

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего
образования
«Санкт-Петербургский горный университет»

На правах рукописи

Махно Даниил Андреевич



**ОБОСНОВАНИЕ СПОСОБА РЕГУЛИРОВАНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ
ТРУБОПРОВОДОВ ДЛЯ ТРАНСПОРТИРОВКИ СЖИЖЕННОЙ СМЕСИ
УГЛЕВОДОРОДОВ С ГАЗОКОНДЕНСАТНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ
ВОСТОЧНОЙ СИБИРИ**

25.00.19 - Строительство и эксплуатация нефтегазопроводов, баз и хранилищ

Диссертация на соискание ученой степени кандидата
технических наук

Научный руководитель
Доктор технических наук, профессор
Агиней Р.В.

Санкт-Петербург – 2020

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	4
Глава 1 Аналитический обзор исследований в области регулирования температуры трубопроводов при транспортировке газоконденсатной смеси углеводородов.....	10
1.1. Трубопроводный транспорт углеводородов с охлажденным и сжиженным виде	10
1.2. Применение сезонно-действующих охлаждающих устройств на объектах нефтегазовой отрасли.....	17
1.3. Использование сезонно-действующих охлаждающих устройств для поддержания температуры трубопроводов в заданном диапазоне.....	21
1.4. Цель и задачи исследования	30
1.5. Выводы по Главе 1	30
Глава 2 Теоретическое обоснование способа регулирования температуры трубопровода для транспортировки газоконденсатной смеси.....	32
2.1. Исследование процесса теплообмена между смесью и окружающей средой. Постановка задач исследования.....	32
2.2. Процесс неизотермической транспортировки смеси по трубопроводу	34
2.3. Подбор сезонно-действующих охлаждающих устройств для поддержания температуры смеси в трубопроводе	39
2.4. Определение характеристик вихревой трубы для обеспечения работы СОУ в летнее время года	44
2.5. Выводы по Главе 2	51
Глава 3 Экспериментальные исследования процесса работы вихревой трубки по обеспечению функционирования сезонно-действующего охлаждающего устройства	53

3.1. Разработка технологической схемы и подготовка стенда для проведения экспериментальных исследований	53
3.2. Методика проведения экспериментального исследования	57
3.3. Анализ результатов проведения экспериментальных исследований вихревой трубки	66
3.4. Выводы по Главе 3	68
Глава 4 Экспериментальные исследования процесса работы вихревой трубки по обеспечению функционирования сезонно-действующего охлаждающего устройства	69
4.1. Корректировка технологической схемы транспорта газоконденсатной смеси с учетом содержания гелия	69
4.2. Разработка устройства для охлаждения грунта	71
4.3. Описание разработанного способа.....	76
4.4. Расчет системы регулирования рабочей температуры	79
4.5. Выводы по Главе 4	83
Заключение	84
Список литературы	86

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования и степень ее разработанности

Актуальность темы подчеркивается нынешними тенденциями в области разработки перспективных газоконденсатных месторождений Иркутской области и Восточной Сибири, обладающих крупнейшими известными запасами углеводородов в мире, поэтому развитие и совершенствование технологий транспортировки ресурсов с газоконденсатных месторождений имеет большое значение для энергетического комплекса нашей страны.

Крайне важным аспектом работы в данном направлении будет обоснование, проектирование, строительство и эксплуатация трубопроводной транспортной системы повышенной производительности – низкотемпературные трубопроводы для транспорта углеводородов в однофазном (сжиженном) виде. Одной из ключевых особенностей данного направления является решение проблем, связанных с регулированием температурного режима низкотемпературного магистрального трубопровода на большой протяженности. Для успешного и рационального решения поставленной задачи требуется многосторонняя оценка и комплексная работа по поиску новых научных оснований и технических решений по реализации данной технологии.

Обоснование способа регулирования рабочей температуры трубопроводов для транспортировки сжиженной смеси углеводородов с газоконденсатных месторождений Восточной Сибири при низкой температуре (ниже $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$) и высоком давлении (от 10 до 12 МПа) позволит обеспечить транспортировку больших объемов углеводородных ресурсов с газоконденсатных месторождений на значительные расстояния (от 1000 км), сделать трубопроводный транспорт углеводородов в однофазном сжиженном виде экологически безопасным, а также экономически целесообразным за счет сокращения капитальных вложений, строительно-монтажных работ и эксплуатационных расходов.

Исследованиями процессов и особенностей транспортировки сжиженной смеси природного газа и газового конденсата при низких температурах и высоком давлении в разное время занимались: С.А. Абдурашитов, Р.А. Алиев, О.А.

Беньяминович, Э.М. Блейхер, А.Е. Владимиров, А.И. Гольянов, С.Ф. Гудков, А.Д. Двойрис, Г.П. Добровольский, В.Л. Жмакин, О.М. Иванцов, А.А. Ильинский, А.П. Клименко, А.А. Коршак, Е.И. Крапивский, Л.С. Лившиц, В.И. Марон, Г.С. Миннегулова, Г.Э. Одишария, Г.Ф. Перри, В.М. Писаревский, А.Е. Полозов, С.М. Польских, Н.И. Преображенский, В.В. Рождественский, В.В. Редькин, Б.С. Рачевский, В.П. Руднев, Р.М. Садыкова, В.С. Сафонов, А.А. Тупиченков, К.Ю. Чириков, А.Н. Швец, Kh. Nasrifara, M. Moshfeghian и др.

На сегодняшний день мало рассмотрены термодинамические процессы транспортировки газоконденсатной смеси в одном трубопроводе, и недостаточно глубоко исследован вопрос поддержания рабочей температуры таких трубопроводов в рабочем диапазоне.

На основании собранного материала можно сделать вывод, что на протяжении последних нескольких десятилетий транспорт углеводородов в сниженном состоянии становится все более популярным по всему миру. Это связано со специфичными физическими свойствами сжиженных углеводородов: большая степень сжатия объема продукции, высшая степень чистоты от примесей и посторонних включений (особенности производства), возможность транспортирования не только трубопроводным транспортом, но и в криогенных емкостях морским транспортом.

Трубопроводный транспорт смесей сжиженных углеводородов является предметом исследований отечественных и зарубежных ученых и специалистов. Применение подобного вида транспорта особо актуально для нашей страны в связи с климатическими, геологическими и географическими особенностями.

Цели и задачи

Обосновать способ регулирования температуры трубопроводов для транспортировки сжиженной смеси углеводородов с газоконденсатных месторождений Восточной Сибири.

Для достижения поставленной цели были сформулированы и решены следующие задачи:

1. Провести аналитический обзор существующей научно-технической информации в данной области, подтвердить актуальность исследований в данной области;
2. Разработать способ регулирования температуры трубопровода для транспортировки сжиженной смеси углеводородов с газоконденсатных месторождений и устройство для его реализации;
3. Провести экспериментальные исследования ключевых параметров вихревой трубы, используемой в качестве генератора холода в предлагаемом способе;
4. Разработать методику расчёта системы регулирования температуры трубопровода для транспортировки сжиженной смеси углеводородов с газоконденсатных месторождений Восточной Сибири.

Научная новизна

1. Обоснован способ регулирования рабочей температуры низкотемпературных трубопроводов с помощью вихревых трубок, используемых в качестве генераторов холода, и разработано устройство для его реализации.
2. Предложена математическая модель процесса теплопередачи между жидкой рабочей средой в трубопроводе, грунтом, хладагентом в термостабилизаторе и атмосферным воздухом.
3. Уточнена технология транспортировки углеводородов с газоконденсатных месторождений в виде сжиженной смеси с учетом применения предложенного способа, а также содержания гелия.

Теоретическая и практическая значимость работы

1. Экспериментальным методом определена зависимость температуры охлажденного воздуха вихревой трубы от расхода сжатого воздуха, подаваемого в вихревую трубу, и относительного расхода охлажденного воздуха, истекающего из вихревой трубы.

2. Разработана методика расстановки и эксплуатации сезонно-действующих охлаждающих устройств вдоль трассы низкотемпературного трубопровода для поддержания его температуры в рабочем диапазоне. Данная методика может быть использована при проектировании низкотемпературных трубопроводов для транспортировки углеводородов в охлажденном и сжиженном виде.

3. Предложено техническое решение, позволяющее обеспечить непрерывную работу сезонно-действующих охлаждающих устройств вне зависимости от времени года и температуры воздуха. Данное решение может быть использовано при необходимости ведения строительных работ на вечномерзлых грунтах в сжатые сроки.

Методология и методы исследования

При решении поставленных задач использовался комплексный метод исследований, включающий теоретические и экспериментальные методы исследований: анализ современного состояния теории, практики и патентных материалов; математическое моделирование; использование специального программного обеспечения; проведение экспериментальных исследований на разработанной установке.

Положения, выносимые на защиту

1. Применение генератора холода, основанного на эффекте Ранке-Хилша, при относительном расходе охлажденного воздуха в диапазоне 0,5 ... 0,7, позволяет использовать сезонно-действующие охлаждающие устройства для регулирования температуры грунтового основания низкотемпературных трубопроводов независимо от температуры наружного воздуха.

2. Регулирование температуры грунтового основания низкотемпературных трубопроводов для транспортировки сжиженной смеси природного газа и газового конденсата с применением разработанных устройств для генерации холода в грунте, расположенных определенным образом, обеспечивает снижение температуры многолетнемерзлых грунтов ниже -25°C , что позволяет поддерживать температуру трубопровода в рабочем диапазоне.

Степень достоверности и апробация результатов

Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждена результатами экспериментальных исследований, проводимых с использованием сертифицированного измерительного оборудования и лицензированного программного обеспечения, с доверительной вероятностью не менее 0,95, и сопоставлением результатов теоретических и экспериментальных исследований с работами других авторов, проводивших исследования в данной области.

Основные положения диссертационной работы докладывались на XII Международной научно-практической конференции «Трубопроводный транспорт – 2017» (г. Уфа, 24-25 мая 2017 г.), Всероссийской научно-технической конференции «Проблемы геологии, разработки и эксплуатации месторождений и транспорта трудноизвлекаемых запасов углеводородов» (г. Ухта, 2-3 ноября 2017 г.), 72-ой Международной научной конференции «Нефть и газ – 2018» (г. Москва, 23-26 апреля 2018 г.), XIII Международная научно-практической конференции «Трубопроводный транспорт – 2018» (г. Уфа, 23-24 мая 2018 г.), Всероссийской научно-технической конференции «Проблемы геологии, разработки и эксплуатации месторождений и транспорта трудноизвлекаемых запасов углеводородов» (г. Ухта, 1-2 ноября 2018 г.), XIX Международной молодежной научной конференции «Севергеоэкотех-2018» (г. Ухта, 21-23 марта 2018 г.), 73-ая Международной научной конференции «Нефть и газ – 2019» (г. Москва, 22-25 апреля 2019 г.), Всероссийской научно-технической конференции «Проблемы геологии, разработки и эксплуатации месторождений и транспорта трудноизвлекаемых запасов углеводородов» (г. Ухта, 7-8 ноября 2019 г.).

Публикации

Результаты диссертационной работы в достаточной степени освещены в 11 печатных работах, в том числе в 2 статьях - в изданиях из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (далее – Перечень ВАК), и в 1 статье в издании из Перечня ВАК и входящем в международную базу данных и систему цитирования Scopus.

Структура диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и библиографического списка. Содержит 96 страниц машинописного текста, 41 рисунок, 20 таблиц, список литературы из 91 наименования.

ГЛАВА 1 АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР ИССЛЕДОВАНИЙ В ОБЛАСТИ РЕГУЛИРОВАНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ТРУБОПРОВОДОВ ПРИ ТРАНСПОРТИРОВКЕ ГАЗОКОНДЕНСАТНОЙ СМЕСИ УГЛЕВОДОРОДОВ

1.1. Трубопроводный транспорт углеводородов с охлажденном и сжиженном виде

Актуальность данного направления обусловлена сложившейся конъюнктурой в области добычи, транспорта и переработки природного газа и газового конденсата. Вся инфраструктура, необходимая для реализации полного цикла работ, связанных с переработкой углеводородов и получения производственного сырья или конечных продуктов, закономерно формировалась вблизи от мест их добычи для снижения затрат на транспорт. Однако, более молодые месторождения, открытые позже, зачастую находятся на большом удалении от уже сформированных и развитых центр нефте- и газопереработки (рисунок 1).

С экономической точки зрения целесообразнее транспортировать углеводороды с данных месторождений, нежели строить новые заводы по переработке [4,21]. В связи с чем остро встает вопрос непрерывного стремления к двум крайностям - минимизации капитальных и эксплуатационных затрат на транспорт с одной стороны, и максимально возможного увеличения объемов транспортировки с другой. В условиях сухопутного транспорта углеводородов, с учетом требуемых для преодоления расстояний в тысячи километров, лучше всего себя зарекомендовал трубопроводный транспорт, привлекательность которого растет пропорционально расстоянию между пунктами отправки и назначения. Но и в трубопроводном транспорте уже давно изучаются варианты совершенствования технологии с точки зрения увеличения объемов транспортировки. Одним из наиболее интересных и популярных направлений является низкотемпературный транспорт природного газа [2]. Охлаждение и сжижение газа позволяет уменьшить объем вещества в сотни раз, что, в свою очередь, ведет к увеличению скорости транспортировки [19].

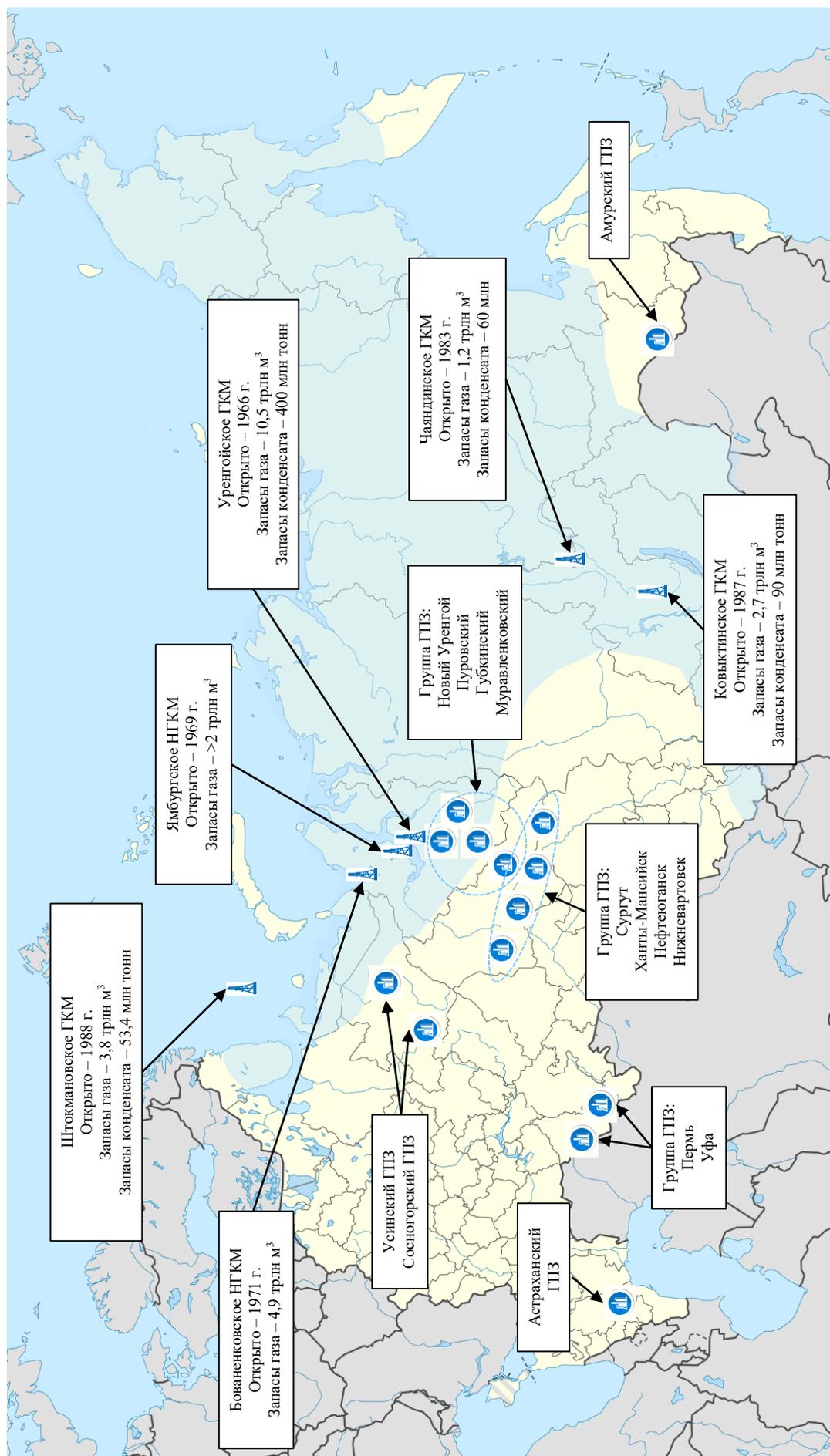


Рисунок 1: Географическое положение крупнейших газоконденсатных месторождений и газоперерабатывающих заводов России.

Условные обозначения:  - месторождение,  - газоперерабатывающий завод,  - распространение многолетнемерзлых грунтов

Проектирование и эксплуатация трубопроводов с пониженной температурой транспортируемой среды является комплексной задачей, и требует решения ряда специфических вопросов (рисунок 2).

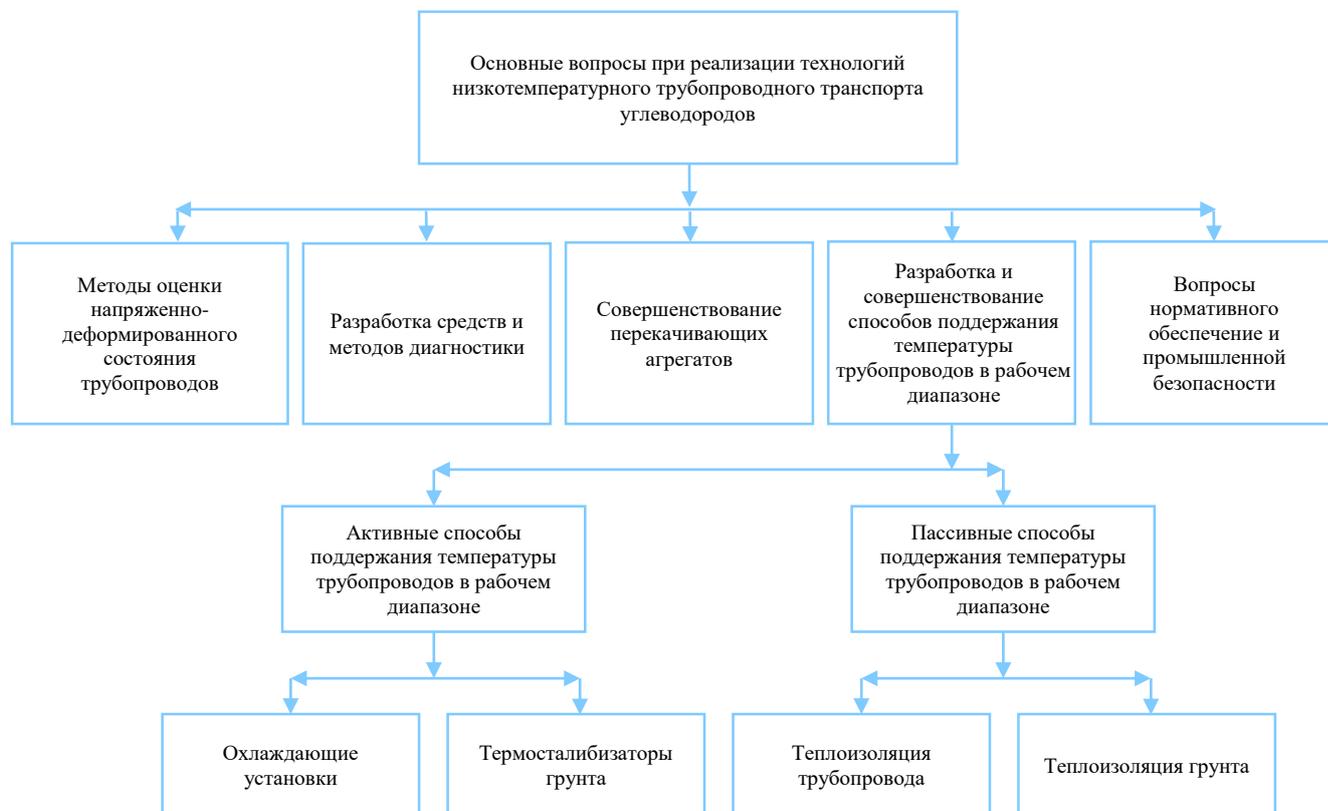


Рисунок 2 - Направления исследований в области низкотемпературного трубопроводного транспорта углеводородов

Исследования в области гидравлики и термодинамики в трубопроводном транспорте и хранении природного газа в охлажденном и сжиженном виде были проводились в работах Владимирова А.Е., Бородавкина П.П., Гриценко А.И., Иванцова О.М., Блейхера Э. М., Клименко А.П., Жмакина В.Л., Николаева А.К. [6,17,22]. Теоретические и экспериментальные исследования напряженно-деформационного состояния низкотемпературных трубопроводов для транспорта природного газа в сжиженном виде описаны в работах Полозова А.Е., Александрова А.В., Акульшиной Н.П., Коршака А.А., Одишария Г.Э [1,53,57,58,59]. Вопросы фазовых переходов сжиженных углеводородов рассматривались в работах Баталина О.Ю., Булейко В.М., Лапшина В.И., Полякова А.В., Писаревского В.М., Брусиловского А.И., Разносчикова В.В., Швеца А.Н.,

Крапивского Е.И., Булейко В.М., Миннегуловой Г.С., Kh. Nasrifara, M. Moshfeghian [5,7,8,27,28,29,31,48,60,67,69,86-91]. Изучение теплового взаимодействия линейной части низкотемпературного трубопровода и грунта описано в работах Т.Н. Дрынкиной, О.Ю. Володченковой, Садыковой Р.М, Д.С. Паздерина [5,72].

На основе рассмотренных материалов можно сделать вывод, что трубопроводный транспорт природного газа в сжиженном виде является перспективным, интересным, но при этом малоизученным направлением. Многие вопросы нуждаются в глубокой проработке, из-за чего данный вид транспорта углеводородов считается нетрадиционным и не имеет прикладной характер, и используется лишь в качестве частного технического решения. Одним из наиболее острых вопросов является температурный режим таких трубопроводов, который тяжело достичь и поддерживать на больших расстояниях.

В работе [48] было приведено обоснование способа транспортировки природного газа и стабильного газового конденсата с газоконденсатных месторождений Крайнего Севера по низкотемпературным магистральным трубопроводам в виде однофазной (жидкой) смеси. На рисунке 3 представлена принципиальная технологическая схема трубопроводного транспорта газоконденсатной смеси углеводородов.

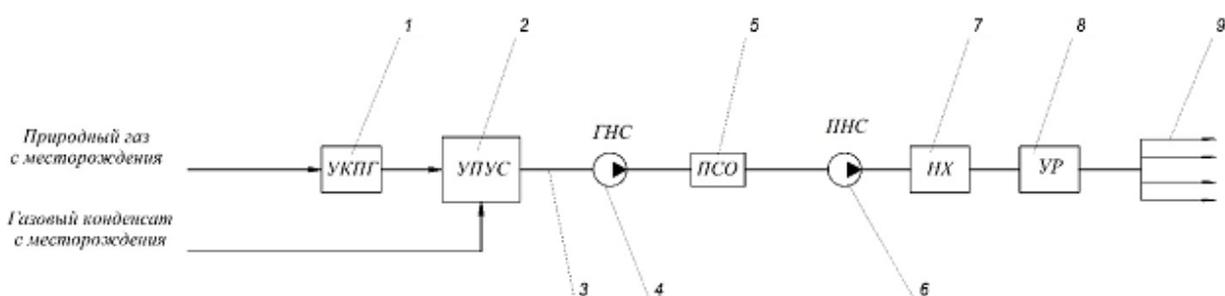


Рисунок 3 - Принципиальная технологическая схема трубопроводного транспорта газоконденсатной смеси углеводородов:

1 - установка комплексной подготовки газа, 2 - установка получения углеводородной смеси, 3 - трубопровод, 4 - головная насосная станция, 5 - промежуточные станции охлаждения, 6 - промежуточные насосные станции, 7 - низкотемпературное хранилище, 8 - установка регазификации, 9 - подача газа потребителям [48]

Суть способа заключается в подготовке смеси природного газа и газового конденсата и ее перекачке по трубопроводам в однофазном состоянии, что позволяет сократить капитальные и эксплуатационные затраты на строительство и обслуживание индивидуальных трубопроводов для газа и конденсата, а также сократить время транспортировки сырья до потребителей по сравнению с транспортировкой морским транспортом.

Процесс трубопроводной транспортировки газоконденсатной смеси описан следующим образом:

1. Природный газ с месторождения поступает на установку комплексной подготовки газа 1, где производится его стандартная подготовка: очистка, осушка и отделение механических примесей;

2. Газ и газовый конденсат подаются на установку получения углеводородной смеси 2, где за счет повышения давления одновременно с охлаждением газа и подачи газового конденсата под высоким давлением до достижения необходимых критических параметров формируется сжиженная смесь. Критические параметры смеси зависят от массового соотношения компонентов (что также рассмотрено в работе);

3. Полученная смесь подается по трубопроводу 3 на головную компрессорную станцию 4, и далее в магистральный трубопровод, который заранее охлаждается до нижней границы диапазона рабочих температур. Для поддержания требуемого температурного режима и давления на линейной части трубопровода через определенные интервалы располагаются промежуточные насосные станции 6 и охлаждающие станции 5.

4. В конечной точке трубопровода газоконденсатная смесь поступает специальное хранилище 7, откуда подается на установку регазификации 8 для проведения операции обратного разделения смеси на газообразную и жидкую фазы перед дальнейшей транспортировкой потребителям 9. Подробная схема подготовки сжиженной смеси природного газа и газового конденсата приведена на рисунке 4.

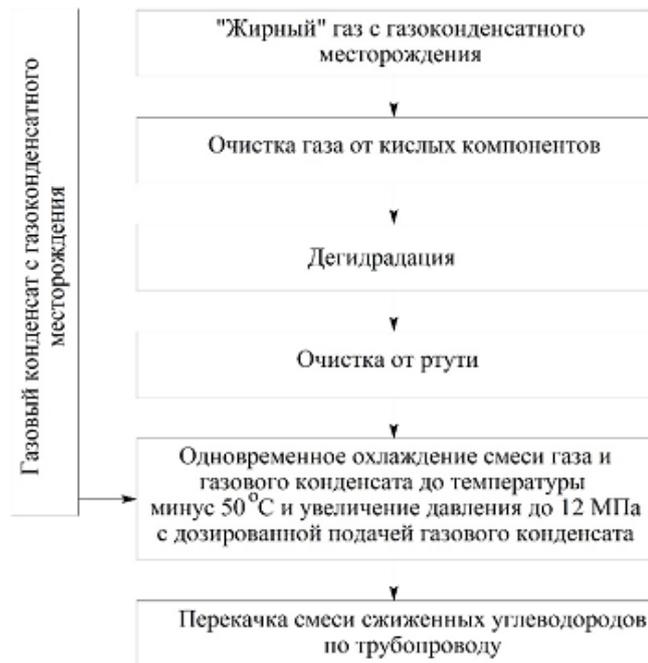


Рисунок 4 - Схема подготовки сжиженной смеси природного газа и газового конденсата [48]

Ключевым отличием установки подготовки сжиженной смеси углеводородов от установки подготовки сжиженного природного газа (СПГ) является отсутствие цикла охлаждения до $-162\text{ }^{\circ}\text{C}$ [11,71], что значительно снижает экономические затраты при подготовке данной смеси. Диаграммы давление–температура (P - T) смеси газа и газового конденсата приведена на рисунках 5 и 6.

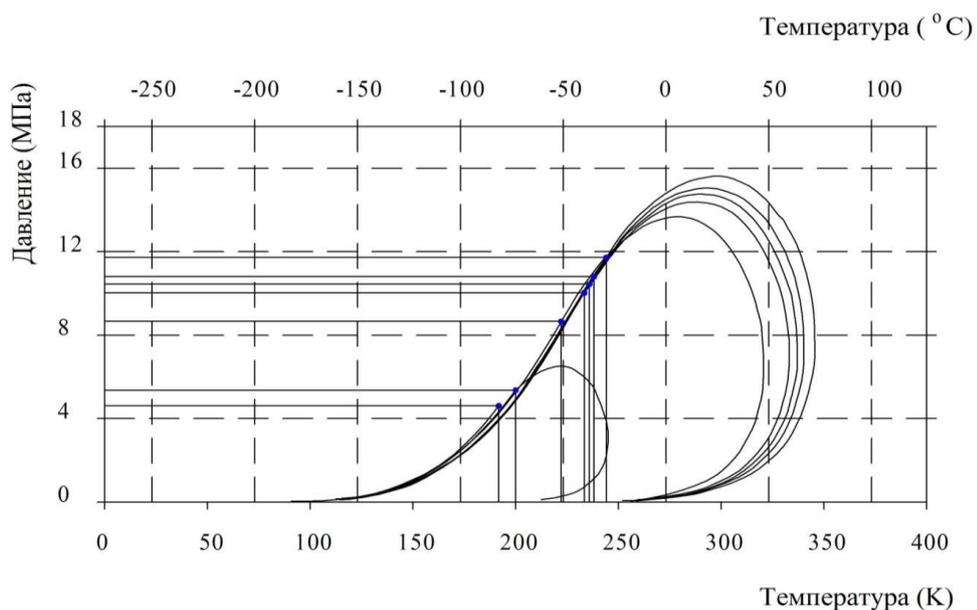


Рисунок 5 – Диаграмма давление–температура (P - T) смеси газа и газового конденсата в соотношении 95 % и 5 % по массе [48]

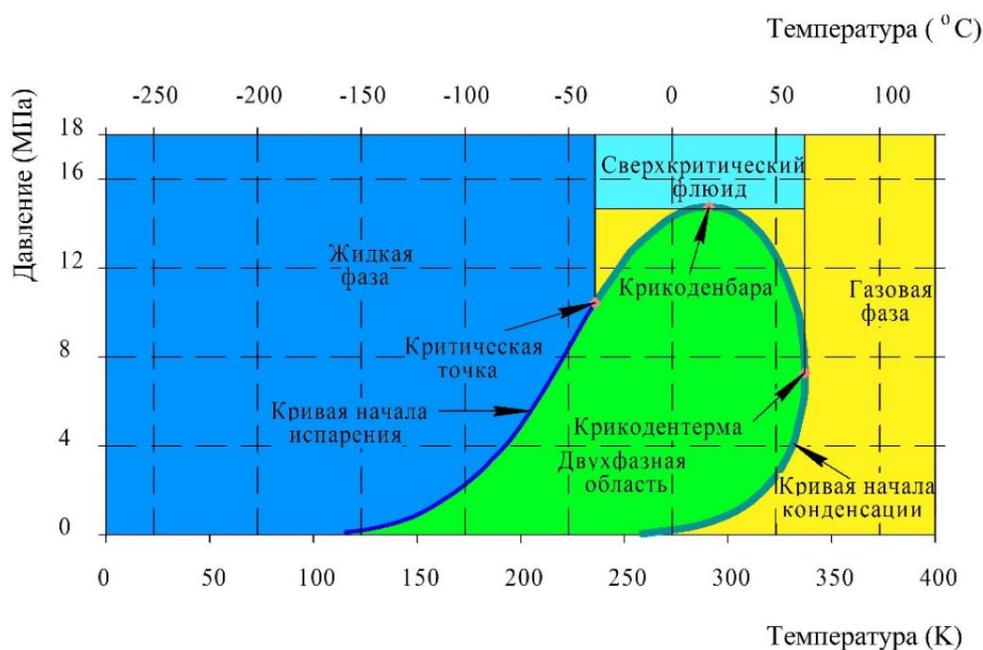


Рисунок 6 – Диаграмма давление–температура (P - T) смеси газа и газового конденсата в соотношении 95 % и 5 % по массе [57]

При анализе гидравлического и теплового расчета низкотемпературного трубопровода для транспортировки сжиженной смеси углеводородов можно выделить следующие особенности:

- температура среды должна поддерживаться ниже критической для исключения возможности разложения смеси на жидкую и газовую фазы;
- на сухопутных участках трубопровод целесообразно прокладывать подземным способом для уменьшения теплообмена с атмосферным воздухом в период положительных температур;
- при определении маршрута трассы трубопровода рекомендуется выбирать участки с многолетнемерзлыми грунтами для дополнительного захлаживания трубопровода;

Физические свойства рассматриваемой смеси в зависимости от компонентного состава определялись с помощью программного комплекса REFPROP, позволяющего достоверно определить критические давление и температуру смеси различных веществ на основании имитационного моделирования [27]. Данные расчета критической температуры сжиженных смесей различного состава представлены в таблице 1.

Таблица 1 - Данные расчета критической температуры сжиженных смесей [48]

№ п/ п	Компоненты	Углеводородные смеси							
		Смесь №1		Смесь №2		Смесь №3		Смесь №4	
		мол. доля	масс. доля	мол. доля	масс. доля	мол. доля	масс. доля	мол. доля	масс. доля
1	Метан	0,8903	0,7445	0,8635	0,6747	0,8985	0,7535	0,8499	0,6476
2	Этан	0,0546	0,0856	0,0552	0,0809	0,0422	0,0634	0,0428	0,0611
3	Пропан	0,0208	0,0478	0,0234	0,0503	0,0235	0,0542	0,0427	0,0894
4	Бутан	0,0095	0,0288	0,0137	0,0388	0,0124	0,0377	0,0294	0,0812
5	Пентан	0,0248	0,0933	0,0442	0,1554	0,0234	0,0826	0,0352	0,1206
6	Общ	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
7	Ткрит, К (REFPROP)	228,84		243,53		251,51		248,31	
8	Ткрит, К (погрешность, %)	209,71 (8,4)	241,76 (5,6)	216,64 (11,04)	261,34 (7,3)	209,06 (8,2)	241,36 (5,9)	219,85 (11,4)	266,29 (7,2)
9	Ткрит с поправочными коэффициентами, К (погрешность, %)	-	236,33 (3,3)	-	253,97 (4,3)	-	236,06 (3,6)	-	258,58 (4,1)

В работах [10,51,71] предлагалось проводить гидравлический расчет трубопровода для транспорта сжиженных углеводородов по аналогии с теплогидравлическим расчетом трубопровода для транспортировки согласно [72]. Это связано с тем, что формулы для расчета нефтепровода при введении некоторых допущений могут быть упрощены и преобразованы в формулы для расчета рабочих характеристик низкотемпературных трубопроводов [48].

1.2. Применение сезонно-действующих охлаждающих устройств на объектах нефтегазовой отрасли

На многих объектах нефтегазового сектора, расположенных в условиях вечномерзлых грунтов, применяются сезонно-действующие охлаждающие устройства (СОУ) [50]. Основная задача СОУ состоит в поддержании грунтов в мерзлом состоянии, поскольку оттаивание воды в грунтах зачастую приводит к их пучению и снижению несущей способности фундаментов зданий и сооружений, расположенных в зоне мёрзлых грунтов [26,75,77].

Суть работы СОУ состоит в передаче тепла от грунта в атмосферный воздух через хладагент с температурой кипения около 0°C , за счет чего температура грунта не поднимается выше температуры оттаивания вследствие теплового

воздействия инженерных сооружений или в результате процесса теплопередачи между слоями грунта. Ключевым достоинством данных устройств является их независимость от электроэнергии, поскольку принцип работы СОУ основан на использовании процесса конвективного теплообмена за счет градиента температур между грунтом и атмосферным воздухом. Таким образом, СОУ представляют собой трубчатый генератор холода, использующий конвекционные свойства хладагента и функционирующий при температуре окружающего (атмосферного) воздуха ниже температуры грунта (рисунок 7).

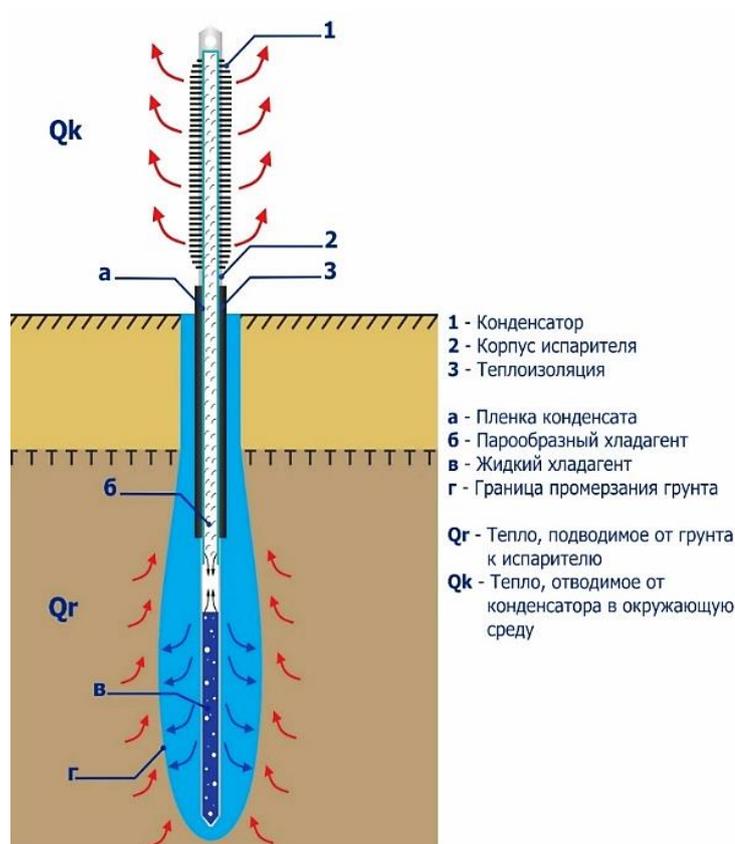


Рисунок 7 – Индивидуальное СОУ

Анализ эффективности применения СОУ на объектах транспорта и хранения нефти и газа проводился на объектах проектирования ПАО «ВНИПИгаздобыча», а также объектах ряда газодобывающих и транспортирующих компаний. Проектирование систем термостабилизации грунтов проводилось с учетом [78].

ПАО «ВНИПИгаздобыча» проводился сравнительный анализ фактического влияния СОУ типовой длины 12,0 м различных производителей на грунт в ходе

опытно-промышленной эксплуатации СОУ в непосредственной близости от фундаментов сооружений. Оценивалась работа СОУ производителей таких компаний, как ООО НПО «Фундаментстройаркос», ОАО «Фундаментпроект», ООО «НПО Север», ООО «Ньюфрост» (рисунок 8).



Рисунок 8 – Применение СОУ на объектах проектирования ПАО «ВНИПИГаздобыча» [18]

Основными входными параметрами являлись условия эксплуатации (среднегодовая температура грунта и воздуха), площадь поверхности оребрения, площадь испарительной части, теплопроводность материала основных конструктивных элементов СОУ [18].

В качестве граничных условий третьего рода при моделировании работы СОУ используется температура атмосферного воздуха, а также коэффициент теплоотдачи от грунта к СОУ. При определении характеристик СОУ расчеты проводились соответствии с СТО Газпром 2-2.1-390-2009 [79].

По результатам опытно-промышленной эксплуатации СОУ на объектах ПАО «ВНИПИГаздобыча» были подтверждены следующие положительные стороны применения СОУ для стабилизации грунтов в основании фундаментов зданий и сооружений:

- уменьшение требуемой минимальной глубины устройства свайных оснований;

- повышение надежности инженерных сооружений за счет более плотной фиксации свай в грунте;

Кроме того, было установлено, что финансовые расходы на комплекс мероприятий по поддержанию несущей способности мерзлых грунтов с помощью их термостабилизации составляют менее 2% от капитальных затрат при строительстве данных объектов (рисунок 9).

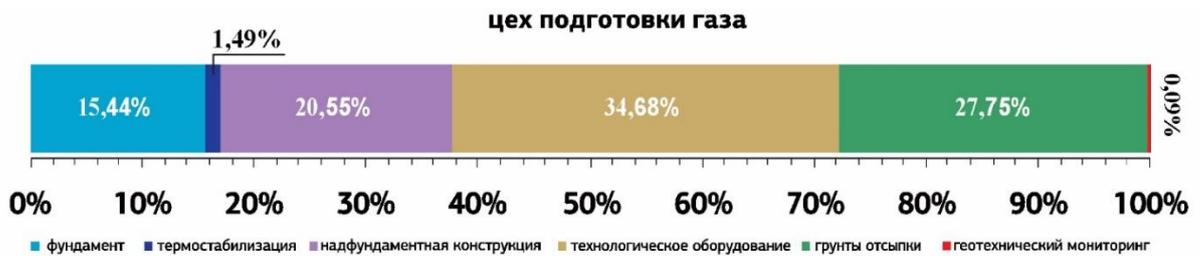


Рисунок 9 – Структура капитальных затрат с учетом применения систем термостабилизации грунта на примере УКПГ ГП-2 Бованенковского НГКМ [19]

На объектах ООО «Газпром добыча Уренгой» в ходе применения СОУ для стабилизации грунтов в основании фундаментов зданий и сооружений были сделаны следующие выводы [50]:

- неоспоримым достоинством СОУ является гибкость их применения с точки зрения монтажа на локальных участках небольшой площади;
- ключевыми недостатками СОУ являются относительно низкая устойчивость к внешним динамическим нагрузкам, а также существенное снижение эффективности в случае наличия снежного покрова на конденсаторной части;
- СОУ со стальными корпусами обладают повышенными прочностными характеристиками по сравнению с аналогами из углеродистого волокна, однако подвержены коррозии;

Оценку результатов применения СОУ на линейной части магистрального трубопровода проводили специалисты ООО «Газпром трансгаз Ухта» [52]. В рамках проекта опытно-промышленной эксплуатации около 4000 индивидуальных

термостабилизаторов было установлено на линейной части системы магистральных газопроводов «Бованенково-Ухта» (таблица 2).

Карта распространения многолетнемерзлых грунтов вдоль трассы газопровода «Бованенково-Ухта» представлена на рисунке 10.

Таблица 2 - Характеристики СМГ «Бованенково-Ухта»

Протяженность	1100 км в двухниточном исполнении
Количество компрессорных станций	9
Диаметр трубопровода	1420 мм
Класс прочности стали трубы	K65, K60
Толщина стенки	от 27,7 до 33 мм
Проектное давление	11,8 МПа

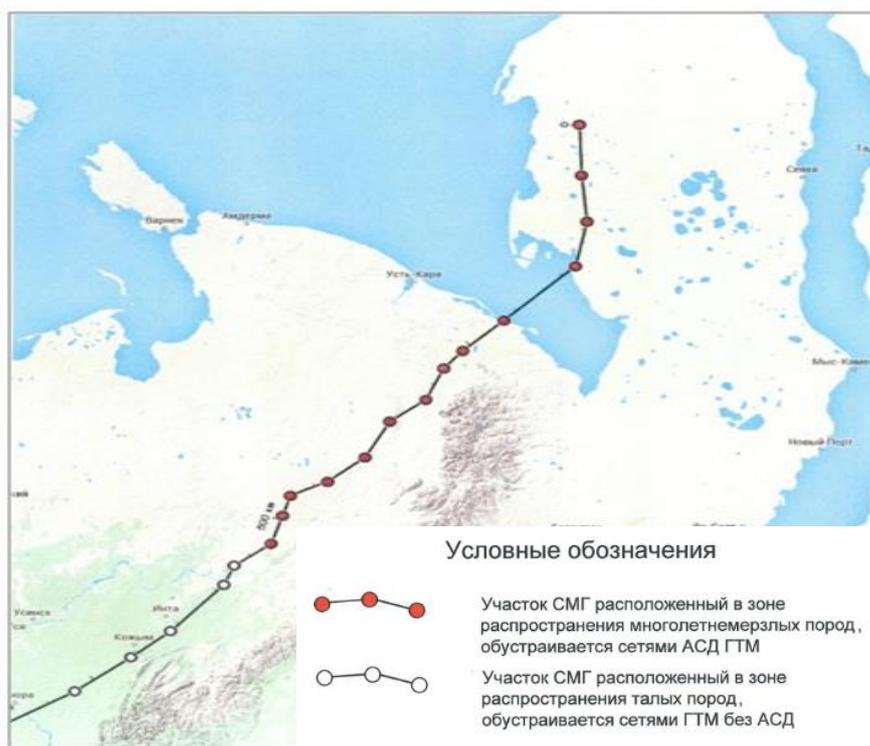


Рисунок 10 – Карта распространения многолетнемерзлых грунтов СМГ «Бованенково-Ухта»

1.3. Использование сезонно-действующих охлаждающих устройств для поддержания температуры трубопроводов в заданном диапазоне

Температура рабочей среды нефтегазопроводов контролируется на насосных или компрессорных станциях. В процессе движения среды по трубопроводу ее

температура меняется вследствие теплообмена с окружающей трубопровод средой. Для надземных трубопроводов такой средой является атмосферный воздух, а для подземных - грунт. Одной из основных задач при транспорте углеводородов является поддержание температуры транспортируемой среды в рабочем диапазоне [74,75], поскольку нарушение температурного режима может привести снижению эффективности транспортировки или даже отказу. Например, при транспортировке нефти по трубопроводу ее предварительно подогревают, поскольку в процессе остывания нефти на внутренней поверхности трубопровода образуются асфальтено-смолисто-парафиновые отложения (АСПО). При снижении температуры газа ниже точки росы происходит образование газогидратов – клатратных соединений природного газа и воды. Оба процесса приводят к снижению живого сечения трубопровода, что снижает общую эффективность системы. Кроме того, наличие посторонних образований на стенках трубопровода может спровоцировать коррозионные процессы. Поддержание температуры среды в заданном диапазоне рабочих температур - основная задача при реализации рассматриваемой технологии транспорта углеводородов в виде газоконденсатной смеси, поскольку при повышении температуры смеси до определенного (критического) значения происходит разложение сжиженной смеси и выделение газообразных компонентов, что приводит к возникновению неоднородности потока и остановке работы перекачивающих станций.

В работе [74] проводилось комплексное исследование возможности применения сезонно-действующих охлаждающих устройств для поддержания рабочей температуры подземного магистрального трубопровода, расположенного в многолетнемерзлых грунтах. Для этого проводились теоретические исследования процесса теплообмена трубопровода с грунтом и атмосферного воздуха с грунтом за счет сезонно-действующих охлаждающих устройств, компьютерное (имитационное) моделирование процесса охлаждения грунта вокруг подземного трубопровода, а также лабораторный эксперимент по замораживанию грунта с помощью прототипа термостабилизатора (рисунок 11).

По процессе теоретических и экспериментальных исследований оценивалась степень и характер влияния термостабилизатора грунта на температуру окружающего грунта. Исследования проводились на базе Санкт-Петербургского горного университета. Общий вид экспериментальной установки представлен на рисунке 11, а результаты оценки движения температурного фронта на рисунке 12.

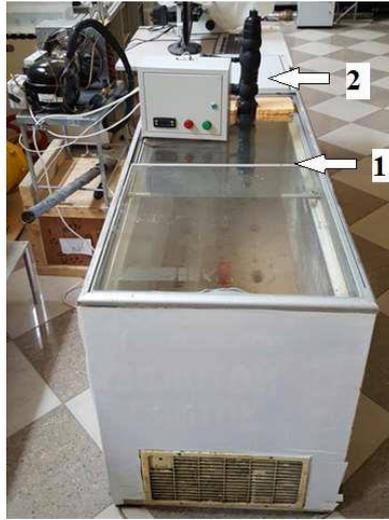


Рисунок 11 - Общий вид установки по исследованию работы СОУ: 1- морозильный ящик с влажным грунтом, 2- прототип термостабилизатора [74]

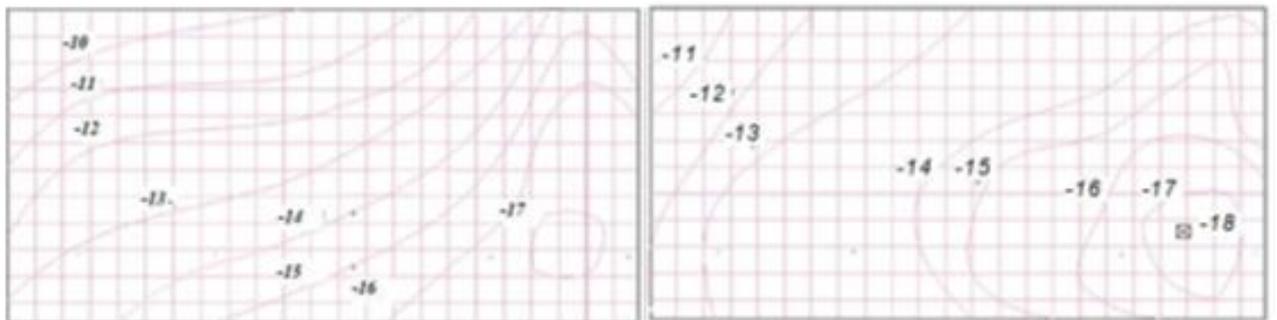


Рисунок 12 – Изолинии изменения температуры грунта при экспериментальной (лабораторной) оценке влияния СОУ на глубине грунта 5 см (слева) и 15 см (справа) [72]

При измерении температуры трубопровода, имеющим минимальную температуру -50°C , в мерзлом грунте с температурой -5°C и -20°C , определялась скорость повышения температуры трубопровода. При этом разница температур

грунта имитировалась с целью воссоздать эффект влияния СОУ на поддержание низкой температуры грунта (рисунки 13 и 14).

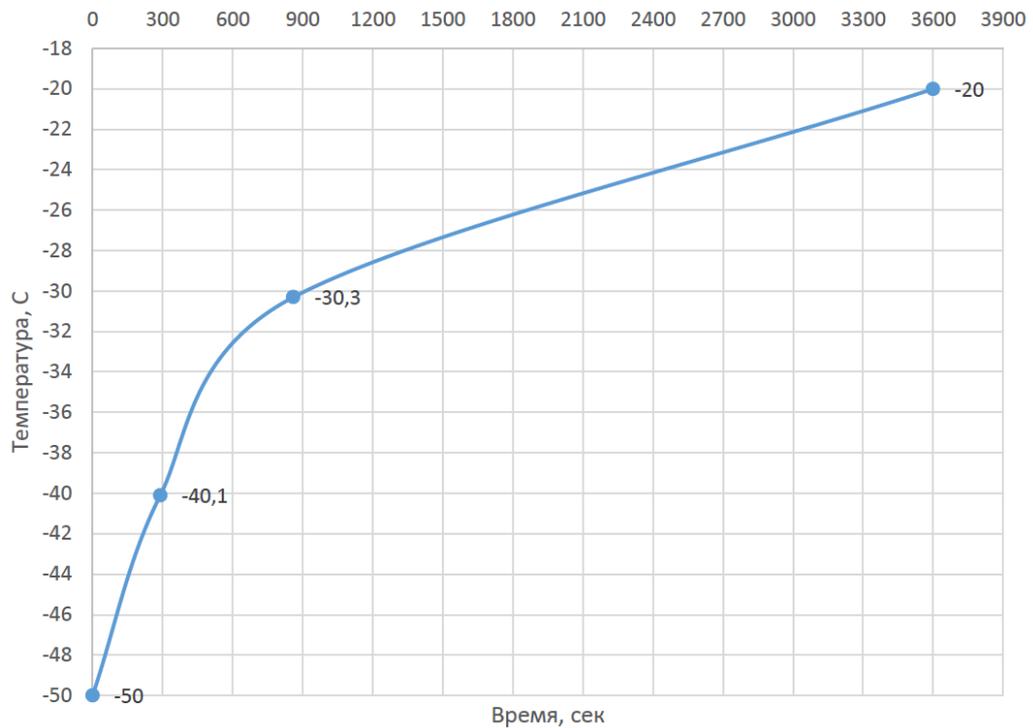


Рисунок 13 – Характер изменения температуры перекачиваемой смеси в трубопроводе с температурой окружающей грунта -5°C [74]

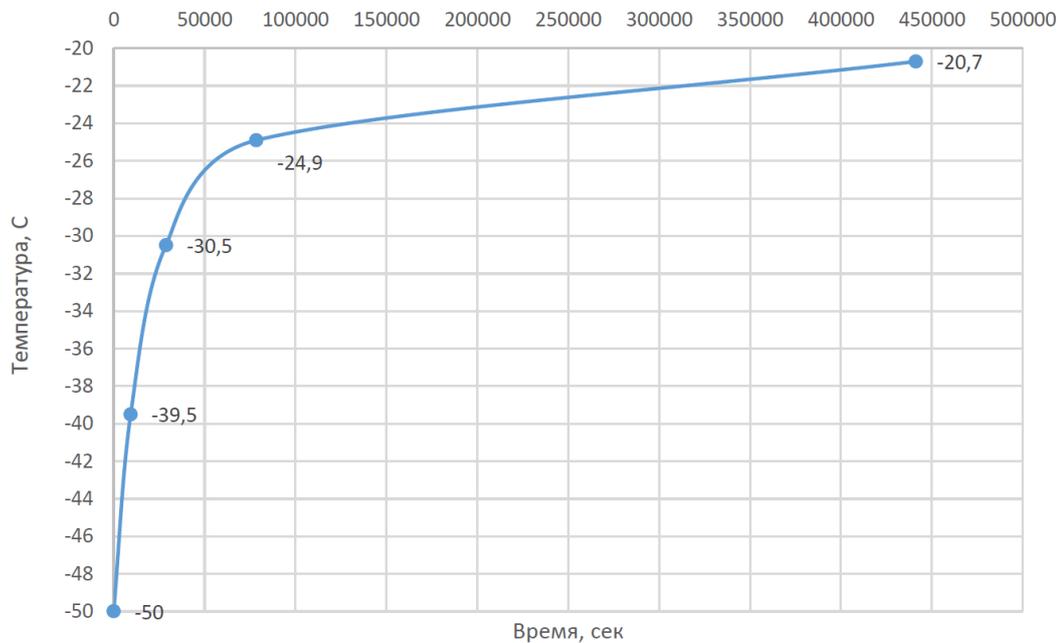


Рисунок 14 – Характер изменения температуры перекачиваемой смеси в трубопроводе с температурой окружающей грунта -20°C [74]

Численное моделирование изменения температуры трубопровода для транспортировки газоконденсатной смеси с учетом влияния СОУ и без него в летний и зимний периоды проводилось в программном комплексе ANSYS Workbench. Результаты моделирования приведены на рисунках 15 и 16.

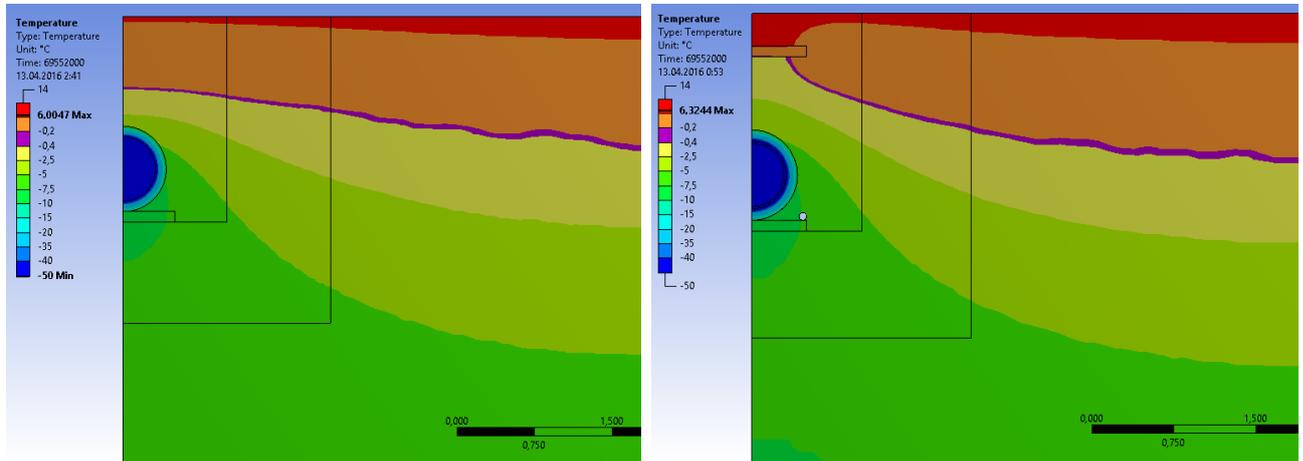


Рисунок 15 – Результаты имитационного моделирования температурного поля грунта вокруг трубопровода для транспортировки газоконденсатной без использования СОУ и теплоизоляционных плит (слева) и с применением СОУ и теплоизоляционных плит (справа) [74]

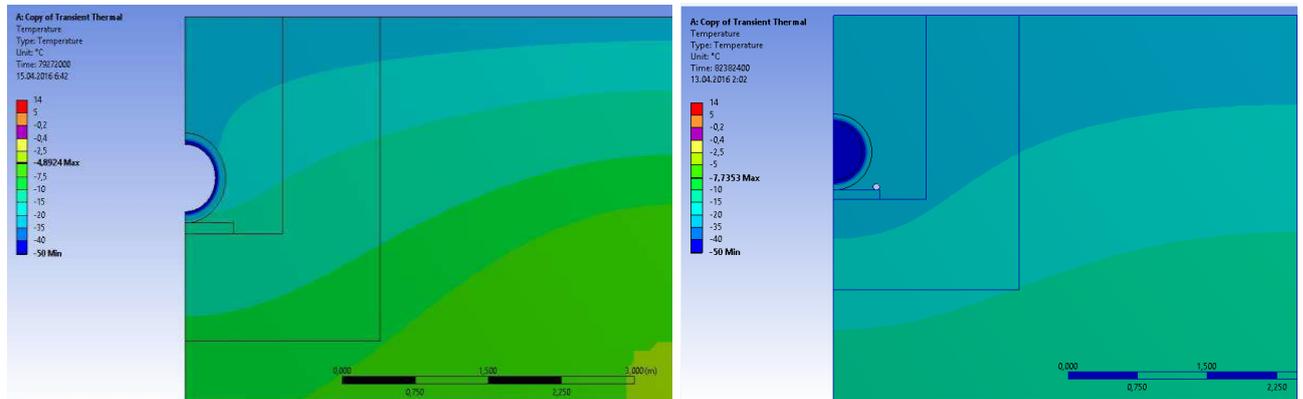


Рисунок 16 Результаты имитационного моделирования температурного поля грунта вокруг трубопровода в зимний период эксплуатации без использования СОУ (слева) и с применением СОУ (справа) [74]

Кроме этого, в работе [74] рассматривалось применения описанного способа транспорта газоконденсатной смеси на примере Южно-Тамбейского месторождения. Состав предполагаемой газоконденсатной смеси представлен в таблице 3.

Таблица 3. Компонентный состав сжиженной смеси углеводородов Южно-Тамбейского месторождения в массовом соотношении природного газа и газового конденсата - 95:5, полученный в работе [74]

Компонент	Формула	Содержание в смеси, масс. %
метан	CH ₄	66
этан	C ₂ H ₆	8
пропан	C ₃ H ₈	11
бутан, изобутан	C ₄ H ₁₀	10
пентан, изопентан	C ₅ H ₁₂	4
гексан и выше	C ₆ H ₁₄₊	1

Гидравлический расчет низкотемпературного газоконденсатного трубопровода предлагалось проводить по формуле (1) [29]:

$$P = P_{\text{н}} - \lambda \cdot \frac{v^2}{2D} \rho \cdot L, \quad (1)$$

где

λ – коэффициент гидравлического сопротивления,

v – средняя линейная скорость движения рабочей среды,

ρ – плотность рабочей среды,

D – внутренний диаметр трубопровода,

$P_{\text{н}}$ – давление в начале расчетного участка трубопровода,

L – длина расчетного участка трубопровода.

Согласно [73], изменение температуры рабочей среды при ее движении по трубопроводу описывается формулой (2):

$$T_{\text{кон}} = \frac{T_{\text{нач}} + T_{\text{ос}}}{\exp\left(\frac{L}{C_{\text{ж}} \cdot G \cdot R_t}\right)} + T_{\text{ос}}, \quad (2)$$

где

$T_{\text{кон}}$ – температура рабочей среды в конце расчетного участка трубопровода,

$T_{\text{нач}}$ – температура рабочей среды в начале расчетного участка трубопровода,
 $T_{\text{ос}}$ – температура окружающей среды (для подземного трубопровода – средняя температура грунта, для надземного – средняя температура воздуха),

L – длина расчетного участка трубопровода,

$C_{\text{ж}}$ – теплоемкость рабочей среды,

G – весовой расход рабочей среды,

R_t – общее термическое сопротивление трубопровода.

На основании формулы (2) может быть установлено расстояние от начала транспортировки, на котором температура среды достигает критической отметки (в нашем случае – температуры фазового перехода легких компонентов смеси). Данное расстояние было определено как критическая длина участка трубопровода и описывается формулой (3):

$$L_{\text{кр}} = C_{\text{рж}} \cdot G \cdot R_t \cdot \ln \left(\frac{T_{\text{нач}} - T_{\text{ос}}}{-T_{\text{ос}}} \right), \quad (3)$$

Общее термическое сопротивление трубопровода R_t определяется по формуле (4) исходя из диаметра трубопровода, а также толщины и коэффициентов теплопроводности каждого слоя:

$$R_t = \frac{1}{\lambda_{\text{ст}}} \cdot \ln \frac{D_2}{D_1} + \frac{1}{\lambda_{\text{аи}}} \cdot \ln \frac{D_2 + 2\delta_{\text{аи}}}{D_2} + \frac{1}{\lambda_{\text{ти}}} \cdot \ln \frac{D_3}{D_2 + \delta_{\text{аи}}}, \quad (4)$$

где $\lambda_{\text{ст}}$, $\lambda_{\text{аи}}$, $\lambda_{\text{ти}}$ – коэффициенты теплопроводности стенки трубопровода, антикоррозионной и тепловой изоляции соответственно, D_1 , D_2 , D_3 – внутренний диаметр, диаметр трубопровода с антикоррозионной изоляцией и наружный диаметр соответственно, $\delta_{\text{аи}}$ и $\delta_{\text{ти}}$ – толщина антикоррозионной и тепловой изоляции соответственно.

В результате исследований было доказано, что применение дополнительного охлаждения грунта термостабилизирующими устройствами позволяет увеличить критическую длину трубопровода до 1,5 раз (рисунки 17 и 18).

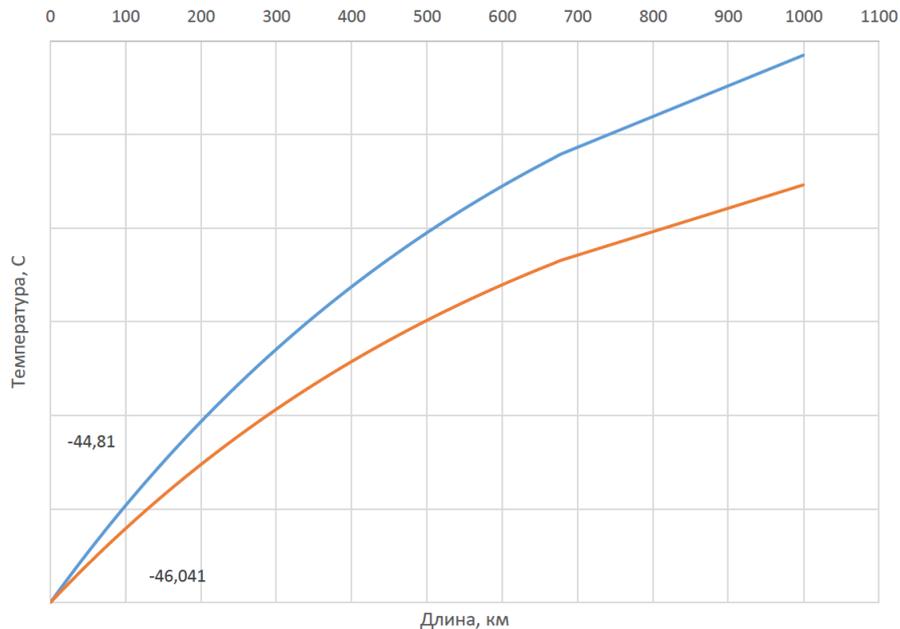


Рисунок 17 – Изменение температуры газоконденсатной смеси при транспортировке по трубопроводу при среднегодовой температуре грунта:
1 – без применения СОУ, 2 – с применением СОУ

В холодный период года охлаждающие устройства переносят тепло от грунта в окружающий (атмосферный) воздух, в результате чего температура грунта снижается. При достижении критической температуры фазового перехода вода в грунте замерзает. В теплый период года, когда температура атмосферного воздуха превышает температуру грунта, охлаждающие устройства автоматически отключаются (запираются). Это является основным конструктивным недостатком СОУ.

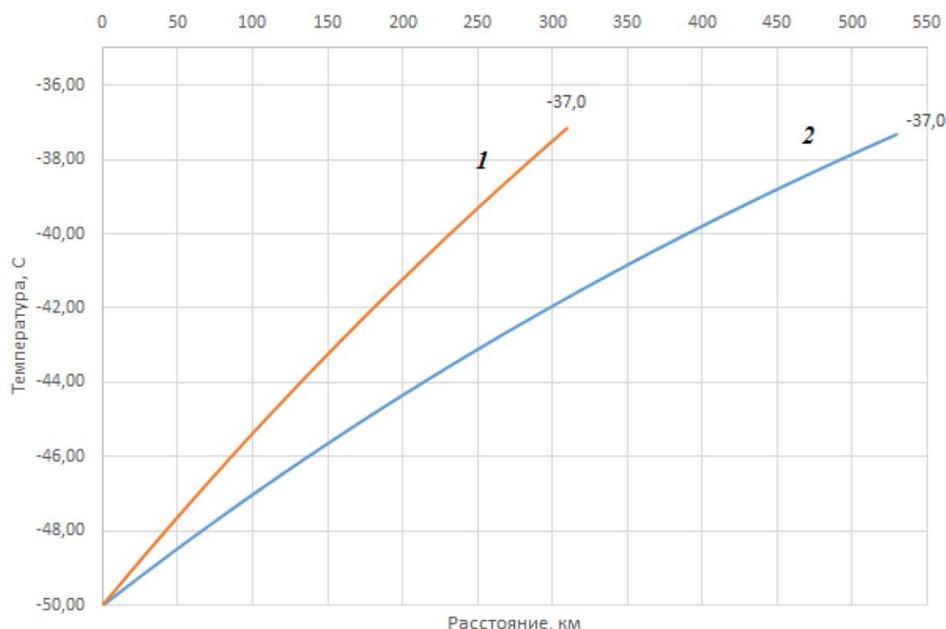


Рисунок 18 – Оценка критической длины участка трубопровода при транспортировке по трубопроводу при среднегодовой температуре грунта:
1 – без применения СОУ, 2 – с применением СОУ

Вопрос скорости рассеивания холода в грунте аккумулированного с помощью СОУ подробно не рассматривался, поэтому нельзя утверждать, что результатов работы СОУ зимой хватит, чтобы предотвратить растепление грунтов в период положительных температур в регионе прокладки трубопровода.

При анализе теоретических и экспериментальных исследований, а также патентных материалов было установлено, что для работы СОУ при положительных температурах воздуха могут применяться следующие способы [47]:

- применение компрессорно-конденсаторных агрегатов;
- применение термоэлектрических охладителей (элементов Пельтье).

В основе работы термоэлектрических генераторов холода лежит эффект Пельтье. Для реализации данного способа стимуляции работы СОУ необходимо обеспечить каждый термостабилизатор автономным источником электроэнергии. Кроме того, сами по себе элементы Пельтье обладают сравнительно низким КПД (около 5%).

Компрессорно-конденсаторные агрегаты могут иметь замкнутый контур со своим хладагентом, конденсатором и испарителем. В случае подключения таких генераторов холода необходимо предусматривать дополнительную запорную

арматуру и соединительные линии для транспорта хладагента от испарителя к агрегату и обратно [33]. Кроме того, компрессорно-конденсаторные агрегаты могут использовать для своей работы составные части СОУ (например, конденсатор, испаритель, или хладагент). Для подключения таких машин к СОУ линии для транспорта паров и жидкой фазы теплоносителя должны быть разделены. К соединительной линии, предназначенной для транспорта паров теплоносителя, подключается компрессор, а к линии для транспорта конденсатора подключается дроссель.

1.4. Цель и задачи исследования

Целью исследования является обоснование способа поддержания рабочей температуры трубопроводов при транспортировке сжиженной смеси углеводородов с газоконденсатных месторождений Восточной Сибири.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Провести аналитический обзор существующей научно-технической информации в данной области, подтвердить актуальность исследований в данной области;
2. Разработать способ регулирования температуры трубопровода для транспортировки сжиженной смеси углеводородов с газоконденсатных месторождений и устройство для его реализации;
3. Провести экспериментальные исследования ключевых параметров вихревой трубы, используемой в качестве генератора холода в предлагаемом способе;
4. Разработать методику расчёта системы регулирования температуры трубопровода для транспортировки сжиженной смеси углеводородов с газоконденсатных месторождений Восточной Сибири.

1.5. Выводы по Главе 1

Проведенный анализ научно-исследовательских работ и результатов опытно-промышленной эксплуатации позволил сделать следующие выводы:

1. Способы транспортирования углеводородов с газоконденсатных месторождений в охлажденном и сжиженном состоянии, а также в виде сжиженной смеси природного газа и газового конденсата, являются перспективным направлением исследований в области трубопроводного транспорта углеводородов;

2. Одна из основных и наиболее сложных задач при реализации технологии транспортирования углеводородов в охлажденном и сжиженном виде – поддержание температуры рабочей среды в заданном диапазоне.

3. Опытно-промышленная эксплуатация СОУ на объектах добычи, транспорта и хранения нефти и газа в условиях мерзлых грунтов с целью предотвращения их оттаивания и пучения подтвердила эффективность и экономическую целесообразность их применения.

4. На сегодняшний день не существует рабочей методики применения СОУ для поддержания температурного режима низкотемпературных трубопроводов.

5. Отсутствуют технические решения стимуляции работы СОУ в период положительных температур.

ГЛАВА 2 ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ СПОСОБА РЕГУЛИРОВАНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ТРУБОПРОВОДА ДЛЯ ТРАНСПОРТИРОВКИ ГАЗОКОНДЕНСАТНОЙ СМЕСИ

2.1. Исследование процесса теплообмена между смесью и окружающей средой. Постановка задач исследования

Классическим способом регулирования температуры охлажденных и криогенных трубопроводов с целью предотвращения нагрева рабочей среды до критической температуры является теплоизоляционное покрытие. В работе [1] проводился глубокий анализ достижений отечественных и зарубежных специалистов в данной области.

Существует несколько основных и наиболее распространённых технологических схем строительства низкотемпературных трубопроводов:

- строительство трубопровода с использованием секций с нанесенной (заводской) термоизоляции;
- сварка секций трубопровода без изоляции с последующим нанесением теплоизоляции заводского изготовления в полевых условиях;
- сварка секций трубопровода с полый гидроизоляцией с последующим заполнением теплоизоляционным материалом пространства между стенкой трубы и оболочкой в полевых условиях.

Широкое распространение в отечественной и зарубежной практике получили первые 2 способа. Теплоизоляция труб в заводских условиях осуществляется стационарными машинами с прессованием различного типа, обеспечивающим нанесение на трубы диаметром 50 – 500 мм сплошного слоя изоляции. При теплоизоляции в заводских условиях качество изоляции и скорость производства работ значительно выше.

В работе [72] был изучен иной способ охлаждения трубопроводов - использование сезонно-действующих охлаждающих устройств (СОУ). Применение СОУ наиболее широко распространено в районах Крайнего Севера - в условиях вечной мерзлоты – при стабилизации грунтов в непосредственной близости от фундаментов зданий и сооружений.

Для решения задачи термостабилизации грунтов с помощью СОУ в качестве исходных данных принимаются климатические характеристики района строительства (температура воздуха, скорость ветра), начальная температура грунта, его теплофизические параметры, а также рабочие характеристики СОУ. Сложность состоит в том, при температуре окружающего воздуха выше температуры грунта циркуляция хладагента прекращается ввиду отсутствия градиента температур между атмосферным воздухом и грунтом.

С целью стимуляции функционирования СОУ вне зависимости от температуры атмосферного воздуха предлагается использовать генераторы холода, в основе работы которых лежит вихревой эффект (эффект Ранке-Хилша). Была рассмотрена возможность использования вихревых трубок для охлаждения конденсаторной части СОУ с целью имитации зимнего времени года в рамках системы «СОУ - грунт», за счет чего можно будет создать желаемый градиент температур в требуемое время. Для этого необходимо провести расчет вихревой трубы и подобрать соответствующий компрессор, способный обеспечить потребный расход сжатого воздуха.

При решении задачи теплообмена между СОУ и грунтом в работе [54] рассматривалась система дифференциальных уравнений (5):

$$\begin{cases} c(T) \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial \left(r \lambda(T) \frac{\partial T}{\partial r} \right)}{\partial r} + \frac{\partial \left(\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial z} \right)}{\partial z}, \\ \lambda(T) \frac{\partial T}{\partial r} = K_s(v)(T - T_v(\tau)); \end{cases} \quad (5)$$

где

r, z – координаты цилиндрической системы координат,

τ – время,

$c(T)$ – эффективная объемная теплоемкость пород,

$\lambda(T)$ – коэффициент теплопроводности,

$K_s(v)$ – коэффициент теплопередачи испарителя.

На основе проведенного анализа были сформулированы основные задачи теоретического исследования:

- описать процесс передачи тепла от грунта смеси;
- рассмотреть варианты исполнения СОУ с целью подбора оптимальной для рассматриваемой ситуации конструкции;
- обосновать возможность использования вихревой трубки для обеспечения работы СОУ в любое время года.

2.2. Процесс неизотермической транспортировки смеси по трубопроводу

По теплофизическим свойствам описываемая смесь природного газа и газового конденсата подобна охлажденному природному газу (ОПГ). При определении параметров транспортирования ОПГ и СПГ в стационарных условиях требуется решить систему дифференциальных уравнений (6) [64]:

$$\begin{cases} \frac{dP}{dx} = -\frac{\xi}{2D_{\text{вн}}F^2} \nu G^2; \\ \frac{dT}{dx} = D_i \frac{dP}{dx} - \frac{\pi D_{\text{н}}}{G c_p l_{\text{п}} \frac{D_{\text{н}} + 2\delta_{\text{из}}}{2\lambda_{\text{из}}}} (T_{\text{гр}} - T), \end{cases} \quad (6)$$

где

P – давление в трубопроводе, мПа;

ξ – коэффициент гидравлического сопротивления;

ν – удельный объем, м³/кг;

T – температура рабочей среды, К;

$T_{\text{гр}}$ – температура грунта, К;

F – площадь живого сечения трубопровода, м²;

D_i – дифференциальный дроссель-эффект, К/мПа;

$D_{\text{вн}}$ – внутренний диаметр трубопровода, м;

$D_{\text{н}}$ – наружный диаметр трубопровода, м;

G – весовой расход рабочей среды, кг/с;

c_p – изобарная теплоемкость, кДж/(кг·К);

$l_{\text{п}}$ – длина участка трубопровода, м;

$\delta_{\text{из}}$ – толщина изоляции, м;

$\lambda_{\text{из}}$ – теплопроводность изоляции, Вт/(м·К).

Система уравнений замыкается уравнением состояния вида $f(P, \nu, T) = 0$, в качестве которого рекомендуется выбирать уравнение (7) Редлиха-Квонга [91]:

$$P = \frac{RT}{V - b} - \frac{a}{T^{0,5}V(V + b)}, \quad (7)$$

где

R – универсальная газовая постоянная, Дж/(моль·К);

V – мольный объем, м³/моль;

a и b – константы, определяемые в зависимости от критических температуры и давления рабочей среды.

Теплообмен между грунтом и смесью внутри трубопровода представляет собой процесс нестационарной теплопроводности, когда поле температуры в теле (в нашем случае – в смеси) изменяется не только в пространстве, но и во времени. При данном процессе смесь стремится к тепловому равновесию с окружающей средой – грунтом.

Для процесса теплопроводности в плоской, цилиндрической и шаровой стенках в работе [] было предложено обобщенное решение как при постоянном коэффициенте теплопроводности λ , так и в случае зависимости последнего от температуры.

В [72] расчет стационарного теплогидравлического режима производится с учетом следующих допущений:

- учитывается превращение работы по преодолению внутреннего трения рабочей среды в тепло, теплоотдача от трубопровода в окружающую среду, а также транспорт тепла рабочей средой;

- на плотность рабочей среды по всей длине трубопровода оказывает влияние только ее температура;
- параметры модели течения рабочей среды зависят только от температуры;
- температура грунта вокруг трубопровода принимается равной средней температуре грунта на глубине оси трубопровода [14];
- теплопередача внутри стенки трубопровода в продольном направлении при расчетах не учитывается.

Примем данные допущения при теплогидравлическом расчете трубопровода для транспортировки газоконденсатной смеси. Изначально трубопровод разбивается на участки длиной L , которая определяется на основании соблюдения по всей длине участка следующих условий из требований:

- диаметры D_2, D_3 неизменны по всей длине участка;
- на участке отсутствуют попутные сбросы/подкачки смеси, а также подключения лупингов;
- климатические факторы (температура грунта, окружающего воздуха, количество осадков) и характеристики грунтов изменяются вдоль участка незначительно.

Для определения температуры рабочей среды в конце каждого участка предлагается использовать формулу (8) Шухова-Лейбензона:

$$T_k = (T_n - T_0 - u)e^{-Шу} + T_0 + u, \quad (8)$$

где Шу – число (параметр) Шухова, определяемый по формуле (9):

$$Шу = \frac{k \cdot L}{G \cdot c_p}, \quad (9)$$

где u – поправка на нагрев смеси за счет внутреннего трения, определяемая по формуле (10):

$$u = \frac{4 \cdot G}{\rho \cdot \pi D_1^2}. \quad (10)$$

Коэффициент теплопередачи k от транспортируемой смеси к цилиндрической поверхности стенки, контактирующей с окружающей средой, может быть выражен формулой (11):

$$k = \frac{\pi}{\frac{1}{\alpha_1 \cdot D_1} + \frac{R}{2} + \frac{1}{\alpha_2 \cdot D_3}}. \quad (11)$$

Общее термическое сопротивление R (стенки трубы, антикоррозионной теплоизоляции и тепловой изоляции) определяется по формуле (4). Основной задачей при определении коэффициента теплопередачи k является определение α_1 и α_2 - коэффициентов внутренней и внешней теплоотдачи соответственно.

Коэффициент внутренней теплоотдачи α_1 для низкотемпературных трубопроводов характеризует скорость теплоотдачи от внутренней стенки трубопровода рабочей среде и определяется по формуле (12):

$$\alpha_1 = \frac{\lambda \cdot Nu}{D_1}. \quad (12)$$

Соотношение между интенсивностью теплообмена за счёт конвекции и интенсивностью теплообмена за счёт теплопроводности (число Нуссельта Nu) определяется по формулам (13) - (15) в зависимости от числа Рейнольдса Re для конкретного режима течения рабочей среды:

$$Nu = 0,17 \cdot Re^{0,33} \cdot Pr^{0,43} \cdot Gr^{0,1} \text{ при } Re \leq 2000, \quad (13)$$

$$Nu = Pr^{0,43} \left(2,09 \cdot Gr^{0,1} + \frac{32,29 - 2,09 \cdot Gr^{0,1}}{8000} (Re - 2000) \right) \text{ при } 2000 \leq Re \leq 10^4, \quad (14)$$

$$Nu = 0,021 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,43} \text{ при } Re \geq 10^4. \quad (15)$$

Коэффициент внешней теплоотдачи α_2 для низкотемпературных трубопроводов характеризует скорость теплоотдачи от воздуха к наружной поверхности (с учетом тепловой изоляции), и определяется по формуле (16) Форхгеймера-Власова [82]:

$$\alpha_2 = \frac{2\lambda_{\text{гр}}}{D_2 \ln \left(\frac{2h_0}{D_2} + \sqrt{\left(\frac{2h_0}{D_2}\right)^2 - 1} \right)}, \quad (16)$$

где h_0 - приведенная глубина залегания оси трубопровода, определяемая по формулам (17) или (18) в зависимости от наличия снежного покрова на поверхности грунта:

- при отсутствии снежного покрова на поверхности грунта:

$$h_0 = h + \frac{\lambda_{\text{гр}}}{\alpha_{\text{в}}}, \quad (17)$$

- при наличии снежного покрова на поверхности грунта:

$$h_0 = h + \frac{\lambda_{\text{гр}}}{\alpha_{\text{в}}} + h_{\text{сн}} \frac{\lambda_{\text{гр}}}{\lambda_{\text{сн}}}. \quad (18)$$

Коэффициент теплоотдачи от поверхности почвы (снега) $\alpha_{\text{в}}$ в воздух определяется в зависимости от скорости ветра (рисунок 19).

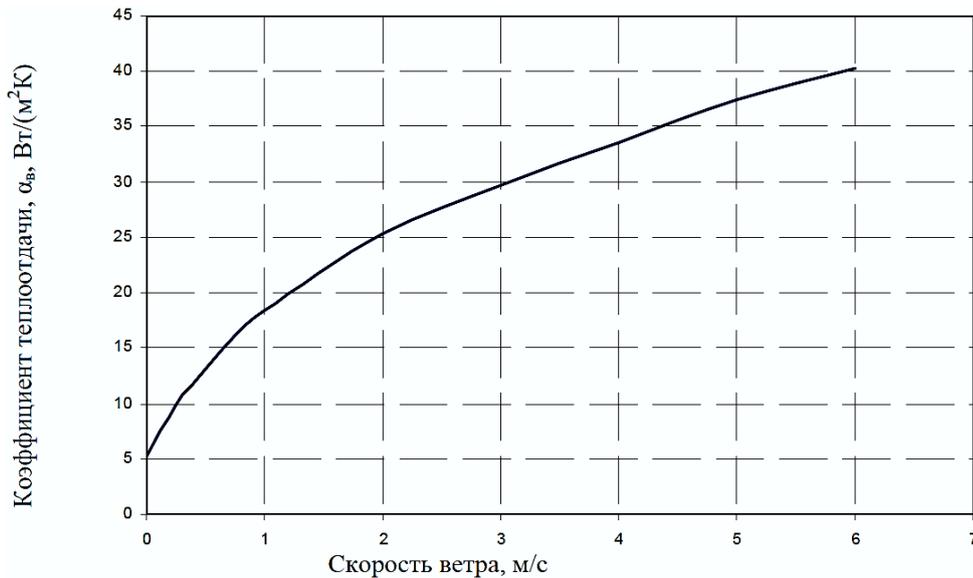


Рисунок 19 - Коэффициент теплоотдачи α_v от поверхности грунта (снега) в воздух

При малых заглублениях трубопровода ($h_0/D_n < 3...4$) рекомендуется пользоваться формулой (19) Аронса-Кутателадзе [82]:

$$\alpha_2 \approx \frac{2\lambda_{тр}}{D_2 \ln \left[4 \cdot \left(\frac{D_2}{D_2} + \frac{1}{Nu} \right) \right]} \cdot \quad (19)$$

В результате определен алгоритм расчета стационарного теплогидравлического режима трубопровода для транспортировки газоконденсатной смеси.

2.3. Подбор сезонно-действующих охлаждающих устройств для поддержания температуры смеси в трубопроводе

Для оценки степени влияния СОУ на транспортируемую смесь необходимо решить следующие задачи:

- рассмотреть различные типы СОУ, применяемые на объектах нефтегазовой отрасли. Провести и обосновать подбор типа СОУ для охлаждения грунта вокруг трубопровода;

– определить алгоритм расчета СОУ для охлаждения грунта вокруг трубопровода и методику расстановки СОУ вдоль трассы трубопровода для обеспечения требуемого эффекта охлаждения грунта;

– определить скорость оттаивания грунта в летний период.

Основные виды сезонно-действующих охлаждающих устройств, применяемых на объектах нефтегазовой отрасли:

- одиночные (индивидуальные) устройства;
- естественно-действующие системы (ГЕТ и ВЕТ);
- специальные (глубинные) устройства.

Индивидуальные СОУ актуальны при стабилизации талых пород в основании фундаментов инженерных сооружений и зданий. Их основная задача – повысить прочностные характеристики грунта на сравнительно небольшой площади и глубине (рисунок 20).

Индивидуальное СОУ представляет собой герметичную неразъемную сварную конструкцию, внутри которой находится хладагент, с подземной и надземной частями. Индивидуальные СОУ устанавливаются вертикально, либо наклонно под углом 10-15 градусов к нормали на расстоянии не более нескольких метров от целевого объекта – здания, сооружения или конструкции, основание которой необходимо обезопасить от снижения несущей способности.



Рисунок 20 - Индивидуальные СОУ, расположенные вдоль трассы нефтепровода «Ванкор - Пурпе» [42]

Система ГЕТ (рисунок 21) несколько сложнее, чем индивидуальные СОУ. ГЕТ системы применяются в случае необходимости укрепления грунтов под группой зданий или сооружениями большой площадью. Такая система состоит из двух основных компонентов:

1. Системы охлаждающих трубопроводов, за счет которых осуществляется теплообмен с грунтом на большой площади;
2. Блока конденсации.



Рисунок 21 – Система ГЕТ на Ванкорском НГМ [42]

Ключевое различие между системами ГЕТ и ВЕТ в том, что конструкция системы ВЕТ состоит из системы охлаждающих трубопроводов, расположенных вертикально (рисунок 22).



Рисунок 22 - Системы ВЕТ в основании технологической обвязки трубопроводов ДКС на Заполярном НГКМ [42]

Глубинные СОУ (рисунок 23) по своей конструкции и исполнению очень похожи на индивидуальные, и отличаются лишь целевой глубиной замораживания

грунта: испарительная часть глубинных СОУ может находиться на глубине порядка 100 м ниже уровня поверхности. Такие СОУ используются при стабилизации грунтов на больших глубинах, например, в основании плотин.

Исходя из обзорного анализа существующих систем стабилизации грунтов, при использовании СОУ на линейной части трубопроводов целесообразнее применять индивидуальные СОУ ввиду сравнительно небольшой ширины охлаждаемого коридора грунта и небольшой глубины заложения трубопровода (не более 2,5 метров по нижней образующей), а также простоты монтажа и эксплуатации по сравнению с другими типами СОУ.



Рисунок 23 - Одиночные глубинные СОУ на плотине на р. Ирелях (г. Мирный)
[42]

По принципу циркуляции хладагента индивидуальные СОУ классифицируют на установки с естественной и принудительной циркуляцией хладагента, а по агрегатному состоянию хладагента - на воздушные, жидкостные и парожидкостные (рисунок 24).

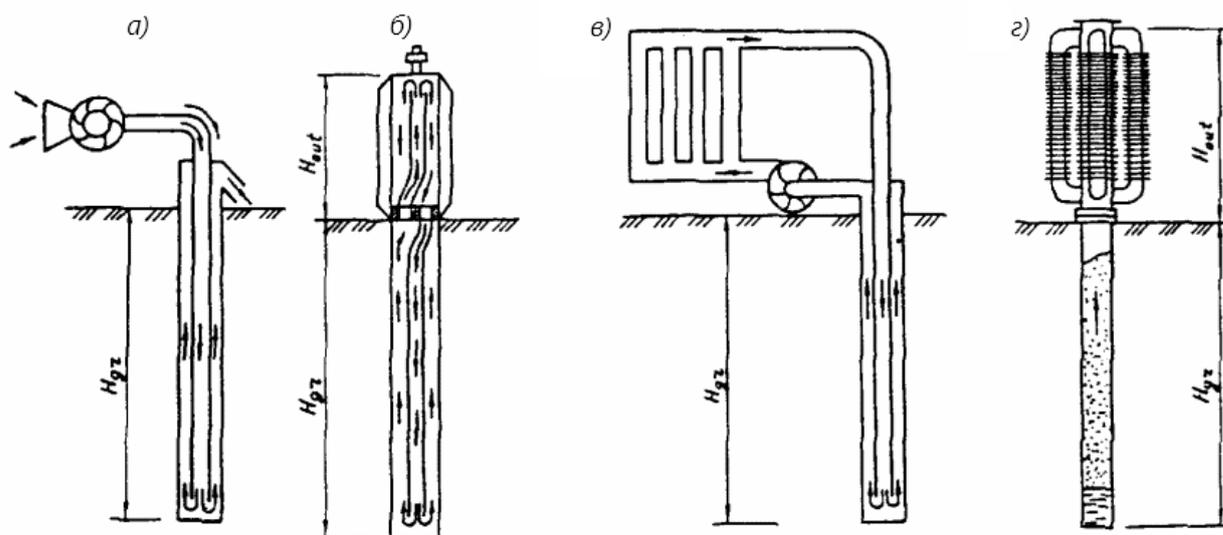


Рисунок 24 - Принципиальные схемы основных видов СОУ:
 а – воздушное с принудительной циркуляцией воздуха, б – жидкостное с естественной конвекцией теплоносителя, в – жидкостное с принудительной циркуляцией теплоносителя, г – парожидкостное [40]

Жидкостные СОУ чаще изготавливают в двухтрубном исполнении из труб разного диаметра, соединённых в замкнутую систему, в которой происходит циркуляция рабочей жидкости-хладагента (керосина). В трубе меньшего диаметра керосин охлаждается быстрее, чем в трубе большего диаметра, в связи с чем его плотность в тонкой трубе больше. Это и является причиной циркуляции керосина в холодный период года: по тонкой трубе - вниз, по трубе большего диаметра - вверх. В летний период охлаждённый керосин находится в нижней части установки и плотность его здесь больше, чем в верхней, более нагретой части, в результате чего установка из теплообмена автоматически отключается.

Парожидкостные устройства могут работать без энергетических затрат в процессе эксплуатации и являются наиболее эффективными и надёжными СОУ. В парожидкостном устройстве свободная конвекция теплоносителя, находящегося в двухфазном состоянии, сопровождается процессами испарения в нижней грунтовой части устройства и конденсации в верхней – воздушной [3].

Парожидкостные устройства являются наиболее эффективными термостабилизаторами, так как обеспечивают высокую интенсивность внутренних процессов теплообмена. Однако в сложном процессе передачи тепла от грунта к

атмосфере лимитирующими являются процессы теплообмена с воздухом и теплопроводности в грунтовом массиве. При этом интенсивность внутреннего теплопереноса парожидкостного устройства не является определяющей, а различные типы парожидкостных теплоносителей становятся конкурентоспособными [12].

Для организации направленного движения теплоносителя могут применяться теплообменные контуры с естественной циркуляцией. Движение теплоносителя по циркуляционному контуру СОУ с естественной циркуляцией осуществляется вследствие разности плотностей парожидкостной смеси в обогреваемой (подъемной) части контура и жидкой фазы в необогреваемой или слабообогреваемой (опускной) части [32].

В результате обоснован выбор типа сезонно-действующих охлаждающих устройств для поддержания рабочей температуры трубопровода газоконденсатной смеси в рабочем состоянии.

2.4. Определение характеристик вихревой трубы для обеспечения работы СОУ в летнее время года

Принципиальная схема вихревой трубы и схема температурного разделения потока воздуха в вихревой трубке представлены на рисунках 25 и 26 соответственно.

Вихревая труба представляет собой гладкую цилиндрическую трубу 1, снабженную тангенциальным соплом 2, улиткой 3, диафрагмой 4 с осевым отверстием и дросселем 5. При втекании газа через сопло образуется интенсивный круговой поток, приосевые слои которого заметно охлаждаются и отводятся через отверстие диафрагмы в виде холодного потока, а периферийные слои подогреваются и вытекают через дроссель в виде горячего потока. По мере прикрытия дросселя общий уровень давления в вихревой трубе повышается и расход холодного потока через отверстие диафрагмы увеличивается при соответствующем уменьшении расхода горячего потока. При этом температуры холодного и горячего потоков также изменяются [39].

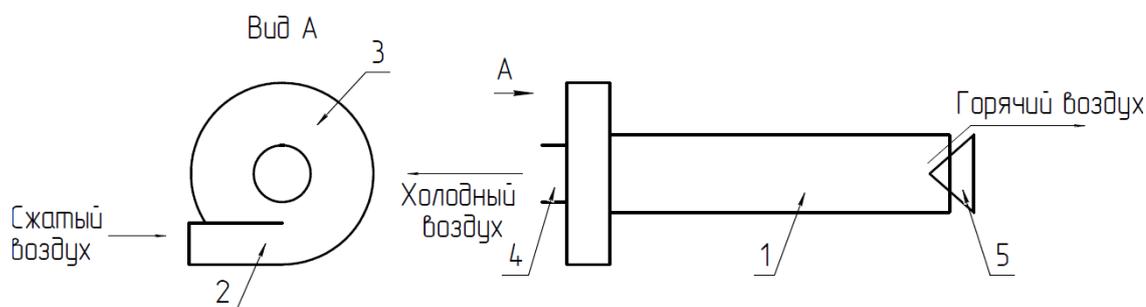


Рисунок 25 - Принципиальная схема трубки Ранка:
1 - труба, 2 - сопло, 3 - улитка, 4 - диафрагма, 5 – дроссель



Рисунок 26 – Схема температурного разделения потока воздуха в вихревой трубке

Первым условием возникновения вихревого эффекта в трубе является наличие в ней вращающегося потока. Движение потока внутри трубы по вращающейся траектории достигается за счет особого ввода газа через штуцер, или сопло, которое должно быть расположено под углом к внутренней поверхности вихревой зоны трубы [23]. При истечении из сопла поток газа с большой скоростью входит в трубу по касательной к внутренней поверхности трубы. Двигаясь по периферии внутренней поверхности трубы, газ приобретает вращательное движение, которое характеризуется как линейной скоростью – вдоль трубы - так и тангенциальной скоростью относительно оси вращения потока, которая совпадает с осью цилиндрической вихревой зоны трубы. Тангенциальные скорости изменяются в двух направлениях: уменьшаются от периферии к центру и от плоскости сечения сопла к выходу из трубы [9].

Вторым условием работы вихревой трубы является отделение части общего потока газа и ее отвод из трубы. Для этого в днище трубы предусматривается выходное отверстие - диафрагма, а на выходе из трубы устанавливается регулируемый конус. За счет передвижения конуса относительно края трубы изменяется зазор и, как следствие, гидравлическое сопротивление на выходе газа. При уменьшении зазора увеличивается давление в трубе, в результате чего центральная часть газового потока выходит через диафрагму. Меняя проходное сечение зазора, можно регулировать распределение долей газа, выходящего через диафрагму и через дроссель. Между внутренним (центральным) и внешним (периферийным) слоями происходит перераспределение энергии в результате выравнивания термодинамических температур (турбулентного теплообмена) и перестройки поля скоростей (отвод кинетической энергии от внутреннего потока к внешнему с изменением тангенциальных скоростей) [30,34].

Основными характеристиками вихревой трубы являются необходимая температура холодного потока T_x его холодопроизводительность Q_x для охлаждения грунта около трубопровода до требуемой температуры. При этом давление холодного потока p_x обычно принимается равным атмосферному. Часовое количество отводимого холодным потоком тепла в килокалориях рассчитывается по формуле (20) [46]:

$$Q_x = 0,86 \cdot L_v, \quad (20)$$

где L_v - теплота начала таяния (замерзания) грунта, принимаемая равной количеству теплоты, необходимой для таяния льда (замерзания воды) в единице объема грунта. Значение L_v определяется по формуле (21) [14]:

$$L_v = L_0(w_{tot} - w_w)\rho_d, \quad (21)$$

где:

L_0 – удельная теплота фазовых превращений вода-лед в расчете на единицу массы,

w_{tot} – суммарная влажность грунта,

w_w – влажность грунта за счет не замерзшей воды,

ρ_d – плотность сухого грунта.

Влажность грунта за счет не замерзшей воды w_w определяется опытным путем, и для мерзлых незасоленных грунтов определяется по формуле (22) [26]:

$$w_w = k_w w_p, \quad (22)$$

где:

k_w – коэффициент пластичности грунта, зависящий от температуры грунта и числа пластичности $I_p = w_p - w_w$,

w_p – нижний предел пластичности грунта.

Суммарная влажность грунта w_{tot} определяется по формуле (23) [26]:

$$w_{tot} = w_i + w_m, \quad (23)$$

где:

w_i – влажность мерзлого грунта за счет ледяных прослоев, включений и линз,

w_m – влажность мерзлых минеральных прослоек, складывающаяся за счет влажности грунта за счет порового льда и незамерзшей воды.

Весовой расход холодного потока G_x определяется по формуле (24) [46]:

$$G_x = \frac{Q_x}{c_p \cdot \Delta t_x}; \quad (24)$$

Потребный эффект охлаждения потока воздуха является основополагающей величиной, характеризующей фактическую эффективность работы вихревой трубы, и определяется по формуле (25):

$$\Delta t_x = T_1 - T_x, \quad (25)$$

где T_1 – температура входящего сжатого воздуха.

По формуле (26) определяется потребный расход сжатого воздуха G :

$$G = \frac{Q_x}{\mu \cdot c_p \cdot \Delta t_x}, \quad (26)$$

где μ - относительный весовой расход холодного потока воздуха, определяемый по формуле (27):

$$\mu = \frac{G_x}{G}. \quad (27)$$

Первоначальная формула (28) нахождения площади входного сопла F_c записывается в виде:

$$F_c = \frac{G \sqrt{T_1^*}}{p_1^* \cdot a_c} \cdot \sqrt{\frac{R}{g}} \cdot \left(\frac{k+1}{2} \right)^{\frac{k+1}{(k-1)2}} \cdot 100. \quad (28)$$

Для воздуха формула (28) приводится к виду (29):

$$F_c = \frac{G \sqrt{T_1^*}}{0,38 \cdot p_1^*} \cdot 100. \quad (29)$$

Диаметр вихревой трубы определяется по формуле (30):

$$D = 3,65 \sqrt{F_c}. \quad (30)$$

Фактический эффект охлаждения может отличаться от расчетного ввиду поправки на влажность воздуха в вихревой трубе, которая может быть определена по формуле (31):

$$(\Delta t_x)_{\text{влажн}} = \Delta t_x + \delta(\Delta t_x), \quad (31)$$

где $\delta(\Delta t_x)$ - поправка на влажность, рассчитываемая по формуле (32) исходя из влажности газа φ в процентах, давления насыщенного пара p_{s1} и давления сжатого воздуха на входе p_1^* :

$$\delta(\Delta t_x) = 18 \cdot \frac{p_{s1}}{p_1^*} \cdot (\varphi\%) \quad (32)$$

Потребная температурная эффективность определяется по формуле (33):

$$\eta_D = \frac{\Delta t_x}{T_1^* \cdot \left[1 - \left(\frac{1}{\pi} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]}, \quad (33)$$

Где π – располагаемая степень расширения воздуха в вихревой трубе, описываемая формулой (34):

$$\pi = \frac{p_1^*}{p_x}. \quad (34)$$

Поправка на масштаб определяется по формуле (35):

$$\Delta\eta = 0,005 \cdot (D - 33). \quad (35)$$

С учетом поправки на масштаб необходимая температурная эффективность определяется по формуле (36):

$$\eta = \Delta\eta + \eta_D . \quad (36)$$

Однако, как показали экспериментальные исследования Хилша, Мартыновского и Алексева [46], поправку на масштаб необходимо учитывать лишь при диаметре вихревых трубок менее 33 мм. При диаметре больше данного эффект охлаждения увеличивается незначительно, поэтому данной поправкой можно пренебречь.

Высота и ширина входного сопла определяются по формулам (37) и (38), исходя из площади поперечного сечения:

$$h = \sqrt{\frac{F_c}{2}} , \quad (37)$$

$$b = \frac{F_c}{h} . \quad (38)$$

Ключевыми параметрами вихревой зоны является ее длина, определяемая по формуле (39):

$$L = 9 \cdot D , \quad (39)$$

и диаметр отверстия диафрагмы, определяемый по формуле (40)

$$D_d = (0,350 + 0,313\mu) \cdot D . \quad (40)$$

Таким образом, основными теплофизическими характеристиками вихревой трубы, выраженными формулами (41) и (42), являются:

1. Эффект охлаждения холодного потока Δt_x :

$$\Delta t_x = \eta T_1^* \cdot \left[1 - \left(\frac{1}{\pi} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]; \quad (41)$$

2. Количество тепла, переданного от холодного потока к горячему для 1 кг воздуха – удельная холодопроизводительность:

$$q_x = \mu \cdot c_p \cdot \Delta t_x = \eta \cdot T_1^* \cdot \left[1 - \left(\frac{1}{\pi} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]; \quad (42)$$

При разработке математической модели процесса теплообмена в системе «смесь – грунт – СОУ – атмосфера» нам требуется определить потребную температуру холодного потока T_x . Для этого выразим ее из уравнения (33) и упростим, приведя к виду (43):

$$T_x = T_1 - \eta \cdot T_1^* \cdot \left[1 - \left(\frac{1}{\pi} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]; \quad (43)$$

2.5. Выводы по Главе 2

1. Определен алгоритм расчета стационарного теплогидравлического режима трубопровода для транспортировки газоконденсатной смеси.
2. Обоснован выбор типа сезонно-действующих охлаждающих устройств для поддержания температуры трубопровода газоконденсатной смеси в рабочем диапазоне.
3. Предложено и обосновано техническое решение вопроса обеспечения работы СОУ в летнее время года.

4. Произведен расчет вихревой трубы для обеспечения требуемых рабочих характеристик СОУ при охлаждении трубопровода для транспортировки газоконденсатной смеси.

ГЛАВА 3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА РАБОТЫ ВИХРЕВОЙ ТРУБКИ ПО ОБЕСПЕЧЕНИЮ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СЕЗОННО-ДЕЙСТВУЮЩЕГО ОХЛАЖДАЮЩЕГО УСТРОЙСТВА

3.1. Разработка технологической схемы и подготовка стенда для проведения экспериментальных исследований

Для подтверждения правильности определения методики расчета вихревой трубки с целью обеспечения функционирования сезонно-действующего охлаждающего устройства проводились экспериментальные исследования с использованием прототипа вихревой трубки. Схема экспериментальной установки представлена на рисунке 27.

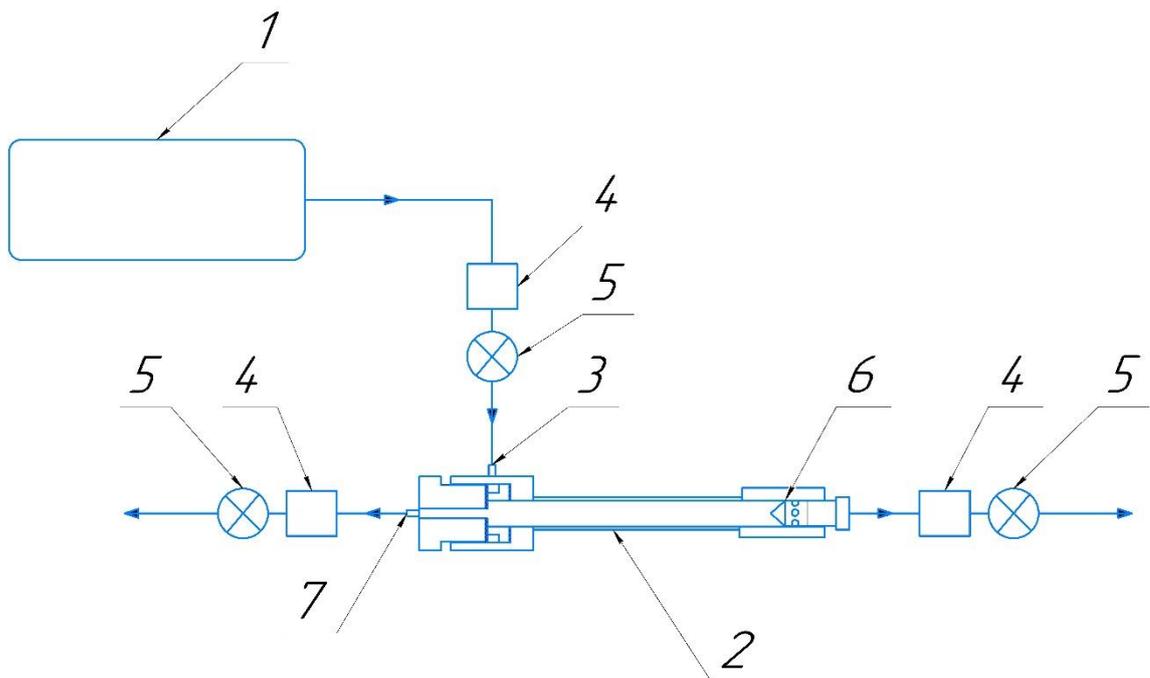


Рисунок 27 – Схема экспериментальной установки:

1 – компрессор, 2 – вихревая трубка, 3 – входной штуцер, 4 – термометры, 5 – расходомеры, 6 – дроссель, 7 – штуцер «холодного» отвода

Установка работает следующим образом. После сжатия компрессором 1 воздух подается в вихревую трубку 2 через входной штуцер 3, при этом измеряются фактический расход и температура воздуха с помощью термометра 4 и расходомера 5. Воздух проходит через завихритель и попадает в корпус вихревой

трубки, где происходит закручивание потока воздуха в направлении дросселя 6. Через открытый дроссель 6, степень открытия которого регулируется вручную, по периферии выходит нагретый воздух, а через штуцер 7 – охлажденный воздух. Температура и расход обоих потоков фиксируются с помощью термометров 4 и расходомеров 5 соответственно. Место проведения экспериментальных исследований и внешний вид установки представлена на рисунках 28 и 29 соответственно. Опытный образец вихревой трубки в собранном и разобранном виде представлена на рисунках 30 и 31 соответственно. Устройство опытного образца вихревой трубки представлено на рисунке 32. Характеристики опытного образца вихревой трубки представлены в таблице 4.



Рисунок 28 – Место проведения экспериментальных исследований



Рисунок 29 – Установка для проведения экспериментальных исследований опытного образца вихревой трубки



Рисунок 30 – Опытный образец вихревой трубки в собранном виде



Рисунок 31 – Опытный образец вихревой трубки в разобранном виде:
 1 – гайка «холодного» отвода со штуцером, 2 – корпус, 3 – труба, 4 – завихритель спиральный шестиканальный, 5 – завихритель прямой четырёхканальный, 6 – завихритель спиральный четырёхканальный, 7 – входной штуцер, 8 – дроссель, 9 – корпус «горячего» отвода

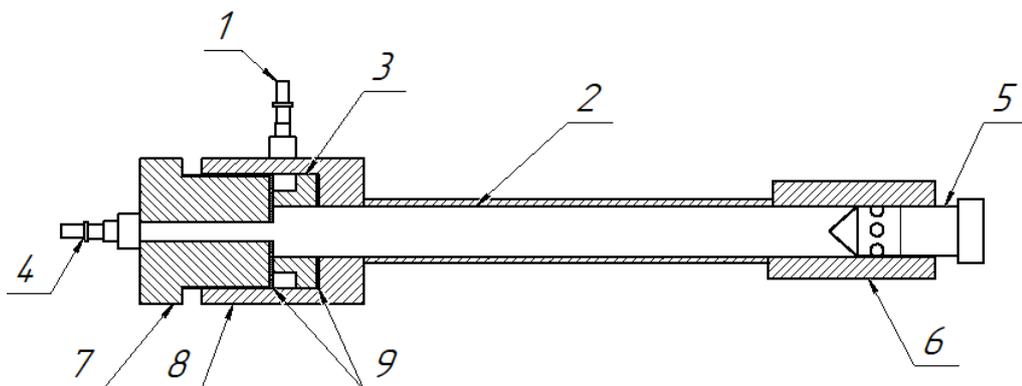


Рисунок 32 – Устройство опытного образца вихревой трубки:
 1 – входной штуцер, 2 – труба, 3 – завихритель, 4 – «холодный» отвод, 5 – дроссель, 6 – корпус «горячего» отвода, 7 - гайка «холодного» отвода, 8 – корпус, 9 – уплотнительные кольца

Таблица 4 – Характеристики опытного образца вихревой трубки

Характеристика	Единицы измерения	Значение
Длина трубки (внутр.)	мм	165
Диаметр трубки (внутр.)	мм	15,9
Ширина сопла	мм	5,2
Высота сопла	мм	5,2
Диаметр диафрагмы	мм	6,2

Экспериментальные исследования проводились на базе Завода Высоковольтных Электронных Компонентов «Прогресс» (ООО «ЗВЭК «Прогресс»), расположенного в пгт. Водный, г. Ухта, Республика Коми в период с 4 по 6 ноября 2019 года на основании методики, разработанной с учетом [14,55].

При проведении исследований для подачи сжатого воздуха использовалась компрессорная установка С416М (рисунок 33). Исследования проводились с использованием завихрителей 3 типов для определения предпочтительной конструкции, обеспечивающей наилучшую холодопроизводительность и эффект охлаждения. При проведении исследований для подачи сжатого воздуха использовалась компрессорная установка С416М (рисунок 33). Технические характеристики компрессорной установки С416М представлены в таблице 5.



Рисунок 33 - Компрессорная установка С416М

Таблица 5 – Технические характеристики компрессорной установки С416М

Характеристика	Единицы измерения	Значение
Производительность	л/мин	1100
Мощность	кВт	11
Объем ресивера	л	430
Давление макс.	МПа	1,0
Давление рабочее	МПа	0,6

3.2. Методика проведения экспериментального исследования

Методика проведения исследования составлялась с учетом [13]. Регулируемыми факторами являются:

- 1) Расход воздуха (производительность) G на входе в вихревую трубку, регулируемые с помощью выходного крана компрессора;
- 2) Относительный расход холодного воздуха μ , регулируемый с помощью дросселя на «горячем» конце трубки.

Ключевым моментом при проведении анализа является определения критерия эффективности, которым в данном случае является создаваемый вихревой трубкой перепад температур. В литературе данный параметр вихревых трубок называется эффект охлаждения потока Δt_x и описывается формулой (25):

Данный параметр был взят в качестве критерия эффективности вместо холодопроизводительности Q_x в связи с тем, что источником охлаждения является не сама трубка, а термостабилизатор грунта. Трубка используется для создания отрицательной температуры в области конденсаторной части термостабилизатора. Поэтому в ходе проведения исследований определялась температура охлажденного воздуха T_x . Исходя из заданных условий устанавливаем, что температура $T_x = f(G, \mu)$.

Была проведена серия экспериментов с учетом нелинейности искомых зависимостей и взаимодействия факторов, т.е. полный факторный эксперимент (ПФЭ) [61]. Анализ литературы по результатам исследований зависимости температуры охлажденного воздуха на выходе из вихревой трубки от общего

расхода воздуха и относительного расхода воздуха показал, что данная зависимость носит нелинейный характер.

На основании вышеизложенного в качестве математической модели исследуемого процесса было принято решение использовать полином второй степени с варьированием факторов на трех уровнях. Таким образом, количество опытов определяется $N = 3^n = 3^2 = 9$, где n – число факторов, каждый из которых принимает верхнее, среднее и нижнее значение [26,37].

Для увеличения точности определяемой зависимости исследуемые диапазоны расхода G и относительного расхода холодного воздуха μ были разбиты на 4 равных участка (таблица 6).

Таблица 6 – Исследуемые диапазоны расхода и относительного расхода

№ участка построения зависимости	1	2	3	4
G , л/сек	2 ÷ 6	6 ÷ 10	10 ÷ 14	14 ÷ 18
μ	0,1 ÷ 0,3	0,3 ÷ 0,5	0,5 ÷ 0,7	0,7 ÷ 0,9

Для каждого участка определялась температура входящего сжатого газа из компрессора и на протяжении всей серии экспериментов составляла $T_0 = (17,9... 18,1)$ °С, и с учетом малого отклонения принималась равной 18 °С. Данная температура определялась как термодинамическая температура с поправкой на эффект торможения по формуле (44) [35]:

$$t = t_0 - \frac{\omega^2}{2c_p}, \quad (44)$$

где:

t_0 – температура торможения, получаемая фактически при измерении температуры потока воздуха;

ω - скорость потока воздуха;

c_p – теплоемкость воздуха.

Модель эксперимента в кодированном масштабе для 2-х факторов будет иметь вид (45) [25]:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_{12}x_1x_2 + b_{11}z_1 + b_{22}z_2 + b_{112}z_1x_2 + b_{122}z_2x_1 + b_{1122}z_1z_2, \quad (45)$$

где x_j – линейная, а z_j – квадратичная функции от X_j - значения факторов в натуральном масштабе (x_1 – расход сжатого воздуха G, л/сек, x_2 – относительный расход холодного воздуха μ), b_j – коэффициенты полинома регрессионной зависимости. Условия эксперимента, поставленного для построения модели, представлены в таблице 7.

Таблица 7 – Условия проведения эксперимента

Фактор	Значения факторов в натуральном масштабе на каждом участке, X_j				Коды уровней, F_j	Значения линейных и квадратичных факторов в кодовом масштабе	
	1	2	3	4		x_j	z_j
G, л/сек	2	6	10	14	0	-1	1
	4	8	12	16	1	0	-2
	6	10	14	18	2	1	1
μ	0,1	0,3	0,5	0,7	0	-1	1
	0,2	0,4	0,6	0,8	1	0	-2
	0,3	0,5	0,7	0,9	2	1	1

Кодовое значение линейных факторов определялось по формуле (46) [25]:

$$x_j = K_j(X_j + A_j), \quad (46)$$

где A_j – среднее значение фактора в натуральном масштабе, определяемое по формуле (47) [25]:

$$A_j = -\frac{\sum_{j=1}^N X_j}{N}, \quad (47)$$

Кодовое значение квадратичных факторов определялось по формуле (48):

$$z_j = K_j'(x_j^2 + a_j x_j + c_j), \quad (48)$$

где a_j и c_j – коэффициенты квадратичного уравнения, определяемые по формулам (49) и (50):

$$a_j = -\frac{\sum_{j=1}^N x_j^3}{\sum_{j=1}^N x_j^2}, \quad (49)$$

$$c_j = -\frac{\sum_{j=1}^N x_j^2}{N}, \quad (50)$$

Значения коэффициентов K_j и K_j' подбирались таким образом, чтобы x_j и z_j представляли собой небольшие целые числа. Удобнее всего для разных факторов их выбирать разными. Значение K_j рассчитывалось по формуле (51):

$$K_j = \frac{2}{X_{jmax} - X_{jmin}}, \quad (51)$$

Формулы кодирования факторов и расширенная матрица планирования эксперимента представлены в таблицах 8 и 9 соответственно.

Таблица 8 – Формулы кодирования факторов на исследуемых участках

Фактор	№ участка			
	1	2	3	4
G	$x_1 = \frac{1}{2}(Xi - 4)$ $z_1 = 3(x_1^2 - \frac{2}{3})$	$x_1 = \frac{1}{2}(Xi - 8)$ $z_1 = 3(x_1^2 - \frac{2}{3})$	$x_1 = \frac{1}{2}(Xi - 12)$ $z_1 = 3(x_1^2 - \frac{2}{3})$	$x_1 = \frac{1}{2}(Xi - 16)$ $z_1 = 3(x_1^2 - \frac{2}{3})$
μ	$x_2 = \frac{1}{0,1}(Xj - 0,2)$ $z_2 = 3(x_2^2 - \frac{2}{3})$	$x_2 = \frac{1}{0,1}(Xj - 0,4)$ $z_2 = 3(x_2^2 - \frac{2}{3})$	$x_2 = \frac{1}{0,1}(Xj - 0,6)$ $z_2 = 3(x_2^2 - \frac{2}{3})$	$x_2 = \frac{1}{0,1}(Xj - 0,8)$ $z_2 = 3(x_2^2 - \frac{2}{3})$

Таблица 9 – Расширенная матрица планирования эксперимента

№ опыта	Коды уровней		Кодовые значения факторов								
	F_1	F_2	x_0	x_1	x_2	$x_1 x_2$	z_1	z_2	$z_1 x_2$	$x_1 z_2$	$z_1 z_2$
1	0	0	1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	-1
2	1	0	1	0	-1	0	-2	1	-2	0	2
3	2	0	1	1	-1	1	1	1	1	1	-1
4	0	1	1	-1	0	0	1	-2	-2	2	0
5	1	1	1	0	0	0	-2	-2	4	0	0
6	2	1	1	1	0	0	1	-2	-2	-2	0
7	0	2	1	-1	1	-1	1	1	1	-1	1
8	1	2	1	0	1	0	-2	1	-2	0	-2
9	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1
$\sum x_j^2$			9	6	6	4	18	18	36	12	12

По матрице планирования были проведены экспериментальные исследования зависимости температуры охлажденного воздуха T_x от расхода воздуха G и относительного расхода холодного воздуха μ . Результаты исследований внесены в таблицу 10.

Таблица 10 – Экспериментальные значения T_x

№ опыта	$T_x, ^\circ\text{C}$			
	Номера исследуемых участков			
	1	2	3	4
1	16,6	7,4	0,7	0,5
2	11,1	5,2	-0,1	0,3
3	7,8	3,0	1,4	0,0
4	16,1	6,9	-2,5	3,7
5	10,9	3,9	-2,9	3,3
6	7,6	1,7	-2,0	2,8
7	15,6	4,5	1,5	6,3
8	10,7	2,2	1,0	6,0
9	7,4	0,7	0,5	5,9

Поскольку матрица проведения эксперимента ортогональна, Коэффициенты b_j математической модели рассчитывались по формуле (52) [25]:

$$b_i = \frac{\sum_{j=1}^N x_j y_j}{\sum_{j=1}^N x_j^2}, \quad (52)$$

Полученные математические модели для каждого участка представлены в таблице 11.

Таблица 11 – Зависимости исследуемых участков в кодовом масштабе

№ участка	Полученная зависимость в кодовом масштабе
1	$y_1 = 11,53 - 4,25x_1 - 0,3x_2 + 0,15x_1x_2 + 0,31667z_1 - 0,05z_1x_2$
2	$y_2 = 3,9444 - 2,333x_1 - 1,3667x_2 - 0,15x_1x_2 + 0,0889z_1 - 0,111z_2 + 0,0667z_1x_2 + 0,18333z_2x_1 - 0,0222z_1z_2$
3	$y_3 = -0,26667 + 0,0333x_1 + 0,16667x_2 - 0,425x_1x_2 - 0,2z_1 + 1,1z_2 - 0,19167z_1x_2 - 0,10833z_2x_1 - 0,00833z_1z_2$
4	$y_4 = 3,2 - 0,3x_1 + 2,9x_2 + 0,025x_1x_2 - 0,0333z_2 + 0,025z_1x_2 + 0,075z_2x_1 + 0,00833z_1z_2$

После определения коэффициентов регрессии по формуле была определена их статистическая значимость. Абсолютная величина коэффициентов должна быть в t_{α, f_1} больше, чем ошибка его определения, что описывается формулой (53) :

$$|b_j| = t_{\alpha, f_1} S_b, \quad (53)$$

где t_{α, f_1} – критерий Стьюдента для уровня значимости $\alpha = 0,05$ и $f_1 = n_0 - 1$ число степеней свободы, S_b – дисперсия коэффициентов регрессии, определяемая по формуле (54):

$$S_b^2 = \frac{S_y^2}{N}, \quad (54)$$

Для расчета дисперсии воспроизводимости S_y^2 были проведены дополнительные опыты в центре эксперимента (таблица 12). Дисперсия воспроизводимости определялась по формуле (55):

$$S_y^2 = \frac{\sum_1^{n_0} (y_{0g} - y_{0cp})^2}{n_0 - 1}, \quad (55)$$

где y_{0g} – результат повторного опыта в центре плана, y_{0cp} – среднее арифметическое значение параметра по данным $n_0 = 6$ дублей центрального опыта.

Затем оценивалась статистическая значимость коэффициентов регрессии для каждого участка (таблица 13).

Таблица 12 – Результаты дублирования опытов в центре плана

№ опыта	$T_x, ^\circ\text{C}$			
	Номера исследуемых участков			
	1	2	3	4
1	10,9	3,9	-2,9	3,3
2	10,8	3,9	-2,7	3,3
3	10,9	3,9	-2,9	3,2
4	10,9	3,9	-2,6	3,3
5	11,0	3,9	-3,0	3,3
6	11,1	3,8	-2,8	3,4
y_{0cp}	10,9333	3,8833	-2,8167	3,3
S_y^2	10,7	2,2	1,0	6,0

Таблица 13 – Доверительный интервал коэффициентов регрессии

Величина	№ участка			
	1	2	3	4
S_b^2	0,011	0,002	0,022	0,004
t_{α, f_1}	2,5706			
$ b_j $	0,0274	0,0043	0,0557	0,0103

Коэффициенты, значение которых менее доверительного интервала, являются статистически незначимыми, и поэтому не учитываются в итоговых моделях (таблица 14).

Таблица 14 – Итоговые зависимости в кодовом масштабе

№ участка	Полученная зависимость в кодовом масштабе
1	$T_x = 11,53 - 4,25x_1 - 0,3x_2 + 0,15x_1x_2 + 0,31667z_1 - 0,05z_1x_2$
2	$T_x = 3,9444 - 2,333x_1 - 1,3667x_2 - 0,15x_1x_2 + 0,0889z_1 - 0,111z_2 + 0,0667z_1x_2 + 0,18333z_2x_1 - 0,0222z_1z_2$
3	$T_x = -0,26667 + 0,16667x_2 - 0,425x_1x_2 - 0,2z_1 + 1,1z_2 - 0,19167z_1x_2 - 0,10833z_2x_1$
4	$T_x = 3,2 - 0,3x_1 + 2,9x_2 + 0,025x_1x_2 - 0,0333z_2 + 0,025z_1x_2 + 0,075z_2x_1$

По полученным зависимостям были найдены расчетные значения температуры холодного воздуха T_x (таблица 15).

Таблица 15 – экспериментальные и расчетные значения T_x

№ опыта	Значения температуры охлажденного воздуха T_x							
	1		2		3		4	
	T_x эксп	T_x расч	T_x эксп	T_x расч	T_x эксп	T_x расч	T_x эксп	T_x расч
1	16,6	16,6	7,4	7,4	0,7	0,7	0,5	0,5
2	11,1	11,1	5,2	5,2	-0,1	-0,1	0,3	0,3
3	7,8	7,8	3,0	3,0	1,4	1,4	0,0	0,0
4	16,1	16,1	6,9	6,9	-2,5	-2,5	3,7	3,7
5	10,9	10,9	3,9	3,9	-2,9	-2,9	3,3	3,3
6	7,6	7,6	1,7	1,7	-2,0	-2,0	2,8	2,8
7	15,6	15,6	4,5	4,5	1,5	1,5	6,3	6,3
8	10,7	10,7	2,2	2,2	1,0	1,0	6,0	6,0
9	7,4	7,4	0,7	0,7	0,5	0,5	5,9	5,9

Проверка адекватности полученных зависимостей производилась по критерию Фишера, поскольку экспериментальные планы ненасыщенные –

количество значимых коэффициентов моделей меньше количества основных опытов. Дисперсия адекватности определялась по формуле (56) [52]:

$$S_{ад}^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (y_i^{расч} - y_i^{эксп})^2}{N - m_k}, \quad (56)$$

где $y_i^{расч}$ и $y_i^{эксп}$ – значения температуры охлажденного воздуха, полученные расчетным и экспериментальным способом соответственно. Критерии адекватности рассчитывались по формулам (57) и (58):

$$F_{f_1 f_2}^{расч} = \frac{S_{ад}^2}{S_y^2}, \text{ если } S_{ад}^2 > S_y^2, \quad (57)$$

$$F_{f_2 f_1}^{расч} = \frac{S_y^2}{S_{ад}^2}, \text{ если } S_y^2 > S_{ад}^2, \quad (58)$$

Модель считается адекватной, если $F^{расч} < F^{кр}$.

Для перехода от модели в кодовом масштабе к модели в натуральном масштабе были использованы формулы из таблицы 8. В результате раскодирования факторов и упрощения полученных выражений, были получены искомые модели (таблица 16).

Таблица 16 – Зависимости исследуемых участков в натуральном масштабе

№ участка	Полученная зависимость в натуральном масштабе
1	$T_x = 25 + G(3,675 - 0,075G + 3,75\mu - 0,375G\mu) - 9\mu$
2	$T_x = -72,9 + G(16,62 - 0,88G + \mu(66,45 - 99\mu + 0,37G)) + \mu(284,72 - 525\mu)$
3	$T_x = 237,231 + G(19,887 + 0,714G + \mu(110,22 - 1,44G + 16,24\mu)) + \mu(-390,91 - 524,4\mu)$
4	$T_x = -97,53 + G(11,675 - 0,15G + \mu(-5,812G + 11,256\mu)) + \mu(378,51 - 190\mu)$

Полученные зависимости были интерполированы на весь диапазон экспериментальных данных для создания единого графика эффективности рассматриваемого прототипа вихревой трубки.

3.3. Анализ результатов проведения экспериментальных исследований вихревой трубки

В результате были построены графики полученной зависимости $T_x = f(G, \mu)$ (рисунки 34-36).

Исходя из формулы, T_x является определяющим параметром по определению оптимального режима работы вихревой трубки. Исходя из требуемого T_x определяются G и μ , на основании которых производится расчет геометрических характеристик вихревой трубки.

На основании проведенных экспериментальных исследований было установлено, что наиболее эффективный режим работы вихревой трубки рассматриваемых размеров конструкции и исполнения (неохлаждаемая противоточная труба) расположен в диапазоне и относительного расхода сжатого воздуха μ от 0,5 до 0,7 и расхода сжатого воздуха G - от 10 до 12 л/сек. G зависит от компрессора и геометрических размеров (пропускной способности трубки), в то время как μ является варьируемой величиной для вихревой трубки любых характеристик.

Параметры, влияющие на характеристики вихревой трубки, можно разделить на несколько категорий:

- геометрические: диаметр отверстия диафрагмы D_d , длина трубки L и геометрия вихревой зоны (угол конусности), площадь проходного сечения сопла F_c ;
- термодинамические: температура T_1 и давление p_1 поступающего газа, давление холодного потока p_x , физические свойства газа (отношение теплоемкостей $k=c_p/c_v$), теплообмен корпуса трубки с окружающей средой.

Влияние геометрических факторов линейное, поэтому масштабирование размеров трубки приводит к линейному соответствующему изменению рабочих

характеристик трубки. Как было отмечено во 2 главе, поправка на масштаб не требуется.

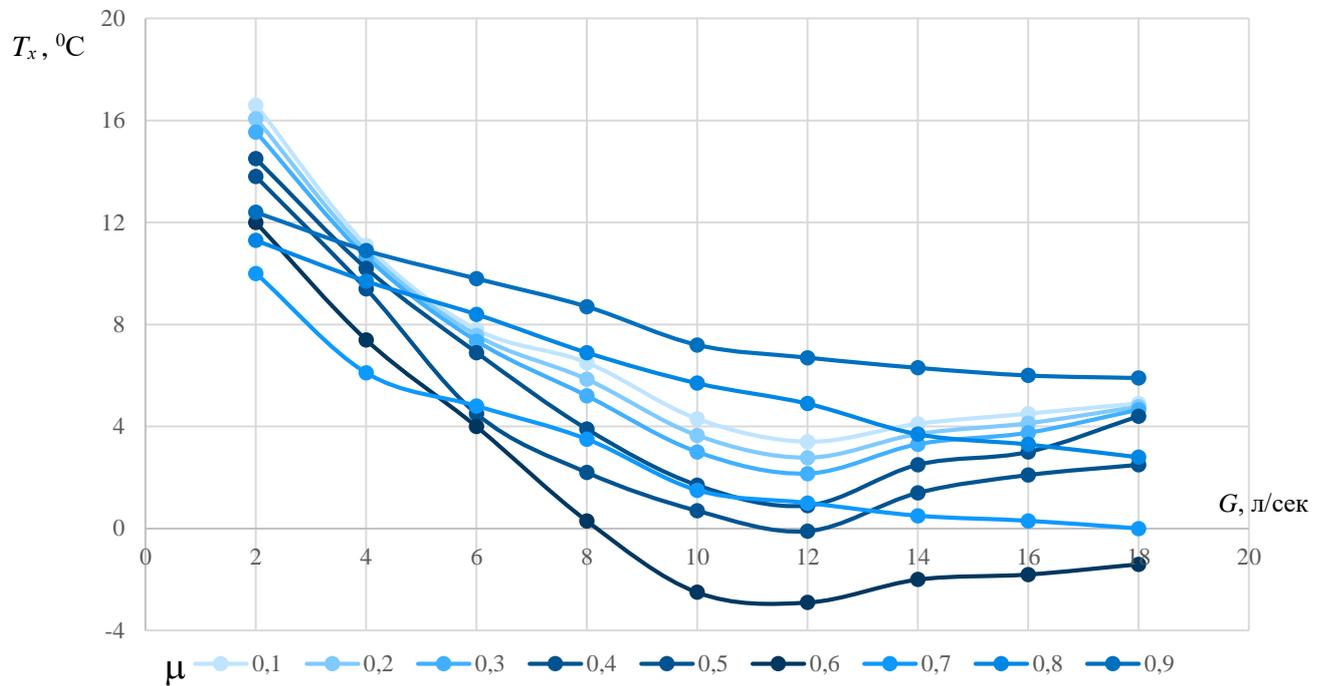


Рисунок 34 - Визуализация зависимости температуры охлажденного воздуха T_x от величины расхода сжатого воздуха G

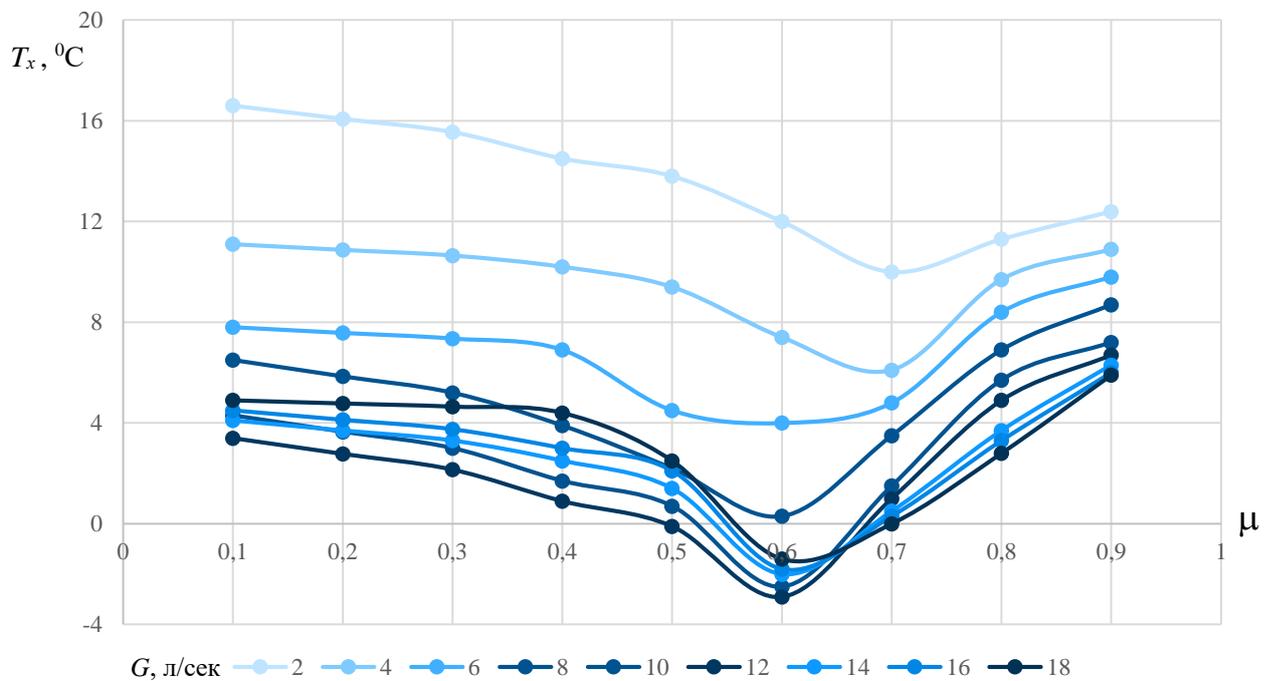


Рисунок 35 - Визуализация зависимости температуры охлажденного воздуха T_x от относительного расхода сжатого воздуха μ

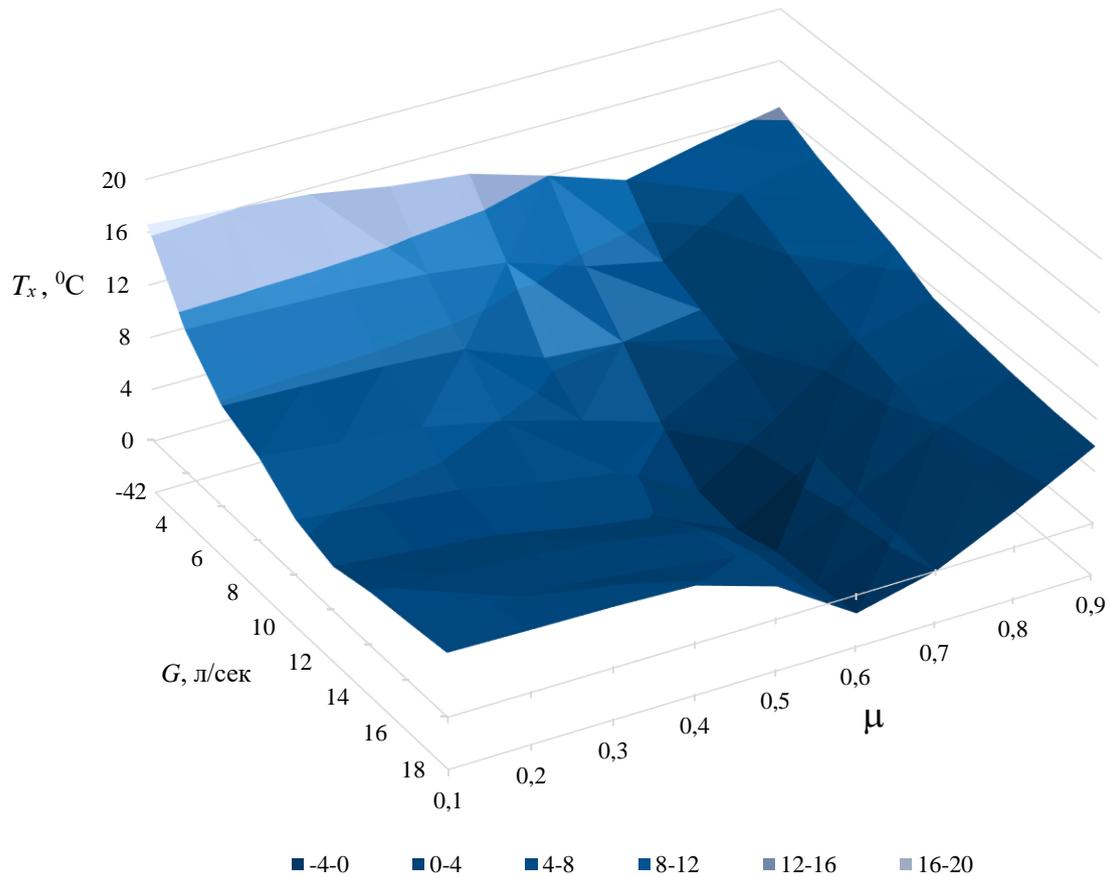


Рисунок 36 - Визуализация зависимости температуры охлажденного воздуха T_x от величины расхода сжатого воздуха G и относительного расхода сжатого воздуха μ

3.4. Выводы по Главе 3

1. Разработана и собрана установка для проведения экспериментальных исследований с использованием прототипа вихревой трубки;
2. Подтверждена правильность определения методики расчета вихревой трубки с целью обеспечения функционирования сезонно-действующего охлаждающего устройства;
3. Определены оптимальные диапазоны основных рабочих параметров вихревой трубки - относительного расхода сжатого воздуха μ и расхода сжатого воздуха G ;
4. На основании полученных экспериментальным путем регрессионных зависимостей подтверждена эффективность применения предложенного способа охлаждения грунта и разработанного автором устройства.

**ГЛАВА 4 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА
РАБОТЫ ВИХРЕВОЙ ТРУБКИ ПО ОБЕСПЕЧЕНИЮ
ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СЕЗОННО-ДЕЙСТВУЮЩЕГО
ОХЛАЖДАЮЩЕГО УСТРОЙСТВА**

4.1. Корректировка технологической схемы транспорта газоконденсатной смеси с учетом содержания гелия

С помощью лицензированного программного комплекса Refprop v. 9.1, моделирующего критические физические параметры различных соединений и их фазовые переходы, было установлено, что при содержании гелия в газоконденсатной смеси свыше 0,05% по массе, смесь газа и конденсата не поддается сжижению при требуемых температуре и давлении вследствие особо низкой температуры кипения гелия (около $-268,78^{\circ}\text{C}$). Для природного газа месторождений Восточной Сибири характерно высокое содержание гелия (таблица 17), в связи с чем рассматриваемую технологию получения газоконденсатной смеси требуется доработать.

Таблица 17 – Запасы гелия в газоконденсатных месторождениях Восточной Сибири [24,63,85]

Название месторождения	Запасы гелия по категориям А+В+С ₁ + С ₂ , млн м ³	Содержание гелия в природном газе, % масс.
Ковыктинское ГКМ	5062	0,28
Чаяндинское НГКМ	1400	0,43
Собинское НГКМ	907	0,57
Тас-Юряхское НГКМ	459	0,38

С целью уточнения схемы процесса сжижения смеси природного газа и газового конденсата, с учетом высокого содержания гелия, предлагается включить этап выделения гелия в виде гелиевого концентрата из газа, например, с помощью мембранных установок, которые уже проходят опытно-промышленную эксплуатацию на Ковыктинском и Чаяндинском ГКМ. Уточненная

принципиальная схема подготовки и транспортировки газоконденсатной смеси представлена на рисунке 37.

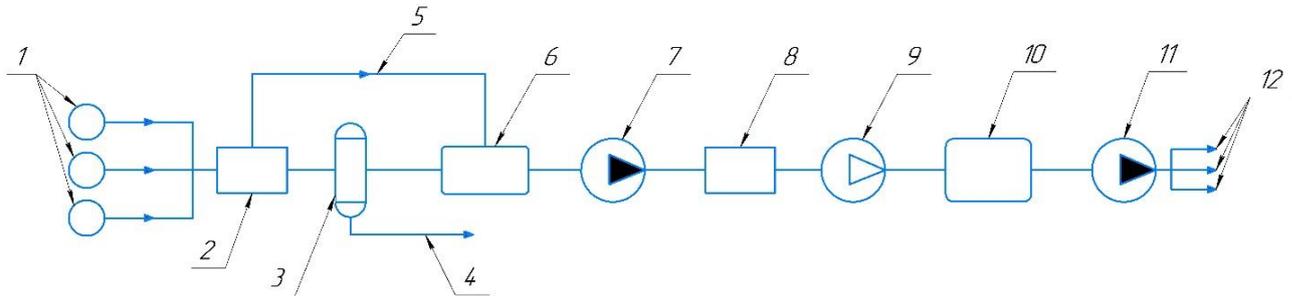


Рисунок 37 – Уточненная принципиальная схема подготовки и транспортировки газоконденсатной смеси:

1 – промысловые пункты сбора, 2 – пункт предварительной подготовки газа, 3 – установка по выделению гелиевого концентрата, 4 – трубопровод для транспортировки гелиевого концентрата, 5 - конденсатопровод, 6 - установка подготовки сжиженной углеводородной смеси, 7 - головная насосная станция, 8 - пункт охлаждения смеси, 9 - промежуточная насосная станция, 10 - пункт регазификации, 11 - компрессорная станция, 12 – потребители

Технология реализуется следующим образом. Добываемая смесь с промысла 1 поступает на пункт предварительной подготовки 2, где осуществляется процесс первичной подготовки, включающий выделение газового конденсата, механических примесей и химически агрессивных компонентов (углекислого газа, угарного газа и сероводорода), а также снижение концентрации воды.

Далее природный газ проходит процедуру выделения гелиевого концентрата (смесь природного газа и гелия с концентрацией гелия 80-85%) в установке 3. Выделенный гелий поступает на компрессорное оборудование по трубопроводу 4 и транспортируется к местам его хранения и переработки. Газовый конденсат по трубопроводу 5 подается на установку подготовки сжиженной углеводородной смеси 6, где проходит многоступенчатое охлаждение и смешение природным газом до достижения стабильного однофазного (сжиженного) состояния. Полученная однофазная смесь сжиженных углеводородов подается на головную насосную станцию 7 для дальнейшей транспортировки по магистральному трубопроводу. По всей длине трубопровода на определенном удалении друг от друга располагаются пункты охлаждения смеси 8 и промежуточные насосные станции 9, на которых

осуществляется поддержание давления и температуры в рабочем диапазоне с целью предотвращения разложения газоконденсатной смеси на жидкую и газовую фазы.

Газоконденсатная смесь по трубопроводу перекачивается до пункта регазификации 10, где происходит операция контролируемого разделения смеси на природный газ и газовый конденсат. Природный газ из пункта регазификации подается на компрессорную станцию 11 для дальнейшей транспортировки потребителям 12.

4.2. Разработка устройства для охлаждения грунта

На основании проведенных теоретических исследований (глава 2) процесса теплообмена в системе «смесь – грунт – СОУ – атмосфера», с учетом применения разработанного устройства, была составлена математическая модель (59) рассматриваемого процесса:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dT_c}{dx} = -D_i \frac{\xi}{2D_{\text{ВН}} F^2} \nu G_c^2 - \frac{\pi D_{\text{Н}}}{G_c c_{\text{PC}} l_{\text{П}} \frac{D_{\text{Н}} + 2\delta_{\text{ИЗ}}}{2\lambda_{\text{ИЗ}}}} (T_{\text{ГР}} - T_c), \\ T_{\text{СК}} = \left(T_{\text{СН}} - T_{\text{ОС}} - \frac{4 \cdot G_c}{\rho \cdot \pi D_{\text{ВН}}^2} \right) e^{-\frac{k_{\text{T}} \cdot L}{G_c \cdot c_p}} + T_0 + \frac{4 \cdot G_c}{\rho \cdot \pi D_{\text{ВН}}^2}; \\ k_{\text{T}} = \frac{\pi}{\frac{1}{\alpha_1 \cdot D_{\text{ВН}}} + \frac{R}{2} + \frac{1}{\alpha_2 \cdot D_{\text{Н}}}}; \\ R = \frac{1}{\lambda_{\text{СТ}}} \cdot \ln \frac{D_2}{D_1} + \frac{1}{\lambda_{\text{АИ}}} \cdot \ln \frac{D_2 + 2\delta_{\text{АИ}}}{D_2} + \frac{1}{\lambda_{\text{ТИ}}} \cdot \ln \frac{D_3}{D_2 + \delta_{\text{АИ}}}, \\ c_{\text{ГР}}(T) \frac{\partial T_{\text{ГР}}}{\partial \tau} = \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial \left(r \lambda_{\text{ГР}}(T_{\text{ГР}}) \frac{\partial T_{\text{ГР}}}{\partial r} \right)}{\partial r} + \frac{\partial \left(\lambda_{\text{ГР}}(T) \frac{\partial T_{\text{ГР}}}{\partial z} \right)}{\partial z}; \\ \lambda_{\text{ГР}}(T) \frac{\partial T_{\text{ГР}}}{\partial r} = K_s(v)(T_{\text{ГР}} - T_{\text{ОС}}); \\ Q_x = \mu G_{\text{В}} c_{\text{ПВ}}(T_{\text{ВХ}} - T_x); \\ T_x(G_{\text{В}}, \mu) \rightarrow \min, \end{array} \right. \quad (59)$$

где $T_c, T_{сн}, T_{ск}, T_{гр}, T_{ос}, T_{вх}, T_x$ – соответственно температуры смеси в трубопроводе, смеси в начале участка трубопровода, смеси в конце участка трубопровода, грунта, входящего в вихревую трубку сжатого воздуха, охлажденного в вихревой трубке воздуха;

x, r, z – соответственно координаты в декартовой и в цилиндрической системах координат;

G_c, G_b – соответственно весовой расход смеси и входящего в вихревую трубку сжатого воздуха;

$\lambda_{ст}, \lambda_{ан}, \lambda_{ти}$ – соответственно коэффициенты теплопроводности стенки трубопровода, антикоррозионной и тепловой изоляции;

D_1, D_2, D_3 – соответственно внутренний диаметр, диаметр трубопровода с антикоррозионной изоляцией и наружный диаметр;

$\delta_{ан}$ и $\delta_{ти}$ – соответственно толщина антикоррозионной и тепловой изоляции;

ξ – коэффициент гидравлического сопротивления;

ν - удельный объем;

F – площадь живого сечения трубопровода;

D_i – дифференциальный дроссель-эффект;

c_{pc}, c_{pb} – соответственно изобарная теплоемкость смеси и входящего в вихревую трубку сжатого воздуха;

τ – время;

$l_{п}$ – длина участка трубопровода;

Q_x – холодопроизводительность вихревой трубки;

μ – относительный расход охлажденного в вихревой трубке воздуха.

С целью стимуляции работы СОУ в период положительных температур предлагается использовать устройство, состоящее из вихревой трубы, кожуха и компрессора. С помощью кожуха вихревая труба подключается к конденсаторной части СОУ, после чего компрессор нагнетает в вихревую трубу сжатый воздух (рисунок 38). В результате возникновения вихревого эффекта, энергоразделения потока воздуха на охлажденный и нагретый, и подачи охлажденного воздуха в

кожух на конденсаторной части СОУ, происходит конденсация хладагента и работа СОУ возобновляется независимо от температуры атмосферного воздуха.

Для реализации данного технического решения предлагается использовать данное устройство на базе грузового автомобиля, движущегося вдоль трассы трубопровода и поочередно стимулирующего работу отдельных СОУ. Данные мероприятия направлены на имитацию зимнего периода в рамках системы СОУ-грунт, в результате чего будет возможно охладить грунт в любой момент.

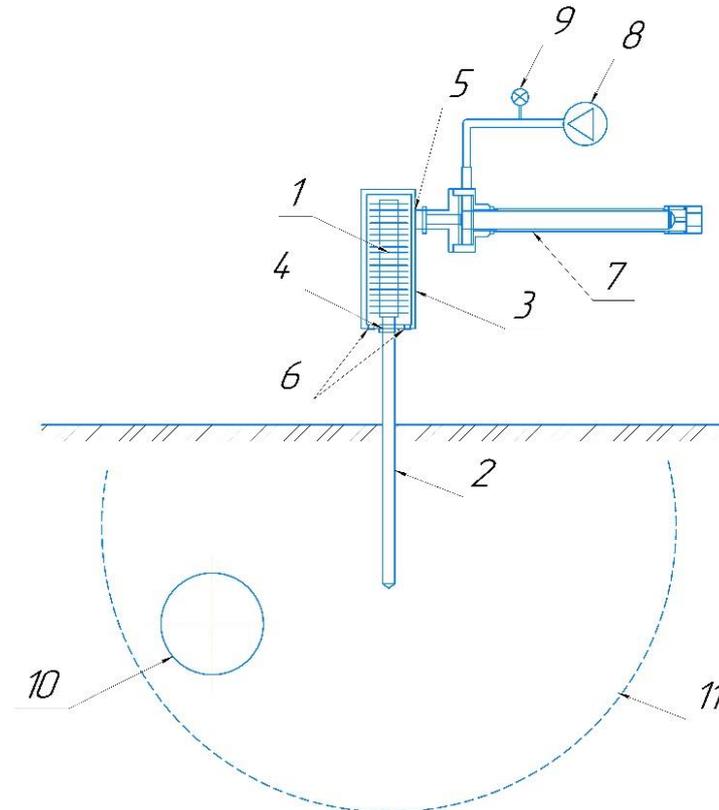


Рисунок 38 - Устройство для регулирования рабочей температуры трубопроводов для транспортировки газоконденсатной смеси:

1 – конденсаторная часть устройства, 2 – испарительная часть устройства, 3 – кожух, 4 – монтажное отверстие, 5 – входной патрубок, 6 – выходные отверстия, 7 – вихревая труба, 8 – компрессор, 9 – манометр, 10 – трубопровод, 11 – область работы устройства

Компрессор 8 предназначен для нагнетания воздуха в вихревую трубу 7. Вихревая труба 7 используется в качестве генератора холода при охлаждении воздуха, подаваемого из компрессора 8 в кожух 3 через входной патрубок кожуха 5. Выходные отверстия кожуха 6 предназначены для сброса нагнетаемого в кожух охлажденного воздуха в атмосферу. Крепление кожуха на трубчатом корпусе устройства осуществляется с помощью монтажного отверстия кожуха 4. В

конденсаторной части 1 происходит конденсация хладагента и его истечение по стенкам трубчатого корпуса в испарительную часть 2, где происходит теплообмен с грунтом и испарение хладагента. Испарительная часть 2 погружается в грунт, а конденсаторная часть 1, расположена над поверхностью грунта.

Устройство работает следующим образом. Компрессор 8 нагнетает воздух во входное отверстие вихревой трубы 7, в которой происходит его энергоразделение на горячий (нагретый) и холодный (охлажденный) потоки посредством возникновения вихревого эффекта. Поток горячего воздуха сбрасывается из вихревой трубы 7 в окружающую среду через «горячий» конец, а поток холодного воздуха через входной патрубок кожуха 5 закачивается в кожух 3, закрепленный на трубчатом корпусе с помощью монтажного отверстия кожуха 4. Поток холодного воздуха, поступающий в кожух, охлаждает конденсаторную часть 1 посредством принудительной циркуляции охлажденного воздуха и снижения температуры воздуха в кожухе 4 вокруг конденсаторной части 1 устройства и также истекает в окружающую среду через выходные отверстия кожуха 6. В результате возникновения отрицательной температуры воздуха внутри кожуха двухфазный хладагент в корпусе конденсируется, в результате чего под действием гравитационных сил стекает в испарительную часть 2 устройства, где возникает градиент температур от более нагретого грунта к хладагенту. Происходит теплообмен грунта с хладагентом, и температура грунта понижается. Хладагент при этом начинает испаряться и подниматься в конденсаторную часть 1, и процесс повторяется. В процессе работы устройства происходит снижение температуры грунта вокруг трубопровода 10 в области работы устройства 11.

Размер кожуха подбирается исходя из размеров конденсаторной части устройства таким образом, чтобы между внутренней поверхностью кожуха и ребрением конденсаторной части устройства был зазор. Кожух изготавливается из материала с низкой теплопроводностью и высокой коррозионной стойкостью для повышения долговечности использования, например, из нержавеющей стали 40Х13.

Диаметр входного отверстия $D_{\text{ВХ}}$ кожуха устройства определяется исходя из требуемой температуры охлаждённого воздуха по формуле (60):

$$D_{\text{ВХ}} = 2 \sqrt{\frac{G_x}{\pi P_x \sqrt{\frac{kM}{zRT_x} \cdot \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k+1}{k-1}}}}}, \quad (60)$$

где

G_x – расход охлажденного воздуха,

P_x – давление охлажденного воздуха,

k – показатель адиабаты,

M – молекулярная масса воздуха,

z – коэффициент сжимаемости воздуха,

R – универсальная газовая постоянная,

T_x – температура охлажденного воздуха.

Диаметр монтажного отверстия подбирается под диаметр основания конденсаторной части устройства. На монтажном отверстии должно быть предусмотрено уплотнительное кольцо из материала, устойчивого к низким температурам, например, из нитрилового каучука.

Диаметр выходных отверстий $D_{\text{ВЫХ}}$ кожуха устройства определяется по формуле (61):

$$D_{\text{ВЫХ}} = \frac{D_{\text{ВХ}}}{n}, \quad (61)$$

где n – количество выходных отверстий кожуха.

Выходные отверстия кожуха устройства располагаются на нижней торцевой части кожуха для увеличения пути движения воздуха вдоль оребрения конденсаторной части и усиления эффекта теплообмена.

4.3. Описание разработанного способа

Для описания разработанной методики регулирования рабочей температуры данных трубопроводов с помощью СОУ и вихревых трубок в качестве примера рассматривается Ковыктинское ГКМ. Общая характеристика скважин Ковыктинского ГКМ проводилась на основании [66,67] и представлена в таблице 18.

Таблица 18 - Общая характеристика скважин Ковыктинского ГКМ [15,24]

Площадь месторождения, км ²	7 499,5
Глубина залегания (по вертикали), м	2838-3388
Толщина продуктивного пласта, м	78
Эффективная толщина, м	29
Пористость песчаника, %	10-19
Газонасыщенность	0,6-0,9
Пластовое давление, МПа	25,7
Пластовая температура, °С	55
Содержание конденсата, г/м ³	67,0
Содержание СН ₄ в газе, моль/%	90,3
Запасы категории С1+С2, трлн. м ³	2,5
Ожидаемый годовой уровень добычи газа, млрд. м ³ /год	25

Уточненная методика расчета трубопровода для транспортировки газоконденсатной смеси выглядит следующим образом:

1. На основании химического состава газа (таблица 19) с помощью программного комплекса Refprop v. 9.1 (рисунок 39) определяются критические параметры смеси природного газа и газового конденсата в соотношении 9:1 (таблица 20) [41,42,44].

Таблица 19 – Химический состав газа Ковыктинского ГКМ (Парфеновский горизонт)

Компонент	Состав, об. %									
	CH ₄	C ₂ H ₅	C ₃ H ₈	<i>i</i> -C ₄	<i>n</i> -C ₄	C ₅ H ₁₂	H ₂	N ₂	Ar	He
Среднее значение	92,36	4,13	0,81	0,16	0,21	0,12	0,09	1,69	0,045	0,284

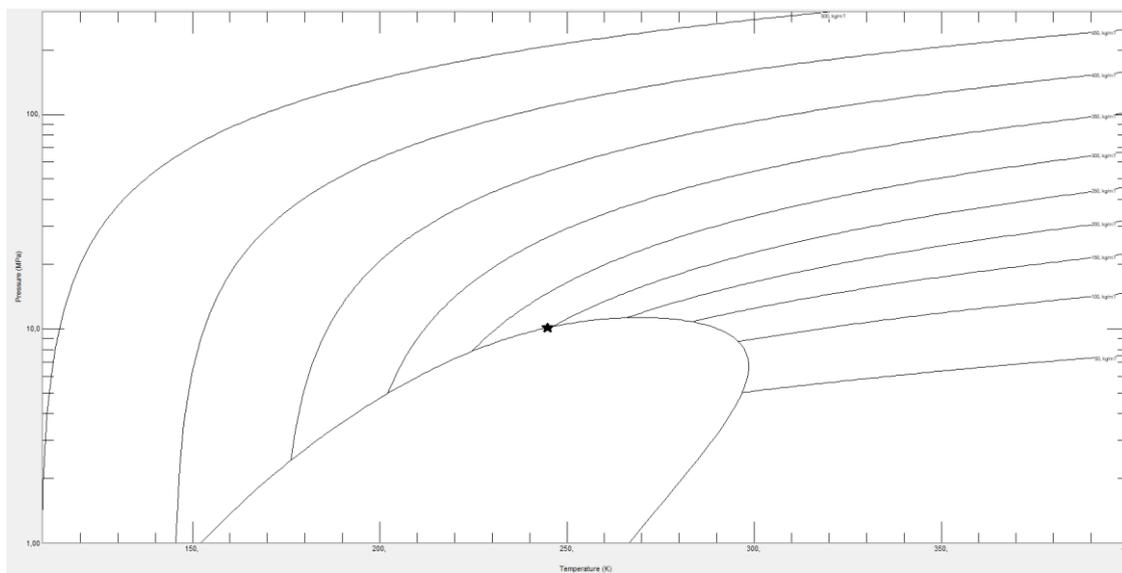


Рисунок 39 – P-T диаграмма газоконденсатной смеси Ковыктинского ГКМ в соотношении 9:1

Таблица 20 – Критические параметры смеси природного газа и газового конденсата Ковыктинского ГКМ в соотношении 9:1

№ п/п	Параметр смеси	Обозначение	Размерность	Значение
1	Критическая температура	T _{крит}	°C	-28,20
2	Критическое давление	P _{крит}	МПа	10,01

2. Определяется оптимальный маршрут следования трубопровода. В ходе обоснования маршрута рассматриваются такие факторы, как протяженность, геологические особенности, сейсмическая активность, пересечения естественных и искусственных препятствий, объем капитальных затрат, сохранение экологической стабильности, а также возможности и последствия (экономические, социальные, экологические) газоснабжения транзитных областей (рисунок 36) [35,40,43].

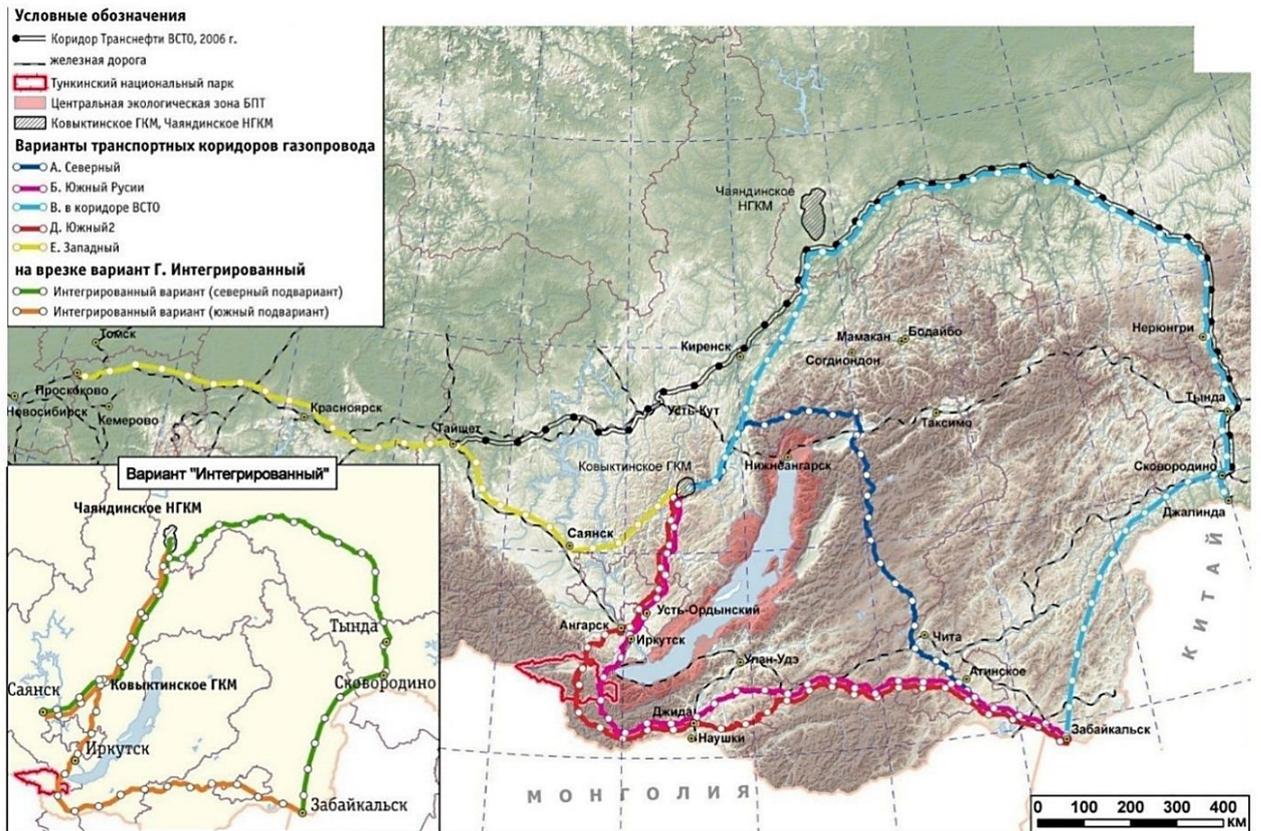


Рисунок 40 - Варианты проектирования трубопровода по транспортировке природного газа с Ковыктинского месторождения для экспортных поставок [20]

3. На основании протяженности, диаметра и требуемой производительности трубопровода осуществляется теплогидравлический расчет трубопровода. По итогам расчета определяются толщина стенки и изоляции, и расстояние между перекачивающими станциями. Проводится расчет скорости нагревания смеси при движении по трубопроводу и при остановке работы трубопровода [38,39].

4. Определяются рабочие температура и давление трубопровода таким образом, что $T < T_{\text{крит}}$, $P > P_{\text{крит}}$.

5. Определяется расстояние по длине трубопровода, на которой происходит повышение температуры смеси до $T_{\text{крит}}$ в процессе теплообмена смеси с грунтом [45].

6. Производится расчет системы регулирования температуры трубопровода: подбор типа СОУ и хладагента, определение порядка расстановки

СОУ вдоль трассы трубопровода, расчет размеров вихревой трубки, подбор компрессора для подачи сжатого воздуха в вихревую трубку [36,37].

4.4. Расчет системы регулирования рабочей температуры

Расчет системы регулирования рабочей температуры трубопроводов с помощью СОУ и вихревых трубок включает:

1. Теплотехнический расчет термостабилизаторов;
2. Определение порядка расстановки термостабилизаторов;
3. Определение геометрических параметров вихревой трубы;
4. Подбор компрессора.

СОУ с областью работы радиусом R монтируются на расстоянии не более $0,8R$ от трубопровода в два ряда по обеим сторонам от трубопровода параллельно его оси. Термостабилизаторы располагаются в шахматном порядке друг относительно друга таким образом, что 2 ближайших СОУ из одного ряда образуют с ближайшим термостабилизатором из второго ряда правильный треугольник со стороной $1,73R$ (рисунок 41). При оценке влияния двух рядом стоящих СОУ учитывались результаты работы [55].

Величина R зависит от таких характеристик термостабилизатора, как тип хладагента, размер и толщина стенки испарительной и конденсаторных частей, материал термостабилизатора и площадь оребрения конденсаторной части [63].

В летний период, когда температура воздуха становится выше температуры грунта, и термостабилизатор переходит в состояние покоя вследствие прекращения конвективной циркуляции хладагента, вдоль трассы трубопровода передвигается мобильный охлаждающий комплекс (МОК) - компрессор, вихревая труба и кожух для крепления на конденсаторной части термостабилизатора на базе грузового автомобиля или вездехода.

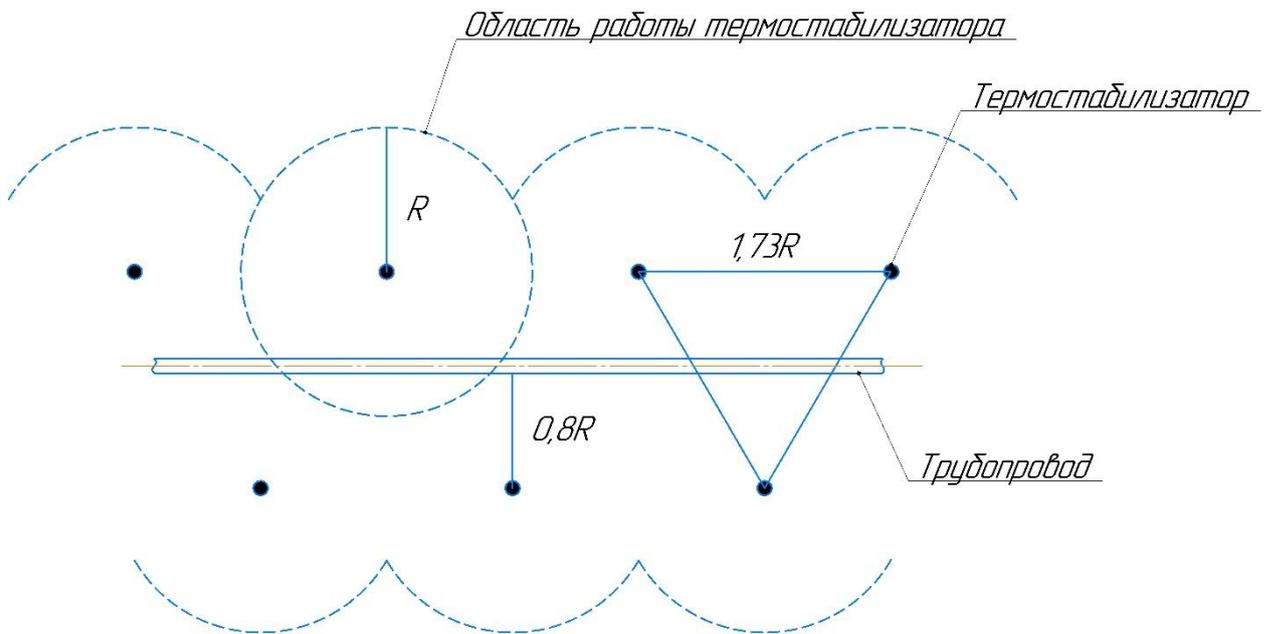


Рисунок 41 – Схема расположения термостабилизаторов грунта вдоль трассы трубопровода для транспортировки газоконденсатной смеси

Монтаж устройства осуществляется следующим образом:

- на основание конденсаторной части монтируется съемный кожух с помощью монтажного отверстия;
- с помощью гибкой трубки, выполненной из материала с низкой теплопроводностью, кожух герметично соединяется с «холодным концом» вихревой трубы через входное отверстие;
- к вихревой трубе через входное отверстие подключается компрессор посредством жесткой или гибкой трубки, в зависимости от взаимного расположения компрессора и вихревой трубы.

Время работы вышеописанного устройства определяется таким образом, чтобы привести температуру грунта в области работы термостабилизатора к характерному уровню температуры грунта в холодный период года. После этого компрессор выключается, устройство демонтируется, и МОК передвигается к следующему СОУ.

Теплотехнический расчет системы охлаждения грунта около трубопровода предлагается осуществлять в несколько этапов:

- 1) определение радиуса зоны охлаждения грунта вокруг испарительной части СОУ;

- 2) определение температуры грунта на границе СОУ-грунт;
- 3) расчет температурного поля грунта вокруг СОУ;
- 4) зоны охлаждения грунта вокруг испарительной части СОУ.

Ключевыми параметрами охлаждающей установки, используемыми при теплотехническом расчете, являются радиус испарителя и отношение площадей испарителя и конденсатора.

Расчет радиуса охлаждения определяется из уравнения методом подбора на основании уравнения (62) [64]:

$$\begin{aligned} & (r_M^2 - r_I^2) [\rho \gamma_{ск} (W_C - W_H) + C_T (T_{гр} - T_0) + C_M (T_0 - T_M)] + \\ & + 8,9 r_M^2 C_M (T_{гр} - T_0) - 2 \lambda_M \tau_A (T_B - T_A) \cdot \frac{l_i \left(\frac{r_M}{r_I} \cdot e^b \right) - l_i e^b}{\left(\frac{r_M}{r_I} - 1 \right) e^b} = 0; \end{aligned} \quad (62)$$

где

r_M – радиус замораживания грунта,

r_I – радиус испарителя,

ρ – удельная теплота фазовых превращений воды в грунте,

$\gamma_{ск}$ – удельный вес скелета в грунте,

W_C – суммарная влажность грунта,

W_H – количество незамерзшей воды при средней температуре в замороженной зоне,

C_T, C_M – удельные теплоемкости грунта в талом и мерзлом состоянии соответственно,

T_0 – температура начала замерзания воды в грунте,

$T_{гр}$ – естественная температура грунта,

T_M – температура грунта в мерзлом состоянии

λ_T, λ_M – коэффициент теплопроводности грунта в талом и мерзлом состоянии соответственно,

τ_A – продолжительность работы термостабилизатора (продолжительность активного периода),

l_i – знак интегрального логарифма,

T_A – температура воздуха в активный период.

В [64] предлагался графический способ решения данного уравнения: через подбор произвольных значений r_m , и построения графика зависимости полученных величин от r_m . Искомая величина r_m определяется точкой пересечения этого графика с осью абсцисс. Также данное уравнение может быть решено аналитически с помощью современных вычислительных систем.

Средняя температура замороженного грунта определяется по формуле (63):

$$T_{\text{ср}} = \frac{T_B}{3,7 + 1,15b_T}, \quad (63)$$

где

T_B – температура воздуха,

b_T – безразмерный коэффициент эффективности термостабилизатора, определяемый по формуле (64):

$$b_T = \frac{\lambda_M}{\alpha_B r_{\text{и}}} \cdot \frac{F_{\text{и}}}{F_{\text{к}}}, \quad (64)$$

где

α_B – коэффициент теплоотдачи от поверхности конденсатора к воздуху,

$r_{\text{и}}$ – радиус испарителя,

$F_{\text{и}}$ – площадь поверхности испарителя,

$F_{\text{к}}$ – площадь поверхности конденсатора.

Расчет геометрических параметров вихревой трубки производится с помощью алгоритма, описанного в главе 2. На основании расчета определяется

требуемый весовой расход сжатого воздуха, подаваемого в трубку, что является основным критерием при подборе компрессора.

4.5. Выводы по Главе 4

В результате выполненной работы:

1. Уточнена схема процесса сжижения смеси природного газа и газового конденсата, с учетом высокого содержания гелия;
2. Разработано устройство для регулирования рабочей температуры трубопроводов для транспортировки газоконденсатной смеси.
3. Составлена математическая модель процесса теплообмена в системе «смесь – грунт – СОУ – атмосфера», с учетом применения разработанного устройства;
4. Описан расчет системы регулирования рабочей температуры трубопроводов для транспортировки газоконденсатной смеси трубопроводов с помощью СОУ и вихревых трубок.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация представляет собой законченную научно - квалификационную работу, в которой предлагается новое научно обоснованное решение актуальной народно-хозяйственной задачи по поддержанию температурного режима трубопроводов для транспортировки сжиженных смесей углеводородов, имеющей важное значение в области трубопроводного транспорта углеводородов.

Выполненные исследования позволяют сделать следующие выводы и рекомендации:

1. На основе анализа научно-исследовательских работ и результатов опытно-промышленной эксплуатации в области транспорта углеводородов по трубопроводам в виде сжиженной смеси была доказана актуальность и перспективность исследований в данном направлении. Было установлено, что на сегодняшний день не существует рабочей методики применения СОУ для поддержания температурного режима низкотемпературных трубопроводов, отсутствуют технические решения стимуляции работы СОУ в период положительных температур.

2. В результате проведенных теоретических исследований определен алгоритм расчета стационарного теплогидравлического режима трубопровода для транспортировки газоконденсатной смеси, обоснован выбор типа сезонно-действующих охлаждающих устройств для поддержания температуры трубопровода для транспортировки газоконденсатной смеси в рабочем диапазоне. Предложен способ регулирования температуры трубопровода для транспортировки сжиженной смеси углеводородов с газоконденсатных месторождений, основанный на применении вихревого эффекта.

3. С помощью разработанной и собранной установки для проведения экспериментальных исследований с использованием прототипа вихревой трубки подтверждена правильность определения методики расчета вихревой трубки с целью обеспечения функционирования СОУ. Определены оптимальные диапазоны основных рабочих параметров вихревой трубы. На основании полученных

экспериментальным путем регрессионных зависимостей подтверждена эффективность применения предложенного способа и разработанного устройства.

4. На основании проведенных теоретических и экспериментальных исследований разработана методика расчёта системы регулирования температуры трубопровода для транспортировки сжиженной смеси углеводородов с применением СОУ. С учетом предлагаемой к внедрению в технологию системы регулирования температуры трубопроводов, обосновано дополнение методики подготовки газоконденсатной смеси с высоким содержанием гелия в исходном сырье.

5. Предложено и обосновано техническое решение вопроса обеспечения работы СОУ в летнее время года с применением вихревого эффекта. Разработано устройство для регулирования рабочей температуры трубопроводов для транспортировки газоконденсатной смеси. Составлена математическая модель процесса теплообмена в системе «смесь – грунт – СОУ – атмосфера», с учетом применения разработанного устройства.

6. Описан расчет системы регулирования рабочей температуры трубопроводов для транспортировки газоконденсатной смеси трубопроводов с помощью СОУ и разработанного устройства.

7. В дальнейшем предлагается продолжить изучение зависимостей теплотехнических характеристик вихревых трубок от ее геометрических и физических параметров. Перспективным направлением является определение характера и степени влияния шероховатости внутренних поверхностей вихревой трубки на создаваемый охлаждающий эффект. Работа в данной области позволит глубже изучить вихревой эффект и возможности его эффективного применения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Акульшина, Н.П.** Магистральные трубопроводы охлажденного и сжиженного природного газа / Акульшина Н.П., Андрианов В.А., Зоркальцев В.И., Ларионов Б.Н., Логвин Г.П., Полозов А.Е., Фот Н.А., Шарыгин В.М. - Сыктывкар, 1988. - 157 с.
2. **Ананенков, А.Г.** Газовая промышленность России на рубеже XX и XXI веков: некоторые итоги и перспективы / Ананенков А.Г., Мастепанов А.М. – М.: ООО «Газоил пресс», 2010. – 304 с.
3. **Аникин, Г.В.** Тепломассоперенос в вертикальном парожидкостном термосифоне / Аникин, Г.В., Поденко, Л.С., Феклистов, В.Н. // Криосфера Земли. – Новосибирск: Академическое издательство «Гео», 2009. т. XIII, №3, С. 54-58.
4. **Бармин, И.В.** Сжиженный природный газ вчера, сегодня, завтра / Бармин И.В., Кунис И.Д. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009. – 256 с.
5. **Баталин, О.Ю.** Фазовые равновесия в системах природных углеводородов / О.Ю. Баталин, А.И. Брусиловский, М.Ю. Захаров. – М.: Недра, 1992. – 272 с.
6. **Блейхер, Э.М.** Трубопроводный транспорт сжиженного природного газа / Э.М. Блейхер, А.Е. Владимиров, О.М. Иванцов, С.М. Польский. - М.: ВНИИЭгазпром, 1977. - 63 с.
7. **Брусиловский, А.И.** Исследование уравнений состояния природных газов / А.И. Брусиловский, Г.Р. Гуревич // Тр. МИНХ и ГП им. Губкина. – 1984. - № 174. – с. 49 – 55.
8. **Булейко, В.М.** Закономерности фазовых превращений углеводородных смесей в нефтегазоносных пластах разрабатываемых месторождений (по экспериментальным данным): автореферат дис. ... д-ра технич. наук: 25.00.17 / Булейко Валерий Михайлович – М., 2007. – 48 с.
9. Вихревой эффект и его применение в технике // Материалы Всесоюзной научно-технической конференции. – Куйбышев: КуАИ, 1988. - 248 с.

10. **Владимиров, А.Е.** Гидравлический и тепловой расчеты трубопроводов СПГ с учетом его сжимаемости / Владимир А.Е., Одишария Г.Э. - М.: ВНИИЭгазпром. - 1972. - № 9. – с. 13 – 17.

11. **Вовк В.С.** Крупномасштабное производство сжиженного природного газа: Учебное пособие для вузов / В.С.Вовк, Б.А.Никитин. - М., 2011.

12. **Голубин С.И.** Парожидкостные термостабилизаторы грунта различных типов и назначения, их конструктивные и теплотехнические особенности. / Голубин С.И., Баясан Р.М., Лобанов А.Д., Баясан Т.В. // Трубопроводный транспорт: теория и практика. – М.: Всесоюзный научно-исследовательский институт по строительству, эксплуатации трубопроводов и объектов ТЭК - инжиниринговая нефтегазовая компания, 2012. №4 (32). – С. 14-19.

13. **ГОСТ 19.301-79.** ЕСПД. Программа и методики испытаний. Требования к содержанию и оформлению = Unified system for program documentation. Program and methods of testing. Requirements for contents and form of presentation : межгосударственный стандарт : издание официальное : утвержден и введен в действие Постановлением Государственного комитета СССР по стандартам от 11 декабря 1979 г. № 4753: дата введения 1981-01-01. – Москва : Стандартиформ, 2010. – 2 с.

14. **ГОСТ 25100-2011.** Грунты. Классификация: межгосударственный стандарт: издание официальное : утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 12 июля 2012 г. № 190-ст : введен взамен ГОСТ 25100-95 : дата введения 2013-01-01. - Москва: МНТКС, 2013. – 63 с.

15. **Довгалева, Ю. А.** Термобарический прогноз нефтегазоносности глубокозалегающих подсолевых отложений Ковыктинского месторождения / Довгалева, Ю. А., Коротаев, Ю. П. // Нефть России. – 2001. - №6. – (Наука и техника). - URL: <http://oilru.com/nr/87/1167> (дата обращения: 01.09.2018).

16. **Евдокимов, В. С.** Исследование работы сезонно-действующего термостабилизатора грунта / В.С. Евдокимов, В.А. Максименко, В.К. Васильев // Проблемы региональной энергетики. - 2014. - №3 (26) – С. 74-80.
17. **Жмакин, В.Л.** Разработка методов и технических решений для транспортировки сжиженного природного газа по низконапорным трубопроводам: дис ... канд. технич. наук: 25.00.19 / Жмакин Виталий Леонидович – М., 2007. - 117 с.
18. **Жмулин, В.В.** Системы термостабилизации на объектах проектирования ПАО «ВНИПИгазодобыча» // Жмулин В.В., Туголуков Р.А. - СПб.: НТС ПАО «Газпром» [б.и.], 2016. – 15 с.
19. **Жувакин, Д.Ю.** Роль и перспективы Российской Федерации на мировом рынке сжиженного природного газа: дис. ... канд. экон. наук: 08.00.14 / Жувакин Дмитрий Юрьевич – М., 2014. – 185 с.
20. **Каширцев, В.А.** Независимый анализ путей транспортировки углеводородного сырья с Ковыктинского газоконденсатного месторождения / Каширцев В.А., Коржубаев А.Г., Садов А.П. и др. // М. - Иркутск – Нижний Новгород, 2007. – 162 с.
21. **Кириллов, Н.Г.** Сжиженный природный газ: анализ мирового рынка и перспективы отечественного производства / Кириллов Н.Г., Белозерова Т.Б., Лазарев А.Н., Ярыгин Ю.Н., Дроздов Ю.В. // Газохимия. - 2010. - №6 (16). – 23-29.
22. **Клименко, А.П.** Сжиженные углеводородные газы - М., Недра, 1974. – 368 с.
23. **Коновалов, В.И.** Разработка расчета вихревых трубок Ранка-Хилша / Коновалов В.И., Орлов А.Ю., Кудра Т. // Вестник ТГТУ. – 2012. – Т. 18. - № 1. – С. 84-107.
24. Ковыктинское газоконденсатное месторождение (Ковыкта) // Neftegaz.RU. – 2012. - №6. - URL: http://neftegaz.ru/tech_library/view/4189-Kovyktinskoe-gazokondensatnoe-mestorozhdenie-Kovykta (дата обращения: 04.06.2017).

25. **Комарова, Т.В.** Организация эксперимента в металловедении и термообработке / Т.В. Комарова, М.Н. Чезрова – Нижний Новгород: НГТУ им. Р.Е. Алексеева, 2010. – 284 с.
26. **Крамаренко, В.В.** Грунтоведение: учебное пособие / Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011. – 431 с.
27. **Крапивский, Е.И.** Исследование фазовых состояний смесей сжиженных углеводородов в программном комплексе Refprop / Крапивский Е.И., Закирова Г.С. // Учебное пособие, - СПб.: Инфо-да. - 2016. – 122 с.
28. **Крапивский, Е.И.** Исследование фазовых состояний смесей сжиженных углеводородов газоконденсатных месторождений п-ова Ямал при низких температурах / Крапивский Е.И., Миннегулова Г.С. // Газовая промышленность, 2014. № 11. С. 86 – 90.
29. **Крапивский, Е.И.** Особенности строительства подземного низкотемпературного магистрального трубопровода смеси сжиженных углеводородных газов в условиях Крайнего Севера / Крапивский Е.И., Миннегулова Г.С., Садыкова Р.М. // Горный информационно-аналитический бюллетень. М.: МГГУ, 2013. № 12. С. 270 – 275.
30. **Кукис, В.С.** Оптимизация параметров вихревой трубы / Кукис В.С., Шабалин Д.В., Омельченко Е.А. / Международный научно-исследовательский журнал. – Екатеринбург, 2016. – № 10 (52). – С. 66-70.
31. **Лапшин, В.И.** Фазовые превращения углеводородных нефтегазоконденсатных систем / В.И. Лапшин, А.Н. Волков, А.А. Константинов // Вести газовой науки. – 2014. - № 2 (18). – с. 120 – 128.
32. **Макаров, В.И.** Термосифоны в северном строительстве. – Новосибирск: Наука, 1985. – 169 с.
33. **Максименко, В.А.** Система заморозки грунта на основе парокомпрессионного и естественноциркуляционного циклов / Максименко В.А., Евдокимов В.С., Гладенко А.А., Новиков А.А., Галдин В.Д. // ОНВ. - 2012. - №2 (110). – С. 163-165.

34. **Мартынов, А.В.** Что такое вихревая труба? / Мартынов А.В., Бродянский В.М. // М.: Энергия, 1976. – 152 с.
35. **Махно, Д.А.** Обоснование маршрута проектирования трубопровода по транспортировке газоконденсатной смеси с Ковыктинского месторождения в Китайскую народную республику / Махно Д.А., Крапивский Е.И. // Горный информационно-аналитический бюллетень – 2018. - №5. – С. 193-205.
36. **Махно, Д.А.** Обоснование технологии транспортировки ресурсов Ковыктинского газоконденсатного месторождения трубопроводным транспортом / Махно Д.А., Крапивский Е.И., Демченко Н.П., Семин В.И. // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и море – 2018. – №12. – С. 36-40.
37. **Махно, Д.А.** Обоснование способа поддержания температурного режима трубопроводов для транспортировки газоконденсатной смеси в рабочем диапазоне / Махно Д.А., Агинея Р.В. // Технологии нефти и газа – 2020. - №2 (127). – С. 51-58.
38. **Махно, Д.А.** Анализ вариантов маршрутов проектирования трубопровода по транспортировке смеси сжиженных углеводородов с Ковыктинского месторождения в КНР / Махно Д.А., Крапивский Е.И. // *Norwegian Journal of development of the International Science*. – 2017. – №5. – С. 21-26;
39. **Махно, Д.А.** Обзор вариантов строительства трубопровода по транспортировке смеси сжиженных углеводородов с Ковыктинского и Чаяндинского месторождений в КНР / Махно Д.А., Крапивский Е.И. // Трубопроводный транспорт – 2017: тезисы докладов XII Международной учебно-научно-практической конференции / ред. кол: Р.Н. Бахтизин, С.М. Султанмагомедов и др. – Уфа: Изд-во УГНТУ, 2017. – С. 120-121;
40. **Махно, Д.А.** Анализ вариантов маршрутов проектирования трубопровода по транспортировке смеси сжиженных углеводородов с Ковыктинского месторождения в КНР / Махно Д.А., Крапивский Е.И., Шубин А.В. // *Norwegian Journal of development of the International Science*. – 2018. – №17. – С. 3-6;

41. **Махно, Д.А.** Обоснование технологии транспортировки углеводородов Ковыктинского газоконденсатного месторождения / Махно Д.А., Шубин А.В. // Нефть и газ – 2018: тезисы докладов 72-й Международной учебно-научно-практической конференции / ред. кол: В.Г, Мартынов (отв. ред.) и др. – Москва: Изд-во РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, 2018. – С. 77;

42. **Махно, Д.А.** Обоснование технологии транспортировки смеси сжиженных углеводородов с Ковыктинского месторождения в КНР / Махно Д.А., Крапивский Е.И., Шубин А.В. // Трубопроводный транспорт – 2018: тезисы докладов XIII Международной учебно-научно-практической конференции / ред. кол: Р.Н. Бахтизин, С.М. Султанмагомедов и др. – Уфа: Изд-во УГНТУ, 2018. – С. 79-81;

43. **Махно, Д.А.** Обоснование маршрута проектирования и технологии трубопроводного транспорта сжиженной смеси природного газа и газового конденсата с Ковыктинского месторождения / Махно Д.А., Шубин А.В. // СЕВЕРГЕОЭКОТЕХ-2018: материалы XIX Международной молодежной научной конференции – Ухта: Изд-во УГТУ, 2018. – С. 149-152;

44. **Махно, Д.А.** Обоснование технологии транспортировки смеси сжиженных углеводородов с Ковыктинского месторождения в КНР / Махно Д.А., Крапивский Е.И., Шубин А.В. // Трубопроводный транспорт – 2018: тезисы докладов XIII Международной учебно-научно-практической конференции / ред. кол: Р.Н. Бахтизин, С.М. Султанмагомедов и др. – Уфа: Изд-во УГНТУ, 2018. – С. 79-81;

45. **Махно, Д.А.** Обоснование способа поддержания рабочей температуры при транспортировке природного газа и газового конденсата в виде сжиженной смеси углеводородов трубопроводным транспортом / Махно Д.А., Крапивский Е.И., Шубин А.В. // Нефть и газ – 2019: тезисы докладов 73-й Международной учебно-научно-практической конференции / ред. кол: В.Г, Мартынов (отв. ред.) и др. – Москва: Изд-во РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, 2019. – С. 180-181.

46. **Меркулов, А. П.** Вихревой эффект и его применение в технике. — М.: Машиностроение, 1969. — 184 с.
47. **Местников, В.В.** Исследование возможностей использования воздушных охлаждающих систем для регулирования температурного режима грунтовых оснований в криолитозоне: дис ... канд. технич. наук: 25.00.08 / Местников Владимир Владимирович – Якутск, 2013. - 137 с.
48. **Миннегулова, Г.С.** Обоснование технологии транспортирования газоконденсатной смеси газоконденсатных месторождений Крайнего Севера по низкотемпературным магистральным трубопроводам: дис ... канд. технич. наук: 25.00.19 / Миннегулова Гульнур Сагдатовна – СПб., 2015. - 128 с.
49. **Назарова, М.Н.** Сравнительный анализ транспорта газа по трубопроводам в жидком и газовоздушном состояниях / Назарова М.Н., Мартыненко Я.В., Воронов В.А. // Neftegaz.RU. – 2017. - №10. – с. 20-23.
50. **Никишин, А.В.** Применение различных видов систем температурной стабилизации на объектах нефтегазовой отрасли / Никишин А.В., Набоков А.В., Огороднова Ю.В., Коркишко О.А. // Инженерный вестник Дона. – Тюмень: Тюменский индустриальный университет, 2017. №2 (45) – 9 с.
51. **Никитин, С.А.** Опыт применения сезонно-действующих охлаждающих устройств на объектах ООО «Газпром добыча Уренгой» – СПб.: НТС ПАО «Газпром» [б.и.], 2016. – 8 с.
52. **Николаев, А.К.** Анализ существующих методик расчета режимов перекачки сжиженного природного газа по трубопроводам / А.К. Николаев, В.П. Докукин, В.А. Воронов // Записки Горного института. – 2012. – Т. 199. – с. 357 – 359.
53. Опыт применения систем термостабилизации грунтов на объектах ООО «Газпром трансгаз Ухта» – СПб.: НТС ПАО «Газпром» [б.и.], 2016. – 16 с.
54. **Паздерин, Д.С.** Динамика теплового состояния многолетнемерзлых грунтов в основании заглубленного трубопровода с применением охлаждающих устройств (термостабилизаторов): дис ... канд. технич. наук: 25.00.08 / Паздерин Дмитрий Сергеевич – Тюмень, 2017. - 204 с.

55. **Паздерин, Д.С.** Расчет ореола промерзания грунта вблизи двух сезонно-действующих охлаждающих устройств // Нефтяное хозяйство. – 2014. – № 2 – с. 20-21.

56. **Писаревский, В.М.** Оценка параметров высокомолекулярного остатка газоконденсатной смеси при расчетах трубопроводов, эксплуатирующихся в сверхкритическом режиме / В.М. Писаревский, А.Н. Швец // Газовая промышленность. – 2014. - № 11. – с. 82 – 86.

57. **Писаревский, В.М.** Трубопроводный транспорт газоконденсатной смеси в сверхкритическом состоянии / В.М. Писаревский, А.Н. Швец // Газовая промышленность. – 2014. - № 1. – с. 87 – 90.

58. **Полозов, А.Е.** Полигон для обработки научно-исследовательских, строительных и эксплуатационных вопросов применительно к СПГ - проводам / А.Е. Полозов // Строительство трубопроводов. - 1995. - № 3. - с. 12 - 14.

59. **Полозов, А.Е.** Повышение прочности низкотемпературных теплоизолированных трубопроводов: дис. ... д-ра технич. наук: 25.00.19 / Полозов Анатолий Евсеевич – М., 2004. – 348 с.

60. **Полозов, А.Е.** Преодоление двухфазности течения транспортируемого сжиженного природного газа по трубопроводу / А.Е. Полозов, В.Л. Жмакин // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. - 2005. - № 12. – с. 58 - 61.

61. **Поляков, А.В.** К вопросу определения давления начала конденсации тощих углеводородных систем / А.В. Поляков // XIX Международная молодежная научная конференция «Севергеоэкотех-2013»: материалы конференции. – Ухта: УГТУ, 2013. – 278 - 281 с.

62. **Протодьяконов, М.М.** Методика рационального планирования экспериментов / М.М. Протодьяконов, Р.И. Тедер. – М.: Наука, 1970. – 78 с.

63. **Пятницкая, Г.Р.** Сырьевая база гелия Российской Федерации и перспективы ее развития / Пятницкая Г.Р., Силантьев Ю.Б. // Вести газовой науки. - 2013. - №5 (16). – С. 194-199.

64. Рекомендации по проектированию и применению в строительстве охлаждающих установок, работающих без энергетических затрат. - М.: НИИОСП им. Н.М. Герсевича. – 1984. – 76 с.

65. Рекомендации по проектированию газопроводов, транспортирующих охлажденный газ Р 585-85. – М.: ВНИИСТ. – 1986. – 98 с.

66. **Р Газпром 086-2010** Инструкция по комплексным исследованиям газовых и газоконденсатных скважин: в 2 ч. – М.: Газпром ЭКСПО, 2011. – Ч. 1. – 234 с.

67. **Р Газпром 086-2010** Инструкция по комплексным исследованиям газовых и газоконденсатных скважин: в 2 ч. – М.: Газпром ЭКСПО, 2011. – Ч. 2. – 319 с.

68. **Разносчиков, В.В.** Математическая модель расчета теплофизических свойств синтетического жидкого топлива / Разносчиков В.В., Демская И.А. // Электронный журнал «Труды МАИ». - 2006. – выпуск № 50. - с. 1 - 20.

69. **Рахматуллин, Ш.И.** Проблемы безопасности трубопроводов ШФЛУ // The Chemical Journal. – 2012. - № 3. – с. 24 – 28.

70. **Рачевский, Б.С.** Сжиженные углеводородные газы – М.: Изд-во «НЕФТЬ и ГАЗ», 2009. – 640 с.

71. **Рахимов, В.О.** Определение теплогазодинамических параметров процессов при транспорте и хранении сжиженного природного газа / В.О. Рахимов, Г.Е. Коробков // Нефтегазовое дело. - 2012. – Т. 10. - №1. - С.54-58.

72. **Рахимов, В.О.** Особенности термодинамических процессов при хранении сжиженного природного газа: дис ... канд. технич. наук: 25.00.19 / Рахимов Вадим Олегович – Уфа, 2013. - 136 с.

73. **РД-75.180.00-КТН-198-09** Унифицированные технологические расчеты объектов магистральных нефтепроводов и нефтепродуктов. – М.: Гипротрубопровод, 2009 – 207 с.

74. **Садыкова, Р.М.** Совершенствование технологии эксплуатации трубопроводов сжиженной смеси природного газа и газового конденсата в

условиях Крайнего Севера: дис ... канд. технич. наук: 25.00.19 / Садыкова Римма Маратовна – СПб., 2016. - 127 с.

75. **СП 25.13330.2012** Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах. Актуализированная редакция СНиП 2.02.04-88. - М.: Минрегион России, 2012. – 118 с.

76. **СП 36.13330.2012** Магистральные трубопроводы. Актуализированная редакция СНиП 2.05.06-85. - М.: Госстрой, 2013. – 102 с.

77. **СП 61.131330.2012** Тепловая изоляция оборудования и трубопроводов. Актуализированная редакция СНиП 41-03-2003. – М.: Минрегион России, 2011. – 51 с.

78. **СП 131.131330.2018** Строительная климатология СНиП 23-01-99*. – М: Стандартиформ, 2019. – 51 с.

79. **СТО Газпром 2-2.1-390-2009.** Руководство по проектированию и применению сезонно-охлаждающих устройств для термостабилизации грунтов оснований фундаментов. – М. [б.и.], 2010. – 57 с.

80. **СТО Газпром 2-2.1-435-2010.** Проектирование оснований, фундаментов, инженерной защиты и мониторинга объектов ОАО «Газпром» в условиях Крайнего Севера. – М. [б.и.], 2010. – 225 с.

81. **Сухарев, К.В.** Верификация математической модели экспериментальной установки для исследования эффекта Ранка-Хилша / Сухарев К.В., Дияров К.А., Насырова М.И., Бердин В.К., Еникеева А.А. // Нефтегазовое дело, 2018. - № 2. – С. 43-64.

82. **Тугунов, П.И.** Типовые расчеты при проектировании и эксплуатации нефтебаз и нефтепроводов / П.И. Тугунов, В.Ф. Новоселов, А.А. Коршак, А.М. Шаммазов; Изд. 2-е, переработанное. - Уфа: ООО «ДизайнПолиграфСервис», 2002. - 658 с.

83. **Хренков, Н.Н.** Расчет режимов остывания и разогрева трубопроводов/ Н.Н. Хренков, О.Ю. Дегтярева // М.: Промышленный электрообогрев и электроотопление, 2011. - №2. - С. 20-23.

84. **Хренков, Н.Н.** Тепловые параметры трубопроводов, проложенных в вечномёрзлом грунте // М.: Нефтяное хозяйство. - №3. - С. 20-23.
85. **Якуцени, В.П.** Сырьевая база гелия: состояние, перспективы освоения и использования» // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. - 2001. - № 2. - С. 10-22.
86. **Changjun, Li** Prediction of the dew point pressure for gas condensate using a modified Peng–Robinson equation of state and a four-coefficient molar distribution function / Changjun Li, Yang Peng, Jingya Dong, Lei Chen // Journal of Natural Gas Science and Engineering, Vol. 27, Part 2, November 2015, P. 967-978.
87. **Kh., Nasrifara** Vapor–liquid equilibria of LNG and gas condensate mixtures by the Nasrifar–Moshfeghian equation of state / Kh. Nasrifara, M. Moshfeghian. // Fluid Phase Equilibria, Vol. 200, Issue 1, July 2002, P. 203-216.
88. **Nefeli, Novak** Prediction of dew points and liquid dropouts of gas condensate mixtures / Nefeli Novak, Vasiliki Louli, Stathis Skouras, Epaminondas Voutsas // Fluid Phase Equilibria, Vol. 457, February 2018, P. 62-73.
89. **Moshfeghian, M.** Variation of properties in the Dense Phase region; Part 2 – Natural Gas // Fluid Phase Equilibria, Vol. 294, December 2009, P. 162-169.
90. **Moshfeghian, M.** Variation of properties in the dense phase region; Part 1 - Pure Compounds // Fluid Phase Equilibria, Vol. 323, September 2010, P. 91-100.
91. **Redlich, O. N. S.** On the Thermodynamics of Solutions. V. An Equation of State. Fugacities of Gaseous Solutions / Redlich O., Kwong J. // Chemical Reviews. — 1949. — Т. 44, № 1. — с. 233–244.