

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«Сибирский федеральный университет»

На правах рукописи



Павлова Прасковья Леонидовна

**РАЗРАБОТКА ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ЭКРАННОГО
МОДУЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ТЕПЛООБМЕНА
ПОДЪЕМНОЙ КОЛОННЫ НЕФТЯНЫХ СКВАЖИН**

05.02.13 – Машины, агрегаты и процессы
(нефтегазовая отрасль)

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Красноярск – 2019

Диссертация выполнена на кафедре «Машины и оборудование нефтяных и газовых промыслов» Института нефти и газа Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Сибирский федеральный университет»

Научный руководитель –

Кондрашов Пётр Михайлович,
кандидат технических наук, доцент,
зав. кафедрой «Машины и
оборудование нефтяных и газовых
промыслов» ФГАОУ ВО «Сибирский
федеральный университет»

Официальные оппоненты –

Гаррис Нина Александровна,
доктор технических наук, профессор
кафедры «Гидрогазодинамика
трубопроводных систем и
гидромашины» ФГАОУ ВО
«Уфимский государственный
нефтяной технический университет»

Полозков Ким Александрович,
кандидат технических наук,
заведующий сектором
ООО «Газпром ВНИИГАЗ»

Ведущая организация –

ФГБУН Институт горного дела
им. Н.А. Чинакала СО РАН

Защита состоится «20» июня 2019 г. в 12ч00мин на заседании диссертационного совета Д 212.291.02 в Ухтинском государственном техническом университете по адресу: 169300, г. Ухта, ул. Первомайская, д. 13.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Ухтинский государственный технический университет», www.ugtu.net в разделе «Диссертации».

Отзывы на автореферат в двух экземплярах с заверенными гербовой печатью и подписью просим направлять по адресу: 169300, г. Ухта, ул. Первомайская, д.13, ФГБОУ ВО «Ухтинский государственный технический университет», диссертационный совет.

Автореферат диссертации разослан «29» апреля 2019 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
канд. техн. наук

Д. А. Борейко

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Многолетнемёрзлые породы (ММП) занимают более половины северных территорий Российской Федерации, являющихся основной базой углеводородного сырья. Таяние мёрзлых грунтов, увеличение глубины их сезонного протаивания существенно усложняют строительство и эксплуатацию скважин в районах с ММП. Из-за протаивания мёрзлых пород деформируются и разрушаются наземные сооружения, теряет продольную устойчивость ствол скважины. Все это приводит к разгерметизации скважинного сооружения, появлению неуправляемых каналов прорыва углеводородного флюида из пласта на дневную поверхность, следовательно, катастрофическим последствиям.

Основное направление исследований и конструкторских работ – это создание пассивного термозащитного оборудования в виде термоизолированного направления, насосно-компрессорных труб, а также активного – термостабилизаторов с использованием хладагентов, например аммиака, фреона–22. Недостатками пассивного термозащитного оборудования является увеличение диаметра и веса труб, оттягивание процесса протаивания и невозможность управления теплообменом в системе «скважина – мёрзлая порода», а к недостаткам термостабилизаторов активного типа можно отнести сезонность работы устройства, использование опасных веществ для здоровья людей и окружающей среды. Анализ естественной и техногенной геокриологической опасности в нефтегазоносных провинциях Российской Федерации и существующих технических средств, применяемых для уменьшения техногенного воздействия скважины на многолетнемёрзлую породу, показал, что разработка оборудования, снижающего тепловое воздействие скважины, является актуальной задачей.

Степень разработанности темы исследования. В работе были использованы идеи российских и зарубежных авторов по проблеме строительства и эксплуатации скважин в многолетнемёрзлых породах.

Различные аспекты анализируемой проблемы нашли отражение во многих публикациях отечественных и зарубежных авторов. В частности, строительство и эксплуатацию скважин в многолетнемёрзлых породах рассматривали Б.Б. Кудряшов, В.Ф. Буслаев, В.Д. Седов, Ю.М. Басарыгин, А.И. Булатов, Ю.М. Проселков, С.М. Кулиев, А.Ю. Намиот, И.Т. Мищенко, Э.Б. Чекалюк, С.М. Купцов, Б.А. Ерехинский, А.В. Полозков и многие другие. Существенный вклад в развитие термозащитного оборудования и его классификации внесли И. Ю. Быков, Р. И. Медведский. За рубежом данная проблема отражена в работах А. Гудмена, С. Майера, В. Хамили, Д. Рея и других.

Несмотря на большое количество работ, проблема растепления многолетнемёрзлых пород во время строительства и эксплуатации скважин не решена. Отсутствие оборудования управления и поддержания тепловых процессов внутри скважины с целью сохранения естественного состояния многолетнемёрзлых пород является причиной таких аварий, как провалы, обвалы, промерзание скважинного оборудования, смятие обсадных колонн, появление неуправляемых каналов прорыва флюида или газа на дневную поверхность.

Соответствие паспорту заявленной специальности.

Тема и содержание диссертационной работы соответствуют паспорту специальности 05.02.13 «Машины, агрегаты и процессы» (нефтегазовая отрасль), а именно п. 1 «Разработка научных и методологических основ проектирования и создания новых машин, агрегатов и процессов; механизации производства в соответствии с современными требованиями внутреннего и внешнего рынка, технологии, качества, надежности, долговечности, промышленной и экологической безопасности».

Цель работы: создание термоэлектрического экранного модуля управления процессами теплообмена скважины в многолетнемёрзлых породах.

Для достижения поставленной цели в диссертационной работе решаются следующие **задачи:**

1. Анализ техники и технологии управления процессами теплообмена скважин, расположенных в многолетнемёрзлых породах.

2. Разработка конструкции термоэлектрического экранного модуля для управления процессами теплообмена внутри скважины.

3. Создание аналитической модели работы термоэлектрического экранного модуля на основе использования термоэлектрического элемента для уменьшения температуры на его наружной поверхности.

4. Экспериментальные исследования изменения температуры от рабочих характеристик термоэлектрического элемента.

5. Разработка опытного образца и лабораторного стенда для исследования работоспособности термоэлектрического экранного модуля.

6. Разработка методики инженерного расчёта термоэлектрического экранного модуля, предназначенного для управления процессом теплообмена скважины, расположенной в многолетнемёрзлых породах.

Научная новизна работы.

1. Разработана математическая модель процесса перемещения теплового потока, установлена аналитическая зависимость, учитывающая мощность термоэлектрических элементов, коэффициенты теплоотдачи, теплопроводности материалов и особенности конструкции термоэлектрического экранного модуля.

2. Установлено, что изменение температуры от локально расположенного термоэлектрического элемента имеет тенденцию к увеличению по мере роста силы тока, отвода теплоты от горячей стороны термоэлектрического элемента, коэффициента теплоотдачи, а изменение температуры от мощности термоэлектрического элемента описывается экспоненциальной зависимостью, совпадающей с аналитической моделью с погрешностью не более 10 %.

3. На лабораторной образце термоэлектрического экранного модуля установлены интервалы изменения температуры охлаждающей жидкости по линейной зависимости, охлаждения наружной поверхности по экспоненциальной зависимости от времени, подтверждающие осуществимость снижения теплового потока за счет использования локально расположенных термоэлектрических элементов вдоль поверхности трубы для скважин кинематической вязкостью жидкости не более $60 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ и критерием подобия Стэнтона 12,08.

Основные положения, выносимые на защиту.

1. Конструкция скважинного термоэлектрического экранного модуля с управляемой температурой на его наружной поверхности для обеспечения снижения теплового воздействия подъемной трубы на окружающую среду.

2. Математическая модель управления процессом теплообмена нефтяных скважин при локальном расположении термоэлектрических элементов в термоэлектрическом экранном модуле.

3. Выявленная зависимость изменения температуры наружной поверхности скважинного термоэлектрического экранного модуля от расстояния между термоэлектрическим элементом, необходимая для расчета их оптимального количества, и точкой на поверхности.

4. Разработанная методика расчета температуры в любой точке поперечного сечения обсаженной скважины, имеющей скважинные термоэлектрические экранированные модули в подъемной колонне.

Теоретическая и практическая значимость работы. Теоретическая значимость работы заключается в научном обосновании целесообразности применения термоэлектрических элементов в экранном модуле для управления процессом теплообмена при строительстве и эксплуатации скважин. Практическая значимость:

1. Предложены технические решения управления процессом теплообмена в нефтяных скважинах с помощью термоэлектрического экранного модуля с локально расположенными термоэлектрическими элементами.

2. Предложены основные формулы и методика инженерного расчёта, позволяющие спроектировать термоэлектрический экранный модуль на основе термоэлектрических элементов для управления процессами теплообмена нефтяных скважин.

3. Расширены функциональные возможности лабораторного стенда – имитатора ствола скважины, а именно создан комплекс оборудования для исследования температуры на поверхности термоэлектрического экранного модуля, который послужит для исследования вновь разрабатываемых образцов и моделей.

Методология и методы исследования. Поставленные задачи решались на основе сбора, обобщения и обработки данных, опубликованных в отечественной и зарубежной литературе; математических методов исследования функций, анализа полученных экспериментальных зависимостей на лабораторном оборудовании с применением стандартных приборов измерения температуры, расхода жидкости, мощности термоэлектрического элемента; для обработки экспериментальных данных использовались методы математической статистики.

Личный вклад автора в диссертационной работе заключается в разработке конструкции термоэлектрического экранного модуля для управления процессом теплообмена при строительстве и эксплуатации скважин в многолетнемёрзлых породах, специального комплекса оборудования для измерения температуры, аналитических математических моделей изменения температуры от локально расположенного термоэлектрического элемента, на основе которых предложена методика инженерного расчёта скважинного термоэлектрического экранного

модуля, а также проведении опытных испытаний на лабораторном стенде имитатора ствола скважины.

Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждена результатами: анализа предыдущих исследований на протяжении более 30 лет; физико-математического моделирования; аналитических исследований и экспериментов с использованием подходов теории ошибок эксперимента и математической статистики.

Реализация результатов работы.

1. Опытный образец разработан в ходе выполнения гранта программы «УМНИК» от Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере по договору № 2308ГУ1/2014 от 19.06.2014 по теме «Разработка устройства для теплоизоляции скважин в районах с многолетнемерзлыми породами».

2. Создана система для измерения температуры в шести точках на поверхности опытного образца при выполнении гранта программы «Территория 2020» от ММАУ «Центр продвижения молодежных проектов ВЕКТОР» и «Центр технического проектирования».

Апробация работы. Результаты исследований докладывались на VII, VIII, IX, X Всероссийских научно-технических конференциях студентов, аспирантов и молодых ученых «Молодежь и наука» в г. Красноярске; на конференции «Инновационный прорыв», г. Красноярск, 2014 г.; на VI Международном Евразийском симпозиуме по проблемам прочности материалов и машин для регионов холодного климата, г. Якутск, июнь 2013 г.; на конференции «Научно-техническое творчество молодежи», г. Красноярск, май 2014 г.; на III Всероссийской научно-технической конференции «Инновационное нефтегазовое оборудование: проблемы и решения», г. Уфа, ноябрь 2014 г.; на Международной конференции Start Up Village в г. Москве 2–3 июня 2014 г.; на научно-техническом конкурсе «Инженерная лига», г. Красноярск, май 2015 г.; на II Всероссийской научно-технической конференции «Молодая нефть», г. Красноярск, май 2015 г.; на специализированной выставке «Нефть. Газ. Химия», г. Красноярск, апрель 2015 г.; на Международном конкурсе Young Vision Award от GAZPROM International и Wintershall, г. Санкт-Петербург, сентябрь 2015 г.; на Международном конкурсе «ПРО: Регион-2015», г. Севастополь, октябрь 2015 г.; на IX Международной научно-практической конференции «Современные проблемы машиностроения», г. Томск, декабрь 2015 г.; на региональном конкурсе Generation S, г. Красноярск, сентябрь 2016 г.; на специализированной выставке «Нефть. Газ. Химия», г. Красноярск, ноябрь 2016 г.; на X Международной конференции «Рассохинские чтения», г. Ухта, февраль 2018 г.

Публикации. Основные результаты исследований опубликованы в 25 работах, в том числе 3 патентах на изобретение, в 22 статьях, в том числе 10 из перечня ВАК, 2 в базах данных Scopus.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа изложена на 174 страницах, состоит из введения, 3 глав, заключения и приложений, в том числе содержит 87 рисунков и 22 таблицы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, определены цели и задачи исследования, научная новизна и практическая значимость.

В первой главе проведен анализ техники и технологий управления процессом теплообмена скважин, а именно существующих конструкций термозащитного оборудования, его видов, характеристик, конструктивных исполнений. Рассмотрены основные осложнения, возникающие во время строительства и эксплуатации скважин в районах с многолетнемёрзлой породой. Проведен обзор работ Р. И. Медведского, И. Ю. Быкова, Б. Б. Кудряшова, В. Ф. Буслаева, В. Д. Седова, Ю. М. Басарыгина, А. И. Булатова, Ю. М. Проселкова, С. М. Кулиева, А. Ю. Намиота, И. Т. Мищенко, Э. Б. Чекалюка, С. М. Купцова и многих других о влиянии процесса строительства и эксплуатации скважин на многолетнемёрзлые породы. С учетом проведенного анализа предлагается разработать конструкцию термозащитного оборудования с использованием термоэлектрических элементов и математическую модель изменения температуры.

Во второй главе разработана конструкция скважинного термоэлектрического экранного модуля (СТЭМ) с учетом работ А. Ф. Иоффе, А. Х. Черкасского, В. С. Мартыновского, А. Е. Коленко, П. Г. Шостаковского по использованию термоэлектрических элементов в различных отраслях промышленности. Скважинный термоэлектрический экранный модуль создает дополнительный изоляционный барьер активного типа в виде экрана, с помощью которого происходит постепенное снижение теплового потока в скважине до температуры на обсадной колонне, например кондукторе, ниже температуры фазовых превращений ММП.

Внутренняя труба 1 СТЭМ расположена внутри наружной трубы 2 с втулками 12. Компенсаторы линейных расширений 3, скорлупы теплоизоляционные 4, термоэлектрические сборки 5 обмотаны металлической проволокой 11. В межтрубном пространстве имеются центрирующие кольца 6, наполнитель 7, кабель 8, проходящий через переходники 9 с разъемными соединениями 10 и муфтами 13 (рисунок 1). В качестве внутренней трубы 1 используется насосно-компрессорная труба (ГОСТ 633–80). Наружная труба, изготовленная из стали или алюминиевого сплава, выполняет функцию кожуха для распределения температуры от локально расположенных термоэлектрических сборок 5, фиксированных металлической проволокой 11. Для увеличения эффективности теплоотвода и соединения секции наружной трубы имеется втулка с отверстиями 12. Для компенсации линейных расширений предусмотрены компенсаторы 3, например в виде гофрированной диафрагмы. Скорлупы 4, изготовленные из материала с низкой теплопроводностью, например пенополиуретана, предотвращают перемещение теплового потока скважинной жидкости в направлении наружной трубы.

Разработанная конструкция СТЭМ позволяет управлять процессом теплообмена в межтрубном пространстве скважин в многолетнемёрзлых породах за счет использования локально расположенных термоэлектрических элементов.

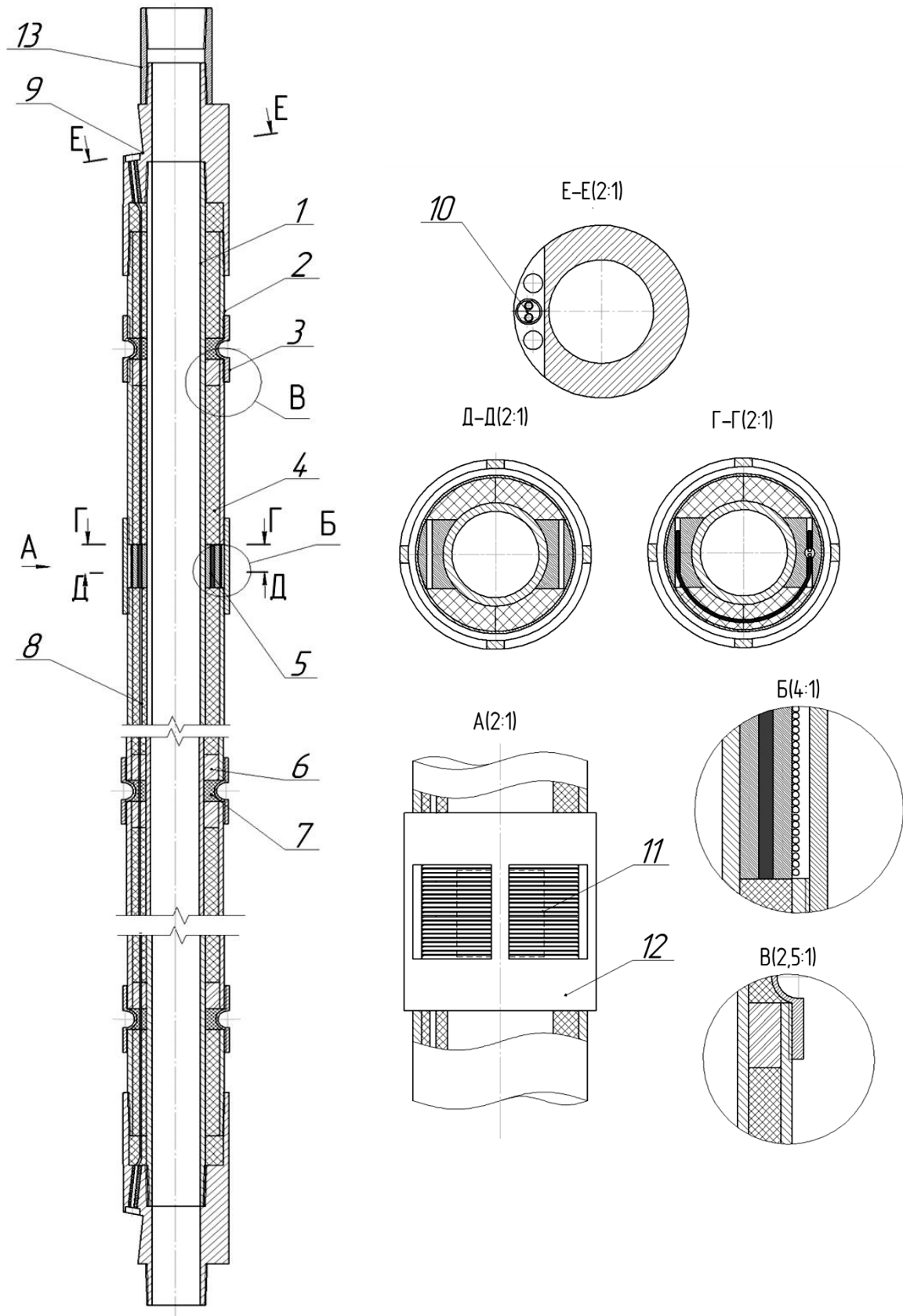


Рисунок 1 – Конструкция СТЭМ для управления процессом теплообмена скважины за счет использования термоэлектрических элементов

Существуют различные технические задачи, где термоэлектрические элементы широко не используются из-за недостаточной изученности отдельных вопросов. К таким вопросам можно отнести разработку математической модели для определения изменения температуры вдоль поверхности металлической трубы от локально расположенного термоэлектрического элемента.

Для упрощения разработки математической модели изменения температуры вдоль поверхности металлической трубы от локально расположенного термоэлектрического элемента приняты следующие допущения:

1. Рассмотрен стационарный процесс.
2. Термоэлектрический элемент принят в виде цилиндрического кольца.
3. Ось Oz совмещена с осью трубы.
4. Деформация рассматриваемого объема от изменения температуры является очень малой величиной по сравнению с самим объемом.
5. Граничные условия III рода, так как в межтрубном пространстве между насосно-компрессорной и эксплуатационной трубами присутствует среда (газ, газожидкостная смесь).

6. Поперечное сечение мало по сравнению с длиной насосно-компрессорной трубы. В этом случае можем пренебречь изменением температуры вдоль трубы.

С учетом принятых допущений на наружной поверхности трубы СТЭМ выделен элементарный объем dV в цилиндрической системе координат со сторонами dz , dr и $d\varphi$ так, что его грани параллельны соответствующим координатным плоскостям (рисунок 2).

Считаем, что теплоизоляционный материал, установленный с внутренней стороны наружной трубы 3, исключает в первом приближении теплопередачу внутрь трубы 3. Принимаем, что величина тепла, передаваемого вдоль оси Oz , может уменьшиться только на величину теплоотдачи в радиальном направлении:

$$dQ_z + dQ_r = 0, \quad (1)$$

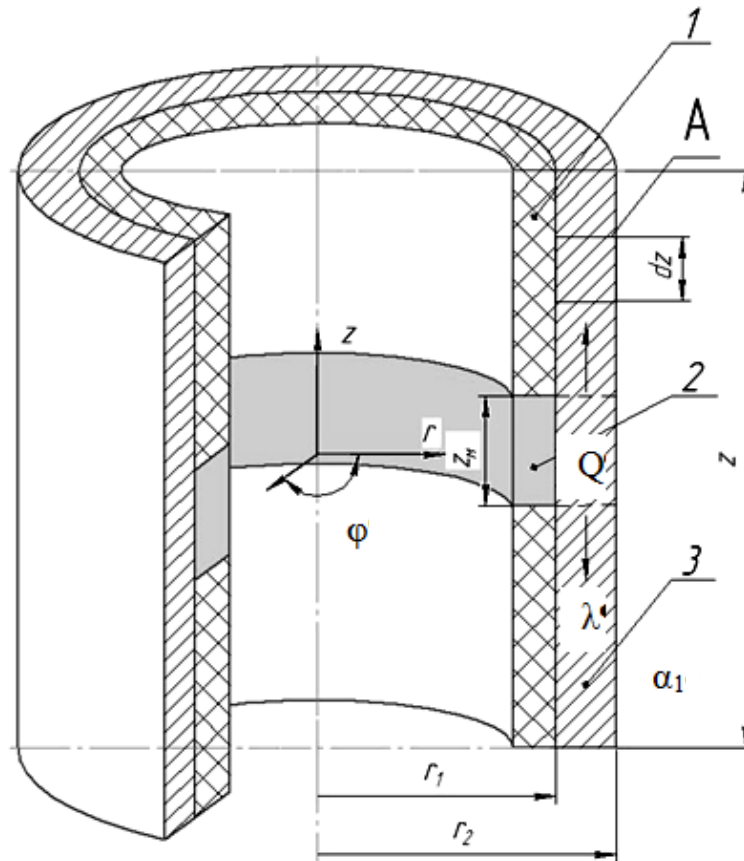
где Q_z – тепловой поток, направленный через ось Oz , Вт; Q_r – тепловой поток, направленный через ось Or , Вт.

С учетом закона теплопроводности Фурье и закона конвективного теплообмена Ньютона – Рихмана уравнение (1) можем записать в виде

$$\lambda \frac{d^2 \vartheta}{dz^2} S_z = \alpha_1 \vartheta dS_r \quad (2)$$

где λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°С); S_z – площадь поверхности теплообмена по оси Oz , м²; ϑ – изменение температуры по длине наружной трубы, °С; α_1 – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·°С); dS_r – площадь внешней поверхности теплообмена, м².

Выносной элементарный объем А для теплопередачи через наружную трубу с бесконечной длиной показан на рисунке 3.



1 – теплоизоляционный материал; 2 – термоэлектрический элемент; 3 – наружная труба термоэлектрического экранного модуля; α_1 – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·°С); λ – коэффициент теплопроводности материала трубы, Вт/(м·°С); z – длина трубы, м; z_m – длина термоэлектрического элемента, м; r_1 – внутренний радиус наружной трубы, м; r_2 – наружный радиус наружной трубы, м; А – расчетный выносной элемент

Рисунок 2 – Размещение термоэлектрического элемента внутри скважинного термоэлектрического экранного модуля

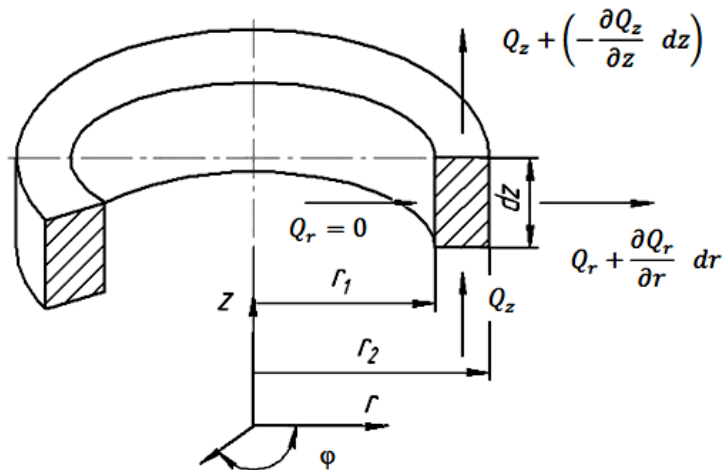


Рисунок 3 – Расчетная схема теплопередачи через наружную трубу с бесконечной длиной (выносной элементарный объем А из рисунка 2)

Площади рассматриваемых участков теплообмена:

$$S_z = \pi(r_2^2 - r_1^2),$$

$$S_r = 2\pi r_2 dz.$$

Следовательно,

$$\frac{d^2 \vartheta}{dz^2} = \frac{\alpha_1 2r_2}{\lambda(r_2^2 - r_1^2)} \vartheta. \quad (3)$$

Для удобства расчетов примем

$$m^2 = \frac{\alpha_1 2r_2}{\lambda(r_2^2 - r_1^2)}. \quad (4)$$

Если характеристическое уравнение (3) имеет два различных действительных корня $k = \pm m$, то решение данного однородного дифференциального уравнения второго порядка имеет общее решение в виде

$$\vartheta(z) = C_1 e^{mz} + C_2 e^{-mz}. \quad (5)$$

Для наружной трубы, имеющей бесконечную длину, граничные условия имеют вид:

$$\begin{cases} \text{при } z = 0, & \text{то } \vartheta = \vartheta_0, \\ \text{при } z = \infty, & \text{то } \vartheta = 0. \end{cases} \quad (6)$$

Перепад температуры $\vartheta(z)$ создается термоэлектрическим элементом на холодной стороне СТЭМ:

$$\vartheta(z) = t_x - t_1 \quad \text{или} \quad \frac{-Q_M \ln \frac{r_1}{r_2}}{S_{\text{пл}} \lambda} = t_x - t_1, \quad (7)$$

где Q_M – количество введенной или отведенной теплоты, Вт; $S_{\text{пл}}$ – площадь введенного или отведенного количества теплоты, м².

С учетом (7) и граничных условий (6) автором предложено уравнение изменения температуры вдоль поверхности трубы от локально расположенного термоэлектрического элемента:

$$t = \frac{-Q_M r_1 \ln \frac{r_1}{r_2}}{2\pi\lambda(r_2^2 - r_1^2)} e^{\sqrt{\frac{\alpha_1 2r_2}{\lambda(r_2^2 - r_1^2)}} z} + t_{\text{окр}}. \quad (8)$$

Если толщина стенки трубы мала по сравнению с диаметром, т. е. выполняется соотношение $d_1/d_2 < 2$, то можем пренебречь кривизной стенки и расчет вести по толщине стенки:

$$\vartheta(z) = t_x - t_1 \quad \text{или} \quad \frac{-Q_M \sigma_{\text{ст}}}{S_{\text{пл}} \lambda} = t_x - t_1,$$

где $\sigma_{\text{ст}}$ – толщина стенки трубы, м.

В данном случае коэффициент m принимает значение

$$m^2 = \frac{\alpha_1}{\lambda \sigma_{\text{ст}}}. \quad (9)$$

Следовательно, уравнение (8) принимает упрощенный вид:

$$t = \frac{-Q_M}{2\pi\lambda z_M} e^{\sqrt{\frac{\alpha_1}{\lambda \sigma_{\text{ст}}}} z} + t_{\text{окр}}. \quad (10)$$

Если труба имеет конечную длину, граничные условия изменяются:

$$\begin{cases} \text{при } z=0, & \text{то } \vartheta = \vartheta_0, \\ \text{при } z=l, & \text{то } \vartheta = \vartheta_l. \end{cases} \quad (11)$$

Выносной элементарный объем А для теплопередачи через наружную трубу с конечной длиной показан на рисунке 4.

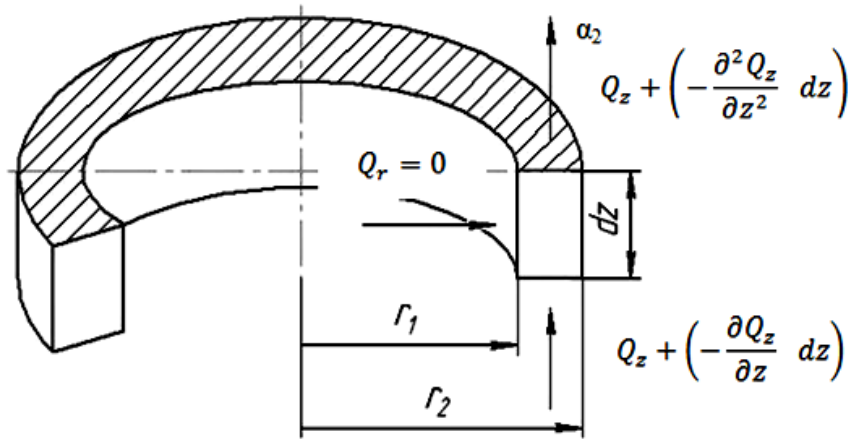


Рисунок 4 – Расчетная схема теплопередачи через наружную трубу с конечной длиной

При $z=l$ количество теплоты dQ_z , подведенное к торцу путем теплопроводности, отдается в окружающую среду (рисунок 4), т. е.

$$-\lambda S_z \left(\frac{d\vartheta}{dz} \right) = \alpha_2 S_z \vartheta_l, \quad (12)$$

где α_2 – коэффициент теплоотдачи на торце наружной трубы, Вт/(м²·°С); ϑ_l – изменение температуры трубы с конечной длиной, °С.

При $z=l$ следует, что

$$\vartheta_l = C_1 e^{ml} + C_2 e^{-ml}. \quad (13)$$

С учетом (5) и (12) определяем C_1 и C_2 . В итоге изменение температуры наружной трубы с конечной длиной от мощности локально расположенного термоэлектрического элемента в термоэлектрическом экранном модуле определим из уравнения

$$t = \frac{-Q_M r_1 \ln \frac{r_1}{r_2} \left(m - \frac{\alpha_2}{\lambda} \right) e^{-ml} e^{mz} + \left(m + \frac{\alpha_2}{\lambda} \right) e^{-ml} e^{-mz}}{2\pi\lambda(r_2^2 - r_1^2) m(e^{ml} + e^{-ml}) + \frac{\alpha_2}{\lambda}(e^{ml} - e^{-ml})} + t_{\text{окр}}, \quad (14)$$

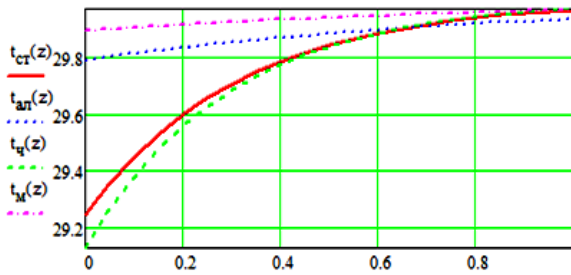
где m равно (4).

В случае если отношение $d_1/d_2 < 2$, то можем записать

$$t = \frac{-Q_M \left(m - \frac{\alpha_2}{\lambda} \right) e^{-ml} e^{mz} + \left(m + \frac{\alpha_2}{\lambda} \right) e^{-ml} e^{-mz}}{2\pi\lambda z_m m(e^{ml} + e^{-ml}) + \frac{\alpha_2}{\lambda}(e^{ml} - e^{-ml})} + t_{\text{окр}}, \quad (15)$$

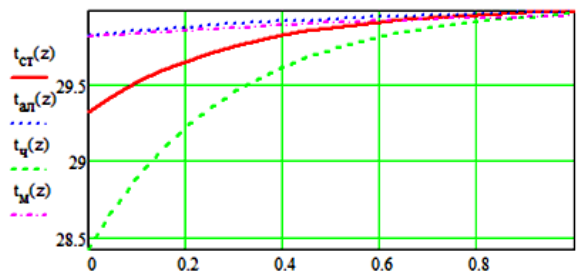
где m равно (9).

Построены графики функций (4), (9), (14) и (15) для термоэлектрического элемента холодопроизводительностью $Q_M = 30$ Вт, размером 0,05 м. Длина рассматриваемого участка трубы 1 м, температура $t_{\text{окр}}$ на её наружной поверхности 30 °С, внутренний радиус наружной трубы r_1 составляет 0,045 м, а толщина стенки σ 0,005 м.



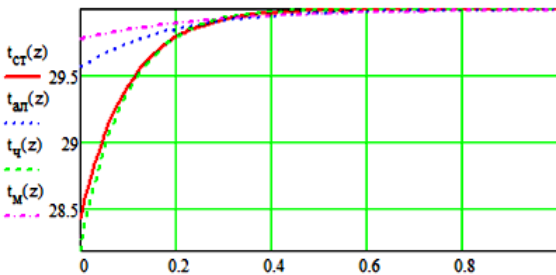
$t_{\text{ал}}(z)$ – сплав Al-Cu; $t_{\text{ст}}(z)$ – сталь 40;
 $t_{\text{ч}}(z)$ – чугун (СЧ30); $t_{\text{медь}}(z)$ – медь (99,9%)

Рисунок 5 – Графики зависимости изменения температуры по формуле (8) на поверхности труб от коэффициентов теплопроводности материалов, теплоотдачи $\alpha_1=5,6$ Вт/(м²·°С)



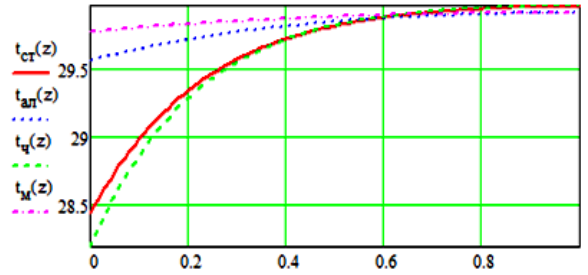
$t_{\text{ал}}(z)$ – сплав Al-Cu; $t_{\text{ст}}(z)$ – сталь 40;
 $t_{\text{ч}}(z)$ – чугун (СЧ30); $t_{\text{медь}}(z)$ – медь (99,9%)

Рисунок 6 – Графики зависимости изменения температуры по формуле (10) на поверхности трубы от коэффициентов теплопроводности материалов, теплоотдачи $\alpha_1=5,6$ Вт/(м²·°С)



$t_{\text{ал}}(z)$ – сплав Al-Cu; $t_{\text{ст}}(z)$ – сталь 40;
 $t_{\text{ч}}(z)$ – чугун (СЧ30); $t_{\text{медь}}(z)$ – медь (99,9%)

Рисунок 7 – Графики зависимости изменения температуры по формуле (14) на поверхности трубы от коэффициентов теплопроводности материалов, теплоотдачи $\alpha_1=30$ Вт/(м²·°С) и $\alpha_2=5,6$ Вт/(м²·°С)



$t_{\text{ал}}(z)$ – сплав Al-Cu; $t_{\text{ст}}(z)$ – сталь 40;
 $t_{\text{ч}}(z)$ – чугун (СЧ30); $t_{\text{медь}}(z)$ – медь (99,9%)

Рисунок 8 – Графики зависимости изменения температуры по формуле (14) на поверхности трубы от коэффициентов теплопроводности материалов, теплоотдачи $\alpha_1=5,6$ Вт/(м²·°С) и $\alpha_2=30$ Вт/(м²·°С)

Из сопоставления графиков функций (рисунки 5–8) следует, что значения изменения температуры незначительны в двух рассматриваемых моделях. Поэтому для инженерных расчётов можно использовать упрощенную модель в виде «плоской стенки». При $\alpha_1 > \alpha_2$ график изменения температуры «круче» на малом участке длины трубы, что можно объяснить более интенсивной передачей теплоты через наружную поверхность, а при $\alpha_1 < \alpha_2$ график изменения температуры пологий, т.е. изменение температуры происходит постепенно, в основном через торец наружной поверхности трубы. Аналитические модели позволяют определить расстояние установки термоэлектрических элементов в скважинном термоэлектрическом экранном модуле. Далее предложена модель изменения температуры от локального действия термоэлектрического элемента в скважине, которая позволяет оценивать температуру на наружной поверхности обсадной трубы, например кондукторе, относительно температуры фазового превращения многолетнемёрзлой породы и подобрать конструктивные характеристики СТЭМ.

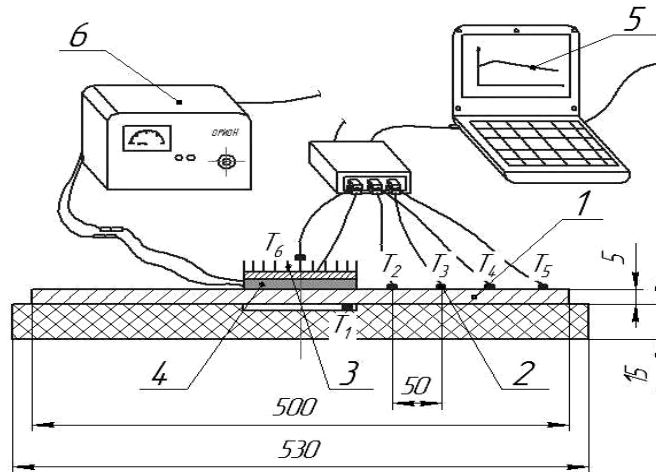
$$\left\{ \begin{aligned} & t_k = t_{\text{ж}} - \frac{q_{\text{СКВ}}}{\pi} \left(\frac{1}{\alpha_1 d_1} + \frac{1}{2\lambda_1} \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{2\lambda_{\text{ИЗ}}} \ln \frac{d_{\text{в.СТЭМ}}}{d_2} \right) + \\ & + \frac{Q_M}{2\pi\lambda z_M} \frac{\left(m - \frac{\alpha_m}{\lambda} \right) e^{-ml} e^{mz} + \left(m + \frac{\alpha_m}{\lambda} \right) e^{-ml} e^{-mz}}{m(e^{ml} + e^{-ml}) + \frac{\alpha_m}{\lambda}(e^{ml} - e^{-ml})} - \\ & - \frac{q_{\text{СКВ}}}{\pi} \left(\sum_{i=2}^3 \frac{1}{\alpha_i d_i} + \sum_{i=3}^n \frac{1}{2\lambda_i} \ln \frac{d_{i+1}}{d_i} \right) \end{aligned} \right. \quad (16)$$

$$t_k \leq t_{\phi} \leq -10^{-4}(L + 38)K,$$

где $t_{\text{ж}}$ – температура флюида в скважине, °С; $q_{\text{СКВ}}$ – линейный тепловой поток скважины в радиальном направлении, Вт/м; α_i – коэффициент теплоотдачи сред в скважине, Вт/(м²·°С); d_{i+1} , d_i – диаметры слоев конструкции скважины, м; $d_{\text{в.СТЭМ}}$ – внутренний диаметр кожуха СТЭМ; λ_i – коэффициент теплопроводности слоев конструкции скважины (подъемных труб, флюида, эксплуатационной и промежуточных колонн, кондуктора, цементных колец), Вт/(м·°С); i – число из натурального ряда; L – глубина рассматриваемого сечения, м; K – коэффициент, зависящий от литологической принадлежности породы.

В третьей главе описаны экспериментальные стенды, созданные для исследования процесса изменения температуры от локально расположенного термоэлектрического элемента, методика проведения экспериментов и их результаты. На основе предложенной конструкции и экспериментальных данных разработан опытный образец скважинного термоэлектрического экранного модуля.

Первый стенд предназначен для исследования изменения температуры от локально расположенного термоэлектрического элемента ТЕС1–12715 (рисунок 9).



1 – пластина алюминиевая Д16 ГОСТ 4784–97; 2 – комплекс оборудования для измерения температуры; 3 – радиатор алюминиевый; 4 – термоэлектрический элемент TEC1–12715;
5 – персональный компьютер; 6 – блок питания

Рисунок 9 – Схема экспериментального стенда для исследования процесса изменения температуры от локально расположенного термоэлектрического элемента

Лабораторный стенд имеет также специально разработанный комплекс оборудования для измерения температуры в шести точках на исследуемой поверхности 4, алюминиевую пластину марки Д16 ГОСТ 4784–97 длиной 0,5 м, шириной 0,3 м и толщиной 0,005 м, термоэлектрический элемент TEC1–12715 размером 0,04x0,04 м, блок питания с напряжением 12 В, силой тока от 0 до 20 А, персональный компьютер для регистрации данных. Четыре датчика (Т2, Т3, Т4, Т5) расположены на расстоянии 0,05 м друг от друга вдоль алюминиевой поверхности, два датчика (Т1, Т6) фиксируют температуру термоэлектрического элемента над холодной и горячей сторонами. На поверхности горячей стороны термоэлектрического элемента установлен алюминиевый радиатор. Температурные датчики показывают изменение температуры от локально расположенного термоэлектрического элемента в зависимости от значения силы тока, температуры окружающей среды.



1 – пластина алюминиевая Д16 ГОСТ 4784–97; 2 – комплекс оборудования для измерения температуры; 3 – радиатор алюминиевый; 4 – термоэлектрический элемент TEC1–12715;
5 – персональный компьютер; 6 – блок питания

Рисунок 10 – Общий вид стенда для исследования процесса изменения температуры от локально расположенного термоэлектрического элемента

По данным Р. И. Медведского, И. Ю. Быкова и др. температура добываемой жидкости может варьировать от 20 до 80 °С, а температура мёрзлых пород вокруг скважины при оттаивании изменяется от 0,5 до 10 °С. Поэтому экспериментальные исследования проводились при температуре окружающей среды 3 и 20 °С. Отвод теплоты от горячей стороны термоэлектрического элемента осуществлялся естественной конвекцией и водой без принудительной циркуляции.

Графики изменения температуры во времени от мощности локально расположенного термоэлектрического элемента представлены на рисунках 11–13. В результате экспериментального исследования при температуре окружающей среды 3 °С установлена отрицательная температура на поверхности алюминиевой пластины длиной 0,5 м с термоэлектрическим элементом мощностью 24 Вт, наблюдался стационарный процесс с температурой до –2,5 °С. Перепад температуры относительно температуры окружающей среды на поверхности пластины составил 5,5 °С (рисунок 13).

Графики изменения температуры от локально расположенного термоэлектрического элемента показывают возможность её регулирования с помощью изменения силы тока. При этом необходимо обеспечить отвод теплоты от горячей стороны скважинного термоэлектрического экранного модуля. Далее экспериментальные данные сопоставлены с теоретическими значениями. Результаты исследования математической модели, описывающей изменение температуры от мощности локально расположенного термоэлектрического элемента, представляли интерес с точки зрения значения температуры на поверхности пластины. Значения изменения температуры определяют количество необходимых термоэлектрических элементов для поддержания заданной температуры на поверхности СТЭМ. Для описания процесса изменения температуры от локально расположенного термоэлектрического элемента выведены два уравнения: для бесконечно длинной трубы и трубы с конечной длиной.

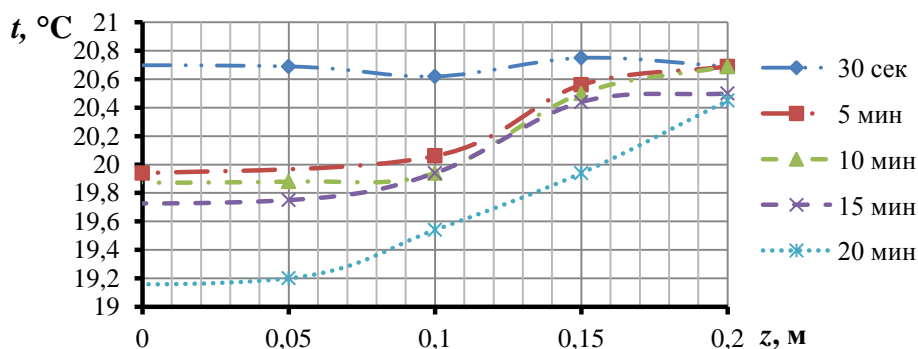


Рисунок 11 – Результаты эксперимента с естественной конвекцией при температуре окружающей среды 20 °С, силе тока 1 А и напряжении 12 В

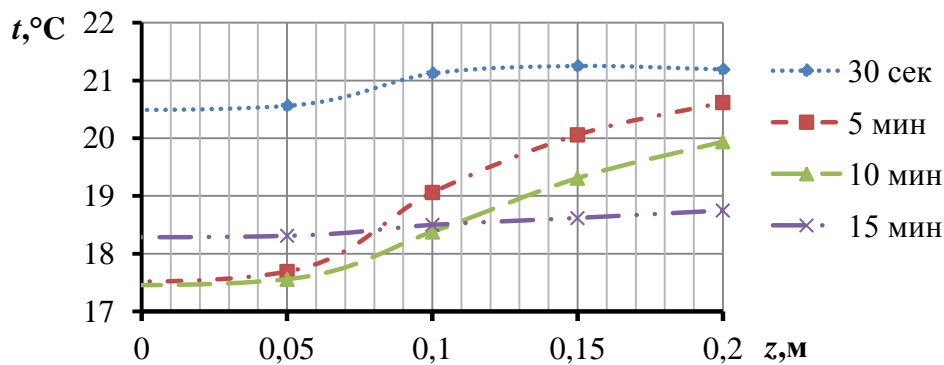


Рисунок 12 – Результаты эксперимента с естественной конвекцией при температуре окружающей среды 20 °С, силе тока 2 А и напряжении 12 В

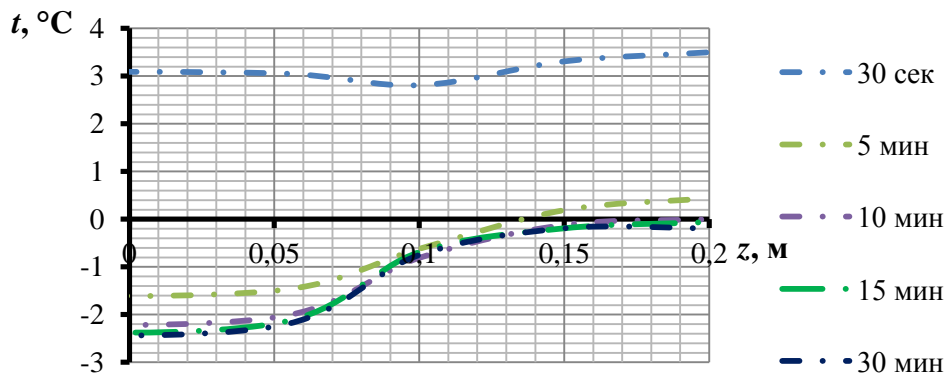


Рисунок 13 – Результаты эксперимента с естественной конвекцией при температуре окружающей среды 3 °С, силе тока 2 А и напряжении 12 В

Следовательно, необходимо сравнить теоретические значения разработанных математических моделей с целью выявления наиболее подходящей формулы для расчета изменения температуры вдоль наружной поверхности СТЭМ и разработки методики инженерного расчёта. Теоретические значения коэффициента теплоотдачи для экспериментального исследования определялись из критериальных уравнений, полученных на основе теории подобия и размерностей. При окружающей температуре 3 и 20 °С со свободной конвекцией газа (воздуха) теоретические значения коэффициента теплоотдачи на поверхности образца составили соответственно 2,92 и 3,12 Вт/(м²·°С), через торцы пластины – 293 и 312 Вт/(м²·°С).

Экспериментальные данные сопоставлены с теоретической моделью для бесконечной (10) и конечной (15) труб в виде «плоской стенки», так как отношение диаметров наружной трубы СТЭМ $d_2/d_1 < 2$. Графики сопоставления экспериментальных данных с теоретическими значениями представлены на рисунке 14. Расхождения теоретических и экспериментальных данных (рисунок 14, а) можно объяснить тем, что в случае рассмотрения бесконечно длинной трубы, тепловой поток распределяется по всей длине рассматриваемого участка, поэтому изменение температуры незначительно.

В реальности же наблюдается процесс конвективного теплообмена через поверхность и торцы пластины. Следовательно, для расчета изменения температуры от мощности локально расположенного термоэлектрического элемента

рекомендуется использовать аналитическую модель изменения температуры для труб с конечной длиной. Учет отвода теплоты через торцы повысил точность расчетов (рисунок 14, б), расхождение экспериментальных и теоретических данных не превышает 10 %. Также установлено, что большее отношение коэффициента теплоотдачи торца к коэффициенту теплоотдачи с поверхности $\frac{\alpha_2}{\alpha_1}$ приводит к интенсивному охлаждению.

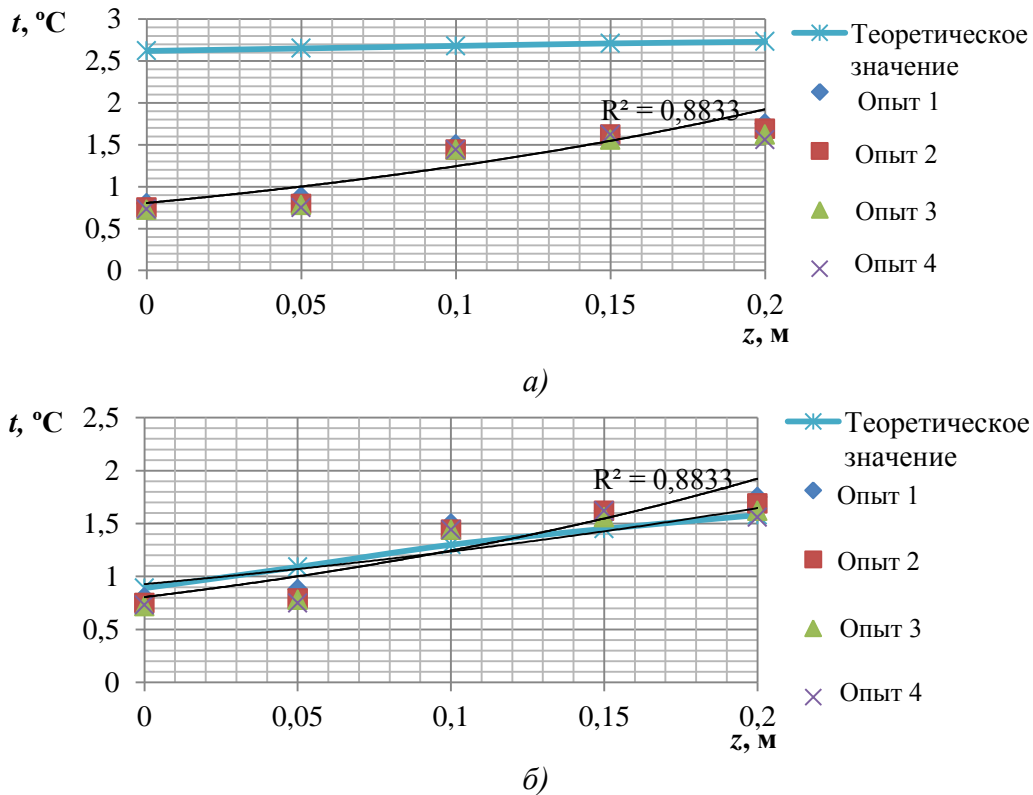
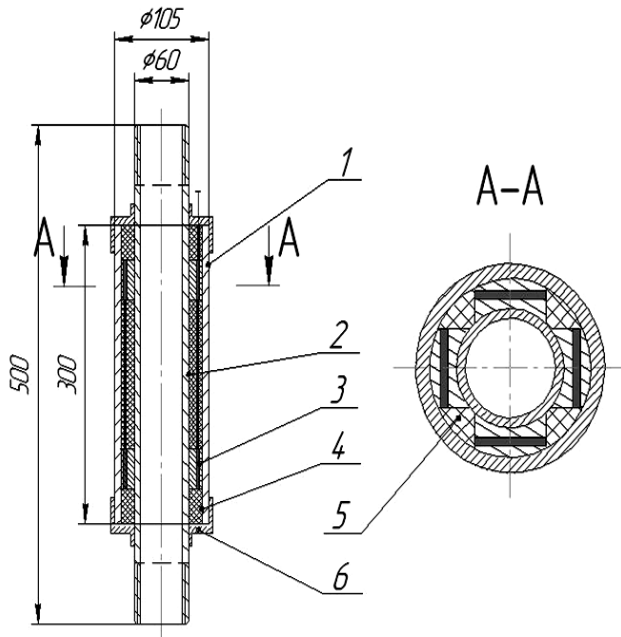


Рисунок 14 – Результаты сопоставления теоретического значения изменения температуры с экспериментальными данными на наружной СТЭМ при температуре окружающей среды 3 °С, силе тока 1 А, напряжении 12В: а – бесконечной; б – конечной длины

С учетом экспериментальных данных изменения температуры от локально расположенного термоэлектрического элемента и предложенной конструкции (гл. 2) разработан опытный образец скважинного термоэлектрического экранного модуля для лабораторных исследований (рисунки 15 и 16) с термоэлектрическими элементами ICE-71. Экспериментальные исследования проводились на стенде имитаторе ствола скважины, расположенном в лабораторном корпусе Института нефти и газа СФУ, с конструкторскими изменениями для исследования опытного образца СТЭМ (рисунок 17). Принципиальная схема лабораторной установки представлена на рисунке 18.

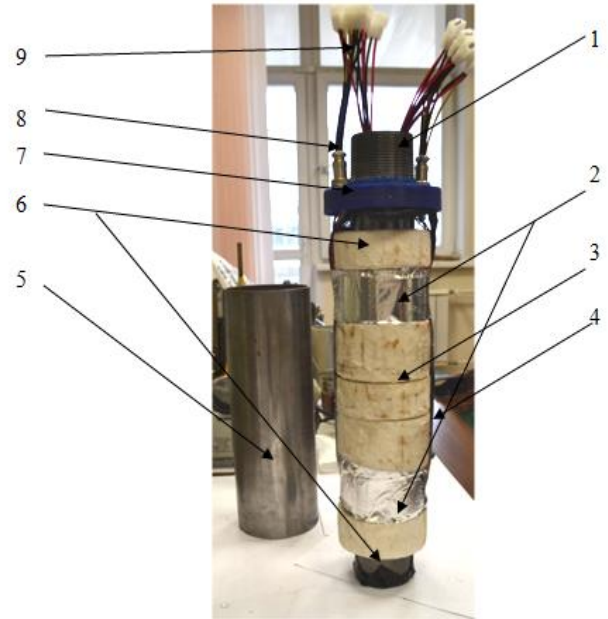
Для опытного образца вычислены: критерий подобия Рейнольдса $Re=86500$, характеризующий течение жидкости, критерий Грасгофа $Gr=1,82 \cdot 10^9$, определяющий процесс подобия теплообмена в поле силы тяжести, и критерий Стэнтона $St=12,08$, характеризующий интенсивность перехода части энергии в тепло в потоке жидкости.



1 – труба наружная; 2 – труба внутренняя;
3 – термоэлектрическая сборка; 4 – кольца из теплоизоляционного материала (пенопласт);

5 – сегменты из теплоизоляционного материала; 6 – защитные крышки

Рисунок 15 – Конструкция опытного образца скважинного термоэлектрического экранного модуля



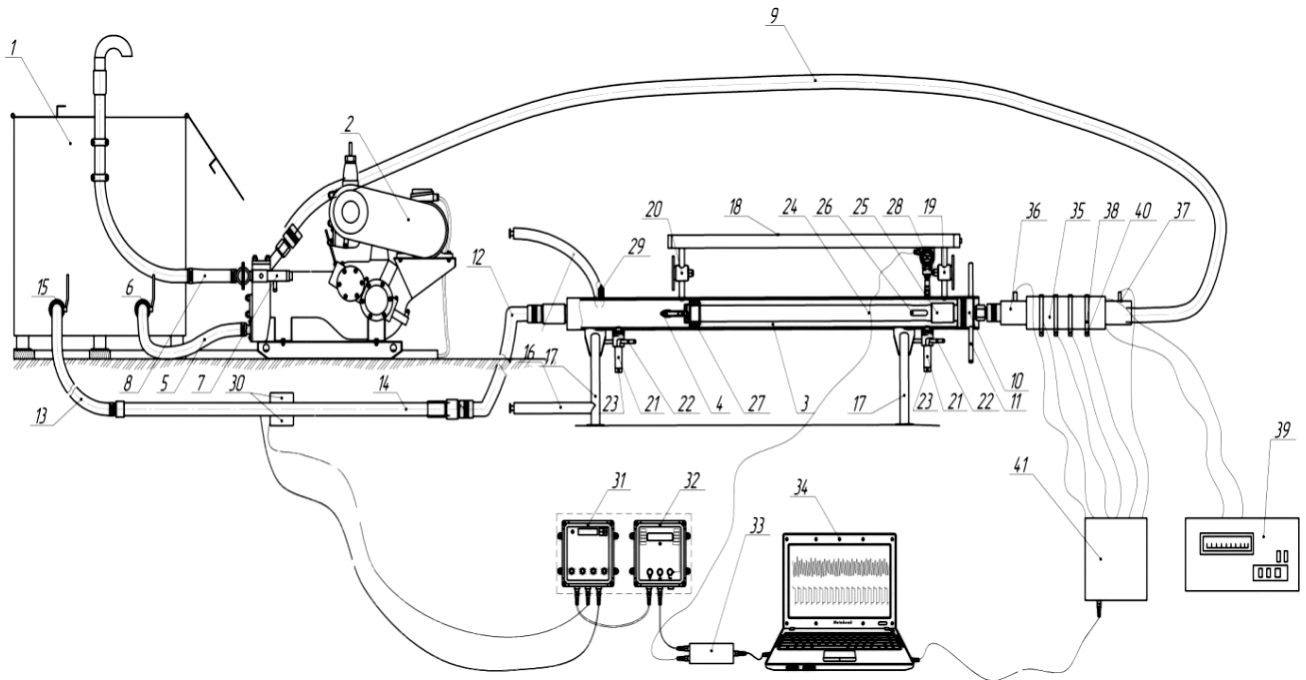
1 – внутренняя труба НКТ 60x5 ГОСТ 633–80;
2 – термоэлектрическая сборка с алюминиевой лентой; 3 – теплоизолирующее кольцо длиной 150 мм и диаметром 90 мм; 4 – прорезь для проводов термоэлектрической сборки;
5 – наружная труба 105x5 ГОСТ 18482;
6 – теплоизолирующие кольца диаметром 90 мм и длиной 30 мм; 7 – верхняя крышка;
8 – разъемное соединение; 9 – переходники для соединения с блоком питания

Рисунок 16 – Общий вид лабораторного опытного образца СТЭМ

На рисунках 19–20 приведены зависимости изменения температуры на наружной поверхности опытного образца скважинного термоэлектрического экранного модуля и охлаждающей жидкости от силы тока I (1, 2, 3 А) и времени τ , при постоянном значении напряжения 12 В, расходе жидкости $9,8 \text{ м}^3/\text{ч}$, температуре окружающей среды $27 \text{ }^\circ\text{C}$ и жидкости $25 \text{ }^\circ\text{C}$. Эксперименты проводились в течение 20 мин.



1 – стенд имитатор ствола скважины; 2 – лабораторный образец скважинного термоэлектрического экранного модуля с элементами ИСЕ–71
Рисунок 17 – Стенд имитатор ствола скважины с лабораторным образцом СТЭМ



1 – бак рабочей жидкости; 2 – буровой насос НБ-160/6,3; 3 – имитатор ствола скважины; 4 – ГСГ; 5 – всасывающая линия; 6, 15 – шаровые краны; 7 – предохранительный клапан насоса; 8 – сбросная линия; 9 – напорная линия (РВД); 10 – заглушка; 11 – рукоятки заглушки; 12, 13 – сливная линия (РВД); 14 – сливная линия (труба НКТ-60); 16 – вертикальные опоры имитатора; 17 – горизонтальные опоры имитатора; 18 – контейнер; 19, 20 – пробковые краны; 21 – штуцеры; 22 – рукоятки; 23 – пробки; 24 – труба НКТ-73; 25 – муфта НКТ-73; 26 – продольные отверстия; 27 – резиновое уплотнение; 28 – микропроцессорный датчик давления «Метран-100»; 29 – пьезоэлектрический датчик давления; 30 – ультразвуковые первичные преобразователи расходомера; 31 – процессорный блок расходомера; 32 – блок питания и индикации расходомера; 33 – усилитель заряда; 34 – ноутбук; 35 – скважинный термоэлектрический экранный модуль; 36 – переходник; 37 – датчики температуры жидкости; 38 – датчики температуры на поверхности устройства; 39 – блок питания; 40 – хомуты; 41 – цифровой преобразователь

Рисунок 18 – Схема лабораторной установки для исследования работы скважинного термоэлектрического экранного модуля

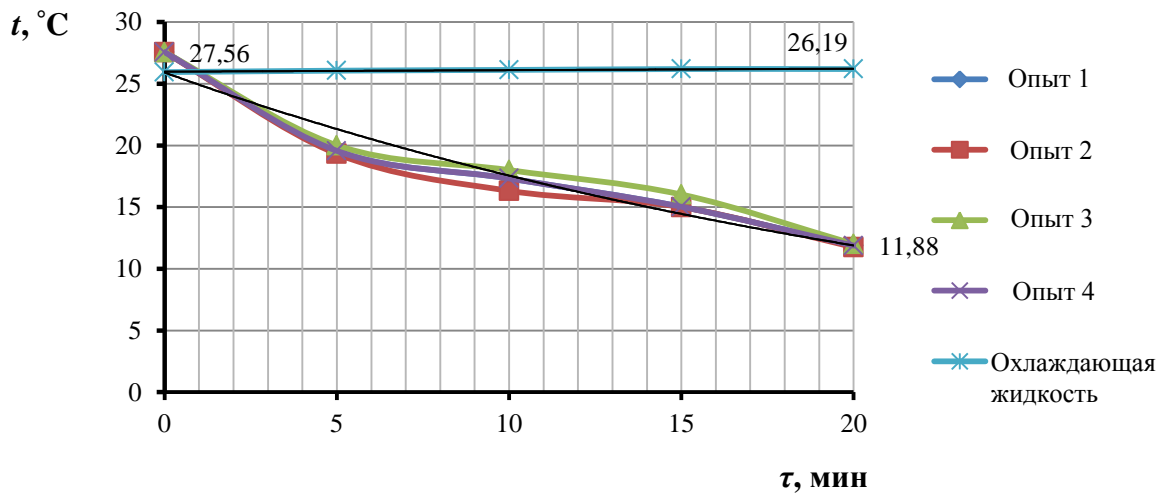


Рисунок 19 – Изменение температуры на наружной поверхности опытного образца СТЭМ при расходе жидкости $9,8 \text{ м}^3/\text{ч}$, силе тока 3 А, напряжении 12 В, температуре окружающей среды 27 °C и жидкости 26 °C во времени

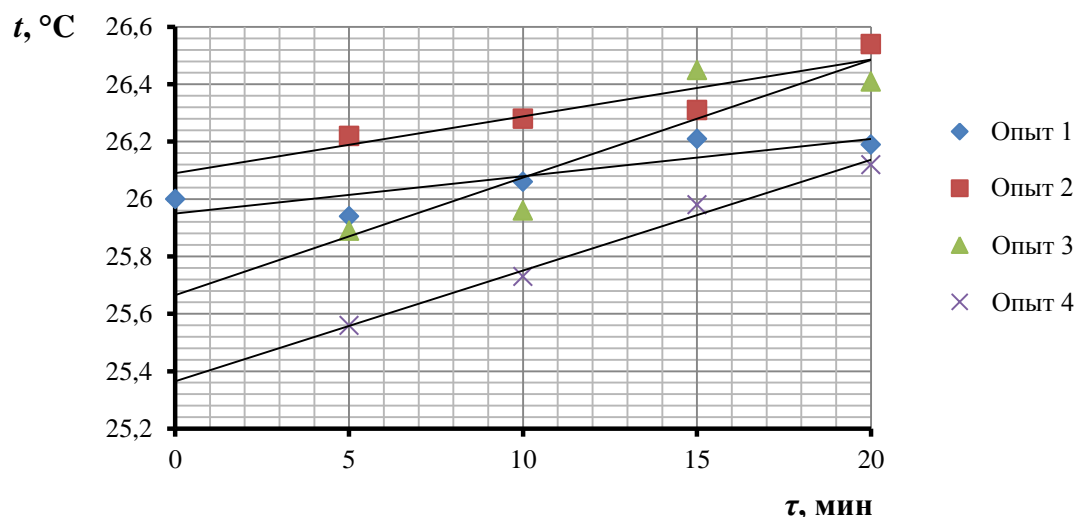


Рисунок 20 – Изменение температуры рабочей жидкости при расходе жидкости $9,8 \text{ м}^3/\text{ч}$, силе тока 3 А, напряжении 12 В, температуре окружающей среды плюс $27 \text{ }^\circ\text{C}$ во времени

В итоге экспериментальных исследований лабораторного опытного образца установлено, что принудительная циркуляция охлаждающей рабочей жидкости приводит к изменению её температуры на $0,03 \text{ }^\circ\text{C}$ по линейной зависимости, а изменение силы тока на 1 А характеризуется экспоненциальной зависимостью. В ходе экспериментальных исследований установлено снижение температуры на наружной поверхности СТЭМ от локально расположенных термоэлектрических элементов при различных значениях силы тока. Температура на наружной поверхности СТЭМ максимально снизилась при силе тока 3 А, напряжении 12 В и составила $16 \text{ }^\circ\text{C}$.

Оценим влияние кинематической вязкости на изменение температуры нефти при различных значениях длины l СТЭМ с учетом найденного значения критерия Грасгофа для опытного образца (рисунок 21).

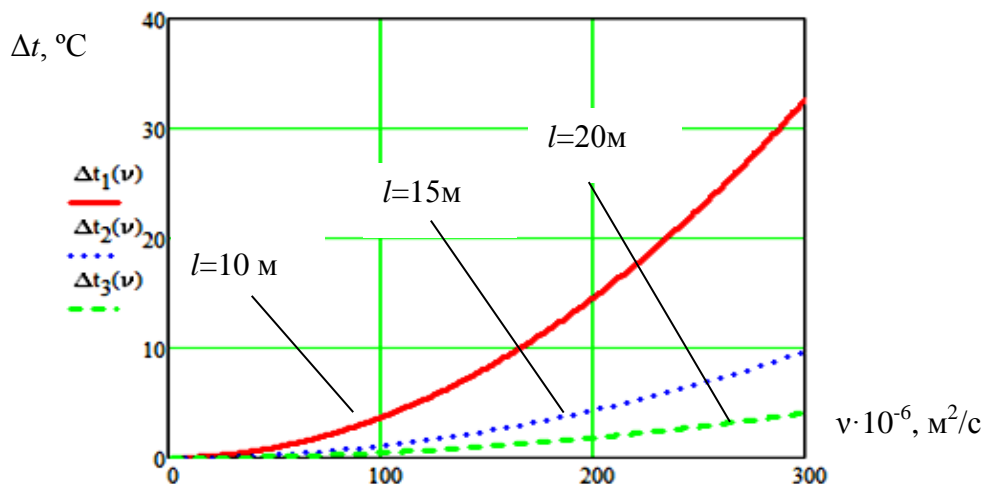


Рисунок 21 – Изменение температуры пластовой нефти от значения кинематической вязкости при различной длине СТЭМ

Определим изменение температуры жидкости от коэффициента объемного расширения нефти при её различных значениях кинематической вязкости. В

зависимости от плотности нефти коэффициент объемного расширения изменяется в диапазоне от $0,001255 \text{ K}^{-1}$ до $0,000526 \text{ K}^{-1}$ (рисунок 22).

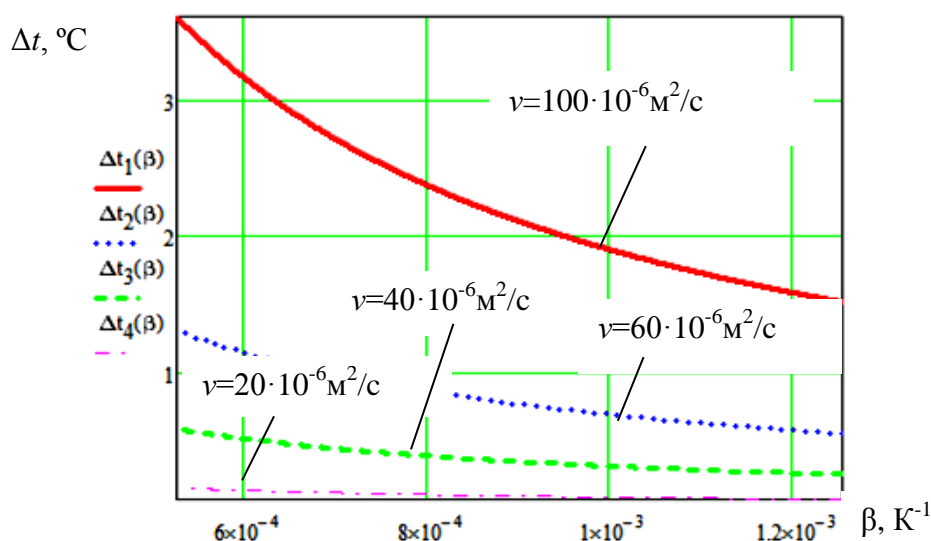


Рисунок 22 – Изменение температуры пластовой нефти от значения коэффициента объемного расширения при различных значениях её кинематической вязкости

При повышении значения кинематической вязкости наблюдается увеличение изменения температуры пластовой нефти. С увеличением коэффициента объемного расширения изменение температуры пластовой жидкости уменьшается.

Из сопоставления теоретических данных рекомендуется использовать СТЭМ для нефтяных месторождений, где коэффициент кинематической вязкости не превышает $60 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$.

На основе теоретических и экспериментальных исследований разработана методика инженерного расчёта скважинного термоэлектрического экранного модуля для управления процессом теплообмена скважин, расположенных в многолетнемёрзлых породах.

Выводы по результатам диссертационной работы:

1. На основе анализа существующих термозащитных технических средств разработана конструкция скважинного термоэлектрического экранного модуля, позволяющая обеспечивать снижение теплового потока подъемной трубы на окружающую поверхность.

2. Разработана математическая модель процесса перемещения теплового потока для труб бесконечной и конечной длины; установлены аналитическая зависимость, учитывающая мощность термоэлектрических элементов, коэффициенты теплоотдачи, теплопроводности материалов и особенности конструкции термоэлектрического экранного модуля. В результате исследования математической модели получены качественные и количественные графические зависимости, а также аналитические зависимости изменения температуры от локально расположенного термоэлектрического элемента в скважинном термоэлектрическом экранном модуле. Выявлено, что при всех сочетаниях исследованных образцов процесс изменения температуры от локально расположенного термоэлектрического элемента при $d_2/d_1 < 2$ можно описать без учета кривизны трубы, следовательно, принять модель «плоской стенки».

Установлено влияние мощности локально расположенного термоэлектрического элемента и коэффициента теплоотдачи на характер изменения температуры.

3. Получены зависимости изменения температуры от длины распространения теплового потока вдоль металлической поверхности. Из графиков, полученных в ходе проведения экспериментального исследования, установлено, что профиль изменения температуры в зависимости от мощности локально расположенного термоэлектрического элемента имеет экспоненциальную форму, что согласуется с аналитической моделью с погрешностью не более 10 %.

4. Разработаны и изготовлены опытный образец скважинного термоэлектрического экранного модуля и экспериментальные стенды, с помощью которых установлено, что изменение температуры от локально расположенного термоэлектрического элемента имеет тенденцию к увеличению по мере роста силы тока, отвода теплоты от горячей стороны термоэлектрического элемента, коэффициента теплоотдачи.

5. Разработана методика инженерного расчета термоэлектрического экранного модуля в эксплуатационной скважине, которая может быть использована для расчета изменения температуры на его наружной поверхности от режима работы локально расположенных термоэлектрических элементов.

Основные положения и наиболее значимые результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

Рецензируемые журналы, входящие в перечень ВАК при Минобрнауки РФ:

1. Павлова П. Л., Колосов М. В., Кондрашов П. М., Зеньков И.В. Разработка опытного образца устройства для термостабилизации мерзлой породы // Научно-технический журнал «Нефтегазовое дело» – Уфа: УГНТУ – 2014. – №6. – С. 679–697.

2. Павлова П. Л., Кондрашов П. М. Разработка математической модели распределения температуры от скважинного термоэлектрического устройства // Оборудование и технологии нефтегазового комплекса – М: ВНИИОЭНГ – 2016. – №1. – С. 40–44.

3. Павлова П. Л., Кондрашов П. М., Зеньков И. В. Результаты исследования изменения температуры устьевой нефтегазовой трубы при использовании термоэлектрического устройства для охлаждения// Вестник ИрГТУ – Иркутск: ИрГТУ – 2016. – №4. – С. 46–53.

4. Павлова П. Л., Кондрашов П. М., Зеньков И. В. Математическая модель работы скважинного термоэлектрического устройства для условий вечной мерзлоты при разработке нефтегазовых месторождений // Вестник КузГТУ – Кемерово: КузГТУ им. Т.Ф. Горбачева – 2016. – №2(114) – С. 97–102.

5. Павлова П. Л., Кондрашов П.М. Экспериментальное исследование лабораторного скважинного термоэлектрического устройства // Оборудование и технологии нефтегазового комплекса – М: ВНИИОЭНГ – 2016. – №4. – С. 50–54.

6. Павлова П. Л., Кондрашов П. М., Тронин О. А. Разработка и испытание комплекса оборудования для измерения температуры и расхода жидкости // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ – Тюмень: ТюмГНГУ – 2016. – №5 – С. 98–100.

7. **Павлова П. Л.,** Кондрашов П. М., Зеньков И. В. Скважинное термоэлектрическое устройство для строительства и эксплуатации скважин // Нефтегазовое дело – Уфа – 2016. – №4 – С. 40–46.

8. **Павлова П. Л.,** Кондрашов П. М., Зеньков И. В. Математическая модель работы термоэлектрического технического устройства при разработке нефтяных месторождений в криолитозоне // Вестник КузГТУ – Кемерово: КузГТУ им. Т.Ф. Горбачева – 2017. – №1(119) – С. 148–153.

9. **Павлова П. Л.,** Кондрашов П. М. О разработке скважинного термоэлектрического устройства для строительства и эксплуатации скважин в районах многолетнемерзлыми породами // Нефтяное хозяйство – 2018. – № 3 – С. 66–69.

10. **Павлова П. Л.,** Кондрашов П. М., Лысянников А. В., Сопоставление экспериментальных данных с теоретическими значениями распределения температуры вдоль пластины // Вестник машиностроения – 2017. – №12 – С. 30–32.

Публикации в реферируемых базах данных Scopus и Web of Science:

1. **Pavlova P. L.,** Kondrashov P. M., Lysyannikov A.V. Theoretical and experimental temperature distribution along a plate // Russian Engineering Research – 2018. – No. 3 – P. 162–165.

2. **Pavlova P. L.,** Kondrashov P. M. On the development of downhole thermoelectric device for the construction and operation of wells in permafrost areas // Neftyanoe Khozyaystvo – 2018. – №3 – P. 66–69.

Патенты на изобретение:

1. Пат. № 2500880 Российская Федерация, МПК E21B36/00. Устройство для теплоизоляции скважины в многолетнемерзлых породах / **Павлова П. Л.,** Колосов В. Н., Бирих Р. А., Лунев А. С. №2012125732; заявл. 19.06.12; опубл. 10.12.13.

2. Пат. № 2625830 Российская Федерация, МПК E21B36/00. Устройство для термоизоляции скважин в многолетнемерзлых породах / **Павлова П. Л.,** Кондрашов П. М. №2016115259; заявл. 19.04.16; опубл. 19.07.17.

3. Пат. № 2655263 Российская Федерация, МПК E21B36/00. Теплоизолированная колонна / **Павлова П. Л.,** Кондрашов П. М. Заявка № 2017124772; заявл. 11.07.2017.