

На правах рукописи

Махно Даниил Андреевич



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

*Специальность 25.00.19 – Строительство и эксплуатация
нефтегазопроводов, баз и хранилищ*

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Санкт-Петербург – 2020

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет»

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор

Агиней Руслан Викторович

Официальные оппоненты:

Александров Юрий Викторович,

доктор технических наук, профессор, Акционерное общество «СТРОЙГАЗМОНТАЖ», заместитель генерального директора по капитальному ремонту, реконструкции, и строительству объектов социального назначения;

Китаев Сергей Владимирович

доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет», кафедра транспорта и хранения нефти и газа, профессор кафедры.

Ведущая организация – акционерное общество «Гипрогазцентр», г. Нижний Новгород.

Защита диссертации состоится 25 февраля 2021 г. в 11:00 на заседании диссертационного совета ГУ 212.224.13 Горного университета по адресу: 199106, г. Санкт-Петербург, 21-я линия, д.2, ауд. № 1171а.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Горного университета и на сайте www.spmi.ru.

Автореферат разослан 24 декабря 2020 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
диссертационного совета



ФЕТИСОВ
Вадим Георгиевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

В связи с активной работой по разработке перспективного газоконденсатных месторождений (ГКМ) Иркутской области и Восточной Сибири, обладающими крупнейшими известными запасами углеводородов в мире, данная тема является актуальной на сегодняшний день и в ближайшие несколько десятилетий.

В этой связи значимыми вопросами являются обоснование, проектирование, строительство и эксплуатация трубопроводных транспортных систем 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.

Обоснование способа поддержания рабочих режимов трубопроводов для транспортировки сжиженной смеси углеводородов с газоконденсатных месторождений Восточной Сибири при температуре ниже -25°C и давлении 10...12 МПа, позволит осуществить перемещение значительных объемов углеводородной смеси с газоконденсатных месторождений на большое расстояние, сделать подобный транспорт безопасным и экономически выгодным за счет сокращения капитальных вложений, строительно-монтажных работ и эксплуатационных расходов.

Степень разработанности темы исследования

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. Бенъяминович, Э.М. Блейхер, А.Е. Владимиров, А.И. Гольянов, С.Ф. Гудков, А.Д. Двойрис, Г.П. Добровольский, В.А. 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. Швеи, Kh. Nasrifara, M. Moshfeghian и др.

На сегодняшний день недостаточно полно рассмотрены термодинамические процессы транспортировки смеси сжиженных углеводородов по одному протяженному трубопроводу. Кроме этого, актуальными являются задачи поддержания рабочей температуры таких трубопроводов в рабочем диапазоне.

Результаты литературного обзора показали, что на протяжении последних нескольких десятилетий транспорт углеводородов в сниженном состоянии становится все более популярным по всему миру. Это связано со специфическими 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 особенно актуален для нашей страны в связи с климатическими, геологическими и географическими особенностями, в частности при освоении месторождений Восточной Сибири.

Цель работы – обосновать способ регулирования температуры трубопроводов для транспортировки сжиженной

смеси углеводородов с газоконденсатных месторождений Восточной Сибири.

Поставленная в диссертационной работе цель достигается посредством решения нижеуказанных **задач**:

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 работы:

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 термостабизаторе и атмосферным воздухом.

3. Уточнена технология транспортировки углеводородов с газоконденсатных месторождений в виде сжиженной смеси с учетом применения предложенного способа, а также содержания гелия в транспортируемой среде.

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 вечномёрзлых 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.

На защиту выносятся следующие положения:

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 результатов исследования обусловлена 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.

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

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы работы, сформулированы цель, задачи работы и научная новизна, раскрыты теоретическая и практическая значимости исследования и изложены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе проведен анализ существующих и разрабатываемых способ транспортировки углеводородного сырья в охлажденном и сжиженном состоянии. Выделена характерная проблема при реализации технологий трубопроводного транспорта охлажденных и сжиженных углеводородов - поддержание однофазного состояния потока рабочей среды по всей длине трубопровода с целью обеспечения стабильной и безопасной транспортировки.

Рассмотрены способы трубопроводного транспорта природного газа в сжиженном состоянии: сжиженный природный газ (СПГ), сжиженная смесь природного газа и газового конденсата. Проведен сравнительный анализ рассмотренных способов.

Рассмотрены случаи практического применения систем термостабилизации грунтов с помощью сезонно-действующих охлаждающих устройств (СОУ). Изучены результаты научно-исследовательских работ по использованию СОУ с целью поддержания температуры низкотемпературных трубопроводов в рабочем диапазоне.

Во второй главе приводятся теоретические исследования процесса теплопередачи между сжиженной смесью углеводородов в трубопроводе, грунтом и воздухом.

Поддержание температуры смеси в заданном диапазоне рабочих температур - основная задача при реализации данной технологии, поскольку при нагреве смеси до определенной (критической) температуры происходит разложение смеси на жидкую и газообразную фазы.

Предлагается использовать вихревые трубки в качестве генератора холода для обеспечения работы СОУ по регулированию температуры сжиженной смеси углеводородов.

Данное техническое решение обладает рядом преимуществ по сравнению с другими системами принудительной циркуляции хладагента внутри термостабилизатора:

- предельная простота эксплуатации за счет отсутствия движущихся элементов в конструкции;
- отсутствие необходимости электропитания для функционирования;
- значительный создаваемый температурный эффект.

Для определения оптимальных параметров вихревой трубы была разработана математическая модель (1) процесса теплообмена между смесью сжиженных углеводородов и атмосферным воздухом в условиях охлаждения грунта вокруг трубопровода с помощью термостабилизатора грунта и вихревой трубки с компрессором:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dT_c}{dx} = -D_i \frac{\xi}{2D_{\text{вн}} F^2} x G_c^2 - \frac{\pi D_{\text{н}}}{G_c c_{\text{pc}} l_{\text{п}} \frac{D_{\text{н}} + 2\delta_{\text{из}}}{2\lambda_{\text{из}}}} (T_{\text{гр}} - T_c), \\ T_{\text{ск}} = \left(T_{\text{сн}} - T_{\text{ос}} - \frac{4 \cdot G_c}{\rho \cdot \pi D_{\text{вн}}^2} \right) e^{-\frac{k_{\text{т}} \cdot L}{G_c c_{\text{п}}}} + T_0 + \frac{4 \cdot G_c}{\rho \cdot \pi D_{\text{вн}}^2}; \\ k_{\text{т}} = \frac{\pi}{\frac{1}{\alpha_1 \cdot D_{\text{вн}}} + \frac{R}{2} + \frac{1}{\alpha_2 \cdot D_{\text{н}}}}; \\ R = \frac{1}{\lambda_{\text{ст}}} \cdot \ln \frac{D_2}{D_1} + \frac{1}{\lambda_{\text{аи}}} \cdot \ln \frac{D_2 + 2\delta_{\text{аи}}}{D_2} + \frac{1}{\lambda_{\text{ти}}} \cdot \ln \frac{D_3}{D_2 + \delta_{\text{аи}}}, \\ c_{\text{гр}}(T) \frac{\partial T_{\text{гр}}}{\partial \tau} = \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial \left(r \lambda_{\text{гр}}(T_{\text{гр}}) \frac{\partial T_{\text{гр}}}{\partial r} \right)}{\partial r} + \frac{\partial \left(\lambda_{\text{гр}}(T) \frac{\partial T_{\text{гр}}}{\partial z} \right)}{\partial z}; \\ \lambda_{\text{гр}}(T) \frac{\partial T_{\text{гр}}}{\partial r} = K_s(v)(T_{\text{гр}} - T_{\text{ос}}); \\ Q_{\text{x}} = \mu G_{\text{в}} c_{\text{рв}} (T_{\text{вх}} - T_{\text{x}}); \\ T_{\text{x}}(G_{\text{в}}, \mu) \rightarrow \min, \end{array} \right. \quad (1)$$

где $T_{\text{с}}, T_{\text{сн}}, T_{\text{ск}}, T_{\text{гр}}, T_{\text{ос}}, T_{\text{вх}}, T_{\text{x}}$ – 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;

$G_{\text{с}}, G_{\text{в}}$ – соответственно весовой расход смеси и входящего в вихревую трубку сжатого воздух;

$\lambda_{ст}, \lambda_{ан}, \lambda_{ти}$ – 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;

$c_{рс}, c_{рв}$ – 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.

В третьей главе описывается проведение экспериментальных исследований с целью определения оптимальных параметров работы вихревой трубы выбранного типа в качестве генератора холода с целью поддержания рабочей температуры трубопровода для транспортировки смеси сжиженных углеводородов (рисунки 1 и 2).

По результатам проведения полного факторного эксперимента была получена зависимость температуры охлажденного воздуха T_x от расхода сжатого воздуха G и относительного расхода охлажденного воздуха μ (рисунок 3).

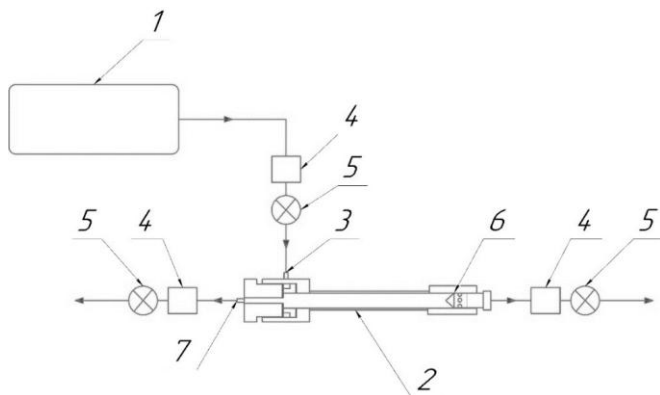


Рисунок 1 – Схема экспериментальной установки:
1 – компрессор, 2 – вихревая трубка, 3 – входной штуцер, 4 – термометры, 5 – расходомеры, 6 – дроссель, 7 – штуцер отвода охлажденного воздуха

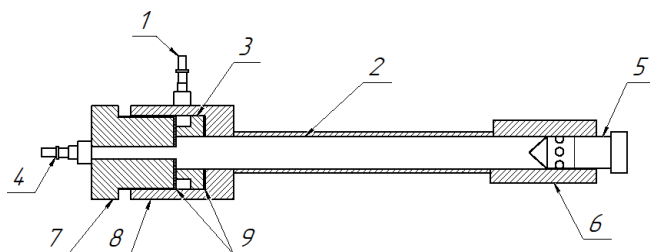


Рисунок 2 – Устройство опытного образца вихревой трубки:
1 – входной штуцер, 2 – труба, 3 – завихритель, 4 – «холодный» отвод, 5 – дроссель, 6 – корпус «горячего» отвода, 7 – гайка «холодного» отвода, 8 – корпус, 9 – уплотнительные кольца

На основании полученных регрессионных зависимостей определялись оптимальные геометрические параметры вихревой трубки. Влияние геометрических факторов линейное, поэтому масштабирование размеров трубки приводит к соответствующему линейному изменению рабочих характеристик трубки.

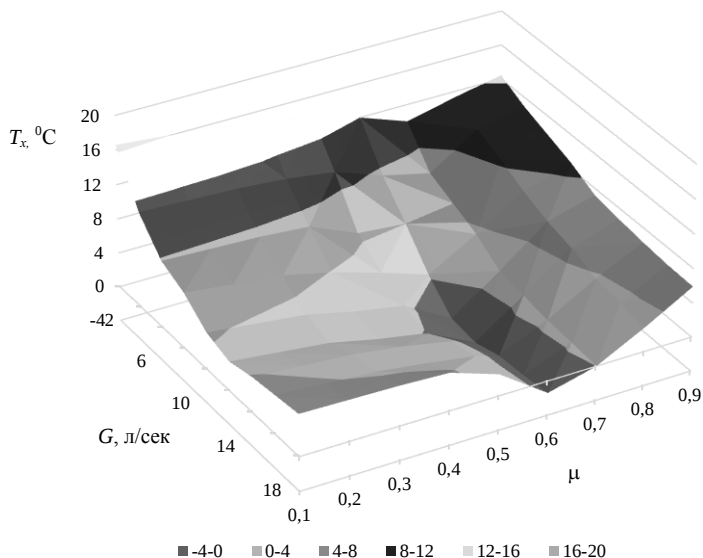


Рисунок 3 - Визуализация зависимости температуры охлажденного воздуха T_x от величины расхода сжатого воздуха G и относительного расхода сжатого воздуха μ

В четвертой главе приводится описание уточненной расчета трубопровода для транспортировки смеси сжиженных углеводородов, и обоснование методики регулирования рабочей температуры данных трубопроводов с помощью СОУ и вихревых трубок. В качестве примера рассматривалось Ковыктинское ГКМ.

С целью уточнения схемы процесса подготовки смеси сжиженных углеводородов предлагается включить этап выделения гелия из газа, например, с помощью мембранных установок, которые уже проходят опытно-промышленную эксплуатацию на Ковыктинском и Чаяндынском ГКМ. Уточненная принципиальная схема подготовки и транспортировки смеси сжиженных углеводородов представлена на рисунке 4.

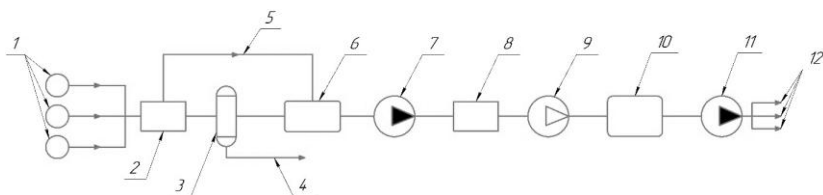


Рисунок 4 – Уточненная принципиальная схема подготовки и транспортировки смеси сжиженных углеводородов:

1 – промышленные 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

Уточненная методика расчета трубопровода для транспортировки смеси сжиженных углеводородов выглядит следующим образом:

1. На основании химического состава газа определяются критические параметры смеси природного газа и газового конденсата в соотношении 9:1 (рисунок 5).

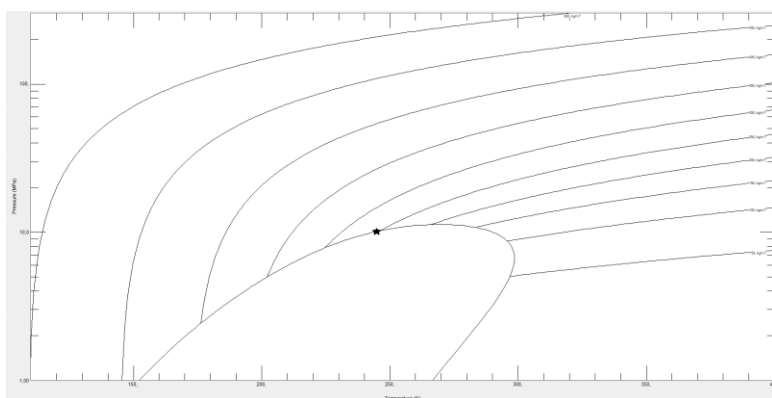


Рисунок 5 – Р-Т диаграмма газоконденсатной смеси Ковыктинского ГКМ в соотношении 9:1

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.

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.

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.

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.

Разработано техническое устройство для реализации данного способа регулирования рабочей температуры низкотемпературных трубопроводов с помощью вихревых трубок, используемых в качестве генераторов холода (рисунок 6).

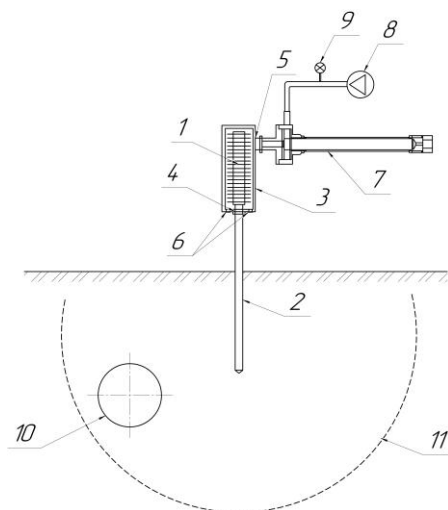


Рисунок 6 - Устройство для регулирования рабочей температуры трубопроводов для транспортировки смеси сжиженных углеводородов:
 1 – конденсаторная часть устройства, 2 – испарительная часть устройства,
 3 – кожух, 4 – монтажное отверстие, 5 – входное отверстие, 6 – выходные
 отверстия, 7 – вихревая труба, 8 – компрессор, 9 – манометр,
 10 – трубопровод, 11 – область работы термостабилизатора

В результате возникновения отрицательных температур воздуха двухфазный хладагент в корпусе конденсируется и под действием гравитационных сил стекает в испарительную часть 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 устройства, и процесс повторяется.

Разработана методика регулирования рабочей температуры трубопроводов с помощью СОУ и вихревых трубок. Термостабилизаторы грунта с областью работы радиусом R устанавливаются 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 термостабилизатора из одного ряда образуют с ближайшим термостабилизатором из второго ряда правильный треугольник со стороной $1,73R$ (рисунок 7).

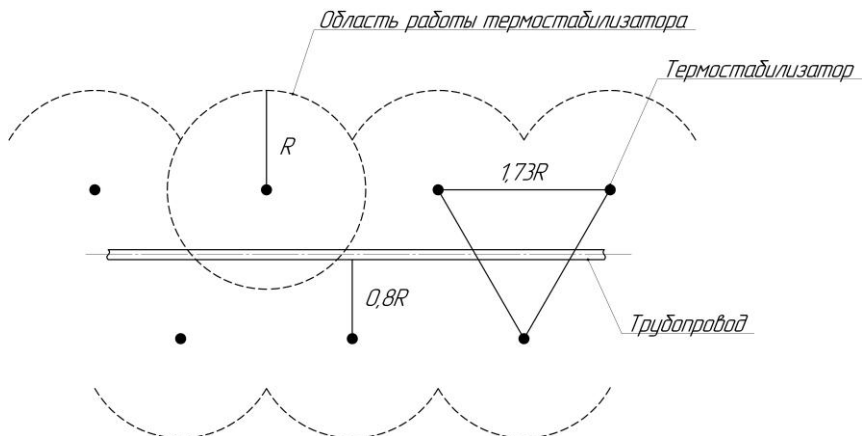


Рисунок 7 – Схема расположения термостабилизаторов грунта вдоль трассы трубопровода для транспортировки смеси сжиженных углеводородов

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.

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 ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях из Перечня ВАК

1. Махно Д.А. Обоснование маршрута проектирования трубопровода по транспортировке смеси сжиженных углеводородов с Ковыктинского месторождения в Китайскую народную республику / Махно Д.А., Крапивский Е.И. // Горный информационно-аналитический бюллетень – 2018. – №5. – С. 193-205. DOI: 10.25018/0236-1493-2018-5-0-193-205 (Scopus);
2. 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. DOI: 0.30713/0130-3872-2018-12s-36-40;
3. Махно Д.А. Обоснование способа поддержания температурного режима трубопроводов для транспортировки смеси сжиженных углеводородов в рабочем диапазоне / Махно Д.А., Агинец Р.В. // Технологии нефти и газа – 2020. – №2 (127). – С. 51-58. DOI: 10.32935/1815-2600-2020-1272-51-58.