в составе насосно-эжекторной системы при работе как с выхлопными газами, так и с воздухом при атмосферном давлении в результате, которых установлено, что при инжекции выхлопных газов, в составе которых присутствуют 10,9% CO и 4,8% CO₂ максимальный коэффициент полезного действия эжектора увеличивается на 2-5%, а оптимальный коэффициент инжекции на 2-12% по сравнению с полученными при инжекции воздуха значениями.

4. Разработана технологическая схема насосно-эжекторной системы, подходящая для создания водогазовой смеси с использованием в качестве газа выхлопных газов от электрогенерирующих установок, расположенных вблизи месторождений в Арктическом регионе, включающая в себя параллельно установленные жидкостно-газовые эжекторы и дожимные мультифазные насосные установки, и работающая при высоких расходах газа.

Научная новизна результатов исследования:

1. Разработан стенд для проведения исследований, позволяющий создавать водогазовые смеси с использованием выхлопных газов от двигателей внутреннего сгорания в качестве инжектируемого потока.

2. В процессе стендовых исследований, впервые выявлен положительный эффект CO и CO₂, выраженный в получении повышенного значения максимального коэффициента полезного действия эжектора и оптимального коэффициента инжекции при использовании в качестве инжектируемой среды выхлопных газов по сравнению с воздухом.

3. Разработана технологическая схема для утилизации выхлопных газов путем создания водогазовой смеси для закачки, включающая в себя параллельно установленные жидкостно-газовые эжекторы и дожимные мультифазные насосные установки.

Соответствие паспорту специальности. Диссертация соответствует пунктам 5-7 паспорта специальности 2.8.4. Разработка и эксплуатация нефтяных и газовых месторождений.

Достоверность полученных результатов исследования подтверждается использованием

общепринятых современных методов и методик, сформулированных в трудах российских и зарубежных ученых по исследованию и расчету напорно-энергетических характеристик жидкостно-газовых эжекторов, расчету погрешностей измерений.

Апробация работы. Основные положения диссертации докладывались и обсуждались на XVIII Всероссийской конференции-конкурсе студентов и аспирантов «Актуальные проблемы недропользования» (апрель 2020 г., г. Санкт-Петербург), Международной мультидисциплинарной конференции по промышленному инжинирингу и современным технологиям «FarEastCon-2020» (октябрь 2020 г., г. Владивосток), Международной конференции «Научно-технические вопросы освоения Арктики 2020: настоящее и будущее» (ARCTIC2020) (сентябрь 2020 г., г. Санкт-Петербург/ г. Архангельск), SPE Russian: Russian and Caspian Regional Student Paper Contest 2021 (PhD Division, октябрь 2020), 12th International Youth Scientific and Practical Congress «Oil and Gas Horizons» (ноябрь 2020 г., г. Москва), XV Международной научно-практической конференции «Новые идеи в науках о Земле» (апрель 2021 г., г. Москва), XIV Всероссийской конференции-конкурсе студентов и аспирантов «Актуальные проблемы недропользования» (апрель 2021 г., г. Санкт-Петербург), Научно-технической конференции «Актуальные проблемы развития нефтегазового комплекса» (апрель 2021 г., г. Москва), Международной мультидисциплинарной конференции по промышленному инжинирингу и современным технологиям «FarEastCon-2021» (октябрь 2021 г., г. Владивосток), IV Международной научно-практической конференции «Актуальные вопросы исследования нефтегазовых пластовых систем» (сентябрь 2022 г., г. Москва), V Всероссийской молодежной научной конференции «Актуальные проблемы нефти и газа» (октябрь 2022 г., г. Москва).

Личный вклад автора заключается в выполнении основного объема теоретических, экспериментальных исследований, проведении расчетов и анализов, апробации результатов исследований, в том числе, в виде публикаций и научных докладов.

Публикации. По теме диссертационной работы опубликовано 20 работ, из которых за последние 5 лет: всего 18 публикаций, в том числе 3 публикации в журналах, индексируемых ВАК, 7 публикаций в журналах, индексируемых в международных базах цитирования (WoS, Scopus), 6 публикаций в иных научных журналах и периодических сборниках, материалах и трудах международных, всероссийских и региональных научно-технических конференций, получен 1 патент на изобретение.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, 5 глав, заключения и библиографического списка из 234 наименований, содержит 175 страниц текста, в том числе 29 таблиц, 52 рисунка.

Благодарности. Автор выражает искреннюю благодарность своему научному руководителю д.т.н., профессору Дроздову А.Н. за неоценимую помощь, ценные советы и наставления, полученные в период подготовки и выполнения диссертационной работы. Автор хотел бы выразить глубокую благодарность своим родителям, мужу и близким за их поддержку, оказанную во время написания диссертации.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность выбранной темы диссертационной работы, сформулированы цель и задача исследования, аргументирована научная новизна, достоверность и практическая значимость работы, сформированы основные положения, выносимые на защиту.

Глава 1. Анализ применения водогазового воздействия, струйных аппаратов и выхлопных газов для добычи нефти и повышения нефтеотдачи и постановка задач исследования

В главе приведен краткий обзор применения водогазового воздействия (ВГВ), рассмотрен опыт применения выхлопных (дымовых) газов в различных технологиях для извлечения нефти, анализ особенностей экспериментальных исследований жидкостно-газовых эжекторов. Проводится обобщение результатов анализа и постановка задач исследования.

Технология ВГВ зарекомендовала себя как одна из наиболее перспективных для повышения нефтеотдачи пластов, как в отечественной, так и в зарубежной практике, что объясняется сочетанием в данной технологии положительных сторон заводнения и нагнетания в пласт газа. За последние десятилетия по всему миру растет число опытно-промышленных испытаний ВГВ, среди которых были признаны неудачными немногие. Технологии ВГВ группируются по различным признакам: по способу нагнетания воды и газа, по соотношению вытесняющих агентов между собой, по типу и составу газа, по источнику газа, по месту образования водогазовой смеси, по режиму вытеснения, по выбору технологического оборудования для реализации технологии, по типу выбранного для воздействия объекта.

В рамках политики декарбонизации нефтегазового сектора актуальны методы улавливания углекислого газа из выхлопных (дымовых) газов и нагнетания в различные пласты, в том числе для повышения нефтеотдачи. Совместное нагнетание CO_2 и N_2 в виде выхлопных или дымовых газов может не только сэкономить ресурсы, но и обеспечить экологически безопасное нефтегазовое производство, помогая защитить атмосферу и соответствовать концепциям экологически устойчивого развития.

Обзор работ посвященных применению выхлопных (дымовых) газов для вытеснения нефти позволяет определить их основные преимущества: дешевизна и доступность в ряде случаев дымовых газов по сравнению с углеводородным газом и CO_2 (дымовые газы ТЭС, котельных и т.п., сжигание ПНГ); присутствие CO_2 в дымовых газах позволяет повысить эффективность вытеснения по сравнению с чистым азотом; возможность утилизации вредных газообразных отходов производства.

Промысловый опыт внедрения водогазового воздействия показывает наличие сложностей с оборудованием, используемым для нагнетания газа. Громоздкие компрессорные станции не только дорогостоящие, но и малонадежны, и требуют больших затрат труда в обслуживании. В качестве альтернативного оборудования для реализации водогазового воздействия применяют насосно-бустерные установки, а также насосно-эжекторные системы (НЭС).

Анализ исследований, посвященных изучению напорно-энергетических характеристик жидкостно-газового эжектора, показал, что эксперименты проводятся с учетом различных конструкций эжекторов и значений рабочего давления и давления в приемной камере эжектора, при использовании различных названий к одним и тем же элементам струйных аппаратов, различных исходных геометрических характеристик и различием в процессах, протекающих при работе с упругими и неупругими средами, а также, что процесс инжекции выхлопных газов от двигателя внутреннего сгорания для создания водогазовой смеси не исследовался ни в одной из существующих работ.

Глава 2. Совершенствование эксплуатации насосно-эжекторных систем при изменяющихся расходах инжектируемого газа

В главе представлены исследования возможности применения насосно-эжекторных систем при изменяющемся расходе инжектируемого газа. Описана методика проведения и результаты

исследования. Приведены зависимости изменения напорно-энергетических характеристик жидкостно-газового эжектора: давления создаваемого струйным аппаратом и коэффициента полезного действия - от подачи откачиваемого газа при различных давлениях рабочей жидкости перед соплом.

Существенное изменение расхода инжектируемого газа (более чем в 13 раз) (рисунок 1) во времени является серьёзной проблемой для эффективной эксплуатации насосно-эжекторных систем при утилизации попутного нефтяного газа, а также образующихся от сжигания ПНГ выхлопных газов.

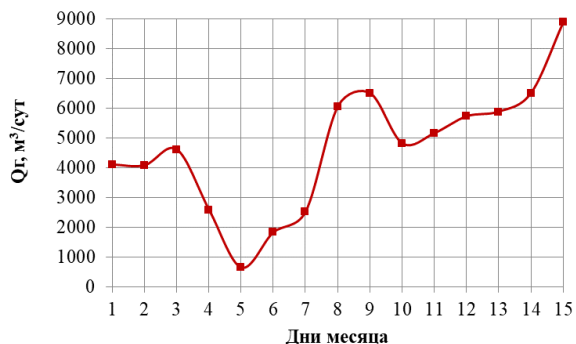


Рисунок 1 – Динамика изменения суточного расхода Q_g сжигаемого на факеле низконапорного ПНГ концевой ступени сепарации во времени

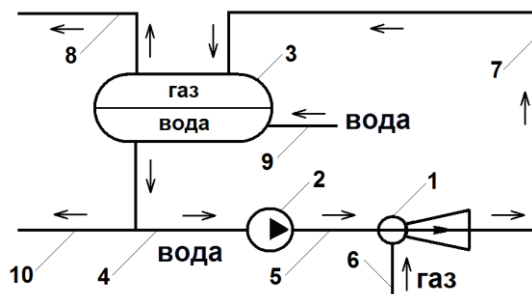


Рисунок 2 – Принципиальная схема насосно-эжекторной системы: 1 – эжектор, 2 – насос, 3 – сепаратор, 4 – всасывающая линия насоса, 5 – нагнетательная линия насоса, 6 – линия откачки низконапорного газа, 7 – линия нагнетания водогазовой смеси, 8 – линия нагнетания отсепарированного газа, 9 – линия подачи воды, 10 – линия отвода воды

Использование ПНГ для выработки электроэнергии приводит также к образованию выхлопных газов и их выпуску в атмосферу. Как правило, объем образованных выхлопных газов в 5-10 раз больше объема сжигаемого ПНГ.

Для обеспечения рациональной работы насосно-эжекторной системы (рисунок 2) при условии изменяющегося расхода инжектируемого газа необходимо проведение экспериментальных исследований характеристик жидкостно-газового эжектора.

По результатам получены напорно-энергетические характеристики исследуемого струйного аппарата при различных давлениях рабочего потока перед соплом эжектора (рисунки 3 и 4).

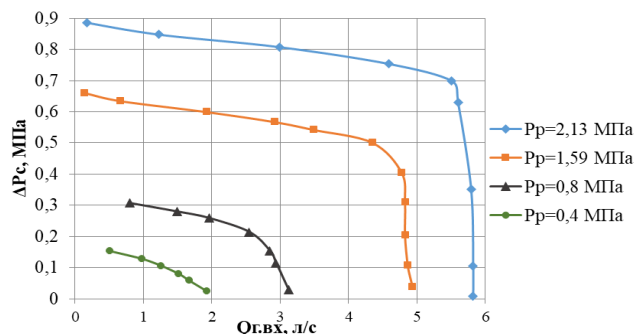


Рисунок 3 – Зависимости давления ΔP_c , создаваемого струйным аппаратом, от подачи откачиваемого газа $Q_{г.вх}$ в условиях входа в приемную камеру эжектора (напорные характеристики) при различных давлениях рабочей жидкости P_p перед соплом

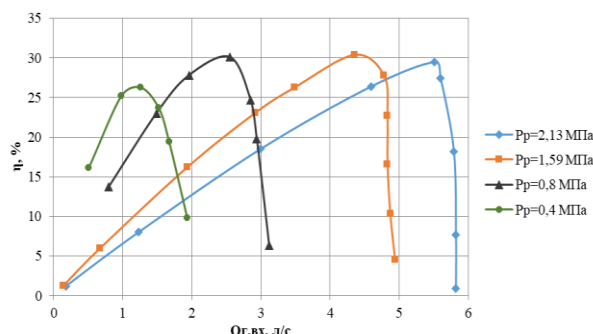


Рисунок 4 – Зависимости КПД жидкостно-газового эжектора η от подачи откачиваемого газа $Q_{г.вх}$ в условиях входа в приемную камеру эжектора (энергетические характеристики) при различных давлениях рабочей жидкости P_p перед соплом

Как показали эксперименты, с увеличением рабочего давления P_r напорные характеристики эжектора существенно меняются. Давление, развиваемое струйным аппаратом, и расход откачиваемого газа заметно увеличиваются, расширяется область работы эжектора.

В экспериментах рабочее давление P_r перед соплом повышалось от 0,4 до 2,13 МПа, т.е. примерно в 5,33 раза. При этом значения давления ΔP_c , создаваемого струйным аппаратом в режимах максимального КПД, возрастали от 0,106 до 0,699 МПа, или практически в 6,59 раз.

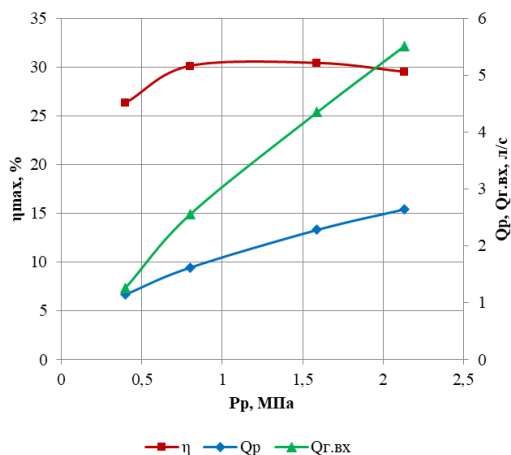


Рисунок 5 – Зависимости максимального КПД η_{max} , расхода рабочей жидкости Q_r и подачи откачиваемого газа $Q_{г.вх}$ от рабочего давления P_r перед соплом для исследуемого струйного аппарата

соплом для исследуемого струйного аппарата (рисунок 5).

Эксперименты позволили установить, что с повышением рабочего давления P_r увеличиваются как расход рабочей жидкости Q_r , так и подача откачиваемого газа $Q_{г.вх}$, при чем темп роста подачи газа существенно больше темпа роста расхода рабочей жидкости. Значения η_{max} с увеличением P_r сначала растут, а после давления P_r , составляющего 1,59 МПа, несколько уменьшаются. При этом в диапазоне P_r от 0,8 до 2,13 МПа изменения η_{max} незначительны (менее 0,9%).

Показана в экспериментах возможность успешного регулирования работы насосно-эжекторной системы за счет изменения рабочего давления перед соплом эжектора и расхода рабочей жидкости через сопло, что позволяет откачивать газ при существенно изменяющихся (в несколько раз) расходах газа, может быть наилучшим образом реализована на практике путем частотного регулирования частоты вращения вала насоса. Этот метод обеспечивает гораздо более высокую энергетическую эффективность по сравнению с регулированием потока вентилем на выходе насоса (использованного в процессе стендовых экспериментов). Станции управления с частотными преобразователями для привода насосов выпускаются серийно, поэтому их применение на практике в составе насосно-эжекторных систем не вызовет затруднений.

Вместе с тем эксперименты показали, что только одного регулирования работы системы путем изменения давления перед соплом эжектора и расхода жидкости через сопло всё же недостаточно для адаптации в тех случаях, когда расходы откачиваемого газа изменяются более чем в 4-5 раз. В самом деле, технически достаточно трудно менять (даже путем частотного регулирования) давление, развиваемое насосом системы, в 6 и более раз. Поэтому для адаптации в условиях изменения расхода эжектируемого газа более чем в 4-5 раз,

целесообразно дополнить частотное регулирование методом периодической кратковременной эксплуатации.

Глава 3. Разработка стенда и методологии проведения исследований насосно-эжекторных систем с использованием выхлопных газов

В главе описаны схема разработанного стенда-макета насосно-эжекторной системы с подключенным источником выхлопных газов - бензиновым двигателем внутреннего сгорания, методика проведения исследования по получению напорно-энергетических характеристик эжектора при инжекции выхлопных газов и методика определения вещественного состава выхлопных газов с помощью газоанализатора.

В рамках настоящего исследования была разработана схема стенда-макета для изучения работы насосно-эжекторной системы, где в качестве газа используются выхлопные газы от реального источника – бензинового двигателя внутреннего сгорания (рисунок 6).

Теплообменник входящих в составе разработанной схемы установлен для охлаждения выхлопные газы до температуры ближе к температуре рабочего потока, что также позволяет сохранить работоспособность контрольно-измерительных приборов, рабочая температура, которых как правило не превышает 50 °С.

Стендовые исследования проводились в закрытом помещении. При работе с выхлопными газами необходимо снизить негативные последствия данных парниковых газов на лаборантов и персонал, работающий вблизи. В связи с этим была реализована вытяжная система.

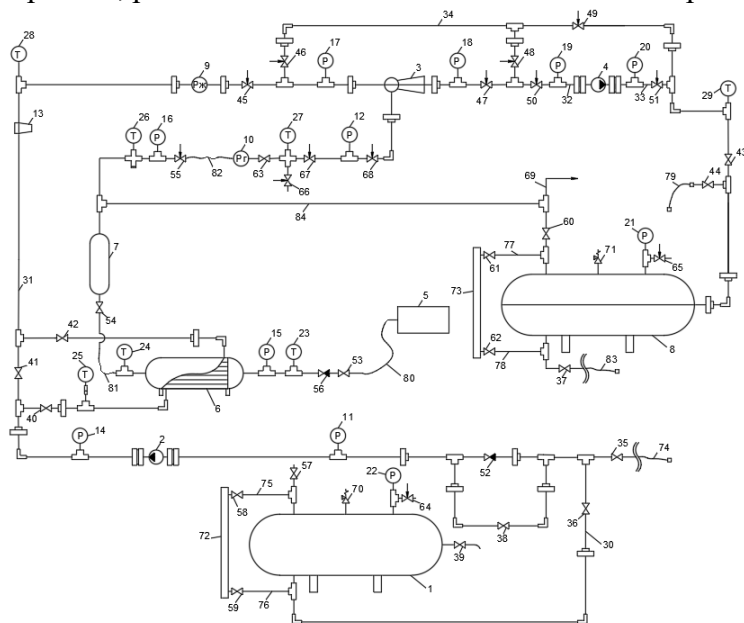


Рисунок 6 – Схема стенда насосно-эжекторной установки с подводом выхлопных газов:

- 1 – бак-резервуар для чистой воды,
- 2 – силовой насос, 3 – эжектор,
- 4 – дожимной насос, 5 – двигатель внутреннего сгорания,
- 6 – теплообменник, 7- ресивер, 8 – бак-сепаратор, 9 - расходомер жидкости, 10 – расходомер выхлопных газов, 11 и 12 – мановакуумметры, 13- фильтр 3/4", 14-22 – манометры, 23-29 – термометры, 30 – всасывающая линия силового насоса, 31 – нагнетательная линия силового насоса, 32 – всасывающая линия дожимного насоса, 33 – нагнетательная линия дожимного насоса, 34 – перепускная линия,

35-44 – краны шаровые 3/4", 45-51 – регулируемые задвижки и вентили 3/4", 52 – обратный клапан 3/4", 53-54 – краны шаровые 1", 55 – регулируемый вентиль кран 1", 56 – обратный клапан 1", 57-63 – краны шаровые 1/2", 64-68 – регулируемые задвижки и вентили 1/2", 69 – гофрированная нержавеющая стальная труба для отвода выхлопных газов в атмосферу, 70-71 – предохранительные клапаны 3/4", 72-73 – водомерное стекло бака с запорными вентилями, 74 – гибкая подводка 3/4" для слива и налива воды в бак, 75-78 – гибкие подводки 1/2" для подсоединения водомерного стекла, 79 – гибкая подводка 1/2" для отбора проб жидкости, 80-82 – стальные трубы для подвода газа, 83 – шланг для слива жидкости, 84 – перепускная линия после ресивера для отвода избытка газа в атмосферу

Экспериментальные исследования насосно-эжекторных систем в данной работе заключаются в исследовании характеристик работы жидкостно-газового эжектора при инжекции выхлопных газов от двигателя внутреннего сгорания при атмосферном давлении.

Анализ вещественного состава выхлопных газов от бензинового генератора проводился с

помощью газоанализатора Инфракар М, предназначенного для измерения объемной доли диоксида углерода (CO₂), оксида углерода (CO), кислорода (O₂), оксида азота (NO), и углеводородов (в пересчете на гексан) в отработавших газах генераторов, автомобилей с бензиновыми двигателями.

Глава 4. Результаты стендовых исследований жидкостно-газового эжектора и их анализ

В главе описаны результаты анализа вещественного состава выхлопных газов, использующихся в стендовых исследованиях, приведены напорно-энергетические характеристики эжекторов при инжекции воздуха и выхлопных газов и их сравнение, а также проанализировано влияния длины камеры смешения на напорно-энергетические характеристики эжектора при инжекции выхлопных газов для диаметров сопла 5,4 мм и 6,4 мм.

Основными токсичными компонентами выхлопных (отработанных) газов в данном исследовании являются оксиды углерода и азота, углеводороды. Состав выхлопных газов от использованного генератора составляет до 10,9% CO, 4,8% CO₂, 6,1% O₂, 0,2% CH и около 77% N₂.

Исследования по влиянию длины камеры смешения на напорно-энергетические характеристики эжектора при инжекции выхлопных газов проводились:

– при диаметре камеры смешения $d_{kc} = 5,4$ мм, величине межсоплового расстояния $l = 1,48d_{kc}$, диаметрах сопла равных 3,3 мм, 3,6 мм 3,9 мм, 4,3 мм и соотношениях диаметра камеры смешения к диаметру рабочего сопла d_{kc}/d_c составляющих 1,64; 1,5; 1,38 и 1,26 соответственно; длинах камеры смешения d_{kc} равных 90 мм, 115 мм, 140 мм и соотношениях длины камеры смешения к её диаметру L_{kc}/d_{kc} составляющих 17, 21 и 26, соответственно (рисунки 7-10 соответственно).

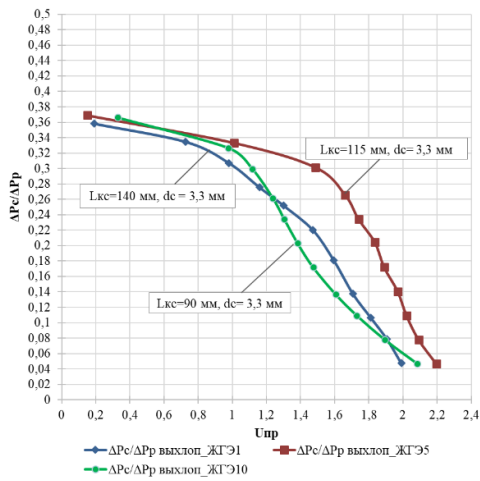
– при диаметре камеры смешения $d_{kc} = 6,4$ мм, величине межсоплового расстояния $l = 1,48d_{kc}$, диаметрах сопла равных 3,3 мм, 3,6 мм 3,9 мм, 4,3 мм и соотношениях диаметра камеры смешения к диаметру рабочего сопла d_{kc}/d_c составляющих 1,94; 1,78; 1,64; и 1,49 соответственно; длинах камеры смешения d_{kc} равных 110 мм, 135 мм, 160 и 185 мм и соотношениях длины камеры смешения к её диаметру L_{kc}/d_{kc} составляющих 17, 21, 25 и 29, соответственно (рисунки 12-14 соответственно).

Рабочее давление выбранного силового насоса при проведении исследований снижалось от 1,29 МПа до 1,12 МПа с увеличением диаметра сопла, вне зависимости от диаметра и длины камеры смешения при инжекции выхлопных газов в условиях атмосферного давления.

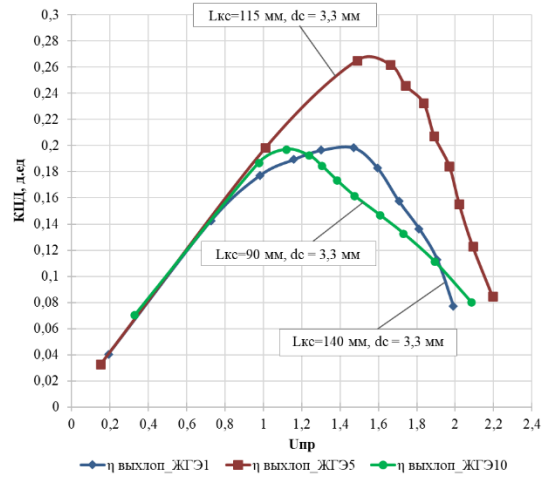
За счет установленного в стенде теплообменника достигалось снижение температуры инжектируемых выхлопных газов со 150 °С (максимальная температура, зарегистрированная за время каждого опыта) до диапазона значений температуры рабочей среды.

Исследования жидкостно-газовых эжекторов при диаметре камеры смешения $d_{kc} = 5,4$ мм.

Для анализа полученных данных и оценки влияния длины камеры смешения на значение оптимальных параметров работы жидкостно-газового эжектора были построены зависимости максимального коэффициента полезного действия KPD_{max} , оптимального коэффициента инжекции $U_{пр.опт}$, оптимального значения относительного перепада давления $(\Delta P_c/\Delta P_p)_{опт}$ представленные на рисунке 11 и полученные для разных диаметров активных сопел и камер смешения при увеличении длины камеры смешения от 90 мм до 140 мм.

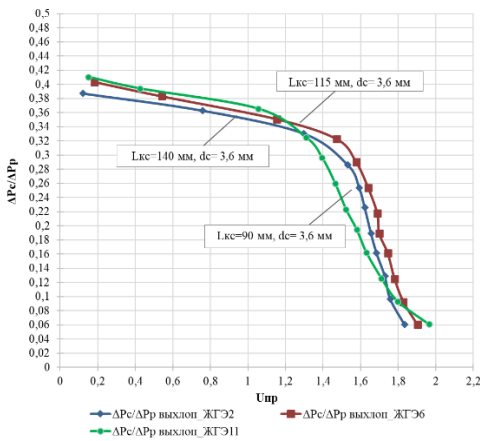


а

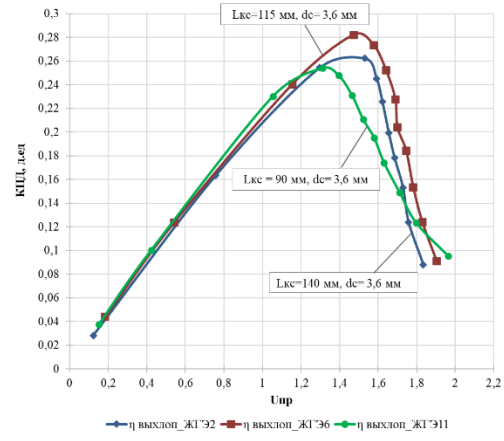


б

Рисунок 7 – Зависимости $\Delta P_c/\Delta P_p$ (а) и КПД (б) от коэффициента инжекции для эжекторов с диаметром камеры смешения $d_{кc} = 5,4$ мм и диаметром рабочего сопла $d_c = 3,3$ мм при разных значениях длин камеры смешения при инжекции выхлопных газов

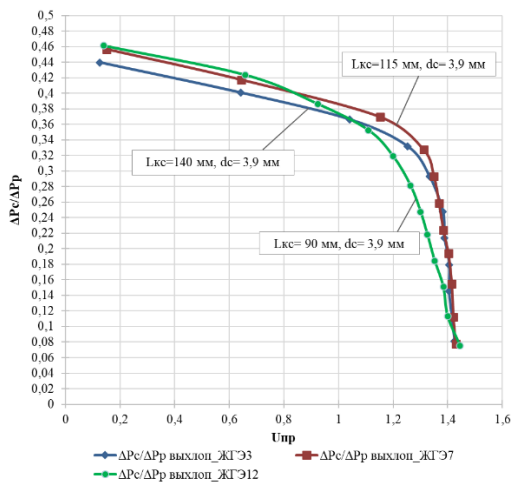


а

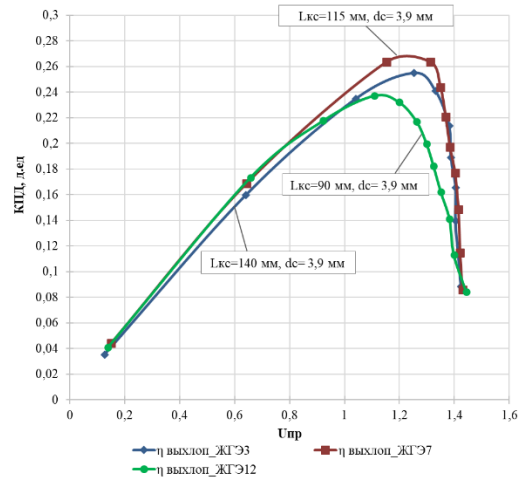


б

Рисунок 8 – Зависимости $\Delta P_c/\Delta P_p$ (а) и КПД (б) от коэффициента инжекции для эжекторов с диаметром камеры смешения $d_{кc} = 5,4$ мм и диаметром рабочего сопла $d_c = 3,6$ мм при разных значениях длин камеры смешения при инжекции выхлопных газов

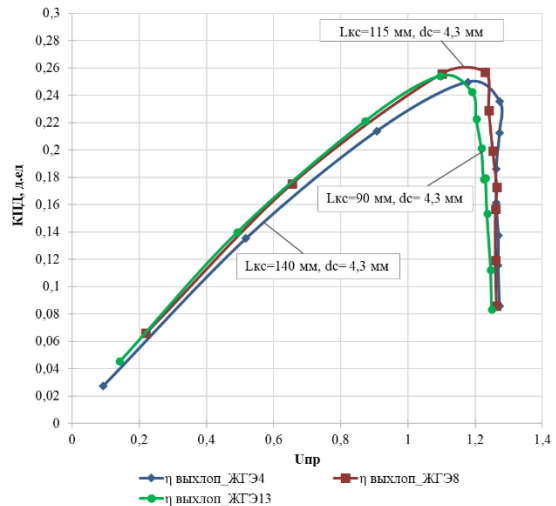
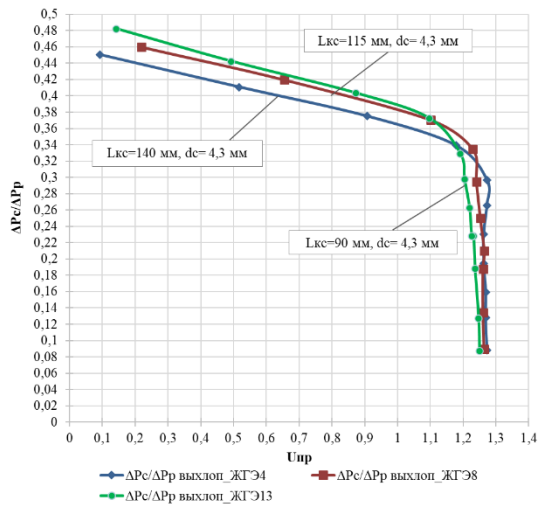


а



б

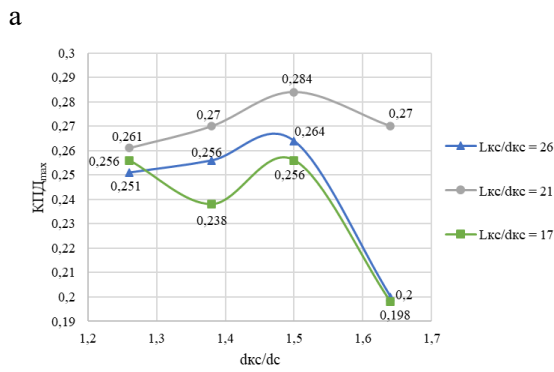
Рисунок 9 – Зависимости $\Delta P_c/\Delta P_p$ (а) и КПД (б) от коэффициента инжекции для эжекторов с диаметром камеры смешения $d_{кc} = 5,4$ мм и диаметром рабочего сопла $d_c = 3,9$ мм при разных значениях длин камеры смешения при инжекции выхлопных газов



а

б

Рисунок 10 – Зависимости $\Delta P_c/\Delta P_p$ (а) и КПД (б) от коэффициента инжекции для эжекторов с диаметром камеры смешения $d_{кc} = 5,4$ мм и диаметром рабочего сопла $d_c = 4,3$ мм при разных значениях длин камеры смешения при инжекции выхлопных газов



б

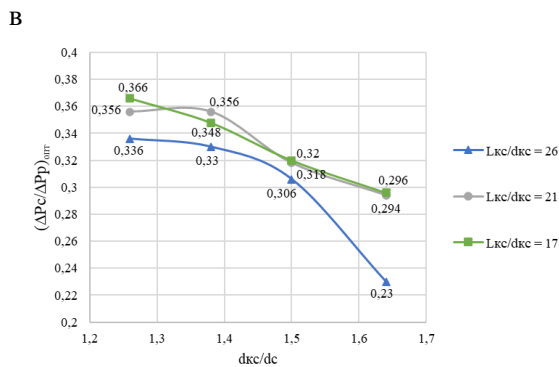
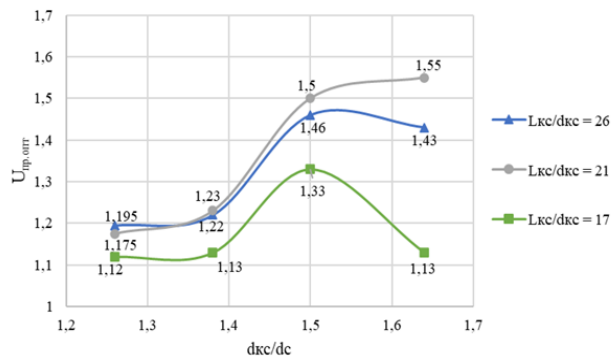


Рисунок 11 – Зависимости максимального коэффициента полезного действия $KПД_{max}$ (а), оптимального коэффициента инжекции $U_{пр,опт}$ (б), оптимального значения относительного перепада давления $(\Delta P_c/\Delta P_p)_{опт}$ (в) при исследуемых соотношениях $L_{кc}/d_{кc}$ и $d_{кc}/d_c$

Из рисунка 11 (б) можно сделать вывод о том, что изменение длины камеры смешения сильнее влияет на значения оптимальных коэффициентов инжекции $U_{пр,опт}$ эжектора с меньшими диаметрами активных сопел и соответственно наибольшими отношениями $d_{кc}/d_c$.

Оптимальный коэффициент инжекции $U_{пр,опт}$ эжекторов с диаметрами сопел 3,9 мм и 4,3 мм с увеличением длины камеры смешения увеличивается в 1,12-1,37 раза. Для эжекторов с диаметрами сопел 3,3 мм и 3,6 мм наблюдается увеличение в 1,09 раза при увеличении соотношения $L_{кc}/d_{кc}$ до 21. Дальнейшее увеличение соотношения $L_{кc}/d_{кc}$ до 26 не приводит к росту значений $U_{пр,опт}$, за исключением $L_{кc}/d_{кc} = 17$ при котором $U_{пр,опт}$ продолжает расти с увеличением длины камеры смешения.

Исходя из рисунка 11 (в) значение относительного перепада давления $(\Delta P_c/\Delta P_p)_{\text{опт}}$ уменьшается при увеличении соотношения $d_{\text{кк}}/d_c$ и соответственно уменьшении d_c . Влияние длины камеры смешения на относительный перепад давления $(\Delta P_c/\Delta P_p)_{\text{опт}}$ довольно однозначно для большинства представленных эжекторов: увеличение соотношения $L_{\text{кк}}/d_{\text{кк}}$ приводит к снижению оптимального относительного перепада давления $(\Delta P_c/\Delta P_p)_{\text{опт}}$.

Полученные значения относительного перепада давления $(\Delta P_c/\Delta P_p)_{\text{опт}}$ для $L_{\text{кк}}/d_{\text{кк}}=17$ и 21 отличаются незначительно, при этом данные значения выше, чем для $L_{\text{кк}}/d_{\text{кк}}=26$ при всех исследуемых соотношениях $d_{\text{кк}}/d_c$.

Наибольшие значения $(\Delta P_c/\Delta P_p)_{\text{опт}}$ получены для эжекторов с диаметрами сопел d_c равными 4,3 мм, т.е. при минимальном $d_{\text{кк}}/d_c=1,26$, но при этом данные эжектора имеют низкие значения КПД_{макс} и сравнительно небольшую рабочую область по коэффициенту инжекции $U_{\text{пр}}$.

Исследования жидкостно-газовых эжекторов при диаметре камеры смешения $d_{\text{кк}} = 6,4$ мм.

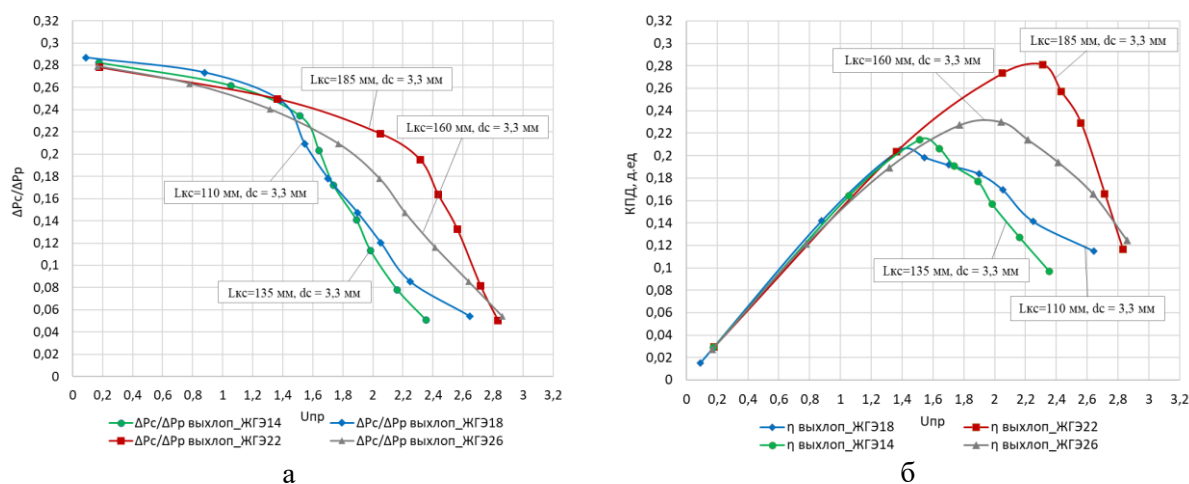


Рисунок 12 – Зависимости $\Delta P_c/\Delta P_p$ (а) и КПД (б) от коэффициента инжекции для эжекторов с диаметром камеры смешения $d_{\text{кк}} = 6,4$ мм и диаметром рабочего сопла $d_c = 3,3$ мм при разных значениях длин камеры смешения при инжекции выхлопных газов

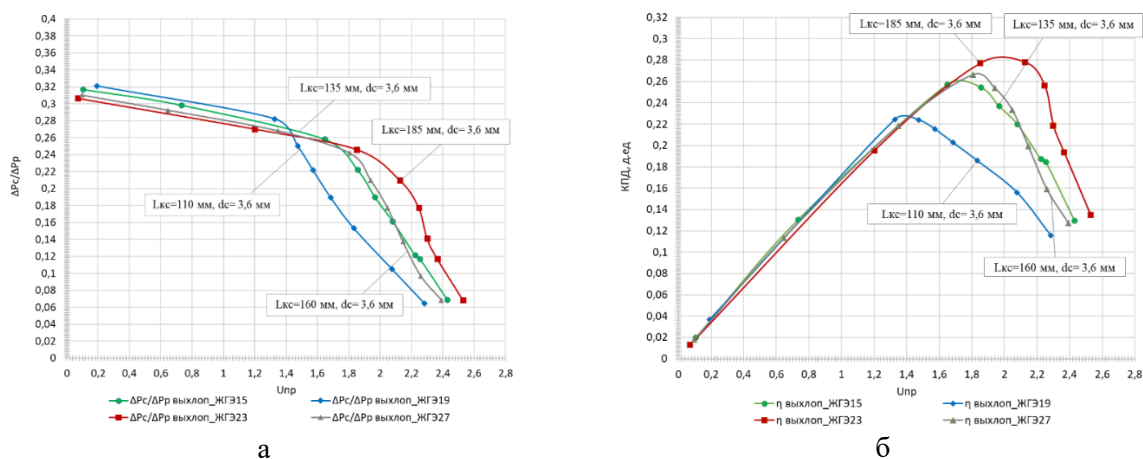
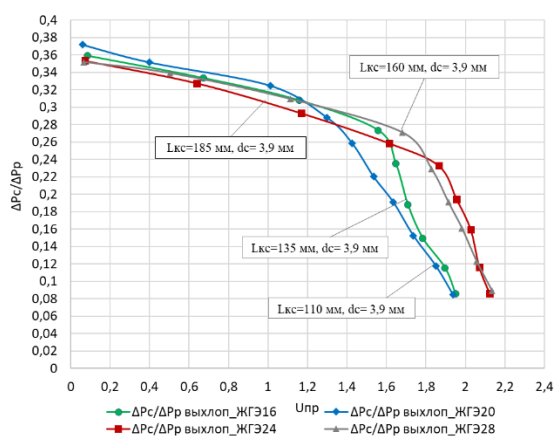
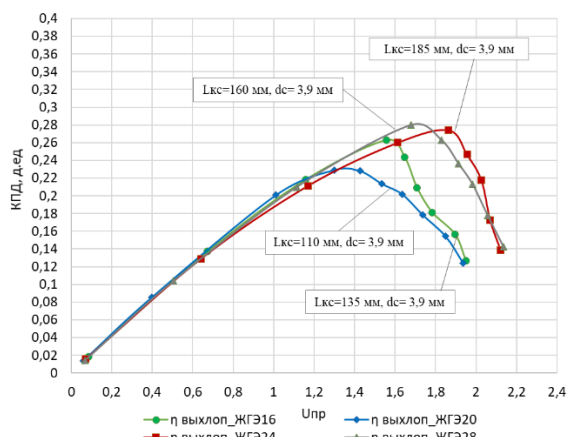


Рисунок 13 – Зависимости $\Delta P_c/\Delta P_p$ (а) и КПД (б) от коэффициента инжекции для эжекторов с диаметром камеры смешения $d_{\text{кк}} = 6,4$ мм и диаметром рабочего сопла $d_c = 3,6$ мм при разных значениях длин камеры смешения при инжекции выхлопных газов

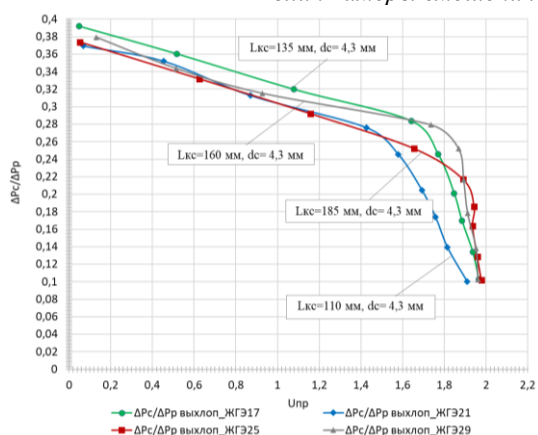


а

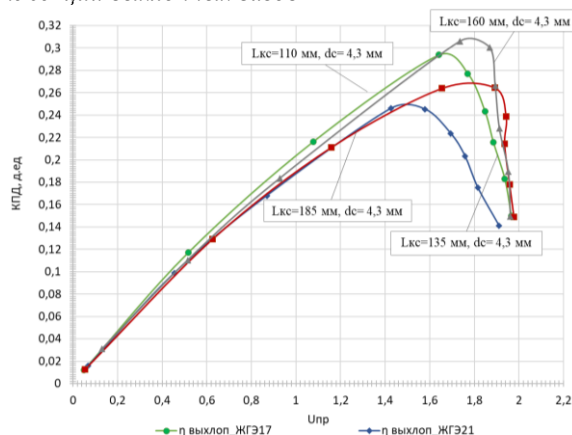


б

Рисунок 14 – Зависимости $\Delta P_c/\Delta P_p$ (а) и КПД (б) от коэффициента инжекции для эжекторов с диаметром камеры смешения $d_{кс} = 6,4$ мм и диаметром рабочего сопла $d_c = 3,9$ мм при разных значениях длин камеры смешения при инжекции выхлопных газов



а



б

Рисунок 15 – Зависимости $\Delta P_c/\Delta P_p$ (а) и КПД (б) от коэффициента инжекции для эжекторов с диаметром камеры смешения $d_{кс} = 6,4$ мм и диаметром рабочего сопла $d_c = 4,3$ мм при разных значениях длин камеры смешения при инжекции выхлопных газов

Минимальные значения $KПД_{max}$ (20,8-23,2%) получены при $d_{кс}/d_c = 1,94$ для значений соотношений $L_{кc}/d_{кс} = 17, 21$ и 25 , а также при $d_{кс}/d_c = 1,49$ для значения соотношения $L_{кc}/d_{кс} = 17$. (рисунок 16 (а)).

Согласно рисунку 16 (б), для эжекторов с длинами камеры смешения $29d_{кс}$ с уменьшением диаметра сопла и соответственно с увеличением соотношения $d_{кс}/d_c$ диапазон значений коэффициентов инжекции, который соответствует рабочей области эжектора, увеличивается, что видно из максимальных значений $U_{пр}$.

Зависимости оптимальных значений коэффициентов инжекции $U_{пр,опт}$, соответствующих режимам с максимальными значениями КПД, представленные на рисунке 16 (б), демонстрируют снижение коэффициента инжекции при увеличении соотношения $d_{кс}/d_c$ до $1,64$ для всех длин камер смешения. При $d_{кс}/d_c$ от $1,64$ до $1,94$ наблюдается увеличение $U_{пр,опт}$ при $L_{кc}/d_{кс} = 17$ и 25 . При $L_{кc}/d_{кс} = 21$ в интервале соотношений $d_{кс}/d_c$ от $1,64$ до $1,78$ отмечаем увеличение $U_{пр,опт}$, но в интервале от $1,78$ до $1,94$ $U_{пр,опт}$ снизилось до значения ниже остальных.

С увеличением d_c с $3,3$ до $4,3$ мм для каждого исследуемого эжектора наблюдается увеличением $U_{пр,опт}$: с $1,5$ до $1,78$ при $d_{кс}/d_c$ $1,49$, с $1,36$ до $1,84$ при $d_{кс}/d_c$ $1,64$, с $1,38$ до $1,98$ при $d_{кс}/d_c$ $1,78$ и с $1,45$ до $2,26$ при $d_{кс}/d_c$ $1,94$.

$KПД_{max}$ незначительно меняется вне зависимости от диаметров сопла при $L_{кc}/d_{кс} = 29$ калибров диаметра, а при $d_{кс}/d_c = 1,94$ обеспечивает самый высокий во всем исследовании

оптимальный коэффициент инжекции.

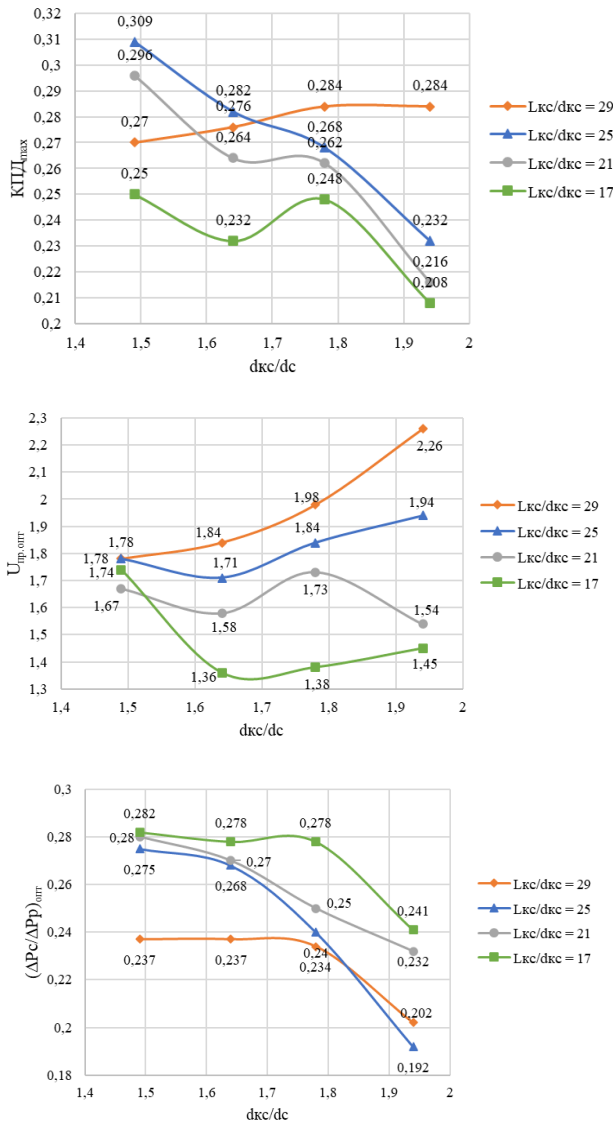


Рисунок 16 – Зависимости максимального коэффициента полезного действия КПД_{max} (а), оптимального коэффициента инжекции U_{пр.опт} (б), оптимального значения относительного перепада давления (ΔP_c/ΔP_p)_{опт} (в) при исследуемых соотношениях L_{кc}/d_{кc} и d_{кc}/d_c

значения КПД_{max} и сравнительно небольшую рабочую область по коэффициенту инжекции U_{пр}.

Так, при диаметре камеры смешения d_{кc} = 6,4 мм, величине межсоплового расстояния l = 1,48d_{кc} при увеличении соотношения диаметра камеры смешения к диаметру сопла происходит снижение оптимального значения относительного перепада давления.

Увеличение длины камеры смешения приводит к снижению значения оптимального относительного перепада давления.

Для уточнения влияния инжекции выхлопных газов на напорно-энергетические характеристики были проведены экспериментальные исследования для всех приведенных проточных частей эжекторов при инжекции воздуха при P_{пр} равном атмосферному давлению.

Анализ полученных результатов показывает, что при инжекции воздуха коэффициент инжекции U_{пр} изменяется в диапазоне от 0,119-1,939, а при инжекции выхлопных газов диапазон значений коэффициента инжекции U_{пр} равен 0,053-1,977.

Из рисунка 16 (б) по расхождению величин U_{пр.опт}, что изменение длины камеры смешения сильнее влияет на значения оптимальных коэффициентов инжекции U_{пр.опт} эжекторов с меньшими диаметрами активных сопел и соответственно наибольшими отношениями d_{кc}/d_c.

Исходя из рисунка 16 (в) значение относительного перепада давления (ΔP_c/ΔP_p)_{опт} уменьшается при увеличении соотношения d_{кc}/d_c и соответственно уменьшении d_c. Влияние длины камеры смешения на относительный перепад давления (ΔP_c/ΔP_p)_{опт} довольно однозначно для большинства представленных эжекторов: увеличение соотношения L_{кc}/d_{кc} приводит к снижению оптимального относительного перепада давления (ΔP_c/ΔP_p)_{опт}. Тем не менее в интервале d_{кc}/d_c = 1,84-1,94 относительный перепад давления (ΔP_c/ΔP_p)_{опт} для эжектора с L_{кc}/d_{кc} = 29 меньше (ΔP_c/ΔP_p)_{опт} с L_{кc}/d_{кc} = 25 при d_{кc}/d_c = 1,94.

Наибольшие значения по соотношением U_{пр.опт} и (ΔP_c/ΔP_p)_{опт} получены для эжекторов с диаметрами сопел d_c равными 3,6 мм и 3,9 мм, т.е. при d_{кc}/d_c = 1,64 и 1,74, но при этом данные эжектора имеют низкие

Изменение зависимости коэффициента полезного действия от коэффициента инжекции $\eta=f(U_{пр})$ при инжекции выхлопных газов наблюдается в диапазоне значений коэффициента инжекции $U_{пр}$ равного 1,0-1,94. Изменение зависимости относительного перепада давления от коэффициента инжекции $\Delta P/\Delta P_p = f(U_{пр})$ при инжекции выхлопных газов наблюдается в диапазоне значений коэффициента инжекции $U_{пр}$ равного 0,7-1,94.

Видно, что при атмосферном давлении кривые, полученные при инжекции выхлопных газов, лежат выше, чем при откачке воздуха. Кроме того, максимальные коэффициенты инжекции при откачке выхлопные газы выше по сравнению с воздухом при прочих равных условиях температуры и давления.

При сравнении результатов, полученных при инжекции воздуха, было установлено, что наличие в выхлопных газах 10,9% CO и 4,8% CO₂, способствовало увеличению КПД_{max} эжектора на 2-5%, а $U_{пр.опт}$ на 2-12%.

Исходя из того, что в воздух состоит преимущественно из азота и кислорода, можно прийти к выводу, что эффективность работы эжектора при инжекции выхлопных газов обусловлена наличием большего значения оксида и диоксида углерода, которые способствуют увеличению энергообмена между компонентами водогазовой смеси в эжекторе. При этом реакция растворения CO₂ в воде оказывает большее влияние на энергообмен.

Глава 5. Технологические решения для применения водогазового воздействия с использованием выхлопных газов на месторождениях Арктического региона

В главе приведены возможные источники выхлопных (дымовых) газов для Арктической климатической зоны. Разработана технологическая схема, подходящая для утилизации выхлопных газов в методах поддержания пластового давления и повышения нефтеотдачи путем закачки при помощи насосно-эжекторной системы водогазовой смеси в нагнетательные скважины месторождения и проведен расчет параметров данной системы при высоком расходе выхлопных газов на примере участка N Ванкорского месторождения, находящегося в Арктическом регионе, а также результаты расчета параметров насосно-эжекторных систем для низкого расхода выхлопных газов от установки с газовой турбиной «Таурус-603-7001».

Промышленная технологическая схема, разработанная для участка N Ванкорского месторождения, позволяющая создавать водогазовую смесь с выхлопными газами при высоком их расходе, представлена на рисунке 17.

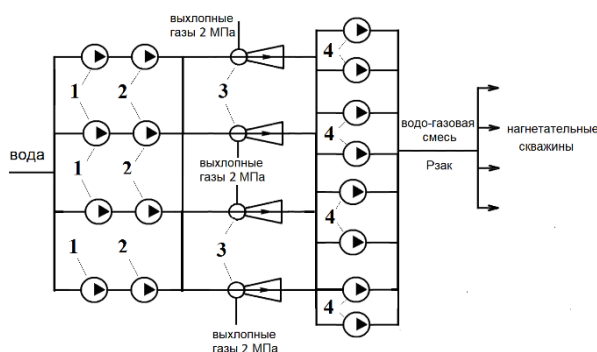


Рисунок 17 – Принципиальная технологическая схема насосно-эжекторной системы для утилизации выхлопных газов:
 1 – первичные силовые насосы,
 2 – промежуточные силовые насосы,
 3 – струйные аппараты (эжектор),
 4 – мультифазные дожимные насосы

По данной технологической схеме собранные от электрогенерирующих установок выхлопные газы после увеличения давления на компрессоре до значения не менее 2 МПа по трубам, изготовленным из коррозионностойкой стали групп высокой прочности, поступают в приемные камеры четырех параллельно установленных эжекторов 3. Система из первичных 1 и промежуточных 2 силовых насосов нагнетает воду в сопло струйных аппаратов 3.

Вода после смешения с газом в эжекторе 3 поступает на прием мультифазных насосов 4,

которые в свою очередь являются основными силовыми элементами для нагнетания воды в скважины с необходимым давлением закачки.

Для уменьшения влияния низких температур на процесс закачки водогазовой смеси рекомендуется применять ингибиторы комплексного действия для решения проблем коррозии и гидратообразования, которые будут добавляться на этапе создания водогазовой смеси.

По результатам расчета определены геометрические размеры проточных частей и рабочих элементов жидкостно-газовых эжекторов (по адаптированной методики К.Г. Донца), а также рассчитано давление, которое должна обеспечивать насосно-эжекторная система.

Необходимое давление нагнетания на выходе из насосно-эжекторных систем (давления на кустовой насосной станции при закачке водогазовой смеси) составляет $P_{\text{КНС}}^{\text{ВГС}} = 20,6$ МПа при значении газо-водяного фактора $41,33 \text{ м}^3/\text{м}^3$. Оптимальной для представленных условий работы аэродинамической схемой жидкостно-газового эжектора является схема №3, параметры проточной части эжекторов следующие: диаметр отверстия сопла $d_0 = d_c = 5,56$ мм, диаметр камеры смешения $d_{\text{рк}} = d_{\text{кс}} = 37,5$ мм, соотношение $(d_{\text{кс}}/d_c) = 6,75$, расстояние от сопла до камеры смешения $l = l_{\text{соп0}} = 150$ мм, длина камеры смешения $L_{\text{кс}} = 1162,57$ мм, угол раскрытия диффузора эжектора 7° , расстояние до второго ряда отверстий в сопле $D_1 = 25$ мм, длина прямого участка $a = 3,71$ мм и входной диаметр $D_0 = 11,25$ мм консоидального сопла, длина диффузорного участка $l_{\text{диф}} = 50,1$ мм. Ожидаемое давление на выходе эжекторов составит $P_{\text{см}} = 5,64$ МПа.

Газосодержание водогазовой смеси на входе в дожимные насосы равно $\beta_{\text{вх}} = 42,3\%$. Осуществить задачу нагнетания водогазовой смеси с высокой концентрацией газа ($\beta_{\text{вх}} > 25\%$) типичным центробежным насосом не удастся, требуется применение мультифазных насосов (МФН), показывающих лучшую эффективность при высоких значениях газосодержания на входе в насос.

С учетом расхода водогазовой смеси выбраны МФН установки У1НВ2-240.2Т.3.04.1700 компании ООО «ВНИИБТ-БУРОВОЙ ИНСТРУМЕНТ», изготовление которых возможно с давлением на выходе до 15 МПа.

Для электрогенерирующих установок меньшей мощности, например, для установки с газовой турбиной «Таурус-603-7001» с номинальной мощностью 5,2 кВт суточный расход выхлопных газов составляет около 78,4 тыс. $\text{м}^3/\text{сут}$.

Приняв начальное давление выхлопных газов равным 0,4 МПа, расход воды $5625 \text{ м}^3/\text{сут}$, плотностью выхлопных газов $0,982 \text{ кг}/\text{м}^3$ был произведен расчет параметров насосно-эжекторной системы и определены характеристики проточных частей эжекторов.

Для газо-водяного фактора при данном расходе выхлопных газов $43,56 \text{ м}^3/\text{м}^3$ необходимое давление нагнетания на выходе из насосно-эжекторной системы составляет 17,9 МПа.

Для электрогенерирующих установок меньшей мощности возможна закачка выхлопных газов в составе водогазовой смеси с помощью, представленной на рисунке 18.

Данная схема работает следующим образом. Вода под давлением от кустовой насосной станции (КНС) поступает в сопло эжектора первой ступени сжатия 1, который откачивает часть выхлопных газов низкого давления. Водогазовая смесь с повышенным давлением направляется в водогазовый сепаратор 3, где происходит её разделение.

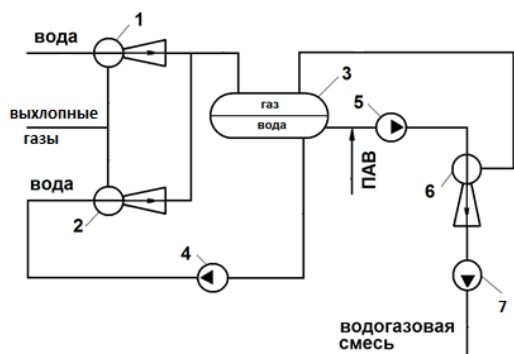


Рисунок 18 – Принципиальная технологическая схема насосно-эжекторной системы для утилизации выхлопных газов (для низкого расхода):

1, 2 – эжекторы первой ступени сжатия, 3 – водогазовый сепаратор, 4 – насос для привода эжектора 2, 5 – насос второй ступени сжатия системы,

6 – эжектор второй ступени сжатия, 7 – многоступенчатый центробежный насос

Далее часть воды из сепаратора 3 идет на прием насоса 4, приводящего в действие второй эжектор 2 первой ступени сжатия, откачивающий остальной выхлопной газ низкого давления. После эжектора 2 водогазовая смесь направляется в водогазовый сепаратор 3. Два эжектора в первой ступени сжатия необходимы для того, чтобы обеспечить откачку газа при большом значении расхода.

Другая часть воды из сепаратора 3 поступает на вход насоса 5. Насос 5 нагнетает воду, в которую при необходимости подается пенообразующий ПАВ для поддержания стабильности мелкодисперсной водогазовой смеси, в сопло эжектора 6 второй ступени сжатия. Эжектор 6 откачивает выхлопной газ из водогазового сепаратора 3 и подает водогазовую смесь на прием насоса 7 третьей ступени системы. Насос 7 дожимает смесь до необходимого давления нагнетания и далее нагнетает смесь по водоводу на водораспределительный пункт и в нагнетательные скважины.

Краткая характеристика многоступенчатых электроцентробежных насосов и эжекторов приведена в таблице 1 и 2, соответственно.

Таблица 1 – Характеристика многоступенчатых электроцентробежных насосов

№ насоса	Типоразмер насоса	Давление на входе	Давление на выходе	Развиваемое давление	Напор, м	Число ступеней, шт	Мощность
		$P_{вх}$, МПа	$P_{вых}$, МПа	P_n , МПа			Нн.в, кВт
9	ЭЦН8-2500Э	2,52	11	8,48	764	59	326,2
12	ЭЦН8-1600Э	2,52	10,52	8	735	48	194,2
15	ЭЦН8-2000Э	5,48	17,9	12,42	1525	110	377,5

Таблица 2 – Характеристика жидкостно-газовых эжекторов

№ эжектора	Коэффициент инжекции	Относительный безразмерный перепад давления	Оптимальное соотношение диаметров	Диаметр сопла	Диаметр камеры смешения	Расстояние от сопла до входа в камеру смешения	Оптимальная длина камеры смешения
	$U_{г.пр}$	$\Delta P_c / \Delta P_p$	$d_{кc} / d_c$	d_c , мм	$d_{кc}$, мм	l , мм	$L_{кc. опт}$, мм
3	4,56	0,2	2,3	17,67	40,64	60,96	1580
4	4,56	0,2	2,3	20,83	47,9	71,85	1862
14	1,73	0,37	1,54	18,96	29,2	43,8	637

Количество насосно-эжекторных систем на месторождении регулируется в зависимости от необходимого объема газа для закачки и условий системы поддержания пластового давления конкретного участка месторождения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации проведено исследование возможности закачки водогазовой смеси с использованием выхлопных газов в качестве инжектируемой среды при помощи насосно-эжекторных систем.

Применение попутного нефтяного газа для генерации энергии на газопоршневых, газотурбинных установках, а также работа дизельных и бензиновых установок, сопровождается выделением большого количества выхлопных газов.

1. Рассмотрены ряд проектов, доказывающих целесообразность закачки выхлопных (дымовых) газов в пласт от различных объектов (заводов, газопоршневых электрогенерирующих, котельных установок, бензиновых двигателей и др.), расположенных вблизи месторождений для увеличения извлечения из продуктивных пластов как легкой маловязкой, так и тяжелой высоковязкой нефти.

2. Проведены исследования характеристик жидкостно-газового эжектора при изменяющемся расходе газа и установлена возможность адаптации работы насосно-эжекторных систем к изменениям расхода откачиваемого газа за счет изменения рабочего давления и расхода жидкости через сопло. При изменении расхода инжектируемого газа более чем в 4-5 раз для успешного изменения работы насосно-эжекторной системы предлагается частотное регулирование вращения вала насоса, которое также может быть дополнено методом периодической кратковременной эксплуатации.

3. Разработана схема стенда насосно-эжекторных систем для нагнетания водогазовых смесей с использованием выхлопных газов от реального источника – двигателя внутреннего сгорания, что позволяет провести исследования характеристик жидкостно-газовых эжекторов при инжектировании выхлопных газов. Установленный теплообменник в разработанной схеме стенда применяется для охлаждения выхлопных газов до температуры близкой к температуре рабочего потока, что также позволяет сохранить работоспособность контрольно-измерительных приборов, рабочая температура, которых как правило не превышает 50 °С. Для снижения негативных последствий парниковых газов на персонал, работающий в закрытом лабораторном помещении, реализована вытяжная система, предназначенная для отвода выхлопных газов, выделяющихся в результате сгорания, происходящего внутри двигателя.

4. Проведены исследования по влиянию длины камеры смешения на напорно-энергетические характеристики эжектора при инъекции выхлопных газов. Установлено, что характеристики эжекторов зависят как от диаметра сопла, так и от длины камеры смешения и существует длина камеры смешения, при которой происходит снижение напорно-энергетических характеристик жидкостно-газового эжектора.

5. Проведены исследования по сравнению характеристик жидкостно-газовых эжекторов при инъекции воздуха и выхлопных газов при атмосферном давлении. Установлено, что при одинаковых условиях работы характеристики эжекторов (относительный перепад давления, КПД и коэффициенты инъекции) наилучшие при закачке выхлопных газов по сравнению с воздухом.

6. Установлено при сравнении результатов, полученных при инъекции воздуха, что наличие в выхлопных газах 10,9% CO, 4,8% CO₂, способствовало увеличению значения максимального коэффициента полезного действия КПД_{max} жидкостно-газового эжектора на 2-5%, а значению оптимального коэффициента инъекции $U_{пр.опт}$ – на 2-12%.

7. Проведен расчет требуемого давления нагнетания водогазовой смеси, а также параметров работы жидкостно-газовых эжекторов и дожимных насосных установок при высоком расходе выхлопных газов для условий участка N Ванкорского месторождения, находящегося в Арктическом регионе, а также расчет требуемого давления нагнетания и параметров насосно-эжекторных систем для низкого расхода выхлопных газов.

8. Разработана промышленная технологическая схема насосно-эжекторной системы для создания водогазовой смеси с использованием в качестве газа выхлопных газов от электрогенерирующей установки при их высоком расходе под условия участка N Ванкорского месторождения, расположенного в Арктическом регионе, а также предложена технологическая схема насосно-эжекторной системы для создания водогазовой смеси с использованием в качестве газа выхлопных газов от электрогенерирующей установки при их низком расходе.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

Научные статьи в изданиях, индексируемых в МЦБ (Scopus, Web of Science):

1. Тчаро (Горбылева) Я.А. Совершенствование эксплуатации насосно-эжекторных систем при изменяющихся расходах попутного нефтяного газа / А. Н. Дроздов, Я. А. Горбылева // Записки Горного института, 2019. Т.238. – С.415-422. DOI:10.31897/PMI.2019.4.415

2. Tcharo (Gorbyleva) Y.A. Application of pump-ejecting system for SWAG injection and utilization of associated gas / A. N. Drozdov, E. I. Gorelkina, Y. A. Gorbyleva, I. M. Narozhnyy // Journal of Physics: Conference Series, Moscow, 14–16 октября 2020 года. – Moscow, 2020. – P. 012040. – DOI 10.1088/1742-6596/1687/1/012040.

3. Tcharo (Gorbyleva) Y.A. Investigation of pump-ejector systems characteristics for water alternating gas injection/ A. N. Drozdov, S. D. Karabaev, N. P. Olmaskhanov, Y. A. Gorbyleva, I. M. Narozhnyy, E. I. Gorelkina // Advances in Raw Material Industries for Sustainable Development Goals. 2021. pp. 358-367.

4. Tcharo (Gorbyleva) Y.A. Perspectives of application of simultaneous water and gas injection for utilizing associated petroleum gas and enhancing oil recovery in the Arctic fields / A. Drozdov, Y. Gorbyleva, E. Gorelkina, N. Drozdov // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Arkhangelsk, Virtual, September 10-11, 2020. – Arkhangelsk, Virtual, 2021. – P. 012039. – DOI 10.1088/1755-1315/678/1/012039.

5. Тчаро (Горбылева) Я.А. Применение технологии водогазового воздействия для утилизации выхлопных газов и снижения выбросов CO₂ / Я. А. Горбылева, Х. Тчаро // Научные труды НИПИ Нефтегаз ГНКАР, 2022. № S2. – С. 28-36. – DOI 10.5510/OGP2022SI200739.

6. Tcharo (Gorbyleva) Y.A. Calculation of the Pump-Ejecting Systems Characteristics for SWAG Injection Using Flue Gas / Y. A. Gorbyleva, A. N. Drozdov // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Virtual, Online, January 10-12, 2022. – Virtual, Online, 2022. – P. 032086. – DOI 10.1088/1755-1315/988/3/032086.

7. Tcharo (Gorbyleva) Y.A. Flue Gas-Simultaneous Water and Gas (Flue Gas-SWAG) Injection for Enhancing Oil Recovery / Y. A. Gorbyleva // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Virtual, Online, January 10-12, 2022. – Virtual, Online, 2022. – P. 032072. – DOI 10.1088/1755-1315/988/3/032072.

8. Тчаро (Горбылева) Я.А. Экспериментальные исследования влияния длины камеры смешения на характеристику жидкостно-газового эжектора при инжекции выхлопных газов для

реализации водогазового воздействия на пласт / Я. А. Горбылева, Х. Тчаро // Научные труды НИПИ Нефтегаз ГНКАР, 2023. № 3. – С. 144-155. – DOI 10.5510/OGP20230300896

Научные статьи в изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

9. Тчаро (Горбылева) Я.А. Влияние минерализации рабочей жидкости на характеристики жидкостно-газовых эжекторов / А.Н. Дроздов, Н. А. Дроздов, Я. А. Горбылева, Е. И. Горелкина // Бурение и нефть, 2019. № 7-8. – С. 42-45.

10. Тчаро (Горбылева) Я.А. О возможности применения насосно-эжекторной системы для водогазового воздействия на пласт с использованием азота / А. Н. Дроздов, В. Н. Калинин, К. Е. Соловьева, Е. И. Горелкина, Я. А. Горбылева // Нефтяная провинция, 2020. № 3(23). – С. 153-163. – DOI 10.25689/NP.2020.3.153-163.

11. Тчаро (Горбылева) Я.А. О технологиях закачки выхлопных (дымовых) газов для извлечения нефти / Я. А. Горбылева // Вестник евразийской науки, 2021. Т. 13. № 4.

12. Тчаро (Горбылева) Я.А. Технология водогазового воздействия с использованием выхлопных газов от электрогенерирующих установок на месторождениях Арктики / Я. А. Горбылева // Деловой журнал Neftgaz.RU, 2022. № 1(121). – С. 94-97.

Патенты на изобретение:

13. Патент № 2784588 С1 Российская Федерация, МПК F04F 5/54, F04B 51/00. Стенд для исследования характеристик насосно-эжекторных систем с использованием выхлопных газов/ **Я.А. Тчаро (Горбылева):** № 2022103229: заявл. 09.02.2022 : опубл. 28.11.2022; Бюл. № 34.

Монографии:

14. Тчаро (Горбылева) Я.А. Применение струйных аппаратов в нефтепромысловом деле / А. Н. Дроздов, Н. А. Дроздов, Я. А. Горбылева, Е. И. Горелкина. – Москва : Спутник+, 2020. – 391 с.

Другие:

15. Тчаро (Горбылева) Я.А. Повышение эффективности работы жидкостно-газового эжектора / А. Н. Дроздов, Я. А. Горбылева, Е. И. Горелкина, Н. А. Дроздов // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. – 2019. – Т. 20. – № 3. – С. 254-260. – DOI 10.22363/2312-8143-2019-20-3-254-260.

16. Тчаро (Горбылева) Я.А. Использование выхлопных газов двигателей электрогенерирующих установок при нагнетании водогазовых смесей // Материалы XVIII всероссийской конференции-конкурса студентов и аспирантов. Санкт-Петербург, 15-17 апреля 2020 года. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский горный университет, 2020. – С. 51. ISBN 978-5-94211-906-5

17. Tcharo (Gorbyleva) Ya. The use of exhaust gases for the injection of water-gas mixtures / Ya. Gorbyleva // Oil and Gas Horizons : Abstract Book of the XIII International Youth Scientific and Practical Congress, Москва, 16–19 ноября 2021 года / Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина. – Москва: Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина, 2021. – Р. 46-47.

18. Тчаро (Горбылева) Я.А. Перспективы использования выхлопных газов для увеличения нефтеотдачи и снижения углеродного следа / Я. А. Горбылева // Новые идеи в науках о Земле : Материалы XV Международной научно-практической конференции. В 7-ми томах, Москва, 01–02 апреля 2021 года. Том 5. – Москва: Российский государственный геологоразведочный университет им. С. Орджоникидзе, 2021. – С. 146-149.

19. Тчаро (Горбылева) Я.А. Исследование применения насосно-эжекторных систем с

инжекцией выхлопных газов для повышения нефтегазоотдачи / Я. А. Горбылева // Актуальные вопросы исследования нефтегазовых пластовых систем : материалы IV Международной научно-практической конференции, Москва, 22–23 сентября 2022 года. – пос. Развилка: Общество с ограниченной ответственностью "Научно- исследовательский институт природных газов и газовых технологий - Газпром ВНИИГАЗ", 2022. – С. 33.

20. Тчаро (Горбылева) Я.А. Исследование утилизации выхлопных газов жидкостно-газовым эжектором для повышения нефтеотдачи при водогазовом воздействии на пласт / Я. А. Горбылева // Актуальные проблемы нефти и газа : Сборник трудов V Всероссийской молодежной научной конференции, Москва, 20–21 октября 2022 года. – Москва: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем нефти и газа Российской академии наук, 2022. – С. 123-125.

АННОТАЦИЯ

к диссертационной работе

Тчаро Яна Алексеевна

на тему: «Методика обоснования характеристик насосно-эжекторных систем для нагнетания в пласт водогазовых смесей с использованием выхлопных газов»

Диссертационная работа посвящена исследованию работы насосно-эжекторных систем для нагнетания в пласт водогазовых смесей с использованием выхлопных газов в качестве инжектируемой среды.

Актуальность работы заключается в исследовании возможности нагнетания выхлопных (дымовых) газов от реальных источников, расположенных вблизи месторождений углеводородов при помощи насосно-эжекторной системы и снижения вредного воздействия на окружающую среду за счет использования газов горения для нагнетания в выработанные пласты с целью захоронения или использования в методах воздействия на пласт.

Для выполнения диссертационной работы были поставлены задачи: изучение особенностей применения водогазового воздействия и выхлопных (дымовых) газов от различных источников в нефтегазодобывающей отрасли; обзор теории и особенностей работы струйных аппаратов при закачке водогазовой смеси в различных условиях; опытное исследование работы насосно-эжекторных систем при изменяющихся расходах инжектируемого газа; разработка стенда для исследования работы струйного аппарата при создании водогазовой смеси с использованием выхлопных газов; опытное исследование напорно-энергетических характеристик жидкостно-газового эжектора при инъекции выхлопных газов и изменении его проточной части; разработка технологической схемы насосно-эжекторной системы, подходящей для утилизации выхлопных газов в условиях месторождений Арктического региона и определение основных параметров работы системы.

Диссертационная работа является результатом проведения теоретического и экспериментального исследования работы жидкостно-газового эжектора в составе насосно-эжекторных систем при использовании выхлопных газов в качестве инжектируемой среды.

ABSTRACT

of the Thesis

Tcharo Yana Alekseevna

Subject: «The procedure for justification of characteristics of pump-ejector systems for injection of water-gas mixtures into the reservoir using exhaust gases»

The thesis is devoted to the investigation of the possibility of realization of water and gas injection using exhaust gases as an injected agent by means of pump - ejector systems.

To carry out the thesis, the following tasks were set: study of peculiarities of application of exhaust (flue) gases from various sources in oil and gas production industry; review of theory and peculiarities of operation of jet apparatuses at injection of water-gas mixture in various conditions; experimental study of operation of pump-ejector systems at changing flow rates of injected gas; development of a bench for research of operation of jet apparatus at creation of water-gas mixture using exhaust gases; experimental research of pressure-energy characteristics of liquid-gas ejector at injection of exhaust gases and change of its flowing part; determination of parameters of technological scheme, suitable for utilization of exhaust gases in conditions of fields of the Arctic region.

The thesis is the result of theoretical and experimental study of liquid-gas ejector operation as a part of pump-and-ejector systems when using exhaust gases as an injected medium.

The relevance of the study is to reduce the harmful impact on the environment by using exhaust gases for injection into depleted formations for burial or use in methods of impact on the formation.