Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи

Лавринович Михаил Валериевич

ТЕПЛОПЕРЕНОС ПРИ РЕЗИСТИВНОМ ЭЛЕКТРООБОГРЕВЕ ПРОТЯЖЕННЫХ ТРУБОПРОВОДОВ

2.4.5. Энергетические системы и комплексы
1.3.14. Теплофизика и теоретическая теплотехника

Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор физико-математических наук,
профессор, член-корреспондент РАН
Стрижак Павел Александрович

Научный консультант:
кандидат физико-математических наук
Антонов Дмитрий Владимирович

Томск – 2026

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ 4
ГЛАВА 1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ 17
1.1 Системы электрообогрева трубопроводов и направления их развития . 17
1.1.1 Классификация по физическому принципу 17
1.1.2 Классификация по способу подвода теплоты к трубопроводу 21
1.1.3 Конструктивные особенности современных систем электрообогрева трубопроводов 22
1.2 Методы исследования систем электрообогрева трубопроводов 25
1.3 Факторы, определяющие эффективность резистивной системы электрообогрева, и направления ее совершенствования 31
1.3.1 Тепловая изоляция 32
1.3.2 Пространственное расположение закладного элемента 33
1.3.3 Конструктивное исполнение нагревательного узла 33
1.3.4 Положение нагревательного элемента внутри закладного канала ... 34
1.3.5 Распределение тепловыделения между элементами системы 34
1.3.6 Основные направления повышения эффективности резистивной системы электрообогрева 36
Выводы по главе 38
ГЛАВА 2. МЕТОДИКИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ И ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ 40
2.1 Экспериментальные исследования 40
2.1.1 Стенд 40
2.1.2 Методика исследований 43
2.1.3 Варьируемые параметры и регистрируемые характеристики 46
2.1.4 Оценка погрешностей экспериментальных измерений 48
2.2 Математическое моделирование 50
2.2.1 Физическая постановка задачи 51
2.2.2 Математическая модель 53
2.2.3 Численная реализация математической модели 59

2.2.4 Верификация и валидация 60
Выводы по главе..... 61
ГЛАВА 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ И ЧИСЛЕННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ..... 63
3.1 Влияние способа преобразования электрической энергии в теплоту на эффективность электрообогрева трубопроводов 63
3.2 Влияние теплоизоляции и пространственного расположения закладного канала на эффективность резистивного электрообогрева протяженных трубопроводов 72
3.3 Влияние конструктивного исполнения нагревательного элемента и закладного канала на температурный режим токопроводящих жил и эффективность электрообогрева 86
3.4 Повышение эффективности резистивного электрообогрева за счет перераспределения тепловыделения между элементами системы..... 100
3.5 Комплексная оценка конструктивных решений резистивного электрообогрева протяженных трубопроводов 115
3.6 Разработка лабораторно-испытательного комплекса для анализа предложенных технических решений в разномасштабных системах электрообогрева трубопроводов..... 132
3.7 Рекомендации по повышению эффективности систем резистивного электрообогрева трубопроводов..... 145
Выводы по главе..... 149
ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ И ВЫВОДЫ..... 152
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ..... 154
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ..... 158
ПРИЛОЖЕНИЕ А. Заявки на патенты 168
ПРИЛОЖЕНИЕ Б. Свидетельства о регистрации программ для ЭВМ..... 170
ПРИЛОЖЕНИЕ В. Акты о внедрении..... 172

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность тематики исследований

Освоение месторождений нефти и газа в Арктической зоне, на континентальном шельфе и в других северных регионах сопровождается развитием трубопроводного транспорта и созданием новых протяжённых трубопроводных систем, эксплуатируемых в условиях пониженных и крайне низких температур окружающей среды [1–3]. При транспортировке нефти, газового конденсата и других технологических сред интенсивное охлаждение продуктов приводит к увеличению их вязкости, выпадению парафиновых отложений [4], образованию газовых гидратов [5] и, как следствие, к снижению пропускной способности трубопроводов [4], нарушению устойчивости технологических процессов и увеличению эксплуатационных затрат [4,5]. Одним из наиболее эффективных способов предотвращения указанных явлений является электрообогрев трубопроводов, обеспечивающий компенсацию тепловых потерь и поддержание температуры транспортируемого продукта в заданном диапазоне [5–7]. По сравнению с системами парового и жидкостного обогрева электрические отличаются возможностью непосредственного подвода тепла к трубопроводу, отсутствием промежуточного теплоносителя, высокой эксплуатационной надёжностью, удобством автоматизации и эффективным применением на протяжённых линейных объектах [6,8].

Строительство надземных трубопроводов в районах с суровым климатом и вечной мерзлотой [2,9] всё чаще осуществляется с использованием предизолированных труб высокой заводской готовности [10]. Такие конструкции позволяют сократить объём строительно-монтажных работ, повысить качество тепловой изоляции и обеспечить высокую степень заводской готовности трубопроводных систем [11]. Применение предизолированных труб исключает возможность использования традиционного резистивного электрообогрева, предусматривающего крепление греющего кабеля непосредственно к наружной поверхности

трубопровода. Для электрообогрева предизолированных трубопроводов применяются поверхностный [12,13] и индукционный [10,14] способы, предусматривающие использование закладных стальных труб в качестве греющих элементов, размещаемых под тепловой изоляцией при изготовлении трубопровода [10,11]. Такие системы позволяют реализовывать электрообогрев трубопроводов протяженностью до 15 км [8,13], однако требуют применения специализированного электротехнического оборудования [13], что увеличивает стоимость системы и усложняет её реализацию. Для практического использования в системах электрообогрева нефтепроводов используется закладной канал с размещением в нем резистивного греющего кабеля. Подобное решение потенциально позволяет совместить преимущества предизолированных трубопроводов с простотой конструкции и сравнительно невысокой стоимостью резистивного электрообогрева. Вместе с тем перенос нагревательного элемента внутрь закладного канала сопровождается изменением условий теплопередачи между элементами конструкции, вследствие чего эффективность системы начинает зависеть не только от параметров нагревательного кабеля, но и от конструктивного исполнения нагревательного узла.

Таким образом, научная проблема заключается в том, что не установлены закономерности совокупного влияния конструктивных и режимных параметров резистивной системы электрообогрева с размещением греющего кабеля в закладном элементе на процессы тепловыделения и теплопереноса, определяющие показатели эффективности электрообогрева протяжённых трубопроводов. Решение данной проблемы требует установления количественных зависимостей между указанными параметрами, протекающими в системе процессами и показателями эффективности электрообогрева.

Объектом исследования является резистивная система электрообогрева предизолированных трубопроводов с размещением греющего кабеля в закладном элементе.

Предметом исследования являются закономерности теплопереноса в элементах резистивной системы электрообогрева трубопровода и их влияние на допустимые режимы работы и показатели эффективности системы.

Степень разработанности темы исследования.

Разработка и совершенствование систем электрообогрева трубопроводов являются актуальными направлениями исследований в области энергетики, теплотехники и нефтегазового транспорта. Основные исследования в этой области посвящены разработке инженерных методик расчёта, математическому моделированию электрических, электромагнитных и тепловых процессов, экспериментальному исследованию температурных режимов, а также совершенствованию резистивных, поверхностных, индукционных и импедансных систем электрообогрева. Значительный вклад в развитие данного научного направления внесли З.В. Фонарев, А.Б. Кувалдин, М.А. Федин, М.Л. Струпинский, Н.Н. Хренков, А.Г. Щербинин, С.Г. Конесев, П.А. Хлюпин, А.И. Данилушкин, J. Nysveen, S. Lervik, M.B. Høyland, Y. Yao, Y. Liang, Y. Wang, L. Ding, J. Zhang, A. Lin, L. Wang, X. Wang, L. Fu и другие известные специалисты. В настоящее время исследования активно выполняются научными коллективами Национального исследовательского университета «МЭИ» (А.Б. Кувалдин, М.А. Федин), Пермского национального исследовательского политехнического университета (А.Г. Щербинин, А.Е. Терлыч), Самарского государственного технического университета (А.И. Данилушкин), Уфимского государственного нефтяного технического университета (С.Г. Конесев, П.А. Хлюпин), специалистами ГК «ССТ» (М.Л. Струпинский, Н.Н. Хренков) и ОАО «НТЦ Энергосбережение» (Е. Ф. Чердынцев, В. И. Балабанов). За рубежом существенный вклад в развитие технологий электрообогрева внесли научные коллективы Norwegian University of Science and Technology (NTNU) и SINTEF Energy Research (J. Nysveen, S. Lervik, M. B. Høyland), специалисты компаний TECHNIP/TechnipFMC (P. Angays, P. Chabane, A. Nysveen), Beijing Institute of Petrochemical Technology и China Petroleum Pipeline Engineering Co.,

Ltd. (Y. Yao, Y. Liang, Y. Wang), China University of Petroleum (L. Ding, J. Zhang, A. Lin), Harbin Institute of Technology (L. Wang, X. Wang, L. Fu), выполнившие исследования, посвящённые разработке, математическому моделированию и экспериментальной верификации систем электрообогрева магистральных трубопроводов. Особенностью развития систем электрообогрева трубопроводов является их выраженная инженерно-прикладная направленность, вследствие чего значительная часть современных технических решений разработана промышленными компаниями, например, nVent RAYCHEM, Thermon, BARTEC, Eltherm, Chromalox, Heat Trace, TECHNIP (TechnipFMC)Э, ГК «ССТ», ОАО «НТЦ Энергосбережение». Они представлены преимущественно в технических руководствах, рекомендациях по проектированию и отраслевых стандартах. Несмотря на значительный объём выполненных исследований, опубликованные работы преимущественно посвящены совершенствованию существующих систем электрообогрева, разработке инженерных методик их расчёта и уточнению эксплуатационных характеристик. Вопросы комплексного исследования резистивной системы электрообогрева при размещении греющего кабеля в ферромагнитном закладном элементе предварительно изолированного трубопровода, включая разнонаправленное совместное влияние положения греющего кабеля, геометрии закладного элемента, толщины тепловой изоляции и перераспределения тепловыделения между токопроводящими и ферромагнитными элементами на температурный режим токопроводящих жил, допустимую линейную мощность и максимально допустимую длину плеча электрообогрева, в опубликованных исследованиях рассмотрены недостаточно, что определило выбор темы, цели и задач настоящего диссертационного исследования.

Целью диссертационного исследования является повышение допустимой линейной мощности и максимальной длины плеча электрообогрева протяжённых трубопроводов при прецизионном размещении резистивного греющего кабеля в закладном элементе.

Для достижения поставленной цели решались **задачи**:

1. Анализ существующих систем электрообогрева трубопроводов, определение области применения и направления повышения эффективности технологии резистивного электрообогрева.
2. Разработка экспериментальной методики и создание лабораторного стенда для проведения исследований интегральных характеристик теплопереноса в системе «элементы электрообогрева – трубопровод» с учетом раздельного и совместного влияния основных внешних и внутренних факторов.
3. Экспериментальное исследование особенностей распределения тепловыделения между элементами различных систем электрообогрева трубопроводов и использование полученных результатов для разработки и верификации физической и математической моделей.
4. Разработка, валидация и верификация физической и математической моделей теплопереноса в резистивной системе электрообогрева, обеспечивающих разномасштабное исследование температурного режима трубопровода и элементов системы.
5. Установление закономерностей влияния параметров резистивной системы электрообогрева на температурный режим её элементов и интегральные показатели эффективности электрообогрева на основе численных параметрических исследований.
6. Обобщение результатов экспериментальных и теоретических исследований с использованием интегральных критериев и карт тепловых режимов трубопроводов.
7. Разработка блочно-модульного испытательного комплекса для верификации результатов лабораторных экспериментов и математического моделирования с возможностью их переноса на разноразмерные системы и апробации предложенных технических решений для повышения эффективности электрообогрева.

8. Разработка научно обоснованных рекомендаций по выбору рациональных технических решений и условий применения резистивной системы электрообогрева с размещением греющего кабеля в закладном канале с учетом технико-экономических, энергетических, экологических и эксплуатационных параметров.

Научная новизна работы заключается в том, что впервые:

1. **Установлено,** что при электрообогреве предизолированных трубопроводов с размещением резистивного греющего кабеля в закладном элементе, в котором отсутствует продольное движение продукта, изменение пространственного положения закладного элемента практически не оказывает влияния на показатели эффективности системы обогрева, поскольку определяющим механизмом теплопереноса является теплопроводность, а влияние естественной конвекции ограничено.
2. **Разработаны** физическая и математические модели резистивной системы электрообогрева с размещением греющего кабеля в закладном элементе, отличающиеся от известных совместным учетом взаимосвязанных электрических, электромагнитных и тепловых процессов и позволяющие исследовать разнонаправленное влияние конструктивных, электрических и теплотехнических параметров системы на температурный режим ее элементов и показатели эффективности электрообогрева.
3. **Установлено** влияние толщины тепловой изоляции, конструктивного исполнения закладного элемента и положения греющего кабеля внутри закладного канала на температурный режим токопроводящих жил, допустимую линейную мощность и максимальную длину плеча резистивного электрообогрева.
4. **Предложен и апробирован** способ изменения распределения тепловыделения между элементами резистивной системы электрообогрева, основанный на несимметричном размещении токопроводящих жил внутри ферромагнитных закладных элементов, при котором возникающие дополнительные электромагнитные потери

обеспечивают тепловыделение в ферромагнитных элементах и снижение тепловой нагрузки токопроводящих жил, создавая резерв для увеличения допустимой линейной мощности электрообогрева.

Практическая значимость работы

1. Разработаны научно обоснованные рекомендации по выбору рациональных технических решений резистивного электрообогрева предизолированных трубопроводов с размещением греющего кабеля в закладном элементе. Полученные результаты позволяют выбирать конструктивное исполнение нагревательного узла, тип нагревательного кабеля, геометрию и расположение закладного элемента, а также параметры тепловой изоляции с учётом требований к допустимой температуре токопроводящих жил, линейной мощности и максимальной длине плеча электрообогрева.
2. Разработан лабораторно-испытательный комплекс, снабженный методиками его использования при содействии ПАО «НК Роснефть» в рамках программы поддержки научных исследований для вузов-партнеров (грант № 38 Национального исследовательского Томского политехнического университета), что обеспечило возможность экспериментальной верификации предложенных технических решений и их последующего внедрения в практику электрообогрева трубопроводов. Созданные комплекс и методики используются в ТПУ при подготовке бакалавров, магистрантов и аспирантов. К диссертации приложены заключения об использовании результатов.
3. Разработанные в диссертации подходы к анализу тепловых режимов электротехнического оборудования использовались при выполнении хоздоговорной работы с АО «Сибкабель», посвящённой расчету температурного режима нефтепогружного кабеля, размещенного по стволу скважины. Полученные результаты расширяют область применения нагревательных кабелей круглой конструкции в системах резистивного электрообогрева трубопроводов и создают предпосылки

для разработки специализированных конструкций нагревательных кабелей, ориентированных на применение в круглых закладных элементах.

Методы исследования

Методологической основой исследования является комплексный подход, основанный на совместном использовании анализа научно-технической литературы, авторских данных экспериментальных исследований, математического моделирования и разноразмерных испытаний. При выполнении работы использованы основы теории и методы расчета теплопередачи и электромагнитного поля. Численное моделирование выполнено с использованием метода конечных элементов в рамках постановки совместной электромагнитной и тепловой задачи. Результаты экспериментальных исследований использованы для валидации результатов математического моделирования. Лабораторно-испытательный комплекс создан для масштабирования предложенных технических решений.

Соответствие диссертации пунктам паспортов специальностей.

2.4.5. Энергетические системы и комплексы

4. Разработка научных подходов, методов, алгоритмов, технологий конструирования и проектирования, контроля и диагностики, оценки надежности основного и вспомогательного оборудования энергетических систем, станций и энергокомплексов и входящих в них энергетических установок.

5. Разработки и исследования в области энергосбережения и ресурсосбережения при производстве тепловой и электрической энергии, при транспортировке тепловой, электрической энергии и энергоносителей в энергетических системах и комплексах.

1.3.14. Теплофизика и теоретическая теплотехника

5. Экспериментальные и теоретические исследования однофазной, свободной и вынужденной конвекции в широком диапазоне свойств

теплоносителей, режимных и геометрических параметров теплопередающих поверхностей.

Положения, результаты и выводы, выносимые на защиту

1. Разработан лабораторно-испытательный комплекс, обеспечивающий воспроизведение тепловых и электромагнитных процессов в системах резистивного, поверхностного и индукционного электрообогрева трубопроводов, позволяющий выполнять экспериментальную валидацию результатов математического моделирования, апробацию и масштабирование предложенных технических решений в условиях, приближённых к эксплуатационным.
2. Разработаны физическая и математические модели резистивной системы электрообогрева с размещением греющего кабеля в закладном элементе, отличающиеся от известных, совместным учетом взаимосвязанных электрических, электромагнитных и тепловых процессов, позволяющие количественно оценивать влияние параметров нагревательного узла на температурный режим элементов системы, допустимую линейную мощность и максимальную длину плеча электрообогрева.
3. При резистивном электрообогреве предизолированных трубопроводов с размещением греющего кабеля в закладном элементе в диапазоне температур транспортируемого продукта 10–70 °C теплоперенос определяется преимущественно теплопроводностью ($Ra < 2 \cdot 10^5$), вследствие чего пространственное расположение закладного элемента на поверхности трубопровода (сверху, снизу или сбоку) практически не влияет на температурный режим системы и показатели эффективности электрообогрева.
4. Конструктивное исполнение нагревательного узла, включающее геометрию закладного элемента, конструкцию нагревательного кабеля и его положение внутри закладного канала, является одним из определяющих факторов, ограничивающих допустимую линейную мощность и максимальную длину плеча резистивного электрообогрева.

Показано, что применение круглого бронированного кабеля совместно с круглым закладным каналом позволяет увеличить максимальную длину плеча электрообогрева и снизить чувствительность системы к изменению положения кабеля внутри закладного элемента.

5. Предложен способ повышения эффективности резистивного электрообогрева, основанный на перераспределении тепловыделения между токопроводящими и ферромагнитными элементами системы посредством асимметричного размещения токопроводящих жил внутри закладного элемента, обеспечивающий снижение температуры токопроводящих жил, увеличение допустимой линейной мощности и максимальной длины плеча электрообогрева.

Достоверность результатов исследования подтверждается использованием фундаментальных основ теории и методов расчета теплопередачи и электромагнитного поля, применением современных методов математического моделирования, согласованностью теоретических результатов с известными представлениями о процессах теплопереноса и электромагнитных явлениях в системах электрообогрева трубопроводов, а также расчетом неопределенностей и воспроизводимостью результатов экспериментальных исследований. Корректность разработанной математической модели подтверждена сопоставлением результатов численного моделирования с экспериментальными данными.

Связь работы с научными программами и грантами.

Тема диссертационной работы соответствует приоритетному направлению развития науки, технологий и техники в Российской Федерации «6. Рациональное природопользование» и критической технологии Российской Федерации «27. Технологии энергоэффективного производства и преобразования энергии на органическом топливе» (Указ Президента № 899 от 7 июля 2011 года «Об утверждении приоритетных направлений развития науки, технологий и техники в Российской Федерации и перечня критических технологий Российской Федерации»). Диссертационные исследования

проводились при поддержке программы мегагрантов Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект 075-15-2025-007) и гранта поддержки научных исследований ПАО «НК Роснефть» № 38 «Разработка модели для прогнозирования необходимых параметров работы электротехнического оборудования в условиях электрообогрева протяженных трубопроводов», реализуемого совместно с Национальным исследовательским Томским политехническим университетом. По результатам гранта ПАО «НК Роснефть» № 38 выделено целевое финансирование на создание лабораторно-испытательного комплекса для экспериментальных исследований и подготовки кадров в НИ ТПУ.

Личный вклад автора заключается в постановке цели и задач исследования, анализе современного состояния систем электрообогрева трубопроводов, разработке математических моделей резистивной системы электрообогрева с размещением греющего кабеля в закладном элементе, выполнении численных исследований и анализа закономерностей влияния параметров системы на показатели ее эффективности. Автором разработан и изготовлен лабораторно-экспериментальный комплекс, спланированы и проведены разноразмерные экспериментальные исследования, выполнены обработка и анализ полученных результатов, оценены погрешности измерений, проведена верификация и валидация результатов математического моделирования, разработаны научно обоснованные рекомендации по повышению эффективности резистивного электрообогрева трубопроводов. Автором сформулированы основные научные положения, выводы и практические рекомендации, представленные в диссертации. Основные публикации по теме диссертационного исследования подготовлены при непосредственном участии автора. В работах, выполненных в соавторстве, вклад автора является определяющим; результаты, представленные в диссертации и выносимые на защиту, получены лично автором, либо при его непосредственном участии и опубликованы с согласия соавторов. Автор выражает благодарность коллективам Лаборатории тепломассопереноса НИ

ТПУ, Лаборатории многофазных прецизионных систем ИТ СО РАН, ООО «РН-Проектирование Добыча» за помощь в организации и проведении диссертационных исследований.

Апробация результатов исследования.

Основные положения и результаты диссертационного исследования докладывались и обсуждались на научных мероприятиях: Техническая конференция в области проведения испытания и внедрения новых технологий в ПАО «НК «Роснефть» (14–18 октябрь 2024 года, г. Красноярск, Россия), XXX Международный молодежный научный симпозиум имени академика М.А. Усова, посвященный 130-летию со дня основания Томского политехнического университета «Проблемы геологии и освоения недр» (6–10 апреля 2026 года, г. Томск, Россия), Томский международный энергетический форум (24-27 июня 2026 года, г. Томск, Россия), Девятая Российская национальная конференция по теплообмену (19-24 октября 2026 года, г. Москва, Россия).

Публикации.

Основные положения и результаты диссертации опубликованы в 7 научных работах, из них 4 – в журналах из списка рекомендованных ВАК, англоязычные версии указанных 3 статей опубликованы в изданиях, индексируемых в международных базах данных Scopus и Web of Science, 3 – в трудах всероссийских и международных конференций.

Подготовлены и направлены две заявки на выдачу патентов РФ. Получены 2 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Структура и объем работы.

Диссертационная работа состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы из 90 наименования; содержит 173 страниц машинописного текста, 37 рисунков, 16 таблиц, 3 приложения.

Содержание работы.

Во введении обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цель и задачи работы, отражены научная новизна,

теоретическая и практическая значимость результатов, представлены положения, выносимые на защиту.

В первой главе выполнен анализ современного состояния систем электрообогрева трубопроводов, рассмотрены современные способы электрообогрева, методы их исследования и направления повышения эффективности. Проанализированы факторы, влияющие на эффективность резистивного электрообогрева с размещением греющего кабеля в закладном элементе, сформулированы задачи исследования.

Во второй главе представлена методология экспериментального исследования, описаны основные элементы созданного стенда, приведено описание разработанных физической и математические модели резистивной системы электрообогрева с размещением греющего кабеля в закладном элементе, изложены методы численного моделирования, а также результаты верификации и валидации математических моделей.

В третьей главе приведены результаты экспериментальных исследований и математического моделирования. Установлены основные закономерности протекания исследуемых процессов и показано влияние толщины тепловой изоляции, пространственного расположения и конструктивного исполнения закладного элемента, положения нагревательного кабеля и перераспределения тепловыделения между элементами системы на температурный режим токопроводящих жил, допустимую линейную мощность и максимальную длину плеча электрообогрева. Представлено описание разработанного испытательного комплекса и его основных элементов. Приведены научно обоснованные решения по повышению эффективности резистивных систем электрообогрева трубопроводов в зависимости от условий эксплуатации.

В заключении приведены основные результаты диссертационной работы, сформулированы выводы и рекомендации по использованию полученных результатов.

ГЛАВА 1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ

1.1 Системы электрообогрева трубопроводов и направления их развития

Системы электрообогрева получили широкое распространение на объектах нефтегазовой промышленности, химического производства и теплоэнергетики, где они используются для предотвращения замерзания рабочих сред, поддержания требуемого температурного режима и обеспечения надежной эксплуатации трубопроводов [13,15,16]. Системы электрообогрева отличаются как физическим принципом преобразования электрической энергии в теплоту, так и конструктивным исполнением [7,12,13]. Первый признак характеризует механизм тепловыделения в элементах системы, второй – особенности передачи теплоты к обогреваемому трубопроводу. Совместное использование обеих классификаций позволяет наиболее полно описать особенности существующих систем электрообогрева, и установить взаимосвязь между физическими процессами, конструктивным исполнением и условиями эксплуатации.

1.1.1 Классификация по физическому принципу

По физическому принципу преобразования электрической энергии в теплоту системы электрообогрева подразделяются на резистивные, поверхностные (скин-эффект), индукционные и импедансные [5,7,12,13].

Резистивный электрообогрев основан на непосредственном протекании электрического тока по токопроводящим жилам нагревательного кабеля, подключенного к источнику питания. Выделение теплоты происходит вследствие Джоулевых потерь в проводнике, после чего теплота передается трубопроводу через контактирующие элементы конструкции [7,13]. Простота реализации, надежность и широкий ассортимент серийно выпускаемых нагревательных кабелей обусловили широкое распространение данного способа [17] при

электрообогреве трубопроводов разной протяженности (от 0,01 до 50 км) с удельной линейной мощностью от 5 до 50 Вт/м [6].

Скин-эффект основан на использовании поверхностного эффекта при протекании переменного тока по системе «изолированный проводник – ферромагнитная труба». Вследствие перераспределения плотности тока основная часть Джоулевых потерь локализуется в поверхностном слое ферромагнитного элемента, который одновременно выполняет функции токопроводящего, нагревательного и теплопередающего элемента. Такое конструктивное решение позволяет реализовать электрообогрев трубопроводов протяженностью до 15 км с удельной линейной мощностью до 120 Вт/м при сравнительно небольшом количестве пунктов электропитания [7,12,13].

Индукционный электрообогрев основан на использовании явления электромагнитной индукции. Переменное магнитное поле, создаваемое индуктором, индуцирует в ферромагнитном элементе вихревые токи, Джоулевы потери которых, а также потери на перемагничивание материала приводят к выделению теплоты непосредственно в нагреваемом элементе. Эффективность данного способа определяется электромагнитными свойствами материала, конфигурацией системы и параметрами источника питания. Индукционный электрообогрев также применяется для электрообогрева протяженных трубопроводов и обладает эксплуатационными характеристиками, близкими к поверхностным системам [10,12,14].

Импедансный электрообогрев основан на пропускании переменного электрического тока непосредственно по металлической стенке трубопровода, являющейся частью электрической цепи. Обратный путь тока обеспечивается параллельно проложенным проводником. Тепловыделение непосредственно в стенке трубопровода обусловлено её электрическим сопротивлением переменному току, зависящим от электрических и магнитных свойств стали [5,7,14]. Применение данного способа позволяет обеспечить непосредственный нагрев трубопровода на значительной протяжённости. Вместе с тем необходимость пропускания значительных токов непосредственно по трубопроводу обусловливает применение

специальных источников питания и токопроводящих кабелей, а также электрическую изоляцию обогреваемого участка трубопровода от смежных участков и оборудования [7,14]. Указанные особенности усложняют конструкцию системы электроснабжения и ограничивают применение импедансного электрообогрева для надземных трубопроводов [7]

Классификация по физическому принципу преобразования электрической энергии в теплоту с использованием закладных стальных труб (трубы-спутники) представлена на рисунке 1.1

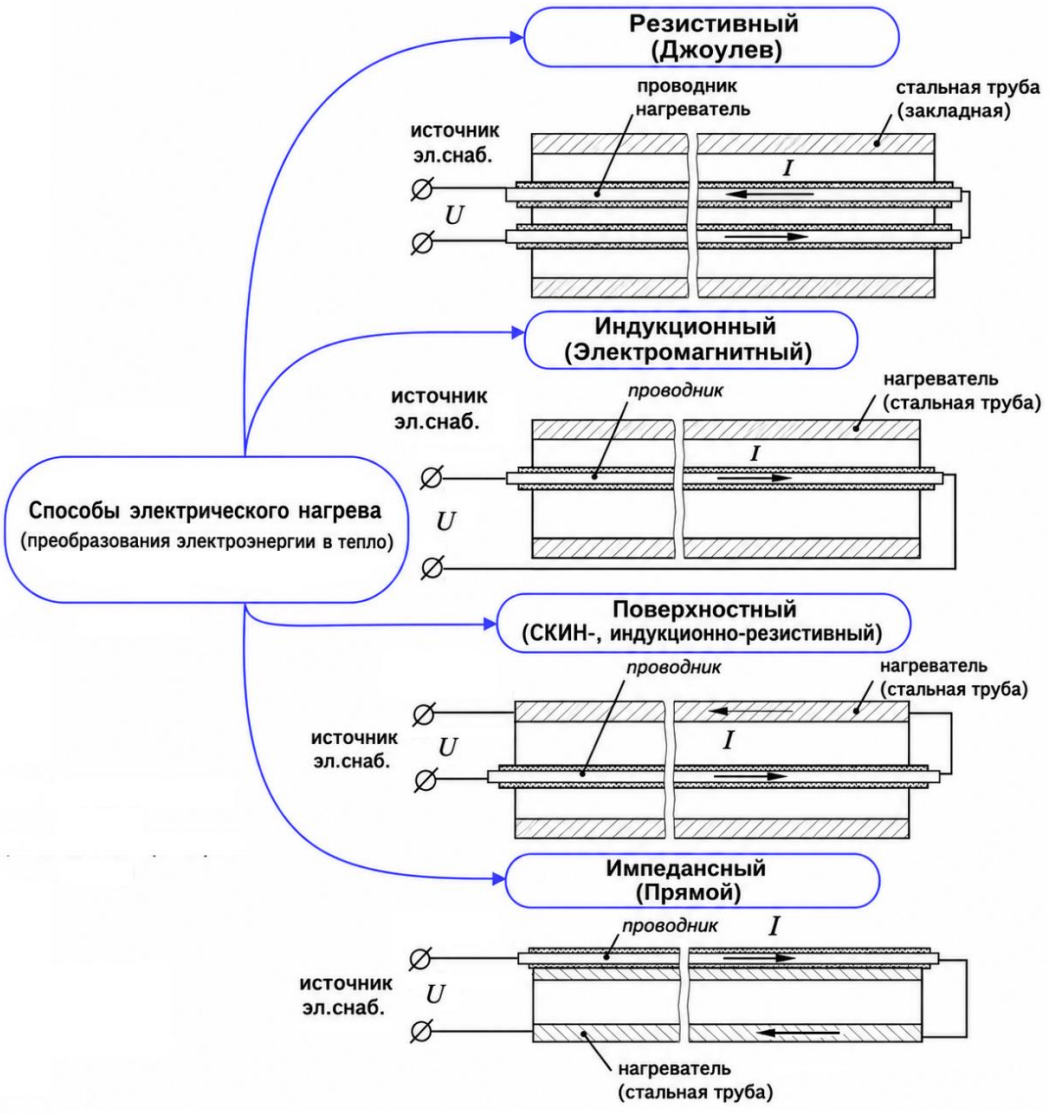


Рисунок 1.1 – Способы электрического нагрева

Во всех рассмотренных системах преобразование электрической энергии в теплоту осуществляется вследствие потерь в токопроводящих и (или) ферромагнитных элементах конструкции. Отличие различных способов

заключается в механизме формирования электрических токов, распределении тепловыделения между элементами системы [18,19] и, как следствие, в конструктивном исполнении [7,13].

Указанные особенности определяют область рационального применения различных способов электрообогрева. Резистивные системы получили наиболее широкое распространение благодаря простоте конструкции и сравнительно невысокой стоимости [17]. Однако при электрообогреве протяженных трубопроводов (от 1 до 15 км) их применение сопровождается необходимостью размещения нескольких пунктов электроснабжения вдоль трассы [7,8,12]. Поверхностные и индукционные системы позволяют осуществлять электрообогрев более протяженных участков при одностороннем подключении к источнику питания без применения сопроводительной электрической сети, что позволяет сократить количество пунктов электроснабжения [8,12,13].

При оценке энергетической и технико-экономической эффективности систем электрообогрева протяженных трубопроводов целесообразно учитывать не только энергопотребление, но и максимально допустимую длину плеча электрообогрева. Под плечом электрообогрева понимается максимальная длина участка трубопровода, обеспечиваемая одним источником электроснабжения без промежуточного подключения нагревательного кабеля при соблюдении электрических и температурных ограничений системы. Для протяженных трубопроводов данный показатель является одним из основных критериев эффективности [7,13], поскольку определяет количество пунктов электроснабжения вдоль трассы и, как следствие, капитальные и эксплуатационные затраты на реализацию системы электрообогрева. Увеличение плеча обогрева позволяет сократить количество источников электроснабжения, стоимость которых может достигать 70% от общей стоимости системы электрообогрева [10,13].

1.1.2 Классификация по способу подвода теплоты к трубопроводу

Наряду с физическим принципом преобразования электрической энергии в теплоту системы электрообогрева различаются способом подвода теплоты к трубопроводу. По данному признаку выделяют системы прямого и косвенного электрообогрева [7,13].

При косвенном способе электрообогрева теплота первоначально выделяется в самостоятельном нагревательном элементе – резистивном кабеле, нагревательной ленте или закладной трубе (трубе-спутнике), после чего передается стенке трубопровода посредством теплопроводности через контактирующие элементы конструкции [12,13].

При прямом способе электрообогрева тепловыделение формируется непосредственно в металлической стенке трубопровода или ферромагнитном элементе, конструктивно связанном с трубопроводом. Благодаря отсутствию промежуточного нагревательного элемента уменьшаются потери при передаче теплоты, что позволяет эффективно применять данный способ на трубопроводах большой протяженности. К системам прямого электрообогрева относятся импедансные, поверхностные и индукционные системы [5,7,20,21].

Классификация систем электрического обогрева трубопроводов по способу подвода тепла к трубопроводу представлена на рисунке 1.2.

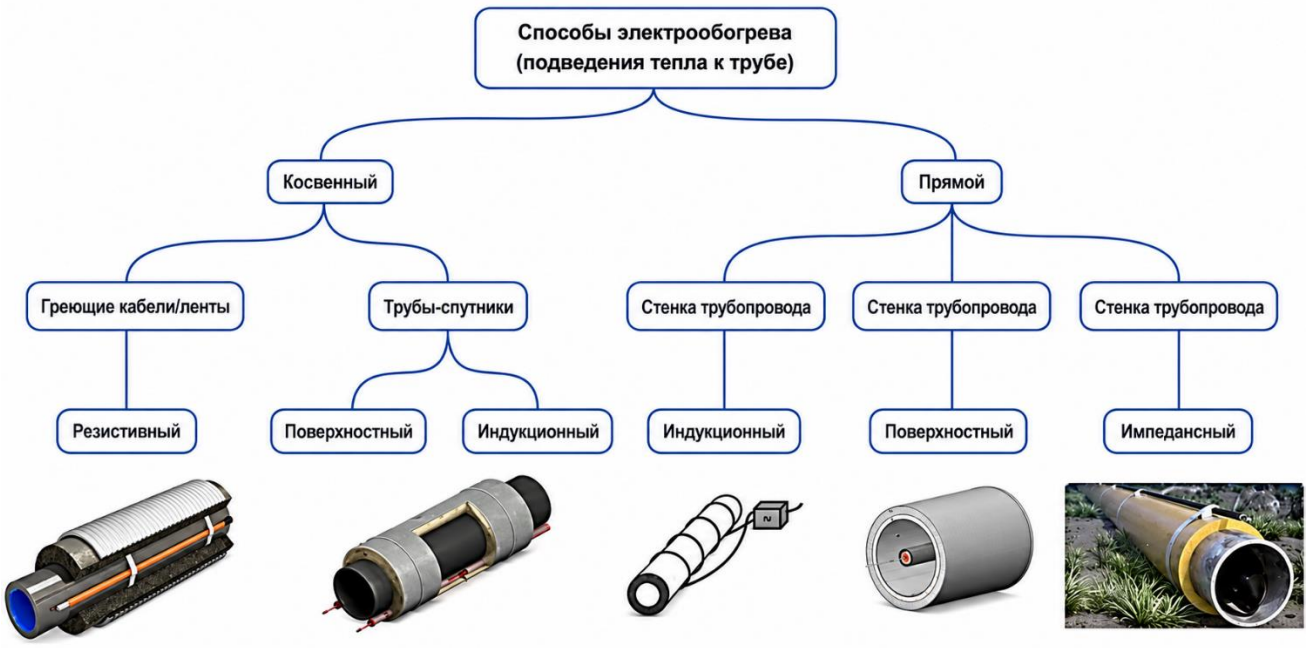


Рисунок 1.2 – Способы электрообогрева протяженных трубопроводов [7,10,12,13,22–25]

1.1.3 Конструктивные особенности современных систем электрообогрева трубопроводов

Конструктивное исполнение системы электрообогрева определяется не только выбранным способом преобразования электрической энергии в теплоту, но и требованиями к монтажу, эксплуатации, техническому обслуживанию и надежности работы трубопроводной системы. Независимо от физического принципа нагрева основной задачей конструкции является обеспечение эффективной передачи теплоты от нагревательного элемента к трубопроводу при сохранении допустимого температурного режима элементов системы [7,18].

В традиционных резистивных системах электрообогрева греющий кабель закрепляется непосредственно на наружной поверхности трубопровода под слоем тепловой изоляции (рисунок 1.3) [7,13,22]. Такое конструктивное исполнение обеспечивает минимальное тепловое сопротивление между нагревательным элементом и трубопроводом, простоту монтажа и расчета теплового режима [26]. Однако необходимость размещения кабеля на поверхности трубы затрудняет его применение в предизолированных трубопроводах заводской готовности.



Рисунок 1.13 – Внешний вид стального надземного трубопровода с резистивной системой электрообогрева

В поверхностных и индукционных системах электрообогрева указанные ограничения устраняются за счет применения стальной закладной трубы (труба-спутник), располагаемой вдоль трубопровода под слоем тепловой изоляции (рисунок 1.4). Размещение электрического проводника внутри закладного канала обеспечивает его механическую защиту, позволяет выполнять монтаж элементов электрообогрева на стадии изготовления предизолированного трубопровода и исключает необходимость доступа к наружной поверхности трубы в процессе эксплуатации [13]. Закладной элемент выполняет функции передачи теплоты к трубопроводу и участвует в преобразовании электрической энергии в теплоту [13,19].

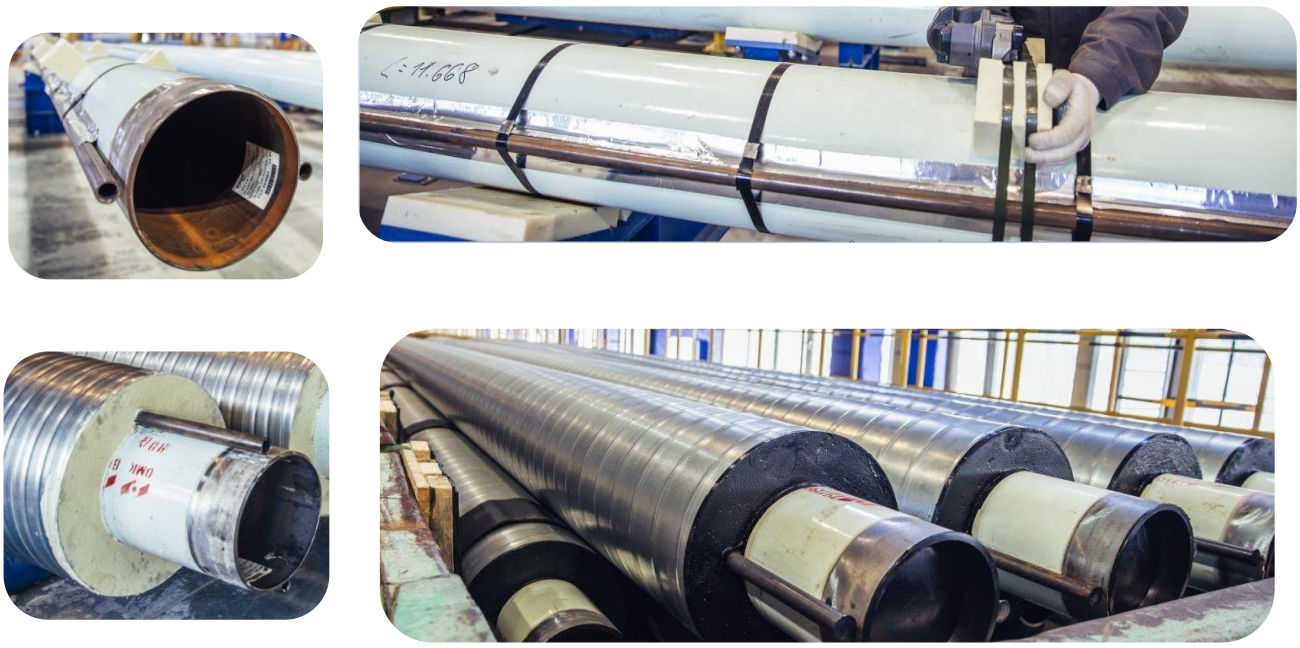


Рисунок 1.4. – Внешний вид стальных предизолированных трубопроводов с закладными каналами (труба-спутник)

Использование закладного канала расширяет возможности конструктивного исполнения системы электрообогрева. Размещение проводника внутри закладного элемента не требует его жесткого крепления к поверхности трубопровода, что снижает требования к гибкости нагревательного элемента и допускает применение различных конструкций проводников и кабелей. Одновременно появляется возможность изменения геометрии закладного элемента без изменения общей компоновки трубопровода, что создает предпосылки для совершенствования конструктивных решений систем электрообогрева.

Применение стальных закладных труб получило широкое распространение преимущественно в поверхностных и индукционных системах электрообогрева, где их использование определяется особенностями формирования тепловыделения и электромагнитных процессов. Однако возможность использования существующего закладного канала для размещения резистивного греющего кабеля до последнего времени практически не рассматривается. Подобное конструктивное решение потенциально позволяет совместить преимущества предизолированных трубопроводов с простотой, высокой надежностью и сравнительно невысокой стоимостью резистивного электрообогрева. Однако перенос нагревательного

элемента внутрь закладного канала изменяет условия теплопередачи по сравнению с традиционной схемой размещения греющего кабеля на поверхности трубопровода [27]. Появляются дополнительные элементы теплопередачи между кабелем и трубопроводом, изменяются условия теплоотвода и температурный режим нагревательного элемента, вследствие чего закономерности, установленные для традиционных резистивных систем электрообогрева, не могут быть непосредственно использованы для рассматриваемой конструкции.

Таким образом, размещение резистивного греющего кабеля в закладном канале представляет самостоятельное конструктивное решение, требующее исследования особенностей теплопередачи и определения факторов, влияющих на эффективность системы электрообогрева. Анализ указанных факторов и существующих подходов к их оценке приведен в разделе 1.3.

1.2 Методы исследования систем электрообогрева трубопроводов

Исследования процессов, протекающих в системах электрообогрева трубопроводов, выполняются с использованием экспериментальных подходов [19,21,28–34], инженерных методик расчета [13,15,16,35,36] и математического моделирования [22,23,37–41]. Выбор метода определяется целью исследования, стадией разработки системы и характером решаемой задачи [7,13,16]. При разработке современных систем электрообогрева указанные методы, как правило, применяются совместно [13,16,27,28,30,39].

Экспериментальные исследования применяются для проверки работоспособности конструктивных решений, определения характеристик отдельных элементов системы и валидации расчетных моделей [19,27,30,33,34,42–46]. Анализ результатов [5,8,20,23,26–33,37–39] показывает, что исследования, направленные на количественную оценку влияния конструктивных параметров нагревательного узла на эффективность резистивной системы электрообогрева при размещении греющего кабеля в закладном элементе, в настоящее время практически отсутствуют. Исследование новых технических решений исключительно экспериментальными методами связано со значительными

трудозатратами, обусловленными необходимостью изготовления опытных образцов и проведения повторных испытаний при изменении исследуемых параметров [7,13,27,29,33,45].

Инженерные методики расчета используются при проектировании известных систем электрообогрева и выборе их основных параметров [15,16,35,36,47]. Проектирование систем электрообогрева трубопроводов в настоящее время осуществляется на основе инженерных методик расчета, изложенных в международных стандартах IEEE 515, IEC/IEEE 62395 [11,15,16,35,36,47], отраслевых нормативных документах [48], а также в технических руководствах ведущих производителей систем электрообогрева, включая nVent RAYCHEM, Thermon, BARTEC, Eltherm и SST Group [13,49–52]. Указанные документы содержат рекомендации по определению требуемой линейной мощности системы электрообогрева, выбору типа нагревательного элемента, параметров системы электроснабжения и максимально допустимой длины плеча электрообогрева для различных условий эксплуатации. В основу инженерных методик положен расчет теплового баланса трубопровода, позволяющий определить требуемую линейную мощность системы электрообогрева с учетом температуры окружающей среды, температуры транспортируемого продукта, толщины тепловой изоляции, коэффициентов теплоотдачи и других эксплуатационных факторов [7,13]. Методики [7,13] ориентированы на системы с заранее заданной конструкцией: геометрия нагревательного узла и условия теплопередачи принимаются известными, а расчет сводится к определению эксплуатационных параметров. Такой подход эффективен при проектировании типовых решений. Однако его возможности ограничены при анализе новых конструктивных вариантов, поскольку при изменении конфигурации системы электрообогрева принятые при разработке методик допущения перестают выполняться [27]. В связи с этим для исследования новых решений требуется применение методов математического моделирования, позволяющих учитывать взаимосвязанные тепловые, электрические и электромагнитные процессы.

Математическое моделирование является одним из основных методов исследования современных систем электрообогрева трубопроводов, позволяющим анализировать взаимосвязанные электрические, электромагнитные и тепловые процессы без изготовления большого количества опытных образцов [20,22,25,30,34–40,46]. В последние годы данное направление активно развивается в работах отечественных и зарубежных научных коллективов, посвященных исследованию резистивных, поверхностных, индукционных и импедансных систем электрообогрева. Анализ опубликованных исследований показывает, что математическое моделирование применяется для расчета температурных полей, определения тепловых потерь трубопроводов, оценки электрических и энергетических характеристик нагревательных элементов, выбора параметров системы электроснабжения и исследования влияния конструктивных и эксплуатационных факторов на эффективность электрообогрева [20,22,25,30,34–40,46]. Однако достоверность результатов математического моделирования определяется корректностью принятой физической постановки задачи, полнотой учета определяющих физических процессов, выбором теплофизических и электрофизических свойств материалов, а также обязательной экспериментальной проверкой разработанной модели. По этой причине математическое моделирование не заменяет экспериментальные исследования, а дополняет их, обеспечивая возможность детального анализа процессов, недоступных непосредственному экспериментальному наблюдению [25,27,30,37,40–43]. В опубликованных исследованиях для моделирования процессов электрообогрева преимущественно используются численные методы, основанные на методе конечных элементов. Наиболее распространенными программными комплексами являются COMSOL Multiphysics и ANSYS, позволяющие выполнять сопряженное моделирование тепловых, электрических и электромагнитных процессов с учетом реальной конфигурации конструкции, свойств материалов и условий теплообмена. Указанные программные комплексы применяются как в научных исследованиях, так и при разработке новых технических решений в промышленности [20,25,30,34–40,46]. Большинство разработанных моделей ориентировано на исследование уже

известных технических решений и их адаптацию к различным условиям эксплуатации. Однако вопросы комплексного исследования новых конструктивных решений резистивной системы электрообогрева при размещении греющего кабеля в закладном элементе в известных работах практически не рассмотрены, что обусловливает необходимость разработки соответствующей математической модели.

Сравнительная характеристика рассмотренных методов исследования приведена в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Перечень методов исследования систем электрообогрева трубопроводов

Метод исследования	Основная область применения	Преимущества	Основные ограничения	Типичные средства исследования	Основные источники
Экспериментальные исследования	Проверка работоспособности конструктивных решений, определение температурных, электрических и энергетических характеристик, валидация моделей	Высокая достоверность результатов, возможность исследования реальных объектов	Высокая трудоемкость, необходимость изготовления опытных образцов, ограниченные возможности параметрических исследований	Экспериментальные стенды, измерительные комплексы, тепловизионный контроль	[25], [27], [29], [31], [40]
Инженерные методики расчета	Проектирование существующих систем электрообогрева и выбор основных параметров	Простота применения, использование нормативной базы, возможность	Применимы преимущественно к типовым конструкциям, ограничены при анализе новых	IEEE 515, IEC/IEEE 62395, отраслевые нормативные документы, технические	[13], [15], [16], [32], [33], [45], [47-50]

Продолжение таблицы 1.1.

Метод исследования	Основная область применения	Преимущества	Основные ограничения	Типичные средства исследования	Основные источники
		быстрого выбора параметров системы	технических решений	руководства производителей	
Математическое моделирование	Исследование новых конструктивных решений, параметрический анализ, прогнозирование характеристик системы	Возможность совместного учета тепловых, электрических и электромагнитных процессов, исследование большого числа вариантов конструкции без изготовления опытных образцов	Требует достоверных исходных данных, корректной физической постановки задачи и обязательной экспериментальной верификации	COMSOL Multiphysics, ANSYS, ANSYS Maxwell	[22], [30], [34], [37], [39], [46]

1.3 Факторы, определяющие эффективность резистивной системы электрообогрева, и направления ее совершенствования

Для систем электрообогрева протяженных трубопроводов одним из основных показателей эффективности является максимально допустимая длина плеча электрообогрева [7,13,49]. Для резистивных систем возможность ее увеличения ограничивается допустимым напряжением изоляции и температурным режимом токопроводящих жил нагревательного кабеля. Поэтому поиск технических решений, позволяющих увеличить длину плеча электрообогрева без нарушения эксплуатационных ограничений, является одним из актуальных направлений совершенствования резистивных систем электрообогрева.

Размещение резистивного греющего кабеля внутри закладного элемента изменяет условия теплопередачи, а эффективность системы начинает определяться конструктивными и эксплуатационными факторами. В отличие от традиционного резистивного электрообогрева, при котором конструкция нагревательного кабеля в значительной степени определяется необходимостью его непосредственного крепления к поверхности трубопровода, использование закладного канала расширяет возможности выбора конструкции нагревательного элемента и конструктивного исполнения нагревательного узла. Также перенос нагревательного кабеля внутрь закладного элемента исключает возможность обеспечения его непосредственного теплового контакта с трубопроводом [27,53]. В результате условия теплоотвода начинают определяться не только тепловыми характеристиками кабеля, но и конфигурацией закладного элемента, величиной воздушного зазора, положением кабеля внутри канала и другими конструктивными параметрами нагревательного узла. К числу наиболее значимых факторов относятся толщина тепловой изоляции [54,55], пространственное расположение закладного элемента относительно трубопровода [56], конструкция нагревательного кабеля и закладного элемента [53], положение нагревательного элемента внутри закладного канала [27,41], а также распределение тепловыделения между токопроводящими и ферромагнитными элементами системы [40].

В диссертационной работе под эффективностью резистивной системы электрообогрева понимается способность системы обеспечивать требуемый температурный режим трубопровода при минимально необходимом энергопотреблении и соблюдении эксплуатационных ограничений нагревательного кабеля. Для протяженных трубопроводов повышение эффективности связано не только со снижением энергозатрат, но и с увеличением допустимой линейной мощности и максимальной длины плеча электрообогрева, достигаемыми без превышения допустимой температуры токопроводящих жил.

1.3.1 Тепловая изоляция

Тепловая изоляция является одним из основных элементов системы электрообогрева трубопроводов и определяет величину тепловых потерь в окружающую среду [54]. От ее толщины и теплофизических свойств зависят требуемая линейная мощность электрообогрева, энергопотребление системы и возможность поддержания заданного температурного режима транспортируемого продукта [11,13,15,16,55,57].

В существующих инженерных методиках расчета толщина тепловой изоляции рассматривается как параметр, определяющий тепловые потери трубопровода. На основании расчета теплового баланса выбираются требуемая линейная мощность электрообогрева, тип нагревательного кабеля и параметры системы электроснабжения. При этом влияние тепловой изоляции на температурный режим самого нагревательного элемента [13,54] и конструктивное исполнение нагревательного узла [54,55], как правило, не рассматриваются.

При использовании резистивного греющего кабеля, размещенного внутри закладного элемента, влияние тепловой изоляции имеет особенности. Изменение толщины изоляции сопровождается изменением суммарных тепловых потерь как от трубопровода в окружающую среду, так и от токопроводящих жил к трубопроводу через элементы закладного канала [41]. Однако этот фактор подробно не исследовался.

1.3.2 Пространственное расположение закладного элемента

В системах косвенного электрообогрева закладной элемент может располагаться в верхней, боковой или нижней части трубопровода. Выбор его положения определяется конструктивными особенностями трубопровода, технологией изготовления предизолированных секций, условиями монтажа и эксплуатации [48]. Изменение пространственного расположения закладного элемента сопровождается изменением взаимного расположения источника тепловыделения и обогреваемого трубопровода. При отсутствии продольного движения транспортируемого продукта это может приводить к изменению температурного поля в поперечном сечении трубопровода, условий естественной конвекции и характера передачи теплоты от нагревательного элемента к транспортируемой среде [41]. Однако в известных инженерных методиках расчета [56] пространственное расположение закладного элемента, как правило, не рассматривается в качестве самостоятельного параметра, и численные оценки влияние этого фактора на теплоперенос при резистивном электрообогреве протяженных трубопроводов не проводилось.

1.3.3 Конструктивное исполнение нагревательного узла

Конструктивное исполнение нагревательного узла является одним из факторов, определяющих условия передачи теплоты от нагревательного элемента к трубопроводу. В рассматриваемой системе нагревательный узел включает резистивный греющий кабель и закладной элемент. В традиционных системах резистивного электрообогрева преимущественно используются плоские гибкие нагревательные кабели [58], обеспечивающие непосредственное крепление к поверхности трубопровода [22,53]. Однако такое размещении кабеля внутри закладного элемента круглого сечения невозможно. Поэтому используются либо кабели также круглого сечения, либо меняется конструктивное исполнение закладного элемента [10,12,13]. В технической литературе встречаются конструкции с использованием профильных труб, уголков и других элементов различного поперечного сечения [53,59,60], отличающихся условиями

теплопередачи, жесткостью конструкции, технологией и себестоимостью изготовления. При размещении резистивного греющего кабеля внутри закладного элемента тепловой поток от токопроводящих жил к трубопроводу проходит через элементы конструкции нагревательного узла. Поэтому конструктивные особенности кабеля и закладного элемента следует рассматривать совместно, поскольку именно их сочетание определяет тепловое сопротивление системы, интенсивность отвода теплоты от токопроводящих жил и температурный режим нагревательного элемента. В [53] конструктивное исполнение закладных элементов преимущественно рассматривается применительно к поверхностным и индукционным системам электрообогрева, тогда как основное внимание при выборе резистивных нагревательных кабелей уделяется их электрическим характеристикам, линейной мощности и эксплуатационной надежности. Комплексное влияние конструктивного исполнения системы «резистивный греющий кабель – закладной элемент» на температурный режим токопроводящих жил, допустимую линейную мощность и эффективность резистивной системы электрообогрева не изучалось.

1.3.4 Положение нагревательного элемента внутри закладного канала

Положение нагревательного элемента определяет величину воздушного зазора, условия отвода теплоты к трубопроводу и температурный режим токопроводящих жил [40,41,53]. Но в известных инженерных методиках расчета положение нагревательного элемента, как правило, считается фиксированным и не рассматривается как самостоятельный фактор влияния. Аналогичный подход используется при разработке одномерных математических моделей, в которых теплоперенос определяется мощностью нагревательного кабеля и тепловыми потерями трубопровода [22,26,54].

1.3.5 Распределение тепловыделения между элементами системы

Эффективность системы электрообогрева определяется не только величиной подводимой электрической мощности, но и распределением источников

тепловыделения между элементами конструкции [18,19]. В зависимости от способа электрообогрева электрическая энергия может преобразовываться в теплоту преимущественно в токопроводящих или ферромагнитных элементах системы, что определяет особенности теплопередачи и температурный режим нагревательного узла [27].

В резистивных системах электрообогрева практически вся электрическая энергия преобразуется в теплоту непосредственно в токопроводящих жилах нагревательного кабеля. В поверхностных и индукционных системах существенная часть тепловыделения формируется в ферромагнитных элементах вследствие протекания индуцированных токов и магнитных потерь [19]. Такое различие в механизмах преобразования электрической энергии определяет различный характер распределения температуры между элементами конструкции и различные области рационального применения указанных способов электрообогрева [27,34].

Анализ результатов ранее выполненных исследований показывает, что опубликованные работы преимущественно посвящены сравнению различных способов электрообогрева [12,14,54], совершенствованию их конструктивного исполнения [25,61] и выбору параметров нагревательных элементов [22]. А возможность целенаправленного изменения распределения тепловыделения между токопроводящими и ферромагнитными элементами в пределах резистивной системы электрообогрева ранее не анализировались.

Использование ферромагнитного закладного элемента создает предпосылки для возникновения дополнительных электромагнитных процессов, сопровождающихся выделением теплоты непосредственно в элементах конструкции [10,19]. Интенсивность этих процессов определяется взаимным расположением токопроводящих жил [27], геометрией закладного элемента [40], его размерами, а также электромагнитными свойствами используемого материала [31,45]. Следовательно, конструктивное исполнение нагревательного узла потенциально позволяет влиять не только на условия теплоотвода, но и на распределение источников тепловыделения внутри системы.

Одним из возможных направлений повышения эффективности резистивного электрообогрева является частичное перераспределение тепловыделения из токопроводящих жил в ферромагнитные элементы конструкции [18] при сохранении общего принципа работы системы и стандартной трехфазной схемы электроснабжения [27]. Реализация такого подхода потенциально позволяет снизить температурную нагрузку на токопроводящие жилы без увеличения общей подводимой мощности системы [34].

Несмотря на перспективность данного направления, количественные оценки влияния перераспределения тепловыделения между элементами конструкции на температурный режим токопроводящих жил и эффективность резистивной системы электрообогрева далее не проводились.

1.3.6 Основные направления повышения эффективности резистивной системы электрообогрева

Проведенный в подразделах 1.3.1–1.3.5 анализ опубликованных работ показал, что повышение эффективности резистивных систем электрообогрева невозможно обеспечить за счет изменения какого-либо одного параметра. Температурный режим трубопровода и нагревательного элемента формируется при совместном влиянии конструктивных, электрических и теплотехнических характеристик системы, вследствие чего совершенствование таких систем должно рассматриваться как комплексная задача.

Рассмотренные в предыдущих подразделах факторы позволяют выделить несколько основных направлений повышения эффективности резистивного электрообогрева. Первое направление связано с совершенствованием конструкции нагревательного узла. Выбор рациональной толщины тепловой изоляции позволяет снизить тепловые потери трубопровода и уменьшить требуемую линейную мощность системы электрообогрева [11,55,57]. Пространственное расположение закладного элемента определяет условия передачи теплоты к транспортируемому продукту и должно учитываться при выборе конструкции системы [41,56]. Конструктивное исполнение закладного элемента и положение нагревательного

кабеля внутри закладного канала оказывают непосредственное влияние на условия теплоотвода от токопроводящих жил и на температурный режим нагревательного элемента [41,53]. Кроме того, использование закладного канала создает предпосылки для расширения области применения существующих конструктивных решений. В отличие от традиционной схемы непосредственного крепления кабеля к поверхности трубопровода такая конструкция потенциально допускает применение кабелей различной конструкции и электрического исполнения, использование которых в традиционных системах резистивного электрообогрева ограничено требованиями непосредственного крепления к поверхности трубопровода [15,16,50,52,58].

Второе направление заключается в снижении температурной нагрузки на токопроводящие элементы системы. Известно, что максимально допустимая линейная мощность резистивной системы ограничивается допустимой температурой изоляции нагревательного кабеля [13,16,52]. Снижение температуры токопроводящих жил позволяет увеличить допустимую линейную мощность системы электрообогрева и максимальную длину плеча без превышения эксплуатационных ограничений [15,16,58]. При этом повышение эффективности достигается за счет более рационального использования подводимой электрической энергии, а не посредством увеличения установленной мощности системы.

Третье направление связано с управлением распределением тепловыделения между токопроводящими и ферромагнитными элементами конструкции. Возможность использования электромагнитных процессов для формирования дополнительного тепловыделения в ферромагнитных элементах показана в работах, посвященных индукционным и индукционно-резистивным системам нагрева [18,39,42,46]. Использование данного подхода потенциально позволяет перераспределять часть тепловыделения между элементами системы и тем самым снижать температурную нагрузку на токопроводящие жилы без изменения общего принципа работы резистивной системы электрообогрева.

Для реализации указанных направлений необходимо определить количественное влияние толщины тепловой изоляции, пространственного расположения и конструктивного исполнения закладного элемента, положения нагревательного кабеля внутри закладного канала, а также возможности перераспределения тепловыделения между токопроводящими и ферромагнитными элементами системы. Решение указанных прикладных задач невозможно без разработки научных основ проектирования энергоэффективных систем резистивного электрообогрева трубопроводов.

Выводы по главе

1. Развитие конструкций предизолированных трубопроводов сопровождается расширением применения закладных элементов в системах косвенного электрообогрева. При этом существующие конструктивные решения ориентированы преимущественно на поверхностный и индукционный способы электрообогрева.
2. Для систем электрообогрева протяженных трубопроводов одним из основных показателей энергетической и технико-экономической эффективности является максимально допустимая длина плеча электрообогрева, определяющая необходимое количество пунктов электроснабжения и связанные с ними капитальные затраты.
3. Возможности применения закладного канала совместно с резистивным греющим кабелем, а также влияние такого конструктивного решения на эффективность системы электрообогрева в опубликованных исследованиях рассмотрены недостаточно.
4. Существующие инженерные методики расчета предназначены главным образом для выбора параметров известных систем электрообогрева и имеют ограниченные возможности при исследовании новых конструктивных решений, что обусловливает необходимость применения математического моделирования с последующей экспериментальной проверкой результатов.

5. Выделены основные факторы, потенциально влияющие на эффективность резистивной системы электрообогрева при размещении греющего кабеля в закладном элементе. Выделенные факторы послужили основой для определения направлений дальнейшего исследования, направленного на количественную оценку их влияния на эффективность резистивных систем электрообогрева.

ГЛАВА 2. МЕТОДИКИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ И ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

2.1 Экспериментальные исследования

Для проведения экспериментальных исследований разработана и изготовлена лабораторная установка, предназначенная для изучения процессов преобразования электрической энергии в тепловую при реализации различных способов косвенного электрообогрева. Основной целью эксперимента являлось установление закономерностей распределения тепловыделения между токопроводящими и ферромагнитными элементами системы, определяющих температурный режим нагревательного элемента и эффективность электрообогрева.

В ходе экспериментальных исследований определялись распределение активной мощности между элементами системы, температурные характеристики нагревательного элемента, электрические характеристики исследуемой системы, а также взаимосвязь электрических и тепловых процессов при резистивном, поверхностном и индукционном способах электрообогрева. Полученные результаты использовались для разработки и последующей валидации математических моделей.

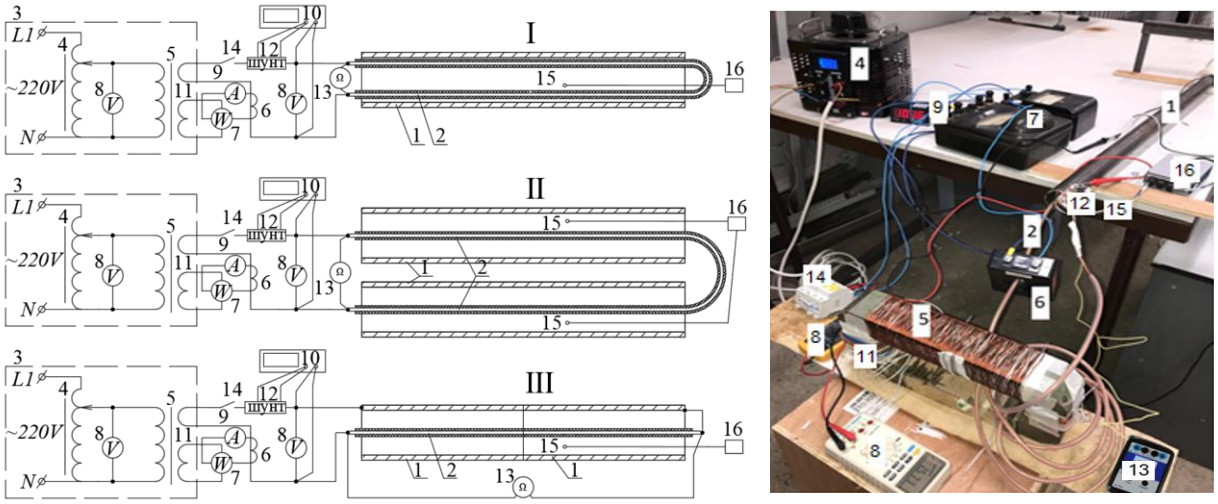
В главе 2 приведены описания экспериментальной установки, используемых материалов, методики проведения исследований, измерительного оборудования, варьируемых параметров, регистрируемых характеристик с оценкой погрешностей экспериментальных измерений.

2.1.1 Стенд

В системах косвенного электрообогрева трубопроводов нагревательный элемент представляет стальной закладной элемент с размещенным внутри изолированным проводником [30,62]. В зависимости от способа преобразования электрической энергии в тепловую данная конструкция может использоваться при резистивном, поверхностном и индукционном способах

электрообогрева. Для проведения экспериментальных исследований использовалась лабораторная установка, конструкция которой соответствовала исследуемому нагревательному элементу и обеспечивала возможность реализации указанных способов электрообогрева при сопоставимых условиях проведения эксперимента.

Экспериментальная установка состояла из стальной водогазопроводной трубы по ГОСТ 3262–75 длиной 2 м, наружным диаметром 33,5 мм и толщиной стенки 2,8 мм, а также размещенного внутри нее изолированного медного многопроволочного проводника марки ПуГВ по ГОСТ 31947–2012 сечением токопроводящей жилы 16 мм^2. Общий вид экспериментальной установки и электрические схемы подключения основных элементов приведены на рисунке 2.1.



(*а*) (*б*)

Рисунок 2.1 – Электрические схемы (*а*) и внешний вид стенда (*б*) для исследования закономерностей электрического нагрева модельных трубопроводов с применением разных способов: I – резистивный, II – индукционный, III – поверхностный.

Обозначения на схеме: *1* – стальная труба; *2* – изолированный медный проводник; *3* – источник питания (на внешнем виде стенда отсутствует, источником выступает розетка 220 В); *4* – регулируемый автотрансформатор; *5* – питающий трансформатор с двумя вторичными обмотками; *6* – трансформатор тока; *7* – ваттметр; *8* – вольтметры; *9* – амперметр;

10 – осциллограф (на внешнем виде стенда отсутствует); *11* – вторичная обмотка питающего трансформатора; *12* – токовый шунт; *13* – микромиллиомметр; *14* – коммутационный аппарат; *15* – термопара; *16* – измеритель температуры.

Изменение схемы электрического соединения стальной трубы и проводника обеспечивало реализацию резистивного, индукционного и поверхностного способов электрообогрева без изменения конструкции исследуемого нагревательного элемента. Это позволяло выполнять их корректное сопоставление в одинаковых геометрических, материаловедческих и режимных условиях проведения эксперимента.

Электропитание экспериментальной установки осуществлялось от источника переменного тока промышленной частоты 50 Гц через регулируемый лабораторный автотрансформатор и понижающий трансформатор. Регулирование напряжения позволяло устанавливать требуемый режим работы исследуемой системы в диапазоне токов от 10 до 120 А. Для регистрации электрических характеристик использовались средства измерения напряжения, тока, активной мощности, коэффициента мощности и электрического сопротивления элементов системы. Температурные измерения выполнялись с использованием термопар типа К. Основные элементы экспериментальной установки и применяемые средства измерения приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Основные элементы экспериментальной установки и средства измерения

Элемент	Назначение
Стальная труба 33,5×2,8 мм	Ферромагнитный нагревательный элемент
Медный проводник ПуГВ 16 мм^2	Токопроводящий элемент
Лабораторный автотрансформатор	Регулирование напряжения питания
Понижающий трансформатор	Формирование требуемого уровня напряжения и тока
Трансформатор тока	Измерение тока
Ваттметр АСМ-2352	Измерение активной мощности и коэффициента мощности
Вольтметр АРРА 106	Измерение напряжения
Амперметр OMIX P94-A-1-0,5	Измерение тока
Осциллограф Tektronix TDS 2012B	Контроль формы сигналов и фазового сдвига
Микромиллиомметр ИКС-1А	Измерение электрического сопротивления
Термопара типа К	Измерение температуры

2.1.2 Методика исследований

Экспериментальные исследования проводились в соответствии с методикой, обеспечивающей поэтапное изучение электрических и тепловых процессов в системах косвенного электрообогрева трубопроводов. Построение методики предусматривало разделение влияния электрофизических, теплотехнических и конструктивных факторов, а также

получение сопоставимых результатов для различных способов электрообогрева.

Исследования выполнялись в два последовательных этапа. На первом определялись электрические характеристики исследуемых способов электрообогрева, позволяющие оценить распределение активной электрической мощности между токопроводящими и ферромагнитными элементами системы. На втором исследовались тепловые характеристики нагревательного элемента, включая температурный режим элементов системы в переходном и установившемся режимах. Последовательное выполнение указанных этапов обеспечивало возможность сопоставления электрических и тепловых процессов при различных способах электрообогрева.

Исследование электрических характеристик проводилось при температуре элементов, близкой к температуре окружающей среды, что позволяло исключить влияние изменения электрического сопротивления, обусловленного их нагревом [63]. Перед началом каждого экспериментального цикла измерялось электрическое сопротивление стальной трубы и медного проводника с использованием микромиллиомметра [64]. Затем с помощью лабораторного автотрансформатора устанавливалось требуемое напряжение питания, соответствующее выбранному режиму экспериментального исследования.

После подготовки схемы осуществлялось кратковременное включение исследуемой системы. Продолжительность подачи напряжения составляла не более 3 с, что существенно меньше характерного времени нагрева проводника и стальной трубы и позволяло считать изменение их температуры пренебрежимо малым. Такой режим обеспечивал регистрацию электрических характеристик при практически неизменных электрофизических свойствах материалов и исключал заметное влияние изменения температуры на результаты измерений, что соответствует общепринятому подходу к определению электрического сопротивления токопроводящих элементов [65,66].

Корректность принятой продолжительности измерений подтверждалась контролем изменения электрического сопротивления элементов системы. За время регистрации электрических характеристик изменение сопротивления токопроводящей жилы не превышало 2,5%, а стальной трубы – 1%, что свидетельствует о пренебрежимо малом влиянии нагрева на результаты электрических измерений.

Исследование тепловых характеристик выполнялось при длительной подаче напряжения с непрерывной регистрацией параметров исследуемой системы до выхода на установившийся режим. Особенностью данного этапа являлось проведение экспериментов при стабилизированном напряжении питания. Такой подход обусловлен тем, что в процессе нагрева изменяются электрические параметры элементов системы, вследствие чего изменяются ток и тепловая мощность, выделяемая в нагревательных элементах.

Предварительно выполнялась градуировка токопроводящей жилы. Для этого жила совместно с контрольным термодатчиком выдерживалась при постоянной температуре до достижения теплового равновесия с окружающей средой, после чего ее электрическое сопротивление измерялось микромиллиомметром. Измерения выполнялись при нескольких установившихся значениях температуры. По экспериментальным данным определялось фактическое значение температурного коэффициента сопротивления токопроводящей жилы по выражению [67]:

$$\alpha = \frac{R - R_0}{R_0 (T - T_0)}, \quad (1)$$

где α – температурный коэффициент сопротивления проводника, R_0 – сопротивление проводника при температуре T_0; R – сопротивление при температуре T.

Полученное значение температурного коэффициента сопротивления использовалось при последующем определении средней температуры токопроводящей жилы по результатам измерения ее электрического сопротивления.

Температура поверхности стальной трубы определялась контактными термопарами, а средняя температура медного проводника рассчитывалась по измеренному электрическому сопротивлению с использованием предварительно определенного температурного коэффициента сопротивления. Совместное применение указанных методов обеспечивало возможность сопоставления локальной температуры поверхности трубы со средней температурой токопроводящего элемента.

Продолжительность эксперимента определялась временем выхода исследуемой системы на установившийся тепловой режим.

2.1.3 Варьируемые параметры и регистрируемые характеристики

Экспериментальные исследования выполнялись при последовательном изменении режима работы исследуемой системы и неизменной конструкции экспериментальной установки. Варьируемые параметры выбирались таким образом, чтобы обеспечить возможность сопоставления резистивного, поверхностного и индукционного способов электрообогрева при одинаковых конструктивных условиях.

Основным варьируемым параметром являлся способ электрообогрева, определяемый схемой электрического соединения стальной трубы и медного проводника. Для каждого способа исследования проводились при различных значениях питающего напряжения, обеспечивающих требуемый диапазон рабочих токов. Перечень варьируемых параметров представлено в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Варьируемые параметры экспериментальных исследований

Варьируемый параметр	Значение
Способ электрообогрева	резистивный, поверхностный, индукционный
Напряжение питания системы электрообогрева	100 – 2500 мВ
Действующее значение тока	10–120 А
Частота питающего напряжения	50 Гц

В процессе исследований регистрировались электрические и тепловые характеристики исследуемой системы. Измеряемые параметры обеспечивали возможность определения распределения активной мощности между токопроводящим и ферромагнитным элементами, а также оценки температурного состояния исследуемых элементов. Перечень регистрируемых характеристик представлено в таблице 2.3.

Таблица 2.3 – Регистрируемые характеристики

Группа характеристик	Измеряемые характеристики
Электрические	Действующее значение напряжения; Действующее значение тока; Активная мощность; Коэффициент мощности; Угол сдвига фаз; Электрическое сопротивление элементов системы
Тепловые	Температура стальной трубы; Средняя температура проводника; Температура окружающей среды; Изменение температуры во времени

Совместный анализ зарегистрированных электрических и тепловых характеристик позволял определить особенности преобразования электрической энергии в тепловую при различных способах электрообогрева, оценить распределение тепловыделения между элементами системы и сопоставить температурный режим исследуемых нагревательных элементов.

2.1.4 Оценка погрешностей экспериментальных измерений

Достоверность результатов экспериментальных исследований обеспечивалась применением поверенных средств измерений, оценкой систематических и случайных составляющих неопределенностей измерений, проведением повторных измерений и использованием методических приемов, направленных на снижение влияния внешних факторов. Оценка неопределенности результатов экспериментальных измерений выполнялась в соответствии с положениями ГОСТ 34100.3-2017/ISO/IEC Guide 98-3:2008 [68].

Систематические составляющие неопределенностей рассчитывались с учетом метрологических характеристик применяемых средств измерений и условий проведения исследований. При оценке электрических характеристик учитывались инструментальные погрешности измерительных трансформаторов, токового шунта, осциллографа, ваттметра, мультиметра, амперметра и микромиллиомметра, а также характеристики соответствующих измерительных каналов.

При оценке температурных характеристик учитывались инструментальная погрешность термопар, качество их теплового контакта с исследуемыми элементами, неоднородность температурного поля в зоне измерения, влияние внешнего теплообмена и инерционность датчиков температуры. Для уменьшения влияния указанных факторов использовались предварительно откалиброванные термопары, термопаста в местах установки датчиков и воспроизводимое расположение точек измерения на поверхности

исследуемых элементов. Основные характеристики применяемых средств измерений приведены в таблице 2.4.

Таблица 2.4 – Основные средства измерений и их характеристики

Измеряемая величина	Средство измерения	Погрешность
Напряжение	APPA 106	±(0,5% + 5 ед.)
Ток	OMIX P94-A-1-0,5	±0,5%
Активная мощность	АСМ-2352	±(2,8% + 10 ед.)
Коэффициент мощности	АСМ-2352	±(3,0% + 10 ед.)
Электрическое сопротивление	ИКС-1А	±(0,05% + 0,2 мОм)
Температура	Термопара К + IT-8 K/K	±(0,5 + 0,0005T) °C

К методическим составляющим неопределенностей относились погрешности, обусловленные конструктивными особенностями экспериментальной установки и принятыми допущениями экспериментальной методики. К основным источникам методической неопределенности относились неоднородность электрического и теплового контакта между элементами исследуемой системы, влияние переходных сопротивлений контактных соединений при протекании токов до 120 А, отклонения геометрических параметров элементов от номинальных размеров, а также нестационарность теплообмена с окружающей средой и возможные отклонения условий проведения отдельных экспериментальных серий.

Влияние указанных факторов снижалось за счет жесткой фиксации элементов экспериментальной установки, стандартизации электрических соединений, воспроизводимого расположения датчиков температуры и проведения серий повторных измерений при одинаковых начальных условиях.

Для оценки случайной составляющей неопределенности измерений и проверки воспроизводимости результатов каждый экспериментальный режим реализовывался серией повторных измерений. Для каждого набора

параметров выполнялось не менее трех независимых экспериментов при одинаковых начальных условиях.

Случайная составляющая неопределенности определялась по среднеквадратичному отклонению результатов измерений и доверительному интервалу при доверительной вероятности 0,95 с использованием коэффициента Стьюдента.

$$\Delta = t(\alpha, n) \cdot S, \quad (2)$$

где $t(\alpha,n)$ – коэффициент Стьюдента при доверительной вероятности $\alpha=0,95$, S – среднеквадратичное отклонение результатов измерений.

Суммарная стандартная неопределенность экспериментальных результатов определялась как [68]:

$$u_c = \sqrt{u_A^2 + u_B^2}, \quad (3)$$

где u_A – стандартная неопределенность, обусловленная случайными составляющими измерений; u_B – стандартная неопределенность, обусловленная систематическими составляющими.

При обработке экспериментальных данных использовались усредненные значения зарегистрированных параметров, что позволило повысить воспроизводимость результатов и уменьшить влияние случайной составляющей неопределенности.

Таким образом, применение поверенных средств измерений, выполнение повторных экспериментов, учет систематических и случайных составляющих неопределенности измерений, а также использование статистической обработки результатов обеспечили получение достоверных экспериментальных данных.

2.2 Математическое моделирование

Экспериментальные исследования, представленные в разделе 2.1, позволили получить данные о тепловых и электрических характеристиках нагревательного элемента, применяемого в системах косвенного электрообогрева трубопроводов, и установить основные закономерности

преобразования электрической энергии в теплоту в токопроводящих и ферромагнитных элементах. Вместе с тем экспериментальные исследования не позволяют в полной мере с необходимой пространственной детализацией определить распределение внутренних источников тепловыделения, электрического тока, магнитного поля и температуры внутри отдельных элементов системы. Для решения указанных задач разработаны физическая и математическая модели взаимосвязанных электрических, электромагнитных, гидродинамических и тепловых процессов, описание которых приведено в последующих подразделах.

2.2.1 Физическая постановка задачи

Объектом математического моделирования являлась система косвенного электрообогрева трубопровода, включающая обогреваемый трубопровод, транспортируемый продукт, тепловую изоляцию, закладной стальной элемент с размещенным в нем электрическим нагревателем и окружающую воздушную область (среду). В зависимости от исследуемого способа электрообогрева в качестве электрического нагревателя рассматривались изолированный проводник или резистивный греющий кабель. Расчетная область исследуемой системы представлены на рисунке 2.2.

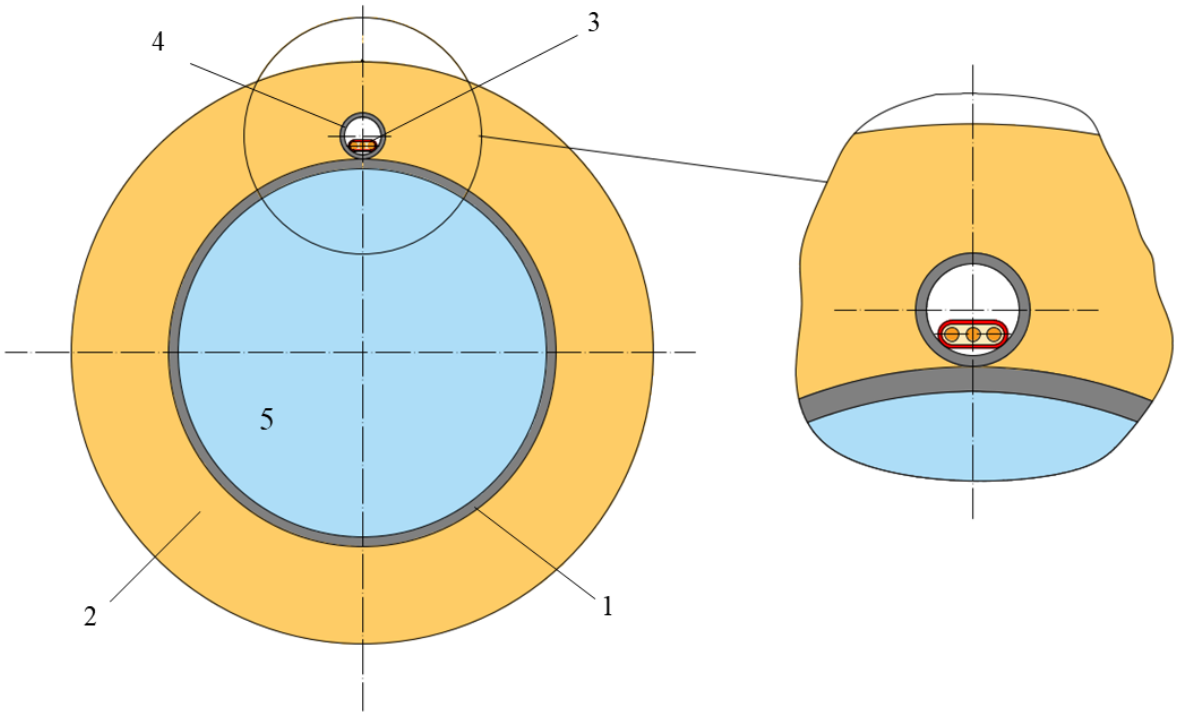


Рисунок 2.2 – Схема области решения: *1* – надземный трубопровод; *2* – слой тепловой изоляции; *3* – резистивный греющий элемент; *4* – закладной канал; *5* – транспортируемая жидкость.

При моделировании учитывались взаимосвязанные электрические, электромагнитные и тепловые процессы: протекание электрического тока в токопроводящих элементах, формирование переменного магнитного поля, преобразование электрической энергии в теплоту, изменение теплофизических свойств элементов конструкции, температуры и теплообмен между трубопроводом, транспортируемым продуктом и окружающей средой. При моделировании электромагнитных процессов в ферромагнитных элементах учитывались вихретоковые потери и потери на гистерезис. Теплофизические и электрофизические свойства материалов, включая удельное электрическое сопротивление, магнитную проницаемость, теплопроводность и удельную теплоемкость, принимались из [31,43,69] в соответствии с рассматриваемым диапазоном температур. Для ферромагнитных элементов учитывалась нелинейная зависимость магнитной проницаемости от напряженности магнитного поля.

При построении математической модели использовалась двумерная постановка задачи для поперечного сечения исследуемой системы, что позволяло анализировать распределение электрических и тепловых характеристик при существенно меньших вычислительных затратах по сравнению с трехмерной постановкой.

Под максимальной допустимой или максимальной длиной плеча электрообогрева в настоящей работе понимается максимальная протяженность участка трубопровода, на котором обеспечивается поддержание требуемого температурного режима транспортируемой жидкости при соблюдении ограничений по допустимой температуре токопроводящих жил и напряжению изоляции греющего кабеля. В отличие от традиционного определения длины плеча электрообогрева [13,49,58], учитывающего только электрические ограничения системы, введенный критерий дополнительно отражает возможность обеспечения требуемого теплового режима трубопровода в рассматриваемых условиях эксплуатации.

2.2.2 Математическая модель

На основе сформулированной физической модели разработана математическая модель исследовавшихся процессов в виде системы дифференциальных уравнений в частных производных.

Теплоперенос в системе электрообогрева описывался дифференциальным уравнением теплопроводности:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + Q, \quad (4)$$

Зависимость удельного электрического сопротивления токопроводящих жил от температуры приводила к изменению выделяемой мощности Q и оценивалось как [63,66]:

$$\rho_{0.э} = \rho_{20} \cdot (1 + \beta_э \cdot (T - 20)), \quad (5)$$

При необходимости учета вклада естественной конвекции транспортируемого продукта в условиях отсутствия принудительного

движения транспортируемого продукта на теплоперенос в трубопроводе уравнение (4) преобразовывалось к виду:

$$\rho c_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla T\right) = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + Q, \quad (6)$$

Естественная конвекция транспортируемого продукта описывалась уравнениями неразрывности и движения для несжимаемой жидкости в рамках приближения Буссинеска [70]:

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0, \quad (7)$$

$$\rho \left(\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla)\mathbf{u}\right) = -\nabla(p - \rho \boldsymbol{g}\boldsymbol{x}) + \mu \nabla^2 \mathbf{u} + \rho \mathbf{g} \beta \left(T - T_{ref}\right), \quad (8)$$

Для определения распределения электрического тока, напряженности магнитного поля и объемной плотности внутренних источников теплоты, обусловленных электромагнитными процессами в ферромагнитных элементах системы, решалась система уравнений Максвелла [66,71,72]:

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J}, \quad (9)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}, \quad (10)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0, \quad (11)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{J} = 0, \quad (12)$$

Для замыкания системы использовались материальные соотношения [73]:

$$\mathbf{B} = \mu_0(\mathbf{H} + \mathbf{M}), \quad (13)$$

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E}, \quad (14)$$

Полученное распределение плотности электрического тока использовалось для определения объемной плотности внутренних источников теплоты. Суммарное тепловыделение определялось как сумма потерь, обусловленных различными механизмами преобразования электрической энергии:

$$Q = Q_J + Q_{eddy} + Q_h, \quad (15)$$

Для токопроводящих элементов объемная плотность Джоулева тепловыделения определялась выражением:

$$Q_J = \mathbf{J} \cdot \mathbf{E}, \quad (16)$$

При воздействии переменного магнитного поля в ферромагнитных закладных элементах индуцируются вихревые токи, замыкающиеся в объеме проводящего материала [66,71]. Вследствие конечной электрической проводимости материала энергия вихревых токов преобразуется в теплоту по закону Джоуля–Ленца, а объемная плотность тепловыделения определяется выражением:

$$Q_{eddy} = \mathbf{J}_{eddy} \cdot \mathbf{E}, \quad (17)$$

При воздействии переменного электромагнитного поля распределение индуцированных токов по сечению ферромагнитного элемента является неравномерным вследствие поверхностного эффекта [66,71]. Характерной величиной, определяющей степень проникновения переменного электромагнитного поля в проводящий материал, является глубина проникновения:

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \cdot \mu_r \cdot \mu_0 \cdot \sigma}}, \quad (18)$$

Для ферромагнитных материалов значение относительной магнитной проницаемости материала μ_r не является постоянным и зависит от напряженности магнитного поля и магнитного состояния материала. Поэтому выражение (18) использовалось для физической оценки характерной глубины проникновения электромагнитного поля, тогда как фактическое распределение магнитного поля, индуцированных токов и обусловленного ими тепловыделения определялось непосредственно при численном решении электромагнитной задачи с учетом нелинейных магнитных свойств ферромагнитного материала.

Для описания нелинейных магнитных свойств ферромагнитных элементов использовалась модель Джайлса–Атертона [73], позволяющая учитывать нелинейный характер намагничивания и влияние предыстории магнитного состояния материала при расчете электромагнитного поля. Модель определяет зависимость намагниченности M от напряжённости магнитного поля H с учётом гистерезисных свойств ферромагнитного материала. Полученная зависимость $M(H)$ совместно с материальным соотношением (13) использовалась при определении магнитной индукции и распределения электромагнитного поля в ферромагнитных элементах.

Математическое описание модели основано на представлении полной намагниченности материала как суммы обратимой и необратимой составляющих. Изменение намагниченности определяется дифференциальным уравнением:

$$\frac{dM}{dH} = f(H, M), \tag{19}$$

функция $f(H,M)$ определяется параметрами модели Джайлса-Атертона, характеризующими процессы доменного перемагничивания ферромагнитного материала.

Параметры модели Джайлса–Атертона принимались по литературным данным для конструкционных сталей, используемых при изготовлении ферромагнитных закладных элементов [42]. Полученное описание нелинейных магнитных свойств материала использовалось для определения распределения магнитного поля и плотности индуцированных токов.

Для определения объемной плотности потерь на гистерезис использовалась эмпирическая модель Штейнмеца, основанная на зависимости магнитных потерь от частоты перемагничивания и магнитной индукции, являющейся развитием классического закона гистерезиса [74]. Расчет выполнялся по выражению [75]:

$$Q_h = k_h \cdot f^{\alpha_h} \cdot B^{\beta_h}, \tag{20}$$

Таким образом, модель Джайлса–Атертона использовалась для описания нелинейной зависимости магнитного состояния ферромагнитного материала от напряжённости поля при решении электромагнитной задачи, тогда как модель Штейнмеца применялась отдельно для количественного определения объёмной плотности потерь на гистерезис.

Для конструкционной стали физико-химические свойства принимались из [31,46]. В настоящей работе использованы значения k_h = 2300 Вт/м^3, α_h = 1 и β_h = 1,3, обеспечивающие описание потерь при промышленной частоте 50 Гц.

Для замыкания математической постановки задавались начальные и граничные условия, соответствующие физической постановке задачи и условиям проведения численных исследований. Начальные условия определяли исходное температурное состояние элементов системы, а граничные условия задавали условия теплообмена, электрического взаимодействия и распределения электромагнитного поля на границах расчетной области.

В начальный момент времени температура всех элементов расчетной области принималась равной заданной температуре, соответствующей рассматриваемому режиму моделирования:

$$T(x, y, 0) = T_0, \tag{21}$$

На внешней поверхности тепловой изоляции задавалось граничное условие третьего рода, учитывающее теплообмен с окружающей средой [76]:

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = \alpha\left(T - T_{\text{окр}}\right), \tag{22}$$

На границах контакта элементов конструкции принимались условия идеального теплового контакта, обеспечивающие непрерывность температуры и плотности теплового потока [77]:

$$T_1 = T_2, \tag{23}$$

$$-\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial n} = -\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial n}, \tag{24}$$

На внешних границах воздушной области использовалось граничное условие магнитной изоляции, исключающее влияние границ расчетной области на магнитное поле исследуемой системы [78]. В проводящих областях расчет электромагнитного поля выполнялся на основе уравнения Ампера с учетом распределения внешней плотности электрического тока.

При решении электромагнитной задачи распределение токов в проводниках определялось с учётом внешней электрической цепи, включающей источник напряжения, электрические сопротивления, заземление и соединения с расчётной областью. Такое представление позволяло учитывать условия электропитания при расчёте распределения электрического тока в элементах системы.

При построении математической модели принимались допущения:

1. Использовалась двумерная постановка задачи для поперечного сечения исследуемой системы, продольные изменения электрических и температурных параметров вдоль трубопровода не учитывались.
2. Электромагнитные процессы рассматривалась в квазистационарном приближении, справедливом для промышленной частоты питающего напряжения 50 Гц [71,72,78].
3. Теплофизические и электрофизические свойства материалов принимались однородными в начальный момент времени и изменялись от температуры на последующих шагах.
4. При моделировании систем, содержащих ферромагнитные элементы, учитывались нелинейные магнитные свойства материалов.
5. Электрический и тепловой контакт между сопрягаемыми элементами считался идеальным.

Разработанная модель использовалась при проведении вычислительных исследований, результаты которых представлены в главе 3.

2.2.3 Численная реализация математической модели

Система дифференциальных уравнений теплопереноса и движения жидкости в надземном трубопроводе при резистивном нагреве решена методом конечных элементов в COMSOL Multiphysics 6.2 в двумерной постановке с использованием интерфейсов Heat Transfer in Solids and Fluids и Laminar Flow, *Electric Currents, Magnetic Fields и Electrical Circuit,* связанных посредством мультифизического модуля Non-Isothermal Flow и *Electromagnetic Heating*. Общее число конечных элементов составляло не менее 25000. Проверка независимости результатов моделирования от параметров расчетной сетки выполнена по значениям максимальной температуры токопроводящей жилы и температуры жидкости в трубопроводе. Различие результатов моделирования при увеличении количества элементов расчетной сетки в два раза не превысило 1%. Решение в конце временного шага являлось начальным условием для последующего шага.

Расчетная область формировалась в соответствии с физической постановкой задачи теплопереноса в исследуемой системе электрообогрева и включала нагревательный элемент, закладной элемент, стенку трубопровода, транспортируемый продукт, тепловую изоляцию и окружающую среду. Геометрические размеры элементов расчетной области задавались в соответствии с параметрами исследуемой конструкции. При выполнении отдельных серий вычислительных экспериментов изменялись только параметры, влияние которых исследовалось. Остальные геометрические, теплофизические, электрофизические и режимные характеристики сохранялись неизменными. Такой подход обеспечивал корректное сопоставление результатов и позволял оценивать влияние каждого исследуемого фактора независимо от остальных.

При численной реализации использовалась двумерная постановка задачи для поперечного сечения исследуемой системы (рис.2.2). Выбор двумерной модели обусловлен тем, что исследуемые процессы определялись распределением основных характеристик в поперечном направлении, тогда

как изменение параметров вдоль оси трубопровода при рассмотрении локального поперечного сечения не оказывало существенного влияния на результаты расчетов. Использование двумерной постановки позволило существенно снизить вычислительные затраты при сохранении достоверности результатов моделирования.

Расчетная область и фрагмент конечно-элементной сетки представлены на рисунках 2.2 и 2.3.

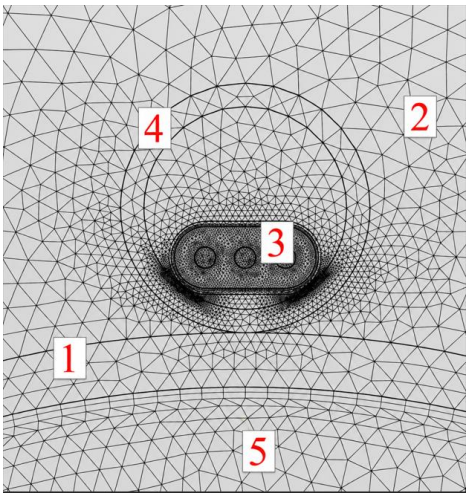


Рисунок 2.3 – Фрагмент конечно-элементной сетки расчетной области в зоне расположения нагревательного элемента при моделировании резистивной системы электрообогрева: *1* – надземный трубопровод; *2* – слой тепловой изоляции; *3* – резистивный греющий элемент; *4* – закладной канал; *5* – транспортируемая жидкость.

2.2.4 Верификация и валидация

Целью верификации являлась проверка сходимости и устойчивости процесса численного решения математической задачи, а целью валидации – оценка ее адекватности экспериментально исследовавшихся электрическим и тепловым процессам, протекающим в системе косвенного электрообогрева трубопроводов.

Достоверность результатов численного решения задачи на этапе верификации подтверждалась независимостью результатов моделирования от степени дискретизации расчетной области и контролем энергетического

баланса, при котором суммарная мощность внутренних источников теплоты сопоставлялась с электрической мощностью, подводимой к системе электрообогрева. Проверка выполнялась последовательным сгущением конечно-элементной сетки в соответствии с методикой, приведенной в разделе 2.2.3, и показала, что увеличение числа конечных элементов в два раза приводило к изменению контролируемых параметров менее чем на 1%.

Валидация математической модели выполнялась путем сопоставления результатов моделирования с результатами экспериментальных исследований, выполненных на лабораторном стенде. При таком анализе сопоставлялись экспериментально определяемые электрические и тепловые характеристики системы, включая температурные зависимости, распределения температур, электрическое сопротивление, активную мощность и коэффициент мощности. Получено удовлетворительное согласование результатов математического моделирования и опытов.

Выводы по главе

1. Разработана методика экспериментальных исследований процессов теплопереноса в системах косвенного электрообогрева трубопроводов, включающая проведение электрических и тепловых испытаний в установившихся и переходных режимах. Созданный экспериментальный стенд обеспечивает исследование процессов теплопереноса в условиях резистивного, поверхностного и индукционного способов электрообогрева и регистрацию электрических и тепловых характеристик системы.
2. Разработана математическая модель взаимосвязанных электрических, электромагнитных, гидродинамических и тепловых процессов в системах косвенного электрообогрева трубопроводов, обеспечивающая совместный расчет характеристик электрического тока, электромагнитного поля, внутренних источников тепловыделения, гидродинамических процессов и температурного поля элементов системы.

3. Выполнена численная реализация разработанной математической модели методом конечных элементов в программном комплексе COMSOL Multiphysics.

4. Выполнены верификация и валидация математической модели путем сопоставления расчетных и экспериментальных электрических и тепловых характеристик исследуемой системы.

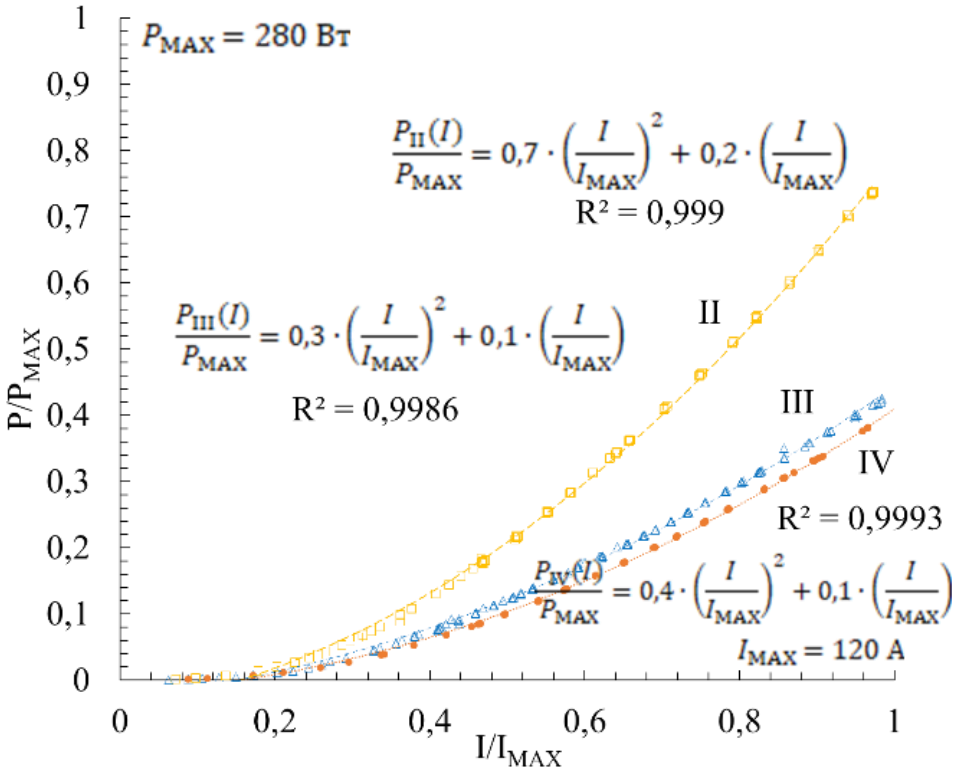
5. Определены основные факторы и эффекты, влияющие на интегральные характеристики электрообогрева трубопроводов для получения карты с выделением эффективных режимов работы системы электрообогрева.

ГЛАВА 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ И ЧИСЛЕННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

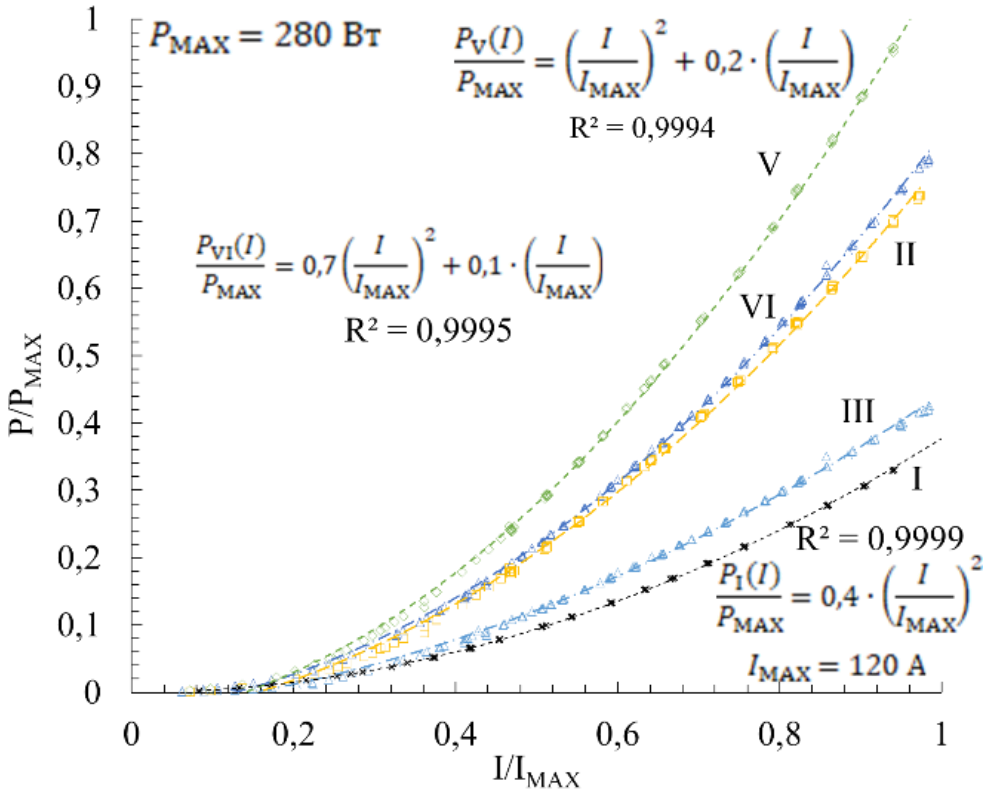
3.1 Влияние способа преобразования электрической энергии в теплоту на эффективность электрообогрева трубопроводов

Для протяженных трубопроводов одним из основных показателей эффективности системы электрообогрева является максимальная длина плеча обогрева [7,13,79], обеспечивающая компенсацию тепловых потерь при заданной удельной линейной мощности трубопровода. Предельная длина плеча обогрева ограничивается допустимой температурой токопроводящих элементов, а также допустимым уровнем падения напряжения, определяемым номинальным напряжением изоляции нагревательного элемента (проводника). Поскольку температурный режим токопроводящих элементов может зависеть не только от величины потребляемой мощности, но и от ее пространственного распределения между элементами системы электрообогрева [7,13,79], в данном разделе исследуется влияние способа преобразования электрической энергии в тепловую на распределение активной мощности между токопроводящими и ферромагнитными элементами системы, а также на связанный с ним температурный режим токопроводящей жилы.

На рисунке 3.1 представлены установленные зависимости активной мощности, выделяемой в стальной трубе, а также суммарной активной мощности системы электрообогрева от величины тока для различных способов нагрева.



(*а*)



(*б*)

Рисунок 3.1 – Зависимости активной мощности, выделяемой в трубе, от тока (*а*) и суммарной активной мощности в системе, в трубе и проводе, от тока (*б*)

при разных способах электрообогрева: I – резистивный (мощность в проводнике), II – индукционный (мощность в трубе), III – поверхностный (мощность в трубе), IV – прямой(импедансный) (мощность в трубе), V – суммарная мощность индукционного обогрева, VI – суммарная мощность поверхностного обогрева

Анализ полученных результатов показал, что при одинаковых значениях тока наибольшая доля тепловой мощности выделяется при индукционном способе нагрева, а наименьшая – при резистивном. Установленное различие обусловлено особенностями распределения токов в стенке ферромагнитной трубы и соответствующим изменением эквивалентного активного сопротивления проводящего слоя. Для исследуемой конфигурации (конструкции нагревателей) мощность, выделяемая в проводящем слое при поверхностном способе нагрева, сопоставима с мощностью, выделяемой в одной токопроводящей жиле резистивной системы. При индукционном способе мощность, выделяемая в ферромагнитной трубе, сопоставима с суммарной мощностью потерь поверхностного нагрева, что свидетельствует о более высокой степени перераспределения тепловыделения в стальной элемент системы.

Анализ распределения активной мощности показал, что при одинаковой суммарной тепловой мощности исследуемой модели трубопровода для индукционного способа более 73% мощности выделяется в ферромагнитной трубе, тогда как для поверхностного способа данный показатель не превышает 54%. Для резистивного способа практически вся тепловая мощность выделяется в токопроводящей жиле.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что способ преобразования электрической энергии в тепловую оказывает определяющее влияние на распределение тепловой нагрузки между элементами системы электрообогрева. Перенос значительной части тепловыделения в стальную трубу позволяет снизить температурную нагрузку на токопроводящую жилу

за счет увеличения доли мощности, выделяемой в элементе, обладающем большей массой и развитой поверхностью теплообмена.

Для оценки энергетических характеристик исследуемых способов электрообогрева на рисунке 3.2 представлены зависимости коэффициента мощности системы и на рисунке. 3.3 сопротивление проводящего слоя для поверхностного способа, эквивалентного активного сопротивления проводящего слоя ферромагнитной трубы от величины тока.

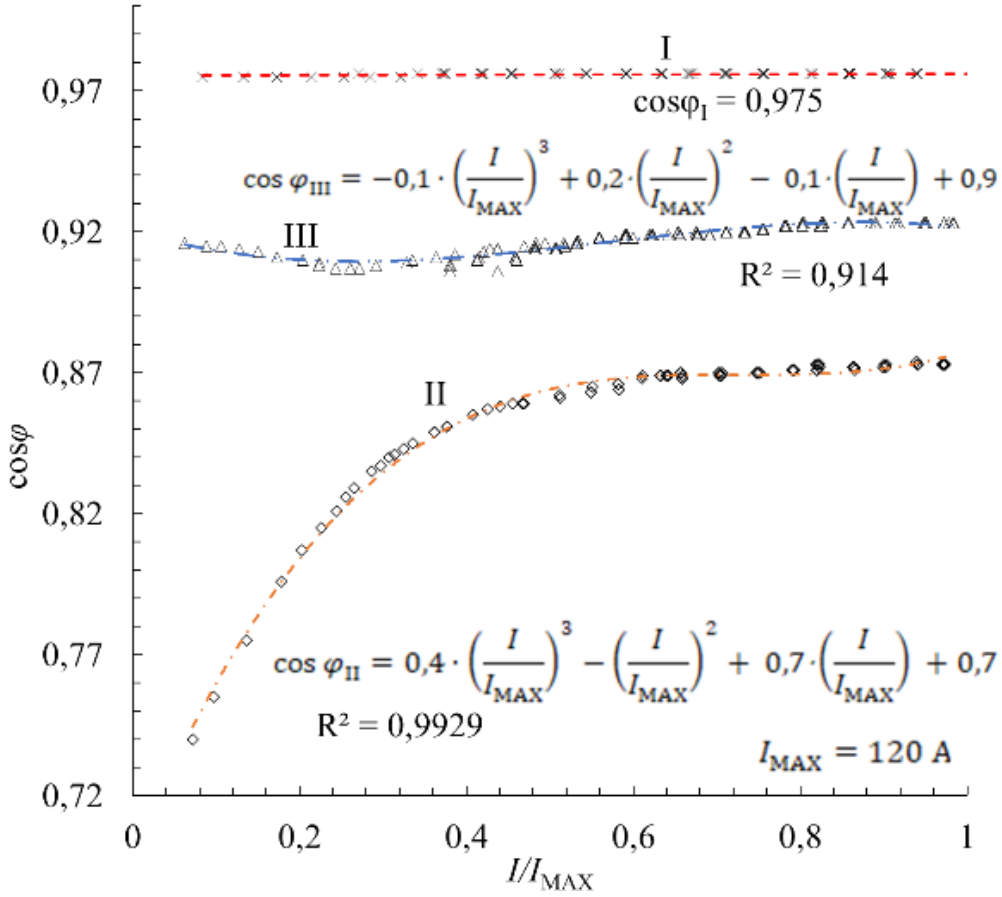


Рисунок 3.2 – Зависимости коэффициента мощности (cosφ), от силы тока системы при разных способах электрообогрева: I – резистивный, II – индукционный, III – поверхностный

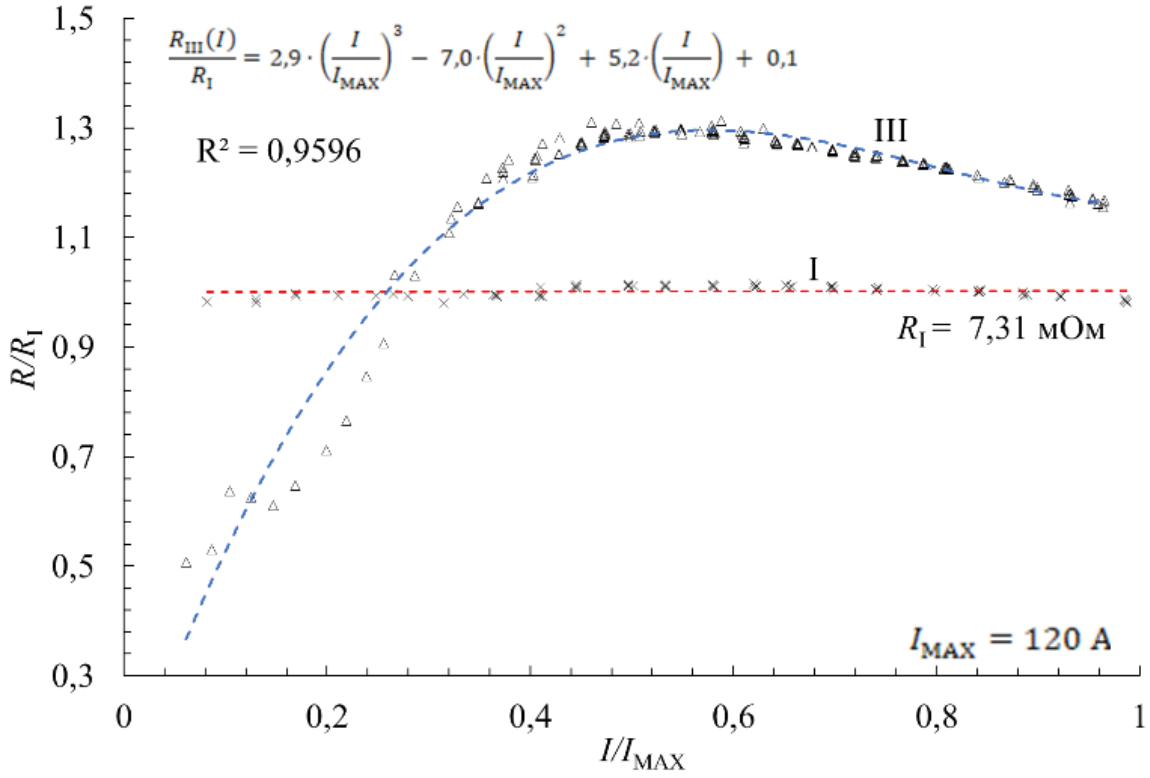


Рисунок 3.3 – Зависимости активного сопротивления проводящего слоя трубы, от тока системы при разных способах электрообогрева:
I – резистивный, III – поверхностный,

Установлено, что значения коэффициента мощности при резистивном способе составляют 0,97–0,98 и практически не зависят от величины тока, что обусловлено преобладанием активной составляющей полного сопротивления электрической цепи. При поверхностном способе коэффициент мощности снижается до 0,90–0,92, а при индукционном – до 0,87 вследствие увеличения относительной роли индуктивной составляющей полного сопротивления, обусловленной электромагнитным взаимодействием проводника и ферромагнитной трубы.

Анализ зависимостей, представленных на рисунках 3.1.-3.3, показывает, что темпы изменения активной мощности определяются особенностями электромагнитных процессов, протекающих в элементах системы электрообогрева. Для резистивного способа функциональная зависимость мощности от тока близка к квадратичной, что соответствует практически

постоянному сопротивлению проводника. Для поверхностного и индукционного способов наблюдаются отклонения от квадратичного закона, обусловленные изменением магнитной проницаемости ферромагнитной трубы и перераспределением плотности тока в ее стенке.

Форма представленных зависимостей коэффициента мощности на рисунке 3.2 отражает физические различия процессов преобразования электрической энергии в тепловую при разных способах обогрева. Учет изменения коэффициента мощности необходим для оценки энергетической эффективности системы. Малые значения cosφ свидетельствуют о росте реактивной мощности и снижении доли активной составляющей, преобразующейся в тепло. Это имеет практическое значение при проектировании промышленных систем электрообогрева протяженных трубопроводов, в частности при выборе полной мощности питающего трансформатора и необходимости компенсации реактивной мощности для снижения падения напряжения в сети внешнего электроснабжения.

Несмотря на снижение коэффициента мощности до 0,87 при индукционном способе нагрева, уменьшение cosφ не превышает 15% по сравнению с резистивным нагревом. Следовательно, наблюдаемое перераспределение тепловыделения между элементами системы достигается при относительно незначительном ухудшении ее электротехнических характеристик.

Полученные результаты показывают, что исследованные способы преобразования электрической энергии в тепловую формируют различное распределение тепловыделения между элементами системы электрообогрева. Однако перераспределение активной мощности не позволяет оценить эффективность системы. Для практического применения важным является влияние способа нагрева на температурный режим изоляции проводника, поскольку именно температура токопроводящей жилы и ее изоляции определяет допустимую удельную линейную мощность и предельную длину плеча обогрева. В связи с этим выполнены экспериментальные исследования

тепловых характеристик резистивного, поверхностного и индукционного способов электрообогрева.

Для сопоставления тепловых характеристик исследуемых способов электрообогрева определены зависимости удельной линейной мощности системы от напряжения питания, а также зависимости разности температур между токопроводящей жилой и стальной трубой от удельной линейной мощности. Полученные результаты представлены на рисунках 3.4 и 3.5.

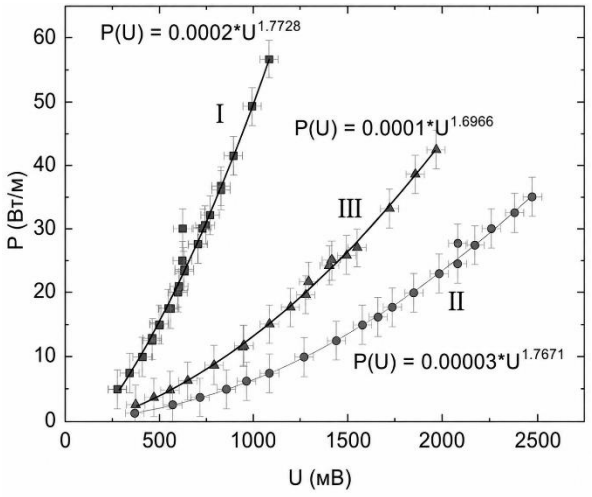


Рисунок 3.4. Экспериментальные зависимости удельной линейной мощности от напряжения питания нагревательного элемента (на выводах вторичной обмотки понижающего трансформатора) при трех способах обогрева:
I – резистивном, II – индукционном,
III – поверхностном

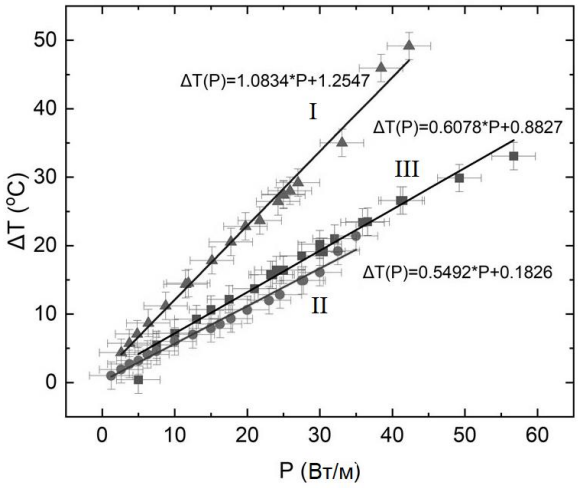


Рисунок 3.5. Экспериментальные зависимости разности температур проводника и стальной трубы от линейной мощности системы при трех способах обогрева:
I – резистивном, II – индукционном,
III – поверхностном

В отличие от результатов, представленных на рисунках 3.1-3.3, зависимости на рисунках 3.4 и 3.5 получены для условий установившегося теплового режима. Для каждого значения напряжения питания активная мощность и температуры элементов фиксировались после достижения теплового равновесия системы. На рисунке 3.4 представлены

экспериментальные зависимости удельной линейной мощности системы электрообогрева от напряжения питания для резистивного, поверхностного и индукционного способов нагрева. Анализ зависимостей показывает, что наиболее интенсивное увеличение мощности наблюдается при резистивном способе нагрева, тогда как для поверхностного и индукционного способов характерно более монотонное изменение мощности вследствие перераспределения электрических потерь между проводником и ферромагнитной трубой. Наиболее монотонное изменение удельной линейной мощности наблюдается при индукционном способе нагрева.

Величина линейной мощности сама по себе не характеризует тепловую нагрузку на токопроводящую жилу. Для оценки температурного режима нагревательных элементов определялись зависимости разности температур между проводником и стальной трубой от удельной линейной мощности системы (рис. 3.5). Установлено, что при одинаковой удельной линейной мощности наибольшая разность температур между проводником и трубой характерна резистивному способу нагрева, а наименьшая – индукционному. Для поверхностного способа получены промежуточные значения. Это свидетельствует о том, что перенос части тепловыделения из проводника в ферромагнитную трубу позволяет снизить температурную нагрузку на изоляцию токопроводящей жилы.

Проведенные исследования показали, что коэффициент мощности оказывает влияние на параметры электроснабжения системы и величину полной потребляемой мощности, однако не является определяющим фактором температурной нагрузки на токопроводящую жилу. Несмотря на снижение коэффициента мощности до 0,87 при индукционном способе нагрева, перенос основной доли тепловыделения в ферромагнитный элемент сопровождается уменьшением температурной разности «жила–труба» и снижением тепловой нагрузки на изоляцию проводника при сопоставимой удельной линейной мощности.

Экспериментально установлено, что при электрообогреве трубопроводов температурный режим токопроводящей жилы определяется не только величиной протекающего тока, но и распределением активной мощности между токопроводящими и ферромагнитными элементами системы. Перенос основной доли тепловыделения в ферромагнитный элемент снижает температурную нагрузку на изоляцию проводника и создает предпосылки для увеличения допустимой линейной мощности системы.

Полученные результаты расширяют современные представления о механизмах тепловыделения при резистивном, поверхностном и индукционном нагреве [18]. В отличие от исследований, посвященных отдельным способам и конструктивным исполнениям средств электрообогрева [20,22,25,30,34,46], в настоящей диссертационной работе выполнено сопоставление резистивного, поверхностного и индукционного способов в единых геометрических условиях и при одинаковом заданном токе. Это позволило количественно оценить распределение активной мощности между токопроводящими и ферромагнитными элементами системы и установить его влияние на температурный режим токопроводящей жилы. Установленное влияние распределения тепловыделения на температурную нагрузку токопроводящей жилы необходимо учитывать при определении допустимой линейной мощности и предельной длины плеча электрообогрева, а также при выборе конструктивного решения системы [13,15,16].

Таким образом, при оценке эффективности систем электрообогрева протяженных трубопроводов целесообразно учитывать не только величину потребляемой мощности и коэффициент мощности, но и распределение тепловыделения между элементами системы, поскольку именно оно формирует температурную нагрузку на токопроводящую жилу и определяет область допустимых режимов работы системы электрообогрева. Полученный вывод является исходной предпосылкой для дальнейшего исследования влияния конструктивного расположения нагревательных элементов, условий

теплоотвода и параметров теплоизоляции на эффективность электрообогрева протяженных трубопроводов.

3.2 Влияние теплоизоляции и пространственного расположения закладного канала на эффективность резистивного электрообогрева протяженных трубопроводов

В разделе 3.1 показано, что при резистивном электрообогреве преобразование электрической энергии в тепловую происходит преимущественно в токопроводящих жилах греющего кабеля. При этом температура токопроводящих жил греющего кабеля определяется балансом между мощностью тепловыделения и интенсивностью отвода тепла в окружающие элементы. В свою очередь, требуемая мощность системы электрообогрева зависит от тепловых потерь трубопровода, определяемых условиями эксплуатации и параметрами тепловой изоляции. Выполнено численное исследование влияния толщины тепловой изоляции и пространственного расположения закладного канала на температурный режим токопроводящих жил, температурное состояние транспортируемого продукта, энергопотребление и максимальную длину плеча электрообогрева. В качестве объекта исследования рассматривался надземный трубопровод наружным диаметром 273 мм и толщиной стенки 7 мм, оснащенный слоем тепловой изоляции из пенополиуретана. Толщина тепловой изоляции изменялась в диапазоне 55–100 мм. В качестве нагревательного элемента использовался трехжильный резистивный греющий кабель LLS 3×6 мм^2 [58], размещенный в стальном закладном канале круглого сечения наружным диаметром 32 мм и толщиной стенки 3 мм [10,13]. Внутреннее пространство трубопровода было заполнено жидкостью [80]. Воспроизводился режим отсутствия продольного течения вдоль оси трубопровода, соответствующий временному прекращению транспортировки продукта. При этом теплоперенос в жидкости определялся совместным действием теплопроводности и естественной конвекции.

Рассматривались три варианта пространственного расположения закладного канала относительно трубопровода: сверху, сбоку и снизу. Геометрические параметры элементов системы электрообогрева надземного трубопровода и теплофизические свойства материалов приведены в таблицах 3.1 и 3.2.

Таблица 3.1 – Геометрические параметры элементов системы электрообогрева надземного трубопровода [48,81]

Элемент	Обозначение	Значение	Единицы
Наружный диаметр трубопровода	D	273	мм
Толщина стенки трубопровода	$\delta_{тр}$	7	мм
Толщина тепловой изоляции	$\delta_{из}$	55…100	мм
Наружный диаметр закладной трубы	$D_з$	32	мм
Толщина стенки закладной трубы	$\delta_з$	3	мм
Толщина греющего кабеля	$H_{каб}$	9,4	мм
Ширина греющего кабеля	$B_{каб}$	19,6	мм
Число токопроводящих жил кабеля	N	3	шт
Площадь поперечного сечения жилы	$S_ж$	6	мм^2
Суммарная площадь жил	S_Σ	18	мм^2

Таблица 3.2 – Теплофизические свойства материалов (температура в °С) [80,82]

Материал	Плотность ρ, кг/м^3	Теплоемкость c_p, Дж/(кг·°С)	Теплопроводность λ, Вт/(м·°С)
Сталь (трубопровод, закладная)	7850	475	44.5
Медь (жила кабеля)	8960	385	400
Изоляция кабеля	1230	1300	0,25
Оболочка кабеля	1100	1500	0,2
Пенополиуретан	60	1450	0,027
Жидкость	$\rho(T) = \frac{890}{1+\beta \cdot T}$	$1775 + 4{,}24 \cdot T$	0,126

*Примечание: $\mu = \upsilon(T)\,\rho(T)$ - динамическая вязкость, Па·с;
$\upsilon(T) = \left(\frac{37800}{(T+18)^2} - 0{,}14\right) \times 10^{-6}$ – кинематическая вязкость, м^2·с;
β=8,3 × 10^{-4} – коэффициент теплового расширения.

Схема расчетной области представлена на рисунке 3.6. Рассматриваемый режим представляет практический интерес для протяженных трубопроводов, эксплуатируемых в районах со сложными климатическими условиями, поскольку позволяет оценить возможности системы электрообогрева по поддержанию требуемого температурного режима продукта в период временного прекращения его транспортировки.

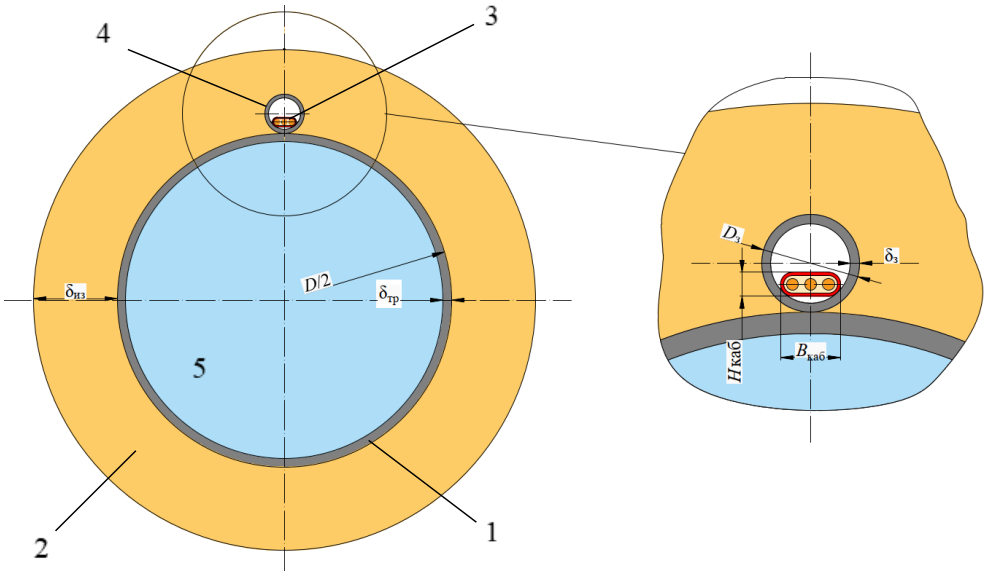


Рисунок 3.6. – Фрагмент конечно-элементной сетки расчетной области в зоне расположения нагревательного элемента при моделировании резистивной системы электрообогрева: *1* – надземный трубопровод; *2* – слой тепловой изоляции; *3* – резистивный греющий элемент; *4* – закладной канал; *5* – транспортируемая жидкость.

Эффективность рассматриваемой системы электрообогрева оценивалась по четырем критериям: температуре токопроводящих жил греющего кабеля, средней температуре транспортируемой жидкости, суммарному энергопотреблению и максимальной длине плеча электрообогрева. Температура токопроводящих жил характеризует допустимость режима работы нагревательного кабеля с точки зрения термической стойкости его изоляции. Средняя температура жидкости определяет способность системы обеспечивать требуемый температурный режим транспортируемого продукта. Суммарное энергопотребление использовалось для оценки энергетической эффективности системы электрообогрева, а максимальная длина плеча электрообогрева для оценки максимально допустимой протяженности обогреваемого участка трубопровода при соблюдении принятых эксплуатационных ограничений.

Для анализа влияния исследуемых факторов использована двумерная модель теплопереноса в поперечном сечении трубопровода. При постановке задачи учитывались процессы теплопроводности в элементах конструкции трубопровода, естественной конвекции жидкости в его внутреннем объеме, а также температурная зависимость электрического сопротивления токопроводящих жил греющего кабеля. Резистивный нагрев моделировался объемным источником тепла, распределенным в области токопроводящих жил. Мощность тепловыделения определялась с учетом изменения электрического сопротивления жил при нагреве.

В качестве эксплуатационного ограничения принималась допустимая температура изоляции греющего кабеля, составляющая 120 °C [58]. При достижении данного значения температуры жил дальнейшее увеличение мощности электрообогрева рассматривалось как недопустимое, поскольку приводило к выходу системы за пределы допустимого температурного режима работы нагревательного кабеля.

На внешней поверхности теплоизоляции задавалось граничное условие теплообмена с окружающей средой. Температура окружающего воздуха принималась равной −60 °C, коэффициент теплоотдачи – 35 Вт/(м^2·°C) [13,26]. На границах между элементами системы задавались одинаковые условия теплопередачи. Такое допущение позволило выделить влияние толщины теплоизоляции и пространственного расположения закладного канала без дополнительного влияния контактных тепловых сопротивлений.

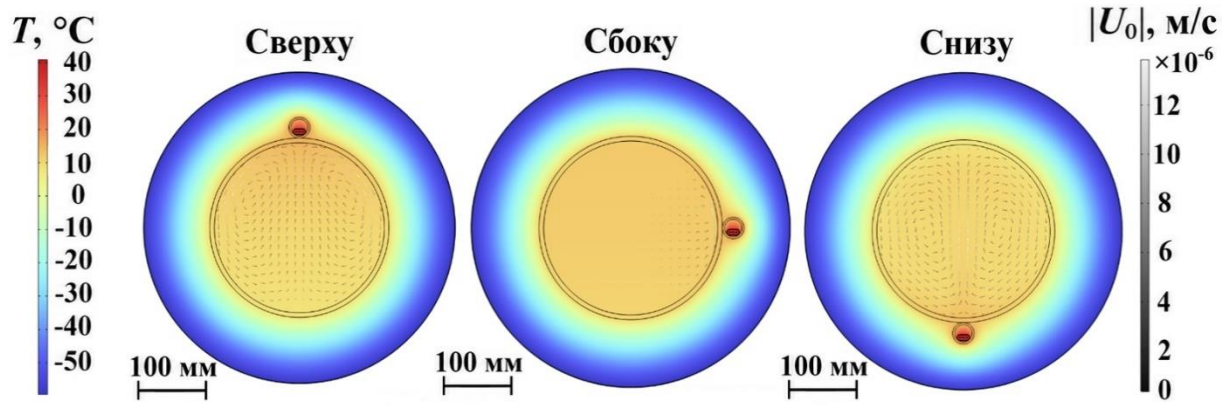
Для анализа интенсивности естественной конвекции в жидкости использовалось число Рэлея [70]:

$$Ra = \frac{g\beta\Delta T D^3}{\nu a}, \qquad (25)$$

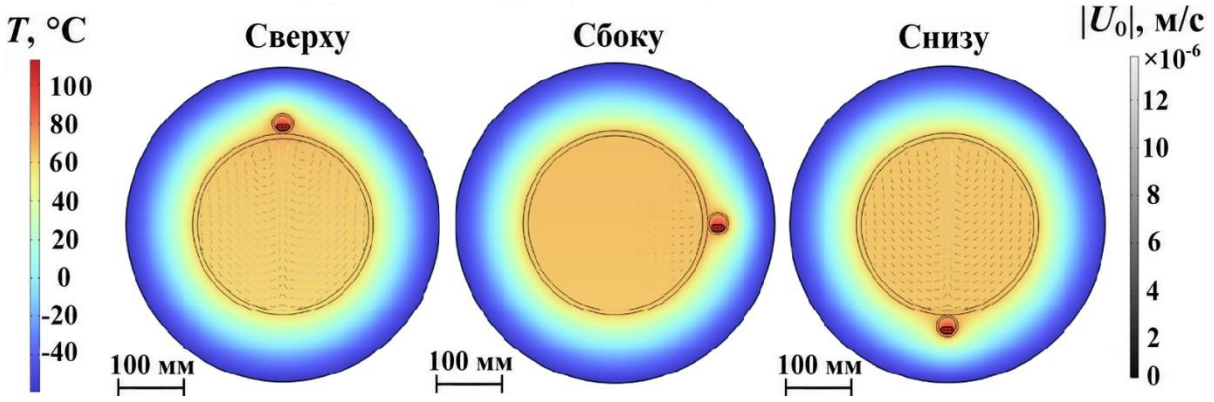
Несмотря на отсутствие продольного движения жидкости, в расчетах дополнительно учитывалась естественная конвекция, возникающая вследствие неоднородности температурного поля в поперечном сечении трубопровода. Необходимость ее учета обусловлена тем, что пространственное расположение нагревательного элемента относительно

трубопровода потенциально может влиять на формирование температурного поля транспортируемой среды и интенсивность конвективного переноса тепла. Особый интерес представляла оценка возможного влияния нижнего расположения закладного канала, при котором направление теплового потока совпадает с направлением действия подъемных сил, обусловленных естественной конвекцией.

Результаты моделирования температурных полей и распределений скорости жидкости при различных положениях закладного канала представлены на рисунке 3.7.



(*а*)



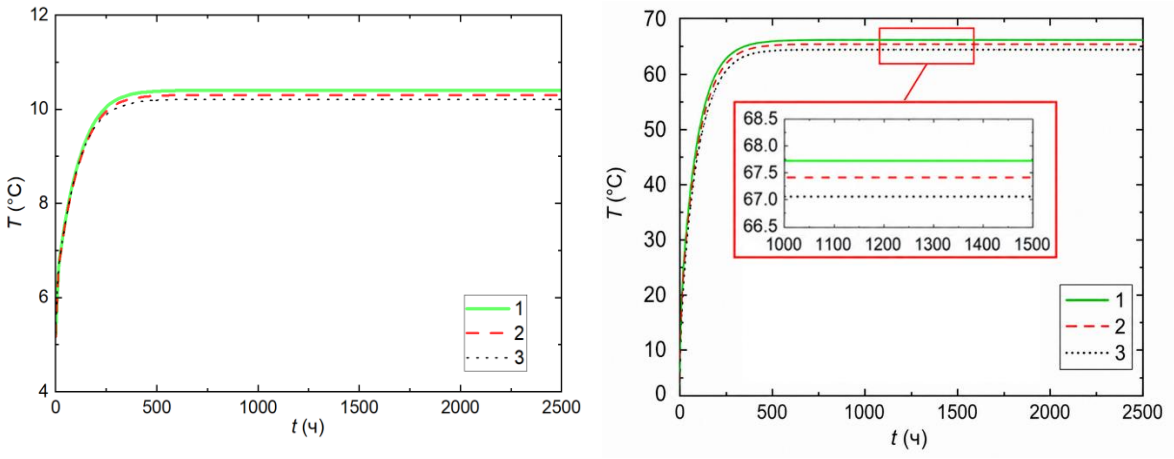
(*б*)

Рисунок 3.7 – Типичные поля температуры и векторы скорости при естественной конвекции жидкости в трубопроводе с толщиной изоляции 100 мм, *а* – температуры продукта ~10 °С; *б* – температуры продукта ~70 °С

Выполненные расчеты показали, что в рассматриваемых условиях характерные значения числа Рэлея не превышают 2×10^5, а скорости естественной конвекции составляют менее 10^{-6} м/с. Несмотря на учет естественной конвекции в модели, ее влияние на формирование температурного поля оказалось ограниченным. Температурное поле в поперечном сечении трубопровода остается близким к однородному, а различия средней температуры жидкости для различных вариантов расположения закладного канала не превышают 1%.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что при вынужденной остановке транспортировки продукта теплоперенос в рассматриваемой системе определяется преимущественно теплопроводностью через элементы конструкции трубопровода и слой тепловой изоляции. Учет естественной конвекции в численной модели позволил количественно оценить границы применимости данного допущения и установить, что для рассматриваемого диапазона параметров использование упрощенных теплопроводностных моделей при инженерных расчетах систем электрообогрева не приводит к существенным погрешностям при оценке их интегральных характеристик.

Для оценки влияния пространственного расположения закладного канала на температурный режим транспортируемой жидкости были проанализированы изменения её средней температуры во времени. Средняя температура жидкости определялась путем усреднения температурного поля по площади поперечного сечения области, занятой жидкостью. Результаты расчётов для различных вариантов расположения закладного канала представлены на рисунке 3.8.



а *б*

Рисунок 3.8. – Типичные тренды средней температуры жидкости при пространственном расположении закладной сверху (*1*), сбоку (*2*) и снизу (*3*) и толщине изоляции 100 мм: *а* – температуры продукта ~10 °С; *б* – температуры продукта ~70 °С

Установлено, что максимальные значения средней температуры жидкости соответствуют верхнему расположению закладного канала, а минимальные – нижнему. При этом различия между рассматриваемыми вариантами не превышают 1%.

Полученный результат свидетельствует о том, что пространственное расположение закладного канала оказывает ограниченное влияние на температурный режим транспортируемой жидкости. С учетом ранее установленных низких значений числа Рэлея и скоростей естественной конвекции наблюдаемые различия связаны преимущественно с изменением условий передачи тепла между греющим кабелем, закладным каналом и трубопроводом.

Несмотря на незначительное влияние пространственного расположения закладного канала на температурный режим транспортируемой жидкости, данный фактор оказывает влияние на условия теплоотвода от токопроводящих жил греющего кабеля и, следовательно, на их температурный режим. Это связано с изменением условий отвода тепла от источника тепловыделения к

трубопроводу при различном положении закладного канала относительно обогреваемого объекта.

При верхнем расположении закладного канала греющий кабель под действием силы тяжести стремиться сместиться к центру трубопровода, что способствует уменьшению теплового сопротивления между токопроводящими жилами и обогреваемым объектом. При нижнем расположении закладного канала расстояние между источником тепловыделения и трубопроводом увеличивается, что ухудшает условия теплоотвода от токопроводящих жил.

Для резистивных систем электрообогрева данный фактор имеет особое значение, поскольку температура токопроводящих жил является одним из основных ограничений, определяющих допустимую линейную мощность и максимальную длину плеча электрообогрева.

Оценка температурного режима транспортируемой жидкости позволяет определить способность системы электрообогрева обеспечивать требуемые условия эксплуатации трубопровода. Однако для сравнения различных конструктивных решений этого критерия недостаточно, поскольку одинаковый температурный режим может быть обеспечен при различных затратах электрической энергии. В связи с этим для количественной оценки эффективности рассматриваемых вариантов дополнительно выполнен анализ суммарного энергопотребления системы электрообогрева.

Для оценки энергетической эффективности системы в нестационарном режиме использовалось суммарное энергопотребление, определяемое интегрированием мгновенной электрической мощности во времени.

Суммарное энергопотребление определялось интегрированием мгновенной электрической мощности во времени:

$$Wh = \int_0^t P(t)dt, \qquad (26)$$

где $P(t)$ – мгновенная электрическая мощность, потребляемая токопроводящими жилами греющего кабеля.

Использование энергии в качестве интегрального критерия позволяет учитывать изменение мощности тепловыделения, обусловленное температурной зависимостью электрического сопротивления токопроводящих жил, и корректно сопоставлять различные варианты исполнения системы электрообогрева не только по достигаемому температурному режиму, но и по затратам электрической энергии на его обеспечение в условиях нестационарного теплопереноса.

Результаты расчетов суммарного энергопотребления при различных положениях закладного канала и толщинах тепловой изоляции представлены на рисунке 3.9.

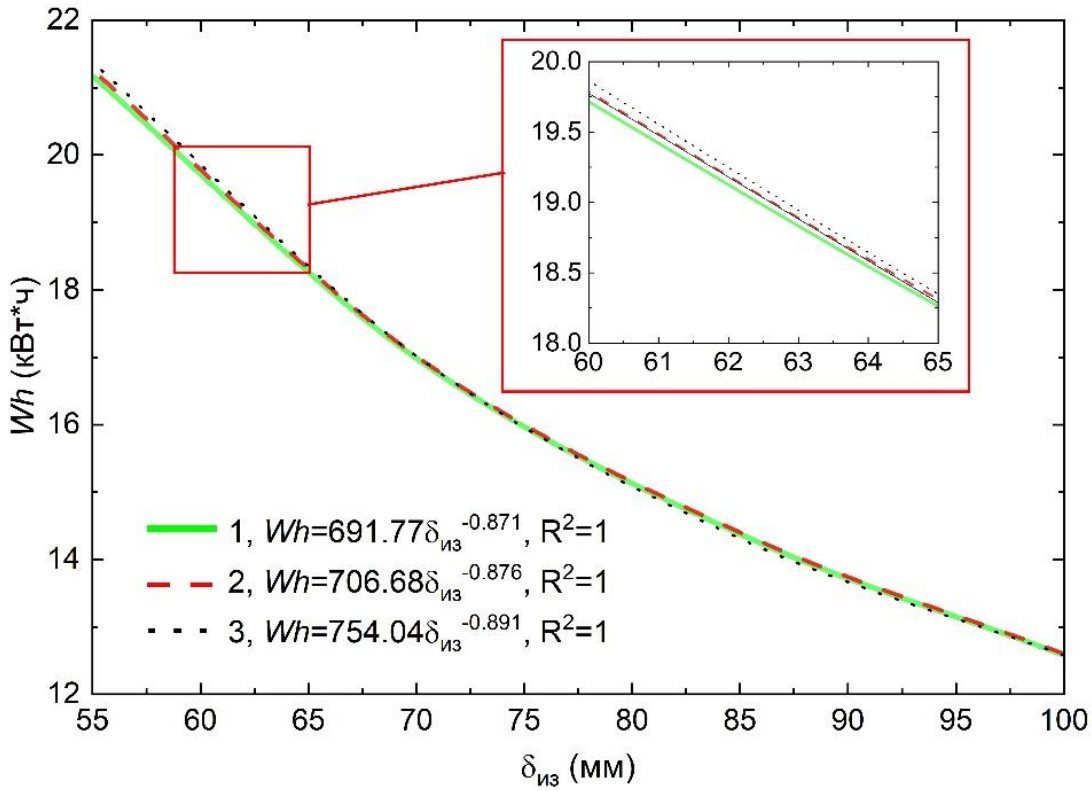


Рисунок 3.9 – Зависимости суммарного энергопотребления резистивным греющим кабелем от толщины тепловой изоляции при пространственном расположении закладной сверху (*1*), сбоку (*2*) и снизу (*3*).

Анализ полученных зависимостей показывает, что изменение пространственного расположения закладного канала оказывает незначительное влияние на суммарное энергопотребление системы

электрообогрева. Для всех рассмотренных вариантов различия не превышали 0,3%, что согласуется с ранее установленным ограниченным влиянием положения закладного канала на температурный режим транспортируемой жидкости. Полученный результат свидетельствует о том, что изменение положения закладного канала является малоэффективным способом управления интегральными энергетическими характеристиками рассматриваемой системы электрообогрева. При принятых условиях моделирования влияние данного фактора существенно уступает влиянию параметров тепловой изоляции и электротепловых характеристик нагревательного кабеля.

В отличие от пространственного расположения закладного канала, толщина тепловой изоляции оказывает существенное влияние на энергетические характеристики системы электрообогрева. Уменьшение толщины теплоизоляции приводит к увеличению тепловых потерь трубопровода в окружающую среду, что требует повышения мощности электрообогрева для поддержания заданного температурного режима транспортируемой жидкости. Результаты расчетов суммарного энергопотребления и максимальной длины плеча электрообогрева в зависимости от толщины тепловой изоляции представлены на рисунке 3.10.

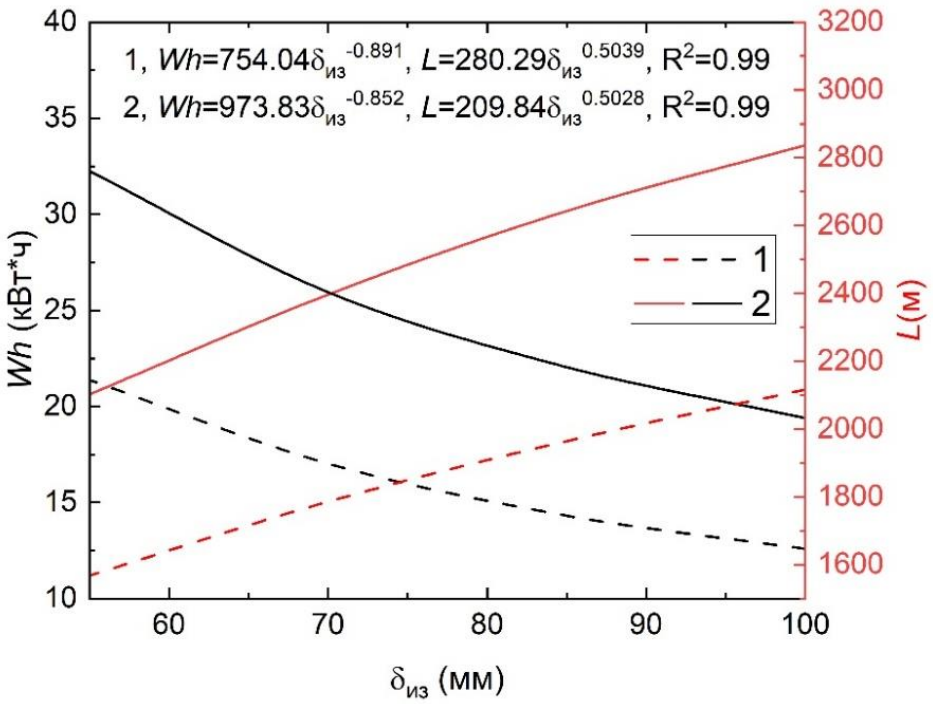


Рисунок 3.10 – Зависимости суммарного энергопотребления резистивным греющим кабелем и длины плеча обогрева надземного трубопровода от толщины тепловой изоляции: *1* – $dU_{ист}/dL$=0,163 В/м (температуры продукта ~10 °С); *2* – $dU_{ист}/dL$=0,249 В/м (температуры продукта ~70 °С).

Установлено, что уменьшение толщины тепловой изоляции приводит одновременно к росту энергопотребления системы и снижению максимальной длины плеча электрообогрева. Так, уменьшение толщины теплоизоляции с 100 до 55 мм сопровождается увеличением суммарного энергопотребления примерно на 40% и снижением длины плеча электрообогрева примерно на 26% по сравнению с вариантом толщины теплоизоляции 100 мм. Полученные зависимости обусловлены увеличением тепловых потерь трубопровода в окружающую среду при уменьшении толщины теплоизоляции. Аналогичная закономерность лежит в основе современных инженерных методик расчета систем электрообогрева и подтверждается опубликованными исследованиями, посвященными выбору рациональной толщины тепловой изоляции трубопроводов [55,57]. Для поддержания требуемого температурного режима транспортируемой жидкости в этих условиях требуется увеличение мощности электрообогрева, что приводит к росту

температуры токопроводящих жил и более быстрому достижению допустимых температурных ограничений нагревательного кабеля.

Существенное влияние на показатели эффективности оказывает также продольный градиент потенциала источника питания вдоль токопроводящей жилы $dU_{ист}/dL$. В исследованном диапазоне значений $dU_{ист}/dL$ изменение данного параметра приводит к изменению суммарного энергопотребления до 60% и максимальной длины плеча электрообогрева до 35%.

В отличие от пространственного расположения закладного канала, влияние которого на интегральные показатели эффективности ограничено, изменение толщины тепловой изоляции и продольного градиента потенциала источника питания непосредственно изменяет область допустимых режимов работы системы электрообогрева и оказывает определяющее влияние на ее энергетическую эффективность.

Для сопоставления относительного влияния исследованных факторов на показатели эффективности системы электрообогрева выполнена интегральная оценка изменения суммарного энергопотребления и максимальной длины плеча электрообогрева. Результаты сравнения приведены в таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Интегральные оценки влияния параметров системы электрообогрева на суммарное энергопотребление резистивным греющим кабелем и максимальную длину плеча обогрева надземного трубопровода.

Параметр	*Wh*	*L*
Схема расположения (сверху, сбоку, снизу)	<0,3%	<0,3%
Толщина изоляции	<40%	<26%
$dU_{ист}/dL$	<60%	<35%

Анализ данных таблицы 3.3 показывает, что наибольшее влияние на показатели эффективности рассматриваемой системы оказывают толщина тепловой изоляции трубопровода и продольный градиент потенциала

источника питания вдоль токопроводящих жил. Варьирование указанных параметров сопровождается существенным изменением тепловых потерь, требуемой мощности электрообогрева и области допустимых режимов работы нагревательного кабеля. В то же время пространственное расположение закладного канала оказывает значительно меньшее влияние на интегральные характеристики системы. Несмотря на изменение локальных условий теплопередачи между токопроводящими жилами, закладным каналом и трубопроводом, различия суммарного энергопотребления и максимальной длины плеча электрообогрева не превышают 0,3% для исследованного диапазона параметров.

Таким образом, при проектировании систем резистивного электрообогрева предизолированных трубопроводов с закладным каналом необходимо учитывать не только требуемую мощность компенсации тепловых потерь, но и температурный режим токопроводящей жилы, а также влияние конструктивного расположения нагревательного элемента на условия теплоотвода. При принятых условиях моделирования установлено, что изменение положения закладного канала оказывает ограниченное влияние на интегральные показатели эффективности, тогда как толщина тепловой изоляции и электротепловые ограничения кабеля являются определяющими факторами формирования максимальной длины плеча обогрева.

Полученные результаты являются основанием для дальнейшего анализа влияния условий теплового контакта между нагревательным элементом и трубопроводом, поскольку в реальных условиях прокладки кабеля в закладном канале контакт между кабелем, стенкой закладной и трубопроводом может отличаться от принятого в настоящем разделе идеализированного варианта.

Анализ полученных результатов показал, что при использовании резистивного электрообогрева в предизолированных трубопроводах с размещением греющего кабеля в закладном канале интегральные показатели эффективности системы определяются преимущественно толщиной тепловой

изоляции трубопровода и электротепловыми ограничениями нагревательного кабеля. Установлено, что при отсутствии продольного течения жидкости и характерных значениях числа Рэлея менее 2×10^5 теплоперенос в поперечном сечении трубопровода определяется преимущественно теплопроводностью. Скорости естественной конвекции не превышают 10^{-6} м/с, а влияние конвективного переноса на интегральные характеристики системы электрообогрева является ограниченным. Показано, что изменение пространственного расположения закладного канала приводит к изменению локальных условий теплопередачи и температурного режима токопроводящих жил, однако влияние данного фактора на суммарное энергопотребление и максимальную длину плеча электрообогрева не превышает 0,3% для исследованной конструкции. Уменьшение толщины тепловой изоляции с 100 до 55 мм сопровождается увеличением суммарного энергопотребления примерно на 40% и сокращением максимальной длины плеча электрообогрева примерно на 26%, что подтверждает определяющее влияние теплоизоляции на энергетическую эффективность систем электрообогрева, отмеченное в инженерных методиках расчета и опубликованных исследованиях [55,57]. Полученные результаты показывают, что для предизолированных трубопроводов с размещением греющего кабеля в закладном канале выбор параметров системы электрообогрева не может основываться исключительно на компенсации тепловых потерь трубопровода. Необходимо учитывать условия отвода тепла от токопроводящих жил, температурные ограничения нагревательного кабеля и их влияние на длину плеча электрообогрева.

3.3 Влияние конструктивного исполнения нагревательного элемента и закладного канала на температурный режим токопроводящих жил и эффективность электрообогрева

В разделе 3.2 обосновано, что изменение пространственного расположения закладного канала относительно трубопровода оказывает

ограниченное влияние на температурный режим транспортируемой жидкости, энергопотребление и максимальную длину плеча электрообогрева. Расчеты выполнялись для режима остановки перекачки, то есть при отсутствии продольного движения продукта в трубопроводе. Теплоперенос в продукте рассматривался преимущественно как теплопроводный процесс, поскольку ранее было показано, что учет естественной конвекции оказывает ограниченное влияние на интегральные показатели системы. Определяющими факторами, ограничивающими допустимую линейную мощность и длину плеча электрообогрева, остаются температура токопроводящих жил и допустимое напряжение изоляции греющего кабеля.

В данном разделе выполнено исследование влияния конструкции нагревательного кабеля, формы закладного элемента и положения кабеля внутри закладного канала на температурный режим токопроводящих жил и эффективность электрообогрева. В качестве базовой конструкции использовалась модель предизолированного трубопровода с неподвижным продуктом, рассмотренная в разделе 3.2. Геометрические размеры трубопровода, параметры тепловой изоляции, теплофизические свойства материалов и условия внешнего теплообмена принимались неизменными. Во всех рассматриваемых вариантах закладной канал располагался в верхней части обогреваемого трубопровода. Изменению подвергались только конструкция нагревательного кабеля, форма и типоразмер закладного канала, а также положение кабеля внутри закладного элемента.

Для резистивного электрообогрева протяженных трубопроводов в настоящее время применяются греющие кабели постоянной мощности различного конструктивного исполнения [49,51,58,83]. В зависимости от области применения они отличаются конструкцией токопроводящих жил, рабочим напряжением изоляции, допустимой строительной длиной, механической прочностью и гибкостью. Наиболее распространенными являются гибкие плоские кабели, предназначенные для традиционного резистивного электрообогрева трубопроводов, а также бронированные кабели,

применяемые при электрообогреве скважин и протяженных трубопроводов [58,83]. В рассматриваемой конструкции электрообогрева нагревательный элемент размещается внутри закладного канала и прокладывается по прямолинейной траектории. В этих условиях требования к гибкости кабеля существенно снижаются, вследствие чего появляется возможность использования не только традиционных плоских греющих кабелей, но и бронированных кабелей с повышенным рабочим напряжением изоляции. Повышение допустимого рабочего напряжения представляет практический интерес, поскольку позволяет увеличить максимально допустимую длину плеча электрообогрева без изменения принципа построения системы электроснабжения.

В качестве нагревательных элементов рассматривались кабели плоского и круглого исполнения с одинаковым номинальным сечением медных токопроводящих жил 3×6 мм^2 и допустимой температурой изоляции 120 °С [58]. Помимо плоского трехжильного греющего кабеля площадью сечения каждой жилы 6 мм^2 (LLS 3×6 мм^2), рассматривался круглый бронированный трехжильный кабель с таким же числом жил и площади их сечения (3×6 мм^2) [83]. Конструкция плоского греющего кабеля LLS 3×6 мм^2 и круглого бронированого 3×6 мм^2 представлены на рисунке 3.11. Указанная конструкция отличается геометрией поперечного сечения, наличием защитных конструктивных элементов и более высоким допустимым номинальным напряжением изоляции жил – 2500 В вместо 800 В для кабеля LLS. Основные характеристики исследовавшихся нагревательных кабелей представлены в таблице 3.4.

Таблица 3.4 – Основные характеристики исследовавшихся нагревательных кабелей [58,83].

Параметр	LLS 3×6	Бронированный 3×6
Сечение жил	3×6 мм^2	3×6 мм^2
Материал жил	медь	медь
Класс жилы (ГОСТ 22483)	класс 4	класс 1
Удельное сопротивление жилы	0,01968 – 0,0198	0,018175 – 0,01844
Рабочее напряжение	800 В	2500 В
Температура изоляции	120 °С	120 °С
Исполнение	плоский	круглый

Таблица 3.5 – Температурные коэффициенты материалов проводников [67]

Металл	Температурные коэффициенты, 1/°С
Алюминий	0,0040 – 0,0043
Медь	0,00393 – 0,004
Углеродистая сталь	0,0045 – 0,006



(*а*) (*б*)

Рисунок 3.11 – Конструкция греющих кабелей (*а*) – LLS 3×6 мм^2, (*б*) – круглого бронированного 3×6 мм^2

С целью анализа влияния геометрии закладного канала рассмотрены элементы круглого, углового и прямоугольного сечений, типоразмеры которых выбирались с учетом типовой номенклатуры труб и профилей по ГОСТ [84–89], а также требований к монтажу на протяженных участках трубопроводов. Сравнение выполнялось не для отдельных элементов, а комплексно для реализуемых сочетаний «резистивный кабель – закладной канал» с учетом теплового взаимодействия между нагревательным элементом, обогреваемым трубопроводом, транспортируемым продуктом и теплоизоляцией. На рисунках 3.12 и 3.13 представлены исследовавшиеся варианты конструктивного исполнения системы «резистивный кабель – закладной канал» для плоского кабеля LLS 3×6 мм^2 и круглого бронированного кабеля соответственно. Для плоского кабеля рассматривались характерных положения внутри закладного канала: центральное положение, прилегание к нижней стенке, прилегание к верхней стенке и промежуточное положение, при котором кабель находится в среднем положении, но имеет локальный контакт со стенкой закладного канала. Для круглого бронированного кабеля рассматривались три положения: центральное, прилегание к нижней стенке и прилегание к верхней стенке.

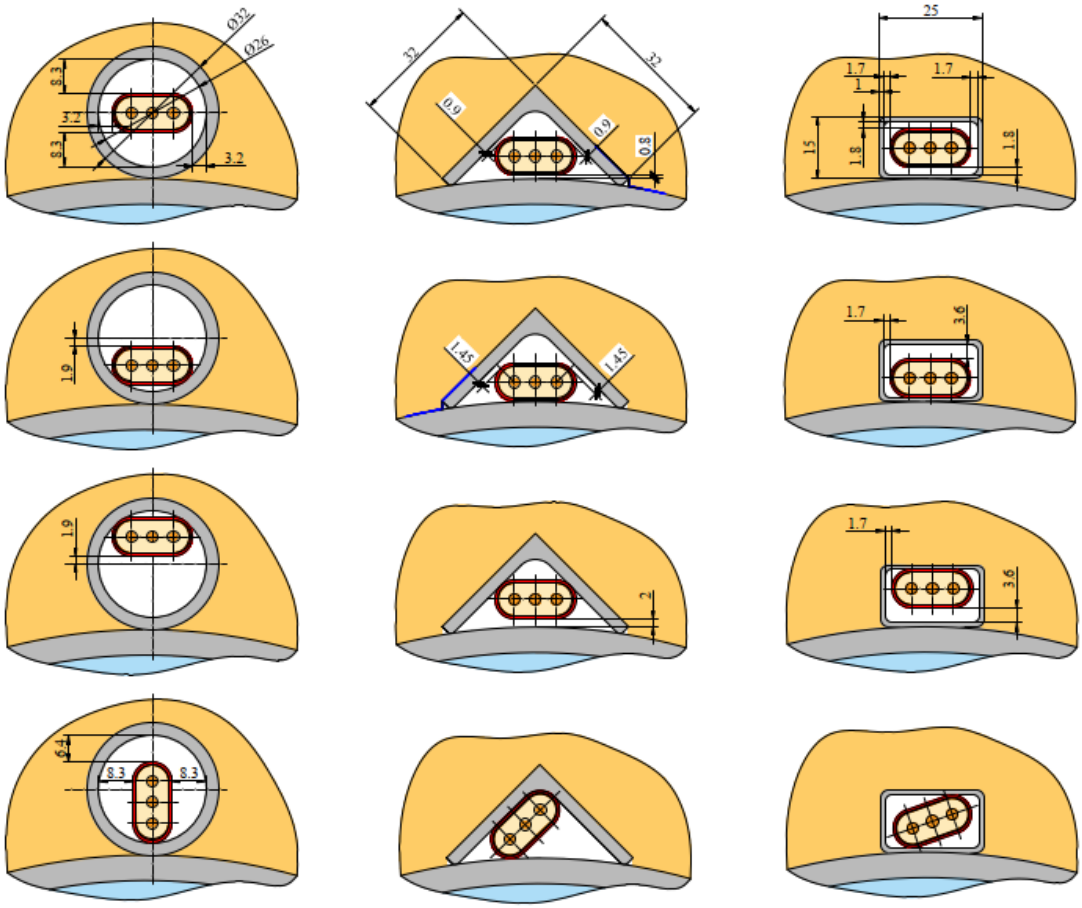


Рисунок 3.12 – Варианты размещения плоского греющего кабеля LLS 3×6 мм^2 в закладных каналах различного исполнения

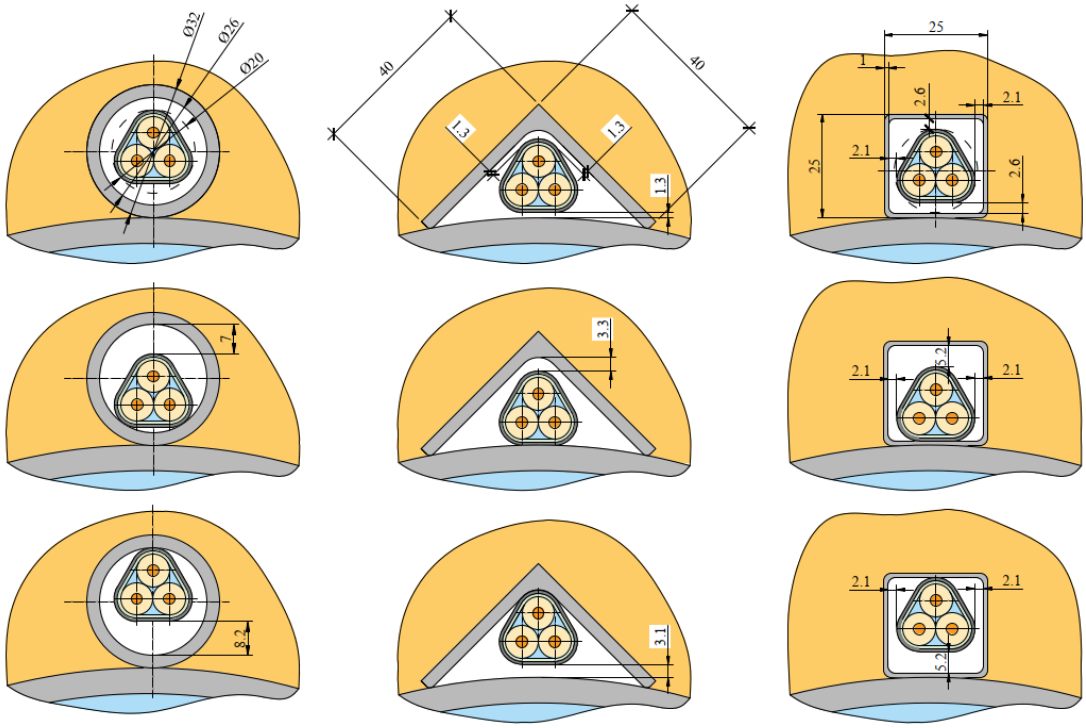


Рисунок 3.13 – Варианты размещения круглого бронированного кабеля 3×6 мм^2 в закладных каналах различного исполнения

Во всех расчетных вариантах в качестве эксплуатационного ограничения принималась максимальная температура токопроводящих жил 120 °С, соответствующая допустимой температуре изоляции применяемых кабелей. Для каждого сочетания «резистивный кабель – закладной канал – положение кабеля» подбиралось напряжение питания, обеспечивающее достижение указанной температуры жил, после чего вычислялись линейная мощность электрообогрева, средняя температура транспортируемого продукта и максимальная длина плеча электрообогрева. Такой подход позволяет оценить влияние конструктивного исполнения системы электрообогрева трубопровод на теплоперенос при допустимых эксплуатационных режимах изоляции кабеля.

На первом этапе выполнено исследование влияния положения плоского трехжильного греющего кабеля LLS 3×6 мм^2 с медными жилами внутри круглого закладного канала ⌀ 32×3 мм ГОСТ [85–88], углового профиля 32×32×3 мм ГОСТ [89] и прямоугольного профиля 30×15×1 мм ГОСТ [84]. Для каждой конструкции рассматривались четыре варианта расположения кабеля, соответствующие изменению расстояния от источника тепловыделения до трубопровода.

На втором этапе выполнено исследование влияния положения круглого бронированного трехжильного кабеля 3×6 мм^2 с медными жилами внутри круглого закладного канала ⌀ 32×3 мм ГОСТ [85–88], углового профиля 40×40×3 мм ГОСТ [89] и прямоугольного профиля 25×25×1 мм ГОСТ [84]. Для круглого кабеля рассматривались три характерных положения: минимальноех, среднее и максимальное расстояние до трубопровода.

Результаты расчетов установившегося температурного режима токопроводящих жил и транспортируемого продукта представлены на рисунке 3.14 и сведены в таблицу 3.6. В таблице приведены предельные режимы работы системы электрообогрева при ограничении максимальной температуры токопроводящих жил на уровне 120 °С.

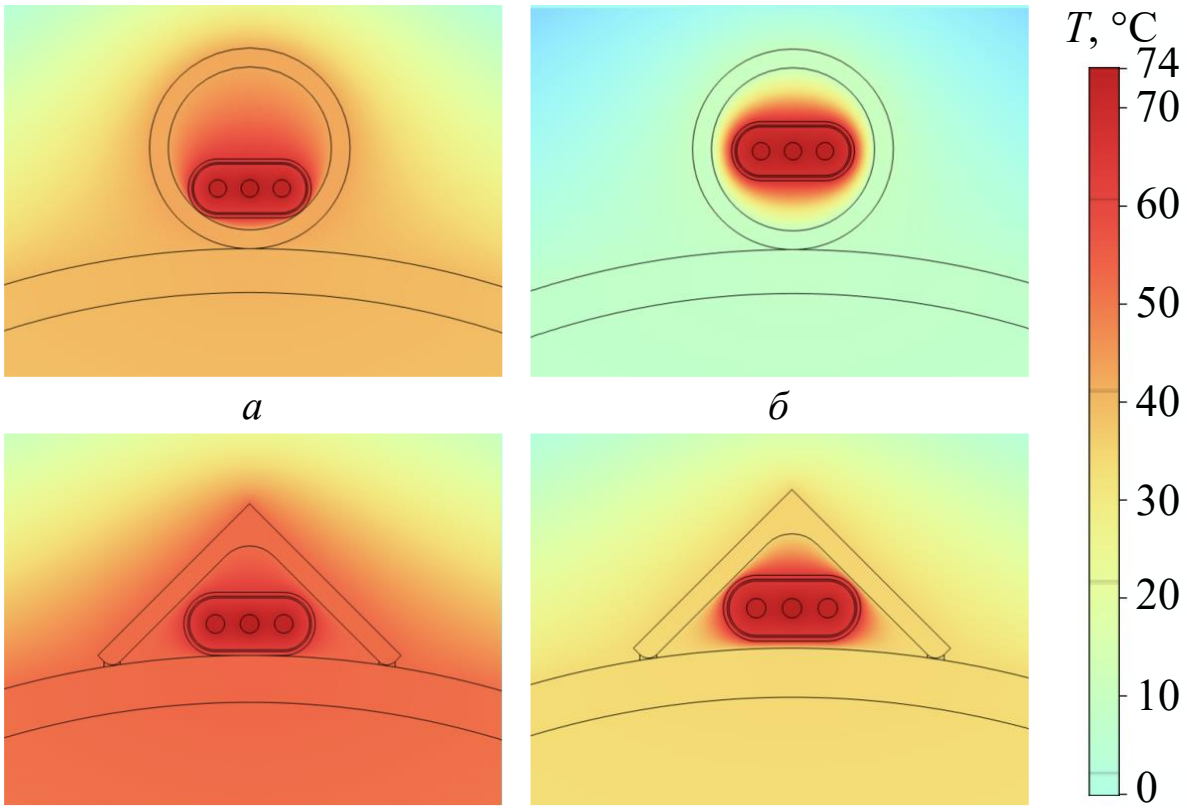


Рисунок 3.14 – Влияние формы закладного канала и положения греющего кабеля на распределение температурного поля:

(*а*) – круглый канал (⌀ 32×3 мм) , плотный тепловой контакт кабеля с нижней поверхностью ($P_{системы}$ = 22,6 Вт/м, $T_{продукта}$ = 10 °С, $T_{жилы}$ = 40 °С);

(*б*) – круглый канал, ослабленный тепловой контакт из-за наличия воздушного зазора ($P_{системы}$ = 20,1 Вт/м, $T_{продукта}$ = 2,5 °С, $T_{жилы}$ = 74 °С);

(*в*) – канал из уголкового профиля (32×32×3 мм), плотный тепловой контакт ($P_{системы}$ = 23,2 Вт/м, $T_{продукта}$ = 14 °С, $T_{жилы}$ = 33 °С);

(*г*) канал из уголкового профиля, наличие воздушного зазора ($P_{системы}$ = 22,1 Вт/м, $T_{продукта}$ = 10 °С, $T_{жилы}$ = 47 °С).

Таблица 3.6 – Предельные режимы работы системы электрообогрева при температуре жилы 120 °С

Кабель	Закладной канал	Положение	U, В/м	P, Вт/м	$T_{пр}$, °С
Плоский	Уголок	Центр	0,2420	38,6	62
		Снизу	0,2614	45,1	83
		Сверху	0,2570	43,6	78
		Промежуточное*	0,2523	42,0	73
	Труба	Центр	0,2071	28,2	27
		Снизу	0,2517	41,8	69
		Сверху	0,2498	41,2	67
		Промежуточное*	0,2424	38,7	59
	Прямоугольный профиль	Центр	0,2289	34,5	49
		Снизу	0,2627	41,8	69
		Сверху	0,2543	42,7	74
		Промежуточное*	0,2453	39,7	65
Круглый	Уголок	Центр	0,2394	37,6	58
		Снизу	0,2647	46,2	85
		Сверху	0,2613	44,9	80
	Труба	Центр	0,2208	32,0	38
		Снизу	0,2611	44,9	78
		Сверху	0,2602	44,6	77
	Прямоугольный профиль	Центр	0,2246	33,1	43
		Снизу	0,2642	46,0	83
		Сверху	0,2529	42,1	70

Промежуточное* - промежуточное положение, при котором кабель находится в среднем положении, но имеет локальный контакт со стенкой закладного канала

Во всех рассмотренных вариантах наименее благоприятным является центральное положение кабеля, при котором формируется максимальный воздушный зазор между нагревательным элементом и стенкой закладного канала. В этом случае ухудшаются условия теплоотвода от токопроводящих жил к трубопроводу, что приводит к снижению допустимого напряжения питания, линейной мощности и температуры транспортируемого продукта.

Для плоского кабеля в круглой закладной трубе переход от наиболее благоприятного положения к центральному приводит к снижению линейной мощности с 41,8 до 28,2 Вт/м, то есть на 32,5%, а средняя температура продукта уменьшается с 69 до 27 °С, более чем на 60%. Для угловой закладной аналогичное снижение мощности составляет около 14,4%, что свидетельствует о меньшей чувствительности данной конструкции к изменению положения кабеля. Прямоугольный профиль занимает промежуточное положение по степени влияния воздушного зазора на параметры системы.

Для круглого бронированного кабеля влияние положения внутри закладного канала также выражено, однако характер изменения параметров отличается от плоского кабеля. В круглой закладной трубе переход от прилегания к нижней стенке к центральному положению приводит к снижению линейной мощности с 44,9 до 32,0 Вт/м, то есть на 28,7%, а средняя температура продукта уменьшается с 78 до 38 °С. Для угловой закладной снижение линейной мощности составляет с 46,2 до 37,6 Вт/м, то есть около 18,6%. Это показывает, что круглый бронированный кабель в целом менее чувствителен к изменению положения в круглой трубе по сравнению с плоским кабелем, однако влияние воздушного зазора сохраняется и для данной конструкции.

Для количественной оценки влияния положения кабеля внутри закладного канала введен коэффициент устойчивости конструкции $k_{уст}$,

определяемый как отношение допустимой линейной мощности системы в наиболее неблагоприятном положении кабеля к ее максимальному значению:

$$k_{уст}=P_{ц}/P_{max,} \quad (27)$$

где $P_{ц}$ – допустимая линейная мощность системы электрообогрева при центральном положении кабеля внутри закладного канала, Вт/м; P_{max} – максимальная допустимая линейная мощность для рассматриваемой конструкции, Вт/м.

Физический смысл коэффициента $k_{уст}$ заключается в оценке чувствительности конструкции к изменению положения кабеля внутри закладного канала. Чем ближе значение коэффициента к единице, тем меньше влияние монтажных отклонений и тем более устойчивой является рассматриваемая конструкция системы электрообогрева к положению греющего кабеля. Значения коэффициента устойчивости для рассмотренных систем приведены в таблице 3.7.

Таблица 3.7 – Коэффициент устойчивости $k_{уст}$ различных конструкций системы электрообогрева к изменению положения кабеля

Кабель	Закладной канал	$P_{ц}$, Вт/м	P_{max}, Вт/м	$k_{уст}$
Плоский LLS 3×6	Уголок	38,6	45,1	0,856
Плоский LLS 3×6	Круглая труба	28,2	41,8	0,675
Плоский LLS 3×6	Прямоугольный профиль	34,5	42,7	0,808
Круглый бронированный	Уголок	37,6	46,2	0,814
Круглый бронированный	Круглая труба	32,0	44,9	0,713
Круглый бронированный	Прямоугольный профиль	33,1	46,0	0,720

Значения коэффициента устойчивости, приведенные в таблице 3.7, показывают, что наиболее устойчивой к изменению положения кабеля является конструкция с угловой закладной: для плоского кабеля $k_{уст} = 0,856$, тогда как для круглой трубы $k_{уст} = 0,675$. Это означает, что смещение кабеля в

наиболее неблагоприятное положение может снижать допустимую линейную мощность системы более чем на 30%. Для круглого бронированного кабеля разброс значений несколько меньше, однако наибольшие значения $k_{уст}$ также соответствуют угловой закладной, а наименьшие – круглой трубе. Следовательно, угловая закладная обеспечивает наименьшую чувствительность системы к изменению положения кабеля.

Для оценки влияния положения кабеля на эффективность передачи тепла к транспортируемому продукту дополнительно введен температурный коэффициент передачи тепла k_T:

$$k_T=T_{пр,ц}/T_{пр,max}, \quad (28)$$

где $T_{пр,ц}$ – средняя температура транспортируемого продукта при центральном положении кабеля внутри закладного канала, °С; $T_{пр,max}$ – максимальная температура транспортируемого продукта для наиболее благоприятного положения кабеля в рассматриваемой конструкции, °С.

Физический смысл коэффициента $k_Т$ заключается в оценке чувствительности температурного режима транспортируемого продукта к изменению положения нагревательного элемента внутри закладного канала. Чем ближе значение коэффициента к единице, тем меньше влияние положения кабеля на эффективность передачи тепла от токопроводящих жил к трубопроводу и транспортируемому продукту. Снижение значения коэффициента свидетельствует об увеличении влияния воздушного зазора между кабелем и стенками закладного канала на процессы теплопередачи в системе электрообогрева.

Значения температурного коэффициента передачи тепла $k_Т$ для всех сочетаний «резистивный кабель – закладной канал» приведены в табл. 3.8.

Таблица 3.8 – Температурный коэффициент передачи тепла k_T

Кабель	Закладная	$T_{пр,ц}$, °C	$T_{пр,max}$, °C	k_T
Плоский LLS 3×6	Уголок	62,4	83,0	0,752
Плоский LLS 3×6	Труба	27,2	68,8	0,395
Плоский LLS 3×6	Прямоугольник	48,6	73,9	0,658
Круглый бронированный	Уголок	57,5	84,6	0,680
Круглый бронированный	Труба	38,4	78,2	0,491
Круглый бронированный	Прямоугольник	42,6	83,1	0,513

Значения k_T, приведенные в таблице 3.8, подтверждают, что наличие воздушного зазора влияет не только на допустимую мощность системы, но и на долю передаваемой продукту мощности (на эффективность передачи тепла транспортируемому продукту).

Наибольшая чувствительность температурного режима продукта к изменению положения кабеля наблюдается для плоского кабеля в круглой закладной трубе, где $k_T = 0,395$, что соответствует снижению температуры продукта более чем на 60% при переходе от благоприятного положения к центральному. Для угловой закладной значения k_T достигают 0,75, что свидетельствует о значительно меньшем влиянии монтажных отклонений на температурный режим. Сравнение коэффициентов $k_{уст}$ и k_T показывает, что изменение положения кабеля сильнее влияет на эффективность передачи тепла к продукту, чем на допустимую линейную мощность, что подтверждает определяющую роль воздушного зазора в формировании теплового режима системы.

Сравнение различных конструкций закладных каналов показало, что чувствительность системы к изменению положения кабеля определяется геометрией профиля и соответствующей величиной воздушного зазора. Наименьшее влияние положения кабеля характерно для угловых закладных

элементов, тогда как наибольшее изменение параметров наблюдается для плоского кабеля в круглой закладной трубе. Для круглой закладной трубы применение круглого бронированного кабеля обеспечивает более высокие значения допустимой линейной мощности, температуры продукта, а также коэффициентов $k_{\text{уст}}$ и k_T по сравнению с плоским кабелем, что связано с более симметричным расположением токопроводящих жил относительно стенок канала.

Выбор формы закладного элемента определяется не только его теплотехническими характеристиками, но и особенностями изготовления предизолированных трубопроводов. Несмотря на то, что угловая закладная обеспечивает наименьшую чувствительность системы к изменению положения кабеля, целесообразность ее практического применения требует дополнительной оценки технологических аспектов изготовления и монтажа, включая обеспечение сохранности антикоррозионного покрытия трубопровода. В связи с этим при проектировании систем электрообогрева целесообразно учитывать не только теплотехническую эффективность закладного элемента, но и особенности его интеграции в конструкцию предизолированного трубопровода.

Результаты проведенных исследований свидетельствуют о том, что при размещении резистивного нагревательного элемента внутри закладного канала определяющее влияние на температурный режим системы оказывает величина воздушного зазора между кабелем и стенками закладного элемента. Показано, что переход от наиболее благоприятного положения кабеля к центральному может приводить к снижению допустимой линейной мощности до 32,5% и уменьшению температуры транспортируемого продукта более чем в два раза. Следовательно, положение нагревательного элемента внутри закладного канала следует рассматривать как самостоятельный конструктивный фактор, который необходимо учитывать при выборе параметров системы электрообогрева. При проектировании систем электрообогрева расчетные режимы целесообразно определять исходя из

наиболее неблагоприятного допустимого положения кабеля, поскольку именно оно может ограничивать работоспособность всего плеча электрообогрева.

Установленная закономерность качественно согласуется с опубликованными результатами исследований резистивных систем электрообогрева, в которых показано, что ухудшение теплового контакта между нагревательным кабелем и трубопроводом сопровождается повышением температуры нагревательного элемента и снижением эффективности передачи теплоты трубопроводу [53]. Вместе с тем в известных исследованиях рассматриваются конструкции с поверхностной прокладкой кабеля, тогда как влияние положения нагревательного элемента внутри закладного канала, формы закладного элемента и величины воздушного зазора на температурный режим токопроводящих жил ранее практически не исследовалось.

Выявленные особенности относятся к резистивным системам электрообогрева, однако установленная зависимость между условиями теплоотвода от нагревательного элемента и его температурным режимом представляет интерес и для других способов электрообогрева трубопроводов, использующих закладные элементы, что требует проведения дальнейших исследований.

3.4 Повышение эффективности резистивного электрообогрева за счет перераспределения тепловыделения между элементами системы

В разделах 3.1–3.3 показано, что допустимая линейная мощность системы резистивного электрообогрева в значительной степени определяется температурным режимом токопроводящих жил. Температура жил зависит как от интенсивности внутреннего тепловыделения в самих проводниках, так и от условий отвода тепла, определяемых толщиной теплоизоляции трубопровода, конструктивным исполнением закладного канала и величиной воздушного

зазора между нагревательным элементом и стенками закладного элемента. Результаты, полученные в разделе 3.1, показали, что снижение температуры токопроводящих жил может быть достигнуто не только за счет интенсификации теплоотвода, но и за счет изменения структуры тепловыделения в системе электрообогрева. Перераспределение части выделяемой мощности из токопроводящих жил в стальные закладные элементы позволяет уменьшить тепловую нагрузку на изоляцию проводников, что создает предпосылки для повышения допустимой линейной мощности системы и увеличения максимальной длины плеча электрообогрева. Установлено, что наибольшая доля тепловыделения в ферромагнитных элементах достигается при индукционном способе электрообогрева. Однако его реализация связана с использованием дополнительных закладных элементов, увеличением металлоемкости конструкции и необходимостью применения специальных схем электроснабжения.

В разделе 3.3 показано, что уменьшение размеров воздушного зазора между токопроводящими жилами и стенками закладного элемента способствует значительному улучшению теплоотвода и снижению температуры жил. Однако даже при минимизации воздушного зазора и благоприятных условиях теплопередачи основная часть электрической энергии в резистивных системах продолжает преобразовываться в тепло непосредственно в токопроводящих жилах, а наличие слоя воздуха неизбежно создает дополнительное тепловое сопротивление, ограничивающее интенсивность отвода тепла. Вследствие этого допустимые режимы работы системы по-прежнему во многом определяются температурной стойкостью изоляции токопроводящих жил, а возможности повышения эффективности только за счет совершенствования теплоотвода оказываются ограниченными. В связи с этим представляет интерес подход, основанный не на дальнейшей интенсификации отвода тепла от жил, а на перераспределении источников тепловыделения между элементами системы электрообогрева. Для проверки данной возможности рассмотрено влияние несимметричного размещения

токопроводящих жил на формирование дополнительных электромагнитных потерь в ферромагнитных элементах закладного канала и температурный режим системы электрообогрева.

Необходимо отметить, что эффективность рассматриваемого подхода определяется не только конфигурацией размещения токопроводящих жил, но и электромагнитными свойствами ферромагнитного элемента, включая магнитную проницаемость материала, интенсивность магнитных потерь (вихревые токи и гистерезис) и конструктивные размеры закладного канала. При промышленной частоте 50 Гц интенсивность индуцируемых вихревых токов и потерь на гистерезис зависит от характеристик используемого материала и геометрии ферромагнитного элемента [31,42,45]. В связи с этим полученные результаты относятся к исследуемым конструктивным исполнениям системы электрообогрева и не могут быть непосредственно распространены на другие материалы и параметры ферромагнитных элементов без дополнительной оценки.

В качестве базовой конструкции использовалась модель предизолированного трубопровода, рассмотренная в разделе 3.2. Геометрические размеры трубопровода, толщина тепловой изоляции, свойства материалов, параметры внешнего теплообмена и характеристики токопроводящих жил принимались неизменными. Изменению подвергались только конфигурация размещения токопроводящих жил и конструктивное исполнение ферромагнитных элементов закладного канала. Такой подход позволял оценить влияние перераспределения тепловыделения между элементами системы при одинаковых теплотехнических условиях.

Основными критериями оценки являлись доля тепловыделения, формируемая в ферромагнитных элементах системы, и максимальная температура токопроводящих жил.

Для сопоставления результатов первоначально рассматривалась традиционная схема резистивного электрообогрева, при которой три токопроводящие жилы трехфазной системы размещаются внутри одного

закладного элемента. Такая конфигурация обеспечивает высокую степень компенсации магнитного поля между фазами и соответствует случаю совместной прокладки трех токопроводящих жил в общем ферромагнитном элементе.

Для формирования дополнительного тепловыделения в ферромагнитных элементах за счет вихревых токов и потерь на гистерезис рассмотрены схемы с несимметричным размещением жил. В качестве основной схемы несимметричного размещения жил принята конструкция с двумя стальными закладными трубами 32×3 мм, поскольку подобное конструктивное решение используется в ряде систем индукционного электрообогрева [10]. В традиционном исполнении в закладных трубах размещаются токопроводящие жилы, подключенные к однофазному источнику питания. В настоящей работе для нарушения компенсации магнитного поля была рассмотрена модификация данной схемы, в которой одна токопроводящая жила размещалась в одной закладной трубе, а две остальные жилы – во второй закладной трубе аналогичных размеров (схема «2+1»). Такое решение позволило использовать стандартный трехфазный источник питания и создать условия для возникновения дополнительных вихретоковых и магнитных потерь в ферромагнитных элементах конструкции.

С целью снижения металлоемкости конструкции дополнительно рассматривались варианты, обеспечивающие использование одного закладного элемента. Во втором варианте использовалась стальная труба 32×3 мм, внутреннее пространство которой разделялось ферромагнитной перегородкой на две области с различным числом токопроводящих жил. Дополнительно исследовалась конструкция типа «труба в трубе», в которой внутри основной закладной трубы 32×3 мм размещалась дополнительная стальная труба 16×3 мм. Такое решение обеспечивало разделение жил и формирование асимметричного магнитного поля при сохранении единого закладного элемента. Использование одного закладного элемента с внутренним разделением жил позволяет обеспечить нарушение компенсации

магнитного поля при сохранении единой конструкции закладного канала и меньшей металлоемкости по сравнению со схемой «2+1». Схемы исследуемых вариантов размещения токопроводящих жил представлены на рисунке 3.15.

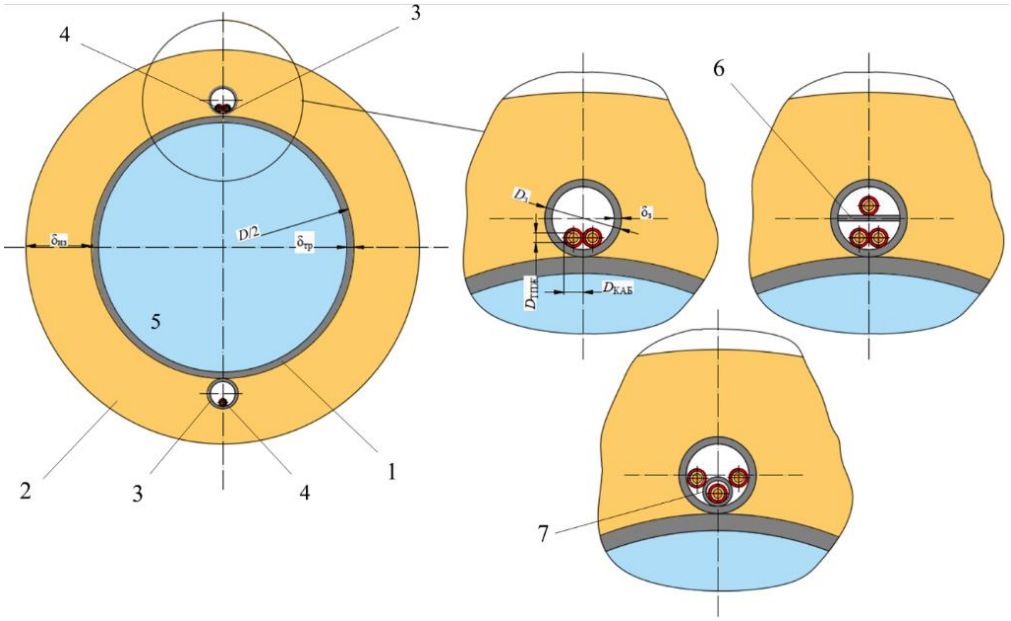
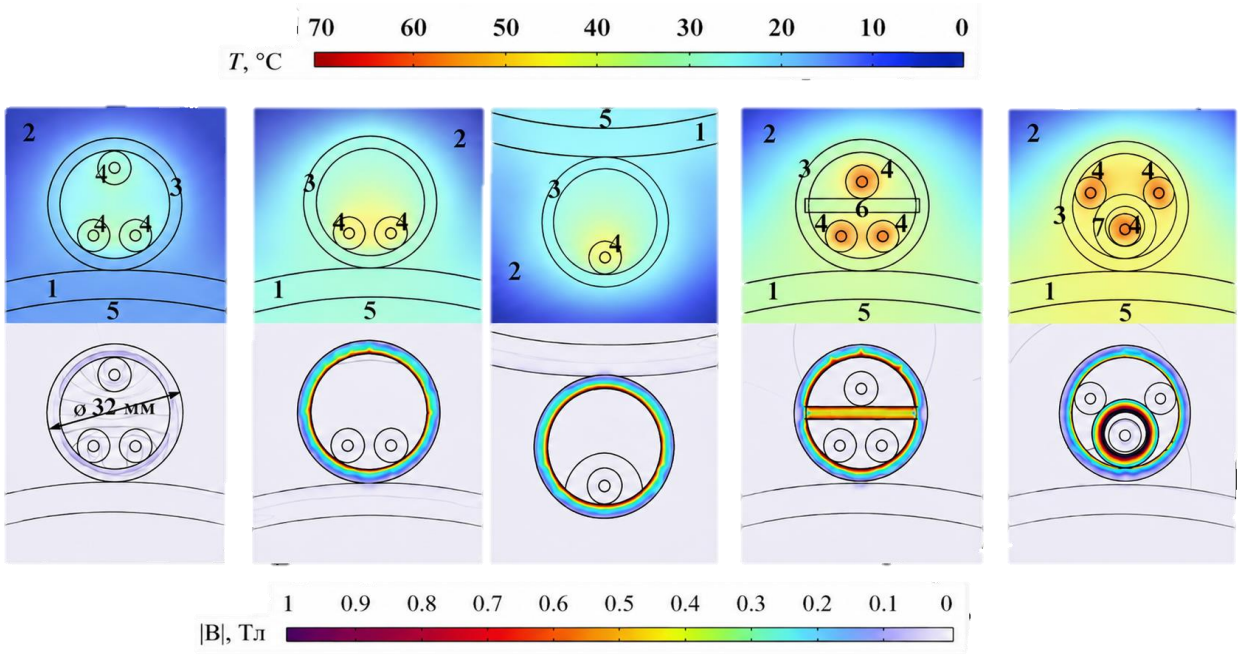


Рисунок 3.15 – Схемы области исследования вариантов размещения токопроводящих жил: *1* – надземный трубопровод, *2* – слой тепловой изоляции, *3* – закладной канал, *4* – изолированный проводник (3 шт.), *5* – транспортируемая жидкость, *6* – стальная перегородка, *7* – стальная трубка..

На рисунке 3.16*а* представлено распределение магнитного поля для базовой схемы размещения трех токопроводящих жил внутри одной закладной трубы. Видно, что магнитное поле локализовано преимущественно в непосредственной близости от проводников, а область повышенной магнитной индукции в стенках закладного элемента практически отсутствует. Вследствие высокой степени компенсации магнитных полей отдельных фаз индуцирование дополнительных токов в ферромагнитном элементе практически не происходит, а тепловыделение в стали остается незначительным.



а *б* *в* *г*

Рисунок 3.16. – Типичные температурные (верхний ряд) и магнитные поля (нижний ряд) в круглой стальной закладной (⌀32×3 мм) при различных схемах размещения трехфазных проводников: *а* – три фазы расположены в одной закладной; *б* – две фазы расположены в одной закладной, третья в отдельной (схема «2+1»); *в* – закладная с внутренней стальной перегородкой; *г* – закладная с трубой внутри (труба в трубе). Обозначения: *1* – надземный трубопровод; *2* – слой тепловой изоляции; *3* – закладной канал; *4* – изолированный проводник (3 шт.); *5* – транспортируемая жидкость; *6* – стальная перегородка; *7* – стальная трубка.

Сопоставление результатов показывает, что разделение одного трехфазного греющего кабеля на три однофазных способствуют уменьшению температуры нагрева жил, что благоприятно сказывается на температуре и удельной линейной мощности. Данный вклад составляет 3%. Снижение температуры токопроводящих жил в том числе обусловлено влиянием жил друг на друга.

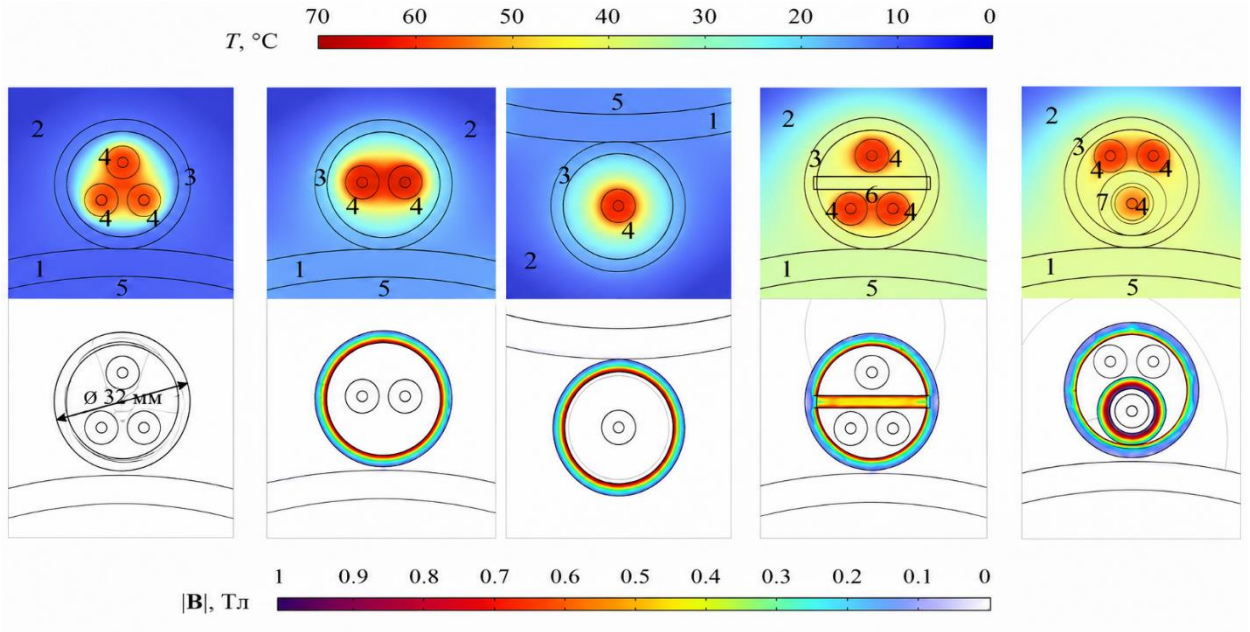
Расчеты для вариантов с несимметричным размещением токопроводящих жил показали существенное изменение структуры

магнитного поля по сравнению с базовой схемой. Как видно из рисунков 3.4.2*б–г*, нарушение пространственной компенсации магнитных полей приводит к появлению локальных областей повышенной магнитной индукции в ферромагнитных элементах конструкции. В результате в стенках закладных элементов возникают вихревые токи и потери на гистерезис, сопровождающиеся дополнительным тепловыделением непосредственно в ферромагнитных элементах системы.

Количественный анализ показал, что для рассмотренных асимметричных схем тепловыделение, обусловленное вихревыми токами, достигает до 36% от уровня Джоулевых потерь в токопроводящих жилах. Дополнительный учет потерь на гистерезис приводит к увеличению тепловыделения в ферромагнитных элементах еще примерно на 25%. В результате суммарное тепловыделение в ферромагнитных элементах системы для исследуемых конструкций достигает порядка 60% от уровня Джоулевых потерь в токопроводящих жилах.

Следует отметить, что выявленный эффект обусловлен не увеличением суммарной подводимой мощности, а изменением пространственного распределения источников тепла внутри системы. В отличие от традиционной схемы резистивного электрообогрева, при которой практически все тепловыделение сосредоточено в токопроводящих жилах, при несимметричном размещении проводников часть мощности переносится в ферромагнитные элементы конструкции, что приводит к снижению тепловой нагрузки на токопроводящие жилы и их изоляцию.

Для оценки влияния перераспределения тепловыделения на температурное состояние элементов системы выполнен анализ температурных полей для различных вариантов размещения токопроводящих жил. Результаты расчетов представлены на рисунке 3.17.



а *б* *в* *г*

Рисунок 3.17 – Типичные температурные (верхний ряд) и магнитные поля (нижний ряд) в круглой стальной закладной (⌀32×3 мм) при различных схемах размещения трехфазных проводников: *а* – три фазы расположены в одной закладной; *б* – две фазы расположены в одной закладной, третья в отдельной (схема «2+1»); *в* – закладная с внутренней стальной перемычкой; *г* – закладная с трубой внутри (труба в трубе). Обозначения на схеме: *1* – надземный трубопровод; *2* – слой тепловой изоляции; *3* – закладной канал; *4* – изолированный проводник (3 шт.); *5* – транспортируемая жидкость; *6* – стальная перегородка; *7* – стальная трубка.

В качестве базового для сравнения принимался вариант отсутствия непосредственного контакта токопроводящих жил со стенкой закладного элемента, при котором наличие воздушного промежутка создает дополнительное тепловое сопротивление и соответствует наиболее неблагоприятным условиям теплоотвода от жил. Такой подход позволяет оценить влияние перераспределения тепловыделения в условиях, близких к наихудшему тепловому режиму токопроводящих жил.

Для симметричной схемы размещения трех токопроводящих жил в одном закладном элементе максимальная температура наблюдается

непосредственно в области расположения проводников. Это обусловлено тем, что основная часть электрической мощности преобразуется в тепло непосредственно в токопроводящих жилах, тогда как тепловыделение в ферромагнитном элементе практически отсутствует.

При переходе к несимметричным схемам размещения токопроводящих жил характер температурного поля изменяется. Появление дополнительных источников тепла в ферромагнитных элементах приводит к более равномерному распределению температуры в области закладного канала и снижению локальной температурной нагрузки на токопроводящие жилы.

Расчеты показали, что перераспределение части тепловыделения из токопроводящих жил в ферромагнитные элементы сопровождается снижением максимальной температуры жил для всех рассмотренных вариантов несимметричного размещения проводников. Результаты расчетов приведены на рисунке 3.18.

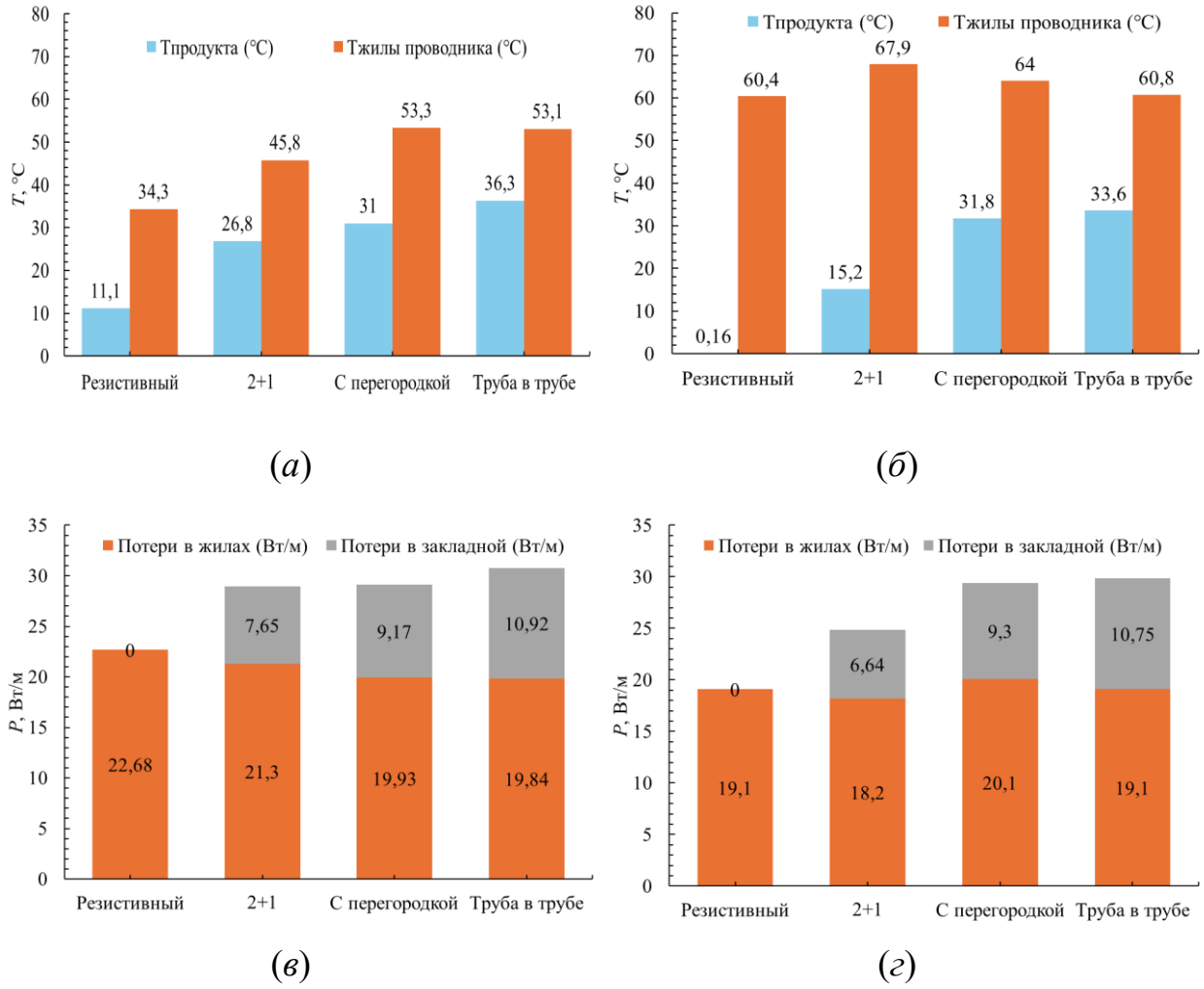


Рисунок 3.18 – (*а, б*) - Максимальная температура жилы и продукта (транспортируемого рабочего тела) и (*в*, *г*) тепловая мощность между элементами системы при различных схемах размещения трехфазных проводников: (*а*, *в*) при наличии теплового контакта с внутренней поверхностью закладной трубы, (*б*, *г*) при его отсутствии.

Для исследуемой конструкции трубопровода с закладным элементом ⌀ 32×3 мм и токопроводящими жилами сечением 6 мм^2 расчетное снижение максимальной температуры жил достигало 10 °С по сравнению с традиционной схемой аразмещения трех фаз в одном закладном элементе. При этом варианты с ферромагнитной перегородкой и конструкцией типа «труба в трубе» также обеспечивают перераспределение тепловыделения между элементами системы и снижение температуры жил, однако характеризуются несколько меньшей эффективностью по сравнению со схемой «2+1».

Сопоставление вариантов с двумя закладными трубами, ферромагнитной перегородкой и конструкцией типа «труба в трубе» показало, что все рассмотренные схемы обеспечивают формирование дополнительного тепловыделения в ферромагнитных элементах. При этом вариант с двумя закладными трубами характеризуется наиболее низкой температурой токопроводящих жил, тогда как использование одной трубы с внутренним разделением позволяет получить сопоставимый эффект при меньшей металлоемкости конструкции.

Для оценки влияния конструктивных параметров ферромагнитного элемента дополнительно исследовалось изменение тепловыделения при различной толщине стенки закладной трубы. В качестве базовой рассматривалась схема размещения жил по принципу «2+1», обеспечивающая наибольшую величину дополнительных электромагнитных потерь. При этом изменялась только толщина стенки закладной трубы, тогда как наружный диаметр, параметры токопроводящих жил, теплотехнические условия и уровень питающего напряжения оставались неизменными.

На рисунке 3.19 представлены зависимости доли тепловыделения в ферромагнитных элементах и относительной металлоемкости конструкции от толщины стенки закладной трубы. За единицу приняты соответствующие значения при толщине стенки 1 мм.

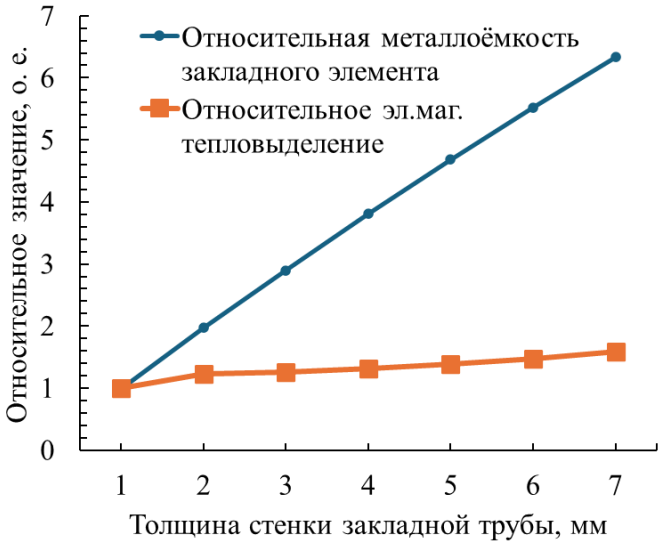


Рисунок 3.19 – Влияние толщины стенки закладной трубы на относительное электромагнитное тепловыделение и относительную металлоемкость закладного элемента для схемы «2+1»

Для описания нелинейных магнитных свойств ферромагнитного материала использовалась модель Джайлса–Атертона [73]. Определение потерь на гистерезис выполнялось с использованием модели Штейнмеца [74], параметры которой принимались по опубликованным экспериментальным данным для конструкционных сталей, применяемых в индукционно-резистивных системах нагрева [31,43,45,46,69,90]. Поскольку самостоятельное определение параметров модели для исследуемых закладных элементов не выполнялось, расчеты потерь на гистерезис носили оценочный характер и использовался преимущественно для сравнительной оценки его вклада в тепловыделение ферромагнитных элементов при изменении исследуемых параметров системы.

Результаты расчетов показывают, что увеличение толщины стенки приводит к росту суммарного тепловыделения в ферромагнитном элементе, обусловленного потерями от вихревых токов и потерями на гистерезис. Вместе с тем прирост суммарного тепловыделения происходит значительно медленнее, чем увеличение объема ферромагнитного материала. Несмотря на увеличение толщины стенки закладной трубы от 1 до 7 мм,

сопровождающееся увеличением объема ферромагнитного материала более чем в 6 раз, суммарное тепловыделение возрастает примерно в 1,6 раза.

Непропорциональный характер полученных зависимостей обусловлен совместным влиянием поверхностного эффекта и нелинейных магнитных свойств ферромагнитного материала. При неизменном наружном диаметре увеличение толщины стенки сопровождается уменьшением внутреннего диаметра закладной трубы и расстояния от токопроводящих жил до ее внутренней поверхности, что при сопоставимой токовой нагрузке приводит к увеличению напряженности магнитного поля в приповерхностной области. Вместе с тем индуцированные токи и электромагнитные потери распределяются по толщине стенки неравномерно вследствие поверхностного эффекта, поэтому дополнительный объем стали при увеличении толщины закладного элемента вовлекается в тепловыделение с меньшей интенсивностью. Кроме того, с увеличением напряженности магнитного поля относительная магнитная проницаемость конструкционной стали достигает максимума, после чего снижается, тогда как удельные потери на перемагничивание выходят на область насыщения [31,43,45,46,69,90]. В результате увеличение толщины и объема ферромагнитного материала не приводит к пропорциональному росту

Полученный результат свидетельствует о снижении эффективности увеличения толщины стенки закладного элемента с точки зрения использования дополнительного объема ферромагнитного материала для формирования тепловыделения. Увеличение толщины стенки от 1 до 7 мм обеспечивает рост суммарного тепловыделения лишь приблизительно в 1,6 раза при увеличении объема стали более чем в 6 раз, что указывает на ограниченную целесообразность повышения металлоемкости закладного элемента только с целью увеличения электромагнитных потерь.

Полученные результаты показывают, что перераспределение тепловыделения между токопроводящими и ферромагнитными элементами определяется двумя группами факторов. Первая группа связана с

конфигурацией размещения токопроводящих жил, определяющей степень компенсации магнитного поля (индуктивным сопротивлением) и, как следствие, величину индуцированных вихревых токов и потерь на гистерезис. Вторая группа обусловлена электрофизическими свойствами и геометрическими параметрами ферромагнитного элемента, определяющими условия формирования вихревых токов, интенсивность процессов перемагничивания и соответствующее распределение тепловыделения.

Сопоставление результатов показывает, что изменение конфигурации размещения токопроводящих жил оказывает значительно более существенное влияние на перераспределение тепловыделения между элементами системы, чем увеличение толщины стенки закладной трубы. Следовательно, наиболее эффективным способом увеличения доли тепловыделения в ферромагнитных элементах является формирование асимметричного магнитного поля за счет рационального размещения токопроводящих жил, тогда как изменение геометрических параметров закладного элемента следует рассматривать как вспомогательный инструмент регулирования распределения тепловыделения и тепловых характеристик системы.

Применение одной закладной трубы с внутренней ферромагнитной перегородкой или конструкции типа «труба в трубе» обеспечивает не только перераспределение тепловыделения между элементами системы, но и уменьшение возможного воздушного зазора между токопроводящими жилами и ферромагнитным элементом. В результате влияние неблагоприятного положения жил оказывается менее выраженным по сравнению со схемой «2+1», использующей две отдельные закладные трубы. Кроме того, применение единого закладного элемента позволяет уменьшить металлоемкость конструкции. Вместе с тем такие решения в меньшей степени соответствуют типовым конструкциям предизолированных трубопроводов и требуют дополнительной оценки технологических аспектов изготовления и монтажа.

Важной особенностью рассматриваемой конструкции является то, что ферромагнитный закладной элемент выполняет двойную функцию. С одной стороны, он является источником дополнительного тепловыделения вследствие возникновения вихревых токов и магнитных потерь, а с другой – служит элементом теплоотвода для токопроводящих жил. Поэтому уменьшение расстояния между жилой и стенкой закладного элемента одновременно способствует повышению доли тепловыделения в ферромагнитном элементе и снижению теплового сопротивления между жилой и окружающими конструкциями. Указанная особенность подтверждает необходимость совместного учета результатов разделов 3.3 и 3.4 при выборе рациональной конструкции системы электрообогрева.

С практической точки зрения перераспределение части тепловыделения из токопроводящих жил в ферромагнитные элементы приводит к снижению температуры наиболее термически нагруженного элемента системы – изоляции нагревательного кабеля. Поскольку именно допустимая температура жил и рабочее напряжение изоляции ограничивают максимальную линейную мощность резистивного электрообогрева, снижение температуры жил создает предпосылки для увеличения допустимой длины плеча электрообогрева без изменения принципиальной схемы электроснабжения.

Показано, что при симметричном размещении трех токопроводящих жил дополнительные электромагнитные потери в ферромагнитных элементах практически отсутствуют, тогда как нарушение пространственной симметрии приводит к возникновению вихревых токов и потерь на гистерезис. Для рассмотренных конструктивных схем тепловыделение, обусловленное вихревыми токами, достигает до 36% от уровня Джоулевых потерь в токопроводящих жилах, а учет гистерезисных потерь увеличивает суммарное тепловыделение в ферромагнитных элементах до порядка 60% от уровня Джоулевых потерь в проводниках.

Установлено, что перераспределение тепловыделения между токопроводящими и ферромагнитными элементами сопровождается

снижением температуры токопроводящих жил. Для исследуемой конструкции трубопровода с закладным элементом ⌀ 32×3 мм и токопроводящими жилами сечением 6 мм^2 расчетное снижение максимальной температуры жил достигало 10 °С по сравнению с другими вариантами традиционной схемой размещения трех фаз в одном закладном элементе. Наибольший эффект обеспечивается схемой «2+1», характеризующейся наиболее выраженным нарушением компенсации магнитного поля. Увеличение толщины стенки ферромагнитного элемента сопровождается ростом дополнительных электромагнитных потерь, однако влияние данного фактора оказывается менее выраженным по сравнению с изменением конфигурации размещения токопроводящих жил.

Таким образом, изменение конфигурации размещения токопроводящих жил позволяет целенаправленно управлять распределением тепловыделения между токопроводящими и ферромагнитными элементами системы, снижать температурную нагрузку на изоляцию жил и создавать предпосылки для увеличения допустимой линейной мощности и максимальной длины плеча резистивного электрообогрева.

3.5 Комплексная оценка конструктивных решений резистивного электрообогрева протяженных трубопроводов

В разделах 3.1–3.4 исследовано влияние отдельных конструктивных, электрических и теплотехнических факторов на работу систем резистивного электрообогрева протяженных трубопроводов. Полученные результаты позволили установить закономерности, определяющие температурный режим элементов системы, допустимую удельную линейную мощность электрообогрева и условия ее реализации. Вместе с тем указанные факторы рассматривались независимо друг от друга, что не позволяет непосредственно определить область рационального применения законченных вариантов исполнения нагревательного узла. В отличие от предыдущих разделов, в настоящем разделе объектом анализа являются не отдельные факторы, а

законченные конструктивные решения, включающие конструкцию нагревательного кабеля, закладного элемента и условия их совместной работы. В связи с этим в настоящем разделе выполнена комплексная сравнительная оценка исследованных конструктивных решений в одинаковых условиях эксплуатации.

Как уже раньше отмечалось, основным показателем, определяющим область рационального применения резистивного электрообогрева протяженных трубопроводов, является максимальная длина плеча электрообогрева. Под плечом электрообогрева понимается максимальная длина участка трубопровода, обеспечиваемая одним источником электроснабжения без промежуточного подключения нагревательного кабеля при соблюдении электрических и температурных ограничений системы. Увеличение плеча обогрева позволяет сократить количество источников электроснабжения. Максимальная длина плеча определяется допустимым рабочим напряжением изоляции нагревательного кабеля, требуемой удельной линейной мощностью и электрическими параметрами нагревательного элемента, зависящими в том числе от его температурного режима. В дальнейшем данный параметр используется в качестве основного критерия оценки эффективности исследуемых конструктивных решений.

Использование только максимальной длины плеча не позволяет в полной мере оценить возможности различных конструкций. Решения, обеспечивающие сопоставимую длину плеча, могут существенно различаться по максимально допустимой удельной линейной мощности и, следовательно, по возможности обеспечения требуемого температурного режима трубопроводов различного диаметра, с различной толщиной тепловой изоляции и в различных условиях эксплуатации. В связи с этим дополнительно использован интегральный показатель потенциальной тепловой производительности одного плеча электрообогрева, определяемый как произведение максимально допустимой удельной линейной мощности на соответствующую максимальную длину плеча. Данный показатель

характеризует максимальную тепловую мощность, которую может обеспечить одно плечо при соблюдении температурных и электрических ограничений.

Для обоснования выбранных показателей эффективности выполнен анализ взаимосвязи исследованных факторов и эксплуатационных ограничений системы электрообогрева. Схема формирования показателей эффективности представлена на рисунке 3.20.

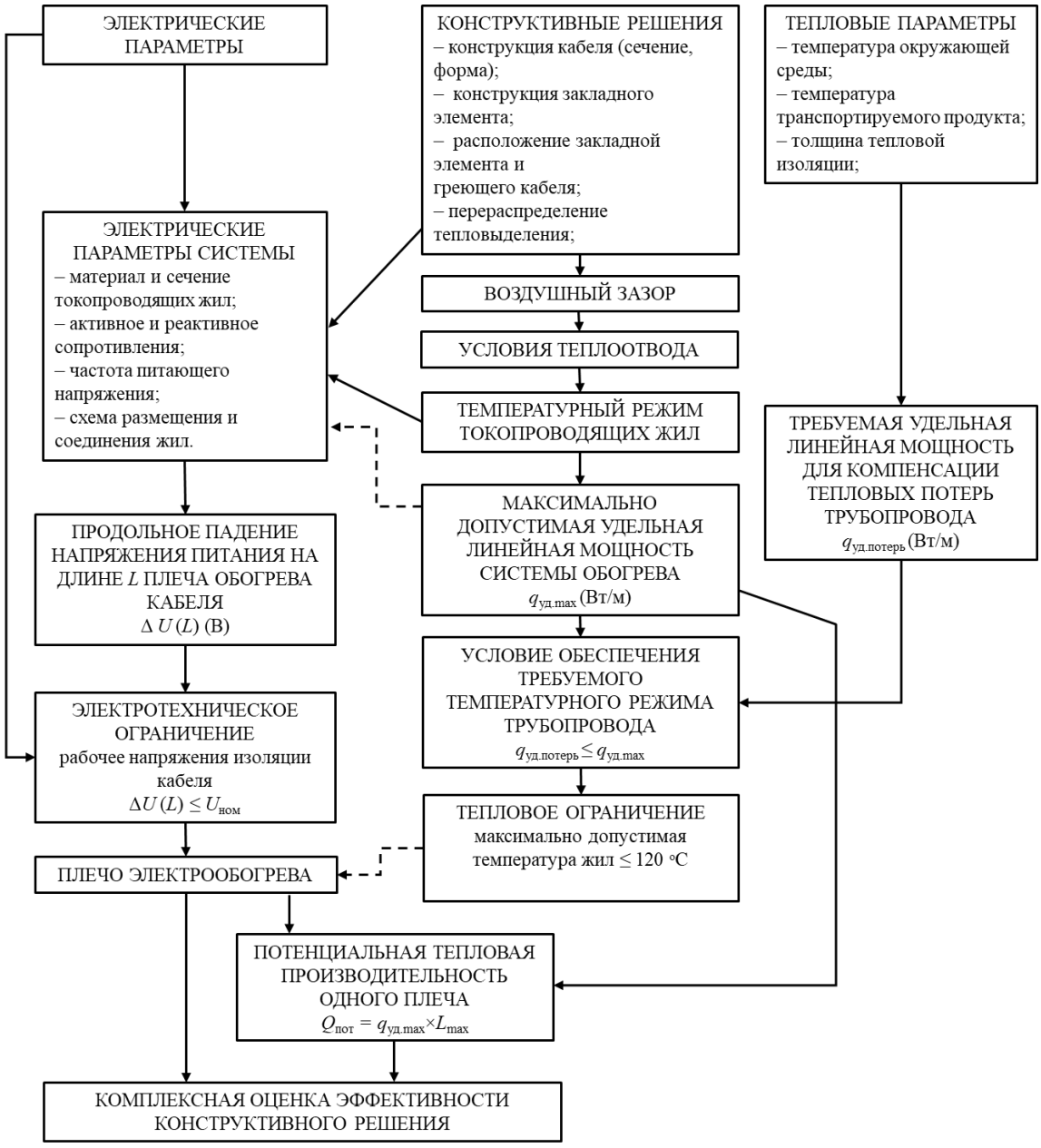


Рисунок 3.20 – Взаимосвязь тепловых, конструктивных и электрических факторов при формировании показателей эффективности резистивного электрообогрева трубопроводов

На рисунке 3.20 показано, что конструктивные, тепловые и электрические факторы оказывают влияние на эффективность системы через изменение температурного режима токопроводящих жил и допустимого рабочего напряжения изоляции нагревательного кабеля. Это обусловило выбор максимальной длины плеча электрообогрева и потенциальной тепловой производительности одного плеча в качестве основных показателей эффективности конструктивных решений. Конструктивные, тепловые и электрические факторы оказывают влияние на эффективность системы через изменение температурного режима токопроводящих жил и допустимого рабочего напряжения изоляции нагревательного кабеля. Это обусловило выбор максимальной длины плеча электрообогрева и потенциальной тепловой производительности одного плеча в качестве основных показателей эффективности конструктивных решений. Для обеспечения сопоставимости результатов все конструктивные решения исследовались при одинаковых параметрах трубопровода и внешних условиях. Температура транспортируемого продукта, температура окружающего воздуха, толщина тепловой изоляции и расположение закладного элемента относительно трубопровода принимались неизменными, поскольку влияние указанных факторов подробно исследовано в разделе 3.2. Принятые исходные условия сравнительной оценки приведены в таблице 3.9.

Таблица 3.9 – Исходные условия сравнительной оценки конструктивных решений

Параметр	Значение
Температура транспортируемого продукта	10 °C
Температура окружающего воздуха	−60 °C
Толщина тепловой изоляции	100 мм
Расположение закладного элемента	Верхняя образующая трубопровода
Тип трубопровода	Стальной надземный
Наружный диаметр трубопровода	273 мм
Толщина стенки трубопровода	7 мм
Коэффициент теплоотдачи от наружной поверхности	35 Вт/(м^2·°C)
Режим движения продукта	Отсутствие продольного движения (естественная конвекция)
Максимально допустимая температура жил кабеля	120 °C
Частота питающего напряжения	50 Гц

Во всех расчетах закладной элемент располагался в верхней части трубопровода. Такое расположение принято постоянным для всех рассматриваемых вариантов, поскольку влияние положения закладной подробно исследовано в разделе 3.2 и в настоящем разделе не является предметом сравнения.

В качестве базового решения принят серийный плоский греющий кабель LLS 3×6 мм^2, установленный непосредственно на поверхности трубопровода без закладного элемента. Такое исполнение обеспечивает контролируемый непрерывный тепловой контакт кабеля с трубопроводом и не содержит

дополнительного теплового сопротивления, обусловленного закладным элементом и воздушным зазором. Остальные варианты сформированы с сохранением параметров жил, но с последовательным изменением конструкции кабеля, способа его размещения и конструкции закладного элемента. Перечень рассматриваемых решений приведен в таблице 3.10.

Таблица 3.10 – Конструктивные решения, принятые для сравнительной оценки эффективности резистивного электрообогрева

№	Конструктивное решение
1	Плоский греющий кабель LLS 3×6 мм^2, установленный непосредственно на поверхности трубопровода без закладного элемента (базовый вариант)
2	Плоский бронированный кабель 3×6 мм^2, установленный непосредственно на поверхности трубопровода без закладного элемента
3	Круглый бронированный кабель 3×6 мм^2, установленный непосредственно на поверхности трубопровода без закладного элемента
4	Плоский греющий кабель LLS 3×6 мм^2, размещенный в круглом закладном элементе
5	Плоский бронированный кабель 3×6 мм^2, размещенный в круглом закладном элементе
6	Круглый бронированный кабель 3×6 мм^2, размещенный в круглом закладном элементе
7	Серийный плоский греющий кабель LLS 3×6 мм^2, размещенный в угловом закладном элементе
8	Плоский бронированный кабель 3×6 мм^2, размещенный в угловом закладном элементе
9	Круглый бронированный кабель 3×6 мм^2, размещенный в угловом закладном элементе

№	Конструктивное решение
10	Трехфазная система с распределением токопроводящих жил между двумя круглыми закладными элементами по схеме «2+1»

Конструкции с прямоугольным закладным элементом в дальнейшую сравнительную оценку не включались, поскольку результаты раздела 3.3 не выявили их явных преимуществ по сравнению с круглыми и угловыми закладными элементами. Вариант по схеме «2+1» рассмотрен отдельно как конструкция, в которой вследствие несимметричного размещения токопроводящих жил формируются дополнительные электромагнитные потери в стальных закладных элементах и изменяется распределение тепловыделения между элементами системы. Для оценки исследуемых конструктивных решений использованы два взаимодополняющих критерия, учитывающих различные ограничения системы электрообогрева. Первый критерий характеризует максимальную длину плеча, обеспечивающего поддержание требуемой температуры транспортируемого продукта, второй – предельную тепловую производительность одного плеча при ограничении температуры токопроводящих жил. Схема сравнительной оценки представлена на рисунке 3.21.

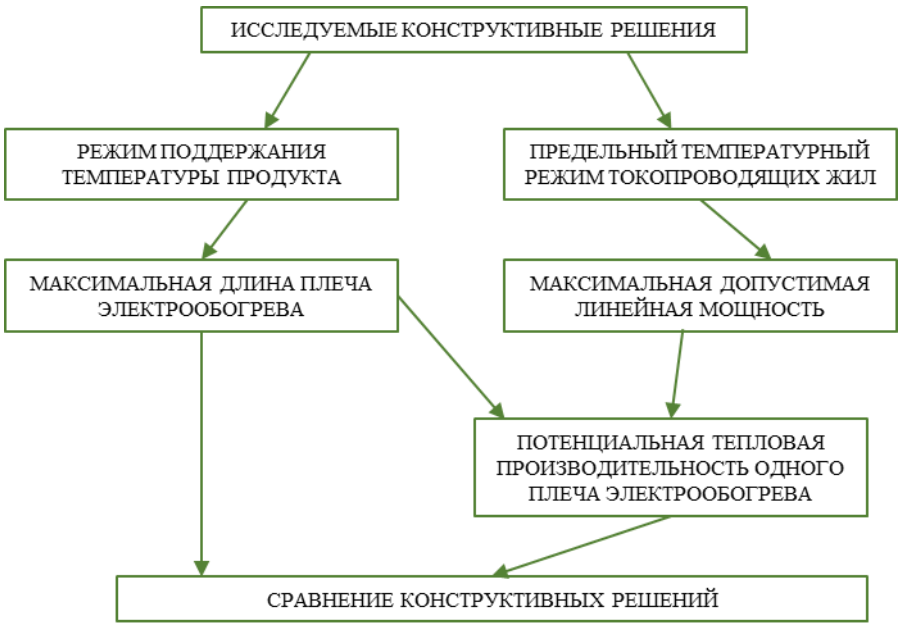


Рисунок 3.21 – Схема сравнительной оценки конструктивных решений резистивного электрообогрева

При оценке по первому критерию для каждого конструктивного решения определялась максимальная длина плеча электрообогрева, обеспечивающая поддержание температуры транспортируемого продукта на уровне 10 °C при заданных внешних условиях. Требуемая удельная линейная мощность задавалась тепловыми потерями трубопровода. По рассчитанному продольному падению напряжения и допустимому рабочему напряжению изоляции соответствующего кабеля определялась максимальная длина одного плеча. Полученный показатель характеризует протяженность трубопровода, на которой один источник электроснабжения способен обеспечить заданный температурный режим продукта.

При оценке по второму критерию определялись предельные энергетические возможности каждого конструктивного решения. Ограничением являлась максимально допустимая температура токопроводящих жил, равная 120 °C. Для каждого варианта рассчитывались максимально допустимая удельная линейная мощность, соответствующая ей максимальная длина плеча и потенциальная тепловая производительность одного плеча. Последний показатель использовался как интегральная

характеристика, учитывающая одновременно температурное и электрическое ограничения системы.

При определении предельных параметров учитывалось, что положение кабеля внутри закладного элемента не может надежно контролироваться по всей длине трубопровода. Поэтому для каждого варианта первоначально определялся наиболее неблагоприятный режим работы конструкции, соответствующий максимальной допустимой температуре токопроводящих жил. Для кабелей, размещенных в закладных элементах, такой режим формировался при отсутствии непосредственного контакта кабеля со стенкой и максимальном воздушном зазоре, ухудшающем теплоотвод от токопроводящих жил. Для системы по схеме «2+1» дополнительно учитывалось взаимное тепловое и электромагнитное влияние двух жил, расположенных в одном закладном элементе.

В наиболее неблагоприятном режиме последовательно увеличивалось напряжение источника электроснабжения до достижения токопроводящей жилой температуры 120 °С. Полученное значение принималось в качестве предельно допустимого для рассматриваемой конструкции. Такой подход позволяет определить работоспособность всей системы по участку с наихудшими условиями теплоотвода и исключить превышение допустимой температуры изоляции при случайном изменении положения кабеля внутри закладного элемента.

После определения предельно допустимого напряжения выполнялся расчет наиболее вероятного эксплуатационного положения кабеля, при котором он соприкасается со стенкой закладного элемента. Напряжение источника при этом сохранялось равным значению, полученному для наиболее неблагоприятного режима. По результатам расчета определялись фактически реализуемая удельная линейная мощность системы и электрические параметры нагревательного элемента. Максимальная длина плеча устанавливалась с учетом допустимого рабочего напряжения изоляции применяемого кабеля.

Для вариантов с непосредственным размещением кабеля на поверхности трубопровода отдельное рассмотрение случайного положения не требовалось, поскольку тепловой контакт кабеля с трубой является заданным и контролируемым. Их предельные параметры определялись непосредственно по достижению максимально допустимой температуры токопроводящих жил либо допустимого рабочего напряжения изоляции кабеля в зависимости от того, какое из ограничений наступало раньше.

Таким образом, предельный режим каждого конструктивного решения определялся совместным действием двух ограничений. Электрическое ограничение задавалось допустимым рабочим напряжением изоляции нагревательного кабеля, а тепловое – максимально допустимой температурой токопроводящих жил. Если первым достигалось допустимое напряжение изоляции, дальнейшее увеличение длины плеча становилось невозможным независимо от имеющегося температурного запаса. Если определяющим являлось температурное ограничение, предельные параметры системы зависели прежде всего от условий теплоотвода от токопроводящих жил и распределения тепловыделения между элементами конструкции.

Потенциальная тепловая производительность одного плеча определялась по выражению

$$Q_{\text{пот}}=q_{\text{уд,max}}\times L_{\text{max}}, \qquad (29)$$

где $Q_{\text{пот}}$ – потенциальная тепловая производительность одного плеча, Вт; $q_{\text{л,max}}$ – максимально допустимая удельная линейная мощность системы, Вт/м; L_{max} – соответствующая максимальная длина плеча электрообогрева, м.

Введенный показатель объединяет температурные и электрические ограничения системы. Его увеличение может быть обеспечено как повышением допустимой удельной линейной мощности за счет улучшения теплоотвода от токопроводящих жил, так и увеличением длины плеча вследствие применения кабеля с более высоким допустимым рабочим напряжением изоляции. Совместное рассмотрение максимальной длины плеча и его потенциальной тепловой производительности позволяет установить не

только относительное преимущество отдельных конструкций, но и причины, ограничивающие область их рационального применения.

Результаты сравнительной оценки конструктивных решений по максимальной длине плеча электрообогрева при поддержании температуры транспортируемого продукта 10 °С представлены на рисунке 3.22.

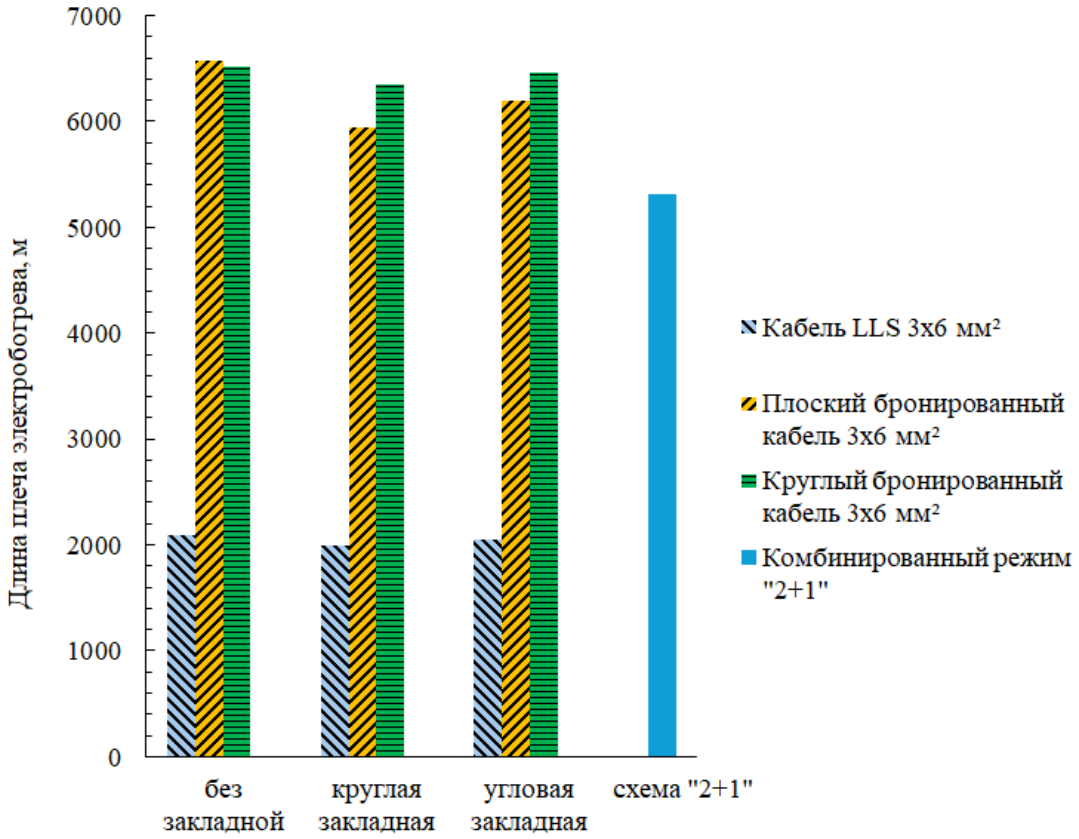


Рисунок 3.22 – Максимальная длина плеча электрообогрева для различных конструктивных решений при поддержании температуры продукта 10 °С

За базовый принят вариант с серийным плоским греющим кабелем LLS 3×6 мм^2, установленным непосредственно на поверхности трубопровода. Данное решение характеризуется наиболее благоприятными условиями передачи теплоты от нагревательного кабеля к трубопроводу, однако допустимое рабочее напряжение изоляции кабеля ограничивает максимальную протяженность одного плеча электрообогрева.

Замена серийного кабеля LLS на бронированные кабели с повышенным допустимым рабочим напряжением приводит к увеличению длины плеча даже

при неизменных условиях теплоотвода. Полученный результат показывает, что при решении задачи поддержания заданной температуры продукта определяющее влияние на протяженность плеча оказывает допустимое рабочее напряжение изоляции кабеля. Различия между плоским и круглым бронированными кабелями при их непосредственном размещении на поверхности трубопровода обусловлены их электрическими параметрами и особенностями теплопередачи, однако являются менее значительными, чем различия между бронированными кабелями и серийным кабелем LLS.

Размещение кабелей в закладных элементах сопровождается появлением дополнительного теплового сопротивления, обусловленного воздушным зазором и промежуточной стальной конструкцией. Для обеспечения той же температуры продукта требуется увеличение тока и напряжения источника электроснабжения, вследствие чего максимальная длина плеча уменьшается относительно вариантов с непосредственным размещением соответствующих кабелей на поверхности трубопровода.

Степень снижения длины плеча зависит от сочетания формы кабеля и конструкции закладного элемента. Плоские кабели более чувствительны к изменению положения внутри закладной, поскольку величина воздушного зазора и площадь контакта существенно различаются для их отдельных положений. Круглый бронированный кабель характеризуется меньшим изменением условий теплоотвода при изменении пространственного положения и поэтому обеспечивает более устойчивые показатели в круглых и угловых закладных элементах.

Круглая закладная обеспечивает возможность прокладки кабелей различных производителей и наружных размеров, однако ее внутренний диаметр должен выбираться с учетом двух противоположных требований. С одной стороны, зазор должен быть достаточным для прокладки кабеля на значительную длину и компенсации допусков его наружных размеров. С другой стороны, чрезмерное увеличение зазора ухудшает теплоотвод и сокращает допустимую длину плеча. Сочетание круглого бронированного

кабеля и круглого закладного элемента является наиболее универсальным из рассмотренных решений, поскольку обеспечивает меньшую зависимость температурного режима от случайного положения кабеля при сохранении возможности его протяжки и замены.

Угловой закладной элемент создает более благоприятные условия для контакта плоского кабеля с металлической поверхностью при его вероятном эксплуатационном положении. Вместе с тем при отклонении кабеля от данного положения величина воздушного зазора увеличивается, поэтому предельные параметры конструкции должны определяться по наиболее неблагоприятному режиму, а не по положению с максимальной площадью контакта.

Применение схемы «2+1» не обеспечило увеличения длины плеча по сравнению с соответствующими чисто резистивными конструкциями. Формирование дополнительных потерь в стальных закладных элементах сопровождалось увеличением полного сопротивления системы вследствие электромагнитного взаимодействия токопроводящих жил. В результате для обеспечения требуемого тока, необходимого для поддержания температуры продукта 10 °C, потребовалось более высокое напряжение источника электроснабжения. Полученный эффект частично компенсировал преимущество, связанное с перераспределением тепловыделения из токопроводящих жил в стальные элементы.

Таким образом, при заданной температуре продукта увеличение длины плеча обеспечивается прежде всего применением нагревательных кабелей с повышенным допустимым рабочим напряжением изоляции. Конструкция закладного элемента оказывает вторичное, но существенное влияние, поскольку определяет требуемые ток и напряжение через условия теплоотвода от кабеля. Перераспределение тепловыделения само по себе не гарантирует увеличения длины плеча, если оно сопровождается ростом реактивной составляющей сопротивления и требуемого напряжения питания.

Результаты определения максимально допустимой удельной линейной мощности и потенциальной тепловой производительности одного плеча представлены на рисунках 3.23. и 3.24.

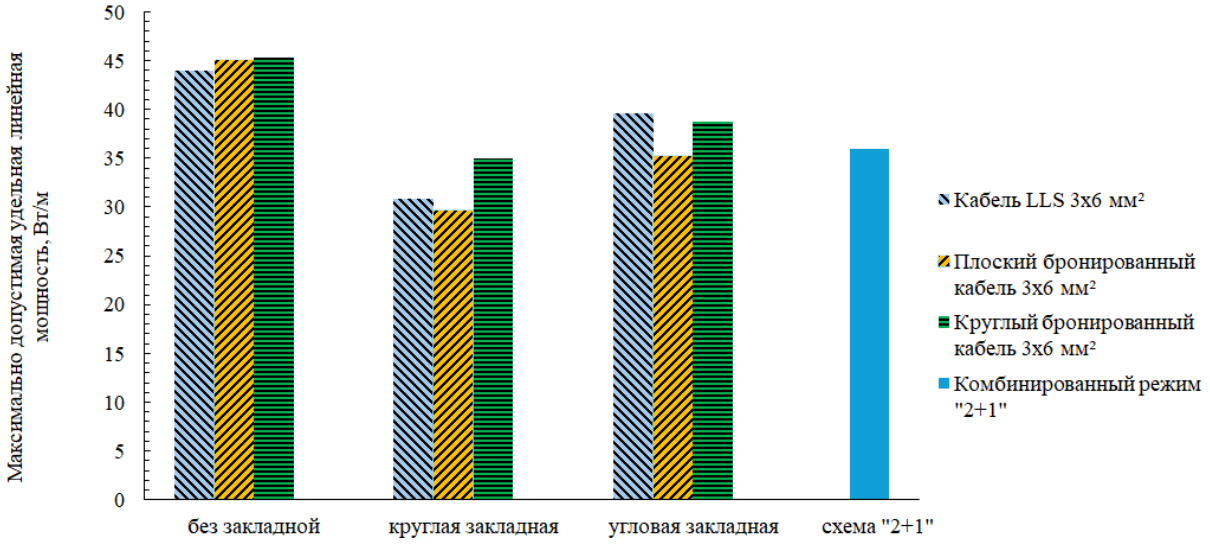


Рисунок 3.23 – Максимально допустимая удельная линейная мощность для различных конструктивных решений при температуре жилы 120 °С

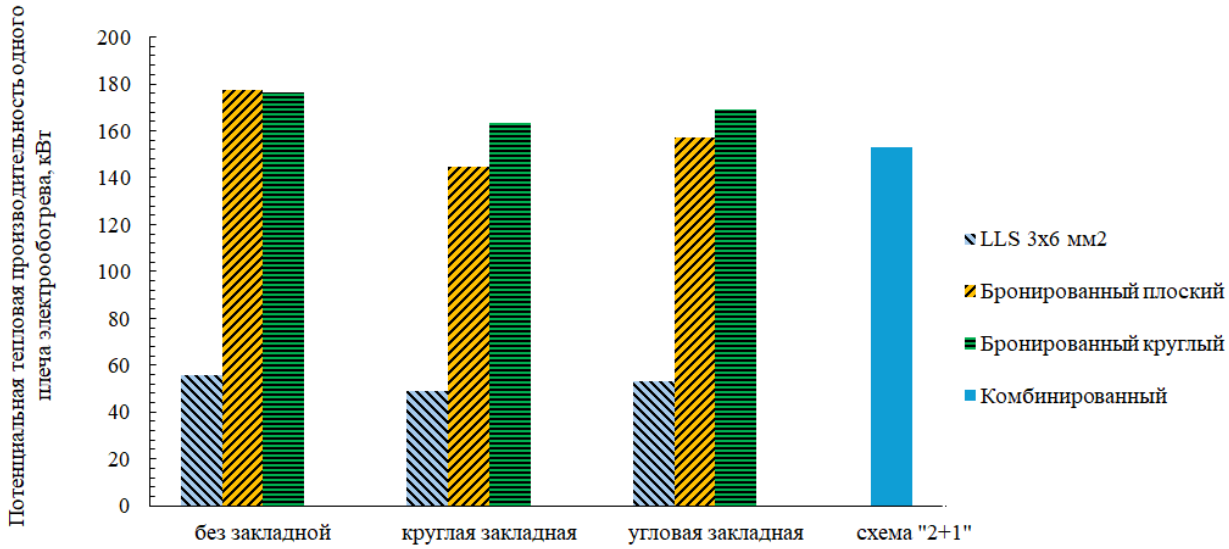


Рисунок 3.24 – Потенциальная тепловая производительность одного плеча электрообогрева для различных конструктивных решений исходя из максимально допустимой удельной линейно мощности

Анализ потенциальной тепловой производительности одного плеча показывает, что максимальный эффект достигается только при

одновременном обеспечении высокой допустимой линейной мощности и большой длины плеча. Преимущество одного из указанных факторов не компенсирует недостаточность другого. Следовательно, повышение эффективности конструктивного решения требует согласованного совершенствования как тепловых, так и электрических характеристик системы.

В отличие от предыдущего режима, в котором удельная линейная мощность задавалась тепловыми потерями трубопровода, при оценке предельных возможностей она определялась температурной стойкостью нагревательного кабеля. Поэтому результаты данного расчета характеризуют способность различных конструкций отводить теплоту от токопроводящих жил и реализовывать повышенную мощность без превышения температуры 120 °C.

Наибольшую допустимую удельную линейную мощность обеспечивают конструкции с непосредственным и устойчивым тепловым контактом кабеля с трубопроводом либо со стенкой закладного элемента. Наличие воздушного зазора уменьшает тепловой поток от жил к трубопроводу и приводит к более раннему достижению предельной температуры изоляции. В результате даже применение кабеля с повышенным рабочим напряжением не обеспечивает полного использования его электрических возможностей, если температурное ограничение достигается раньше ограничения по напряжению.

Форма кабеля влияет не только на абсолютное значение допустимой мощности, но и на устойчивость конструкции к изменению положения внутри закладной. Для плоских кабелей различие между благоприятным и неблагоприятным положениями выражено сильнее, поскольку изменение ориентации сопровождается существенным изменением площади контакта и максимального воздушного зазора. Для круглого кабеля изменение условий теплоотвода происходит в меньшем диапазоне, что снижает вероятность локального перегрева и позволяет более полно использовать допустимое рабочее напряжение изоляции.

При оценке системы по схеме «2+1» предельный режим определялся двумя жилами, размещенными в одном закладном элементе. В наиболее неблагоприятном положении они находились в центральной части закладной, соприкасались между собой и были удалены от ее стенок. Взаимный нагрев жил в сочетании с увеличенным воздушным зазором ухудшал теплоотвод и приводил к достижению температуры 120 °С при меньшей мощности, чем ожидалось исходя только из перераспределения части тепловыделения в стальные элементы. Следовательно, отсутствие итогового преимущества схемы «2+1» не опровергает возможность использования дополнительных электромагнитных потерь для снижения тепловой нагрузки токопроводящих жил. Полученный результат показывает, что положительный эффект перераспределения тепловыделения может быть реализован только при одновременном обеспечении эффективного теплоотвода от всех жил. Если конструктивная схема создает локальные участки с увеличенным воздушным зазором или взаимным нагревом проводников, именно они становятся определяющими для предельного режима всей системы.

Потенциальная тепловая производительность одного плеча зависит одновременно от допустимой удельной линейной мощности и максимальной длины плеча. Поэтому конструкция, обеспечивающая высокую линейную мощность, не обязательно имеет наибольшую потенциальную производительность, если ее длина ограничена низким допустимым напряжением изоляции. Аналогично применение высоковольтного кабеля не обеспечивает максимального результата при неудовлетворительных условиях теплоотвода, ограничивающих допустимую мощность.

Сопоставление полученных результатов показывает, что увеличение потенциальной тепловой производительности требует согласования электрических и тепловых параметров нагревательного узла. Электрический резерв создается повышением допустимого рабочего напряжения кабеля, а тепловой – уменьшением сопротивления теплопередаче между токопроводящими жилами и трубопроводом. Преимущество конструктивного

решения реализуется только в том случае, если ни одно из указанных ограничений не препятствует использованию другого.

Выполненная сравнительная оценка показала, что область рационального применения конструктивных решений резистивного электрообогрева определяется совместным действием тепловых и электрических ограничений. Требуемая удельная линейная мощность задается тепловыми потерями трубопровода, тогда как возможность ее реализации ограничивается температурным режимом токопроводящих жил. Максимальная длина плеча дополнительно зависит от допустимого рабочего напряжения изоляции и продольного полного сопротивления нагревательного элемента.

Влияние исследованных факторов на конечные показатели системы реализуется через различные физические механизмы. Толщина тепловой изоляции изменяет требуемую мощность компенсации тепловых потерь. Конструкция кабеля, величина воздушного зазора и форма закладного элемента определяют условия теплоотвода от токопроводящих жил. Дополнительные электромагнитные потери изменяют распределение тепловыделения между токопроводящими и ферромагнитными элементами, но одновременно могут увеличивать полное сопротивление системы. Допустимое рабочее напряжение изоляции определяет возможность использования полученного теплового резерва для увеличения длины плеча.

Следовательно, повышение эффективности конструктивных решений должно обеспечиваться согласованным изменением конструкции нагревательного кабеля, закладного элемента, условий теплоотвода и электрических параметров системы.

Выполненная комплексная оценка позволила установить влияние конструктивных, электрических и теплотехнических факторов на предельные параметры систем резистивного электрообогрева, определить область рационального применения рассмотренных конструктивных решений и выявить факторы, ограничивающие их дальнейшее совершенствование.

Полученные результаты послужили основой для формулирования требований к экспериментальной проверке установленных закономерностей и разработке новых конструктивных решений.

Вместе с тем существующая экспериментальная установка не обеспечивает возможности комплексного анализа широкого диапазона конструктивных решений, рассмотренных в настоящей главе. В связи с этим возникает необходимость разработки специализированного испытательного комплекса, предназначенного для верификации результатов математического моделирования, экспериментальной проверки предложенных технических решений, обеспечивающей возможность воспроизведения различных способов электрообогрева, изменения конструктивных параметров системы и комплексной регистрации тепловых и электрических характеристик в единой экспериментальной постановке. Разработка такого комплекса рассмотрена в следующем разделе.

3.6 Разработка лабораторно-испытательного комплекса для анализа предложенных технических решений в разномасштабных системах электрообогрева трубопроводов

Для верификации результатов численного моделирования, разномасштабной апробации технических решений систем электрообогрева трубопроводов и проведения дальнейших исследований взаимосвязанных тепловых, гидравлических и электромагнитных процессов разработан лабораторно-испытательный комплекс (рисунке 3.25, таблице 3.11). При его разработке предусматривалась возможность реализации резистивного, поверхностного, индукционного и комбинированного способов электрообогрева, изменения конструктивного исполнения исследуемой системы и последующей модернизации комплекса. В состав лабораторно-испытательного комплекса входят исследовательский участок, предназначенный для экспериментальной проверки результатов настоящей

работы, а также демонстрационные участки, предназначенные для анализа существующих способов электрообогрева трубопроводов и использования комплекса в учебных целях. В настоящем разделе основное внимание уделено исследовательскому участку, поскольку его конструкция обеспечивает экспериментальную проверку результатов, полученных в разделах 3.2–3.5.

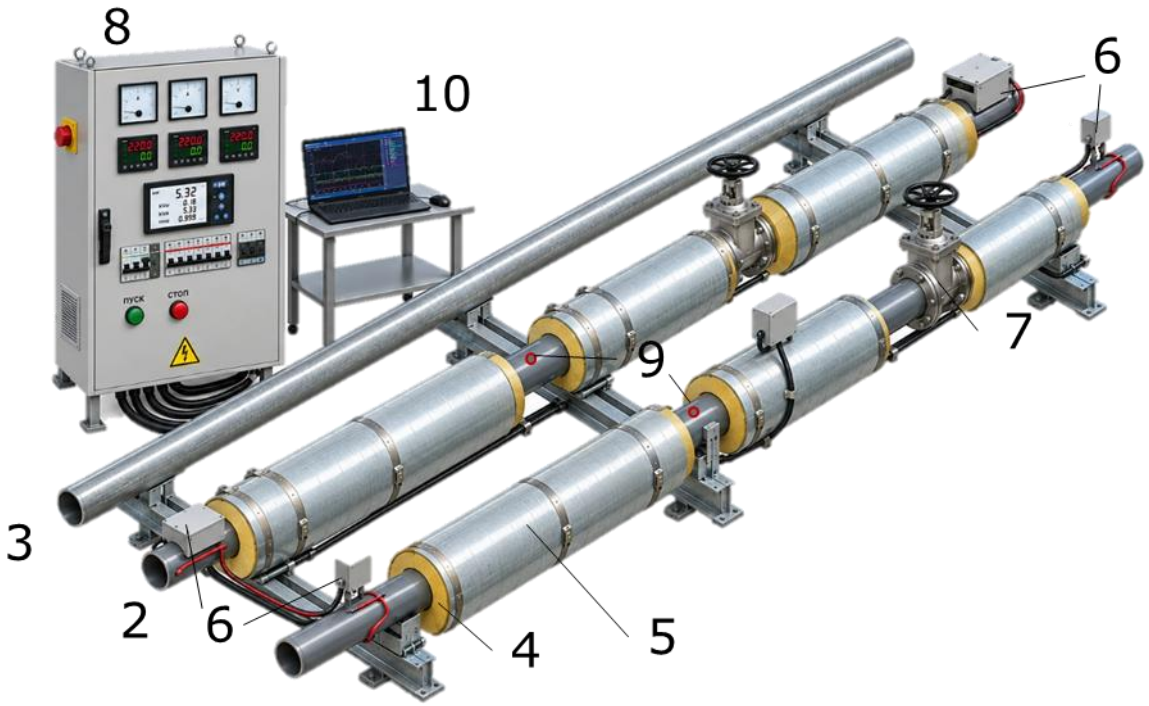


Рисунок 3.25 – Общий вид лабораторно-испытательного комплекса

Обозначения на схеме: *1* - демонстрационный участок с резистивным обогревом; *2* - демонстрационный участок с индукционным и поверхностным обогревом; *3* - экспериментальный участок трубы резистивного, индукционного и поверхностного электрообогрева; *4* - тепловая изоляция; *5* - защитный кожух; *6* - клеммная коробка; *7* - запорная арматура; *8* - источник электроснабжения и измерительными приборами; *9* – термопара; *10* - система измерения и регистрации данных.

Таблица 3.11 – Основные количественные характеристики комплекса

Параметр	Значение
Длина испытательного участка трубопровода, м	6
Диаметр и толщина стенки трубопровода, мм	273×5
Диаметр и толщина стенки трубчатых закладных, мм	25×3, 32×3, 36×3, 45×5
Тип труб и марка стали трубчатых закладных	холоднодеформированные, горячедеформированные, электросварные, водогазопроводные; стали 10, 20, Ст3
Размеры угловых закладных, мм	32×32×3 40×40×3
Толщина тепловой изоляции, мм	20-120
Сечение изолированных медных проводников, мм^2	1×6, 1×10, 1×16
Сечение греющих кабелей, мм^2	3×6, 3×10
Напряжение питания, В	220/380
Частота сети, Гц	50
Максимальный ток, А	150
Максимальная мощность, Вт	2000
Диапазон измерения температуры, °С	- 15 до 150
Интервал регистрации, ч	24

Исследовательский модуль выполнен на основе горизонтального участка стального трубопровода, закрепленного на металлической раме. На наружной поверхности трубопровода устанавливаются сменные трубчатые и

профильные закладные элементы, внутри или снаружи которых размещаются нагревательные кабели и изолированные токопроводящие проводники. Такое конструктивное исполнение позволяет изменять форму, размеры, материал и положение элементов системы электрообогрева без демонтажа основного трубопровода.

В состав лабораторно-испытательного комплекса входят:

1. Испытательный трубопровод с прямолинейным участком стальной трубы наружным диаметром 273 мм и толщиной стенки 5 мм, опорной металлической рамой, присоединительными и концевыми элементами.
2. Система сменных закладных элементов, включающая стальные трубы и профильные конструкции различной формы, размеров, толщины стенки, марки стали и технологии изготовления. Конструкция креплений предусматривает замену закладных элементов без демонтажа основного трубопровода.
3. Комплект нагревательных элементов, включающий плоские и круглые резистивные греющие кабели, бронированные и небронированные кабели, а также изолированные токопроводящие жилы для реализации поверхностного, индукционного и комбинированного способов электрообогрева.
4. Устройства фиксации и позиционирования проводников, обеспечивающие изменение положения кабеля или токопроводящих жил внутри закладного элемента, формирование заданного воздушного зазора, симметричное и асимметричное расположение фаз, включая схему «2+1», а также размещение проводников в конструкциях с перегородкой и типа «труба в трубе».
5. Система сменной тепловой изоляции, обеспечивающая исследование участков без изоляции и с теплоизоляционным слоем различной толщины, а также снижение влияния торцевого теплообмена.
6. Система электропитания и регулирования, включающая регулируемые автотрансформаторы, понижающие однофазные трансформаторы,

коммутационные аппараты защиты и управления. Система обеспечивает регулирование напряжения, тока и продолжительности подачи электрической мощности.

7. Система измерения электрических параметров, включающая трансформаторы тока, токовые шунты, амперметры, вольтметры, ваттметры, осциллограф и микромиллиомметр. Система предназначена для измерения токов, напряжений, активной, реактивной и полной мощности, коэффициента мощности, фазовых соотношений и электрического сопротивления элементов.
8. Система температурного контроля, включающая контактные датчики температуры, многоканальный измерительный блок и средства тепловизионного контроля. Датчики устанавливаются на поверхности трубопровода, закладных элементов, нагревательных кабелей, внутри закладных каналов, поверхности обогреваемой трубы, а также в рабочей среде.
9. Информационно-измерительная система, обеспечивающая синхронизацию измерительных каналов, визуализацию текущих параметров, запись временных зависимостей и архивирование экспериментальных данных.

Лабораторно-испытательный комплекс построен по модульному принципу и включает подсистемы электропитания и управления, испытательную подсистему, подсистему формирования гидравлических режимов, измерительную подсистему и информационно-управляющую подсистему. Такая структура обеспечивает проведение комплексных исследований электрических, электромагнитных, тепловых и гидродинамических процессов, а также синхронную регистрацию экспериментальных данных. Структурно-функциональная схема лабораторно-испытательного комплекса приведена на рисунке 3.26.

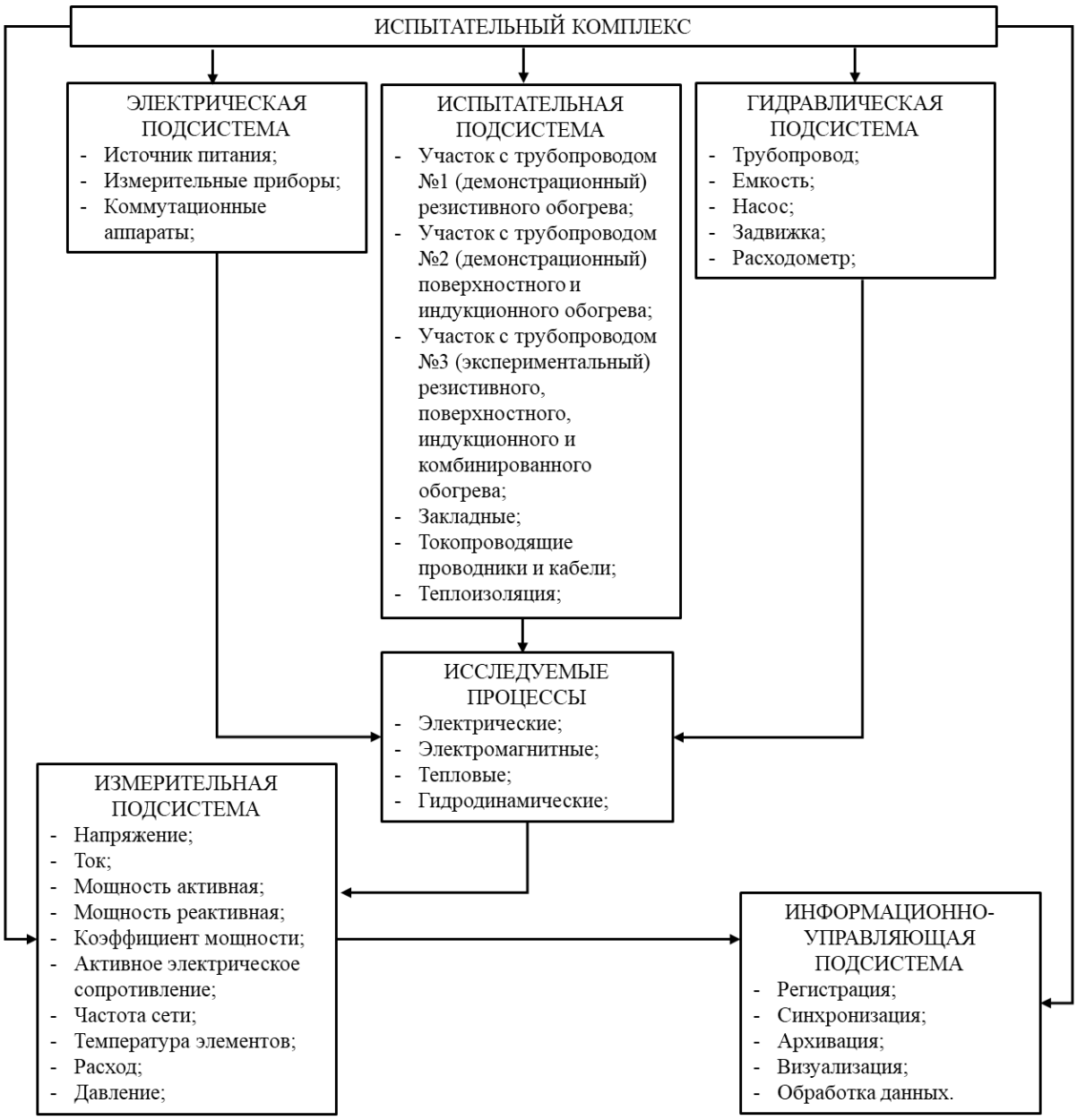


Рисунок 3.26 – Структурно-функциональная схема лабораторно-испытательного комплекса

Модульная архитектура комплекса позволяет независимо варьировать конструктивные и режимные параметры исследуемой системы без существенного изменения остальных элементов экспериментальной установки.

В состав испытательной подсистемы входят три взаимосвязанных участка трубопровода. Первый предназначен для исследований резистивного способа электрообогрева, второй – поверхностного и индукционного

способов, третий представляет исследовательский модуль, обеспечивающий экспериментальную проверку предложенных в настоящей работе технических решений, включая резистивный, поверхностный, индукционный и комбинированный способы электрообогрева.

Испытательная подсистема предназначена для воспроизведения конструктивных и теплотехнических условий работы систем электрообогрева трубопроводов. Подсистема электропитания и управления обеспечивает формирование однофазных и трехфазных режимов электропитания, регулирование напряжения и тока, а также реализацию резистивного, поверхностного, индукционного и комбинированного способов электрообогрева. Измерительная подсистема предназначена для синхронной регистрации электрических, тепловых параметров, а информационно-управляющая подсистема – для визуализации, архивирования и последующей обработки экспериментальных данных.

Архитектура испытательного комплекса также предусматривает возможность дальнейшей модернизации для реализации различных гидравлических режимов работы трубопровода, включая исследования при заполненном и незаполненном трубопроводе, а также моделирование режимов циркуляции и остановки транспортируемой среды. Это позволит расширить область применения комплекса и проводить исследования взаимосвязанных тепловых, гидравлических и электрических процессов в условиях, приближенных к эксплуатационным.

В зависимости от исследуемого способа электрообогрева конструкция исследовательского модуля обеспечивает возможность реализации различных схем размещения нагревательных элементов и их электрического подключения. При этом сохраняются неизменными основные конструктивные элементы установки – обогреваемый трубопровод, система тепловой изоляции, измерительная аппаратура и средства регистрации параметров, тогда как изменяются конструкция закладного элемента, тип нагревательного элемента и схема его электрического подключения. Структурные схемы

исследовательского модуля для резистивного, поверхностного и индукционного способов электрообогрева представлены на рисунках 3.27–3.29. Комбинированный способ не требует принципиального изменения конструкции исследовательского модуля и отличается только схемой электрического подключения и расположением проводников внутри закладных элементов, его отдельная структурная схема не приводится.

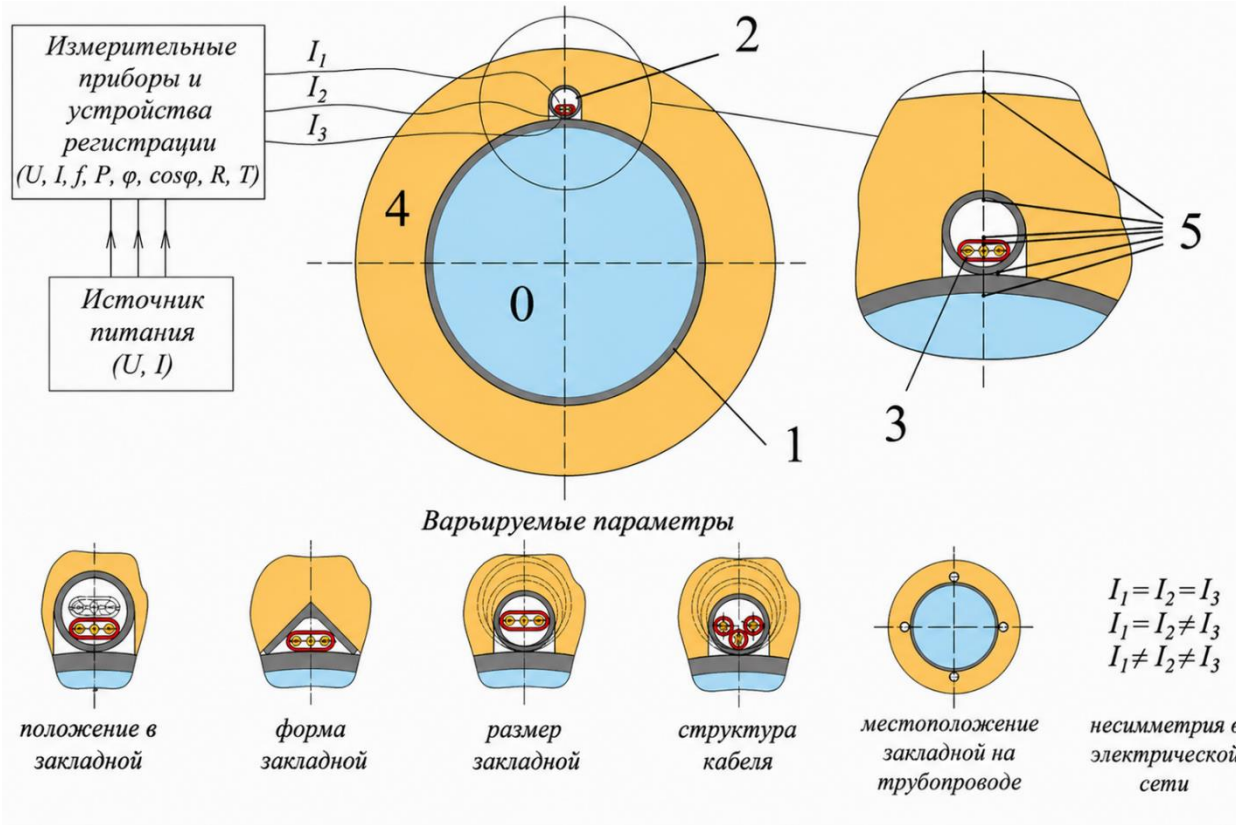


Рисунок 3.27 – Структурная схема экспериментального участка для реализации резистивного и комбинированного способов электрообогрева . Обозначения на схеме: *0* – продукт в трубе; *1* – обогреваемая стальная труба; *2* – закладная труба; *3* – резистивный кабель; *4* – тепловая изоляция; *5* – термопара (6 шт.).

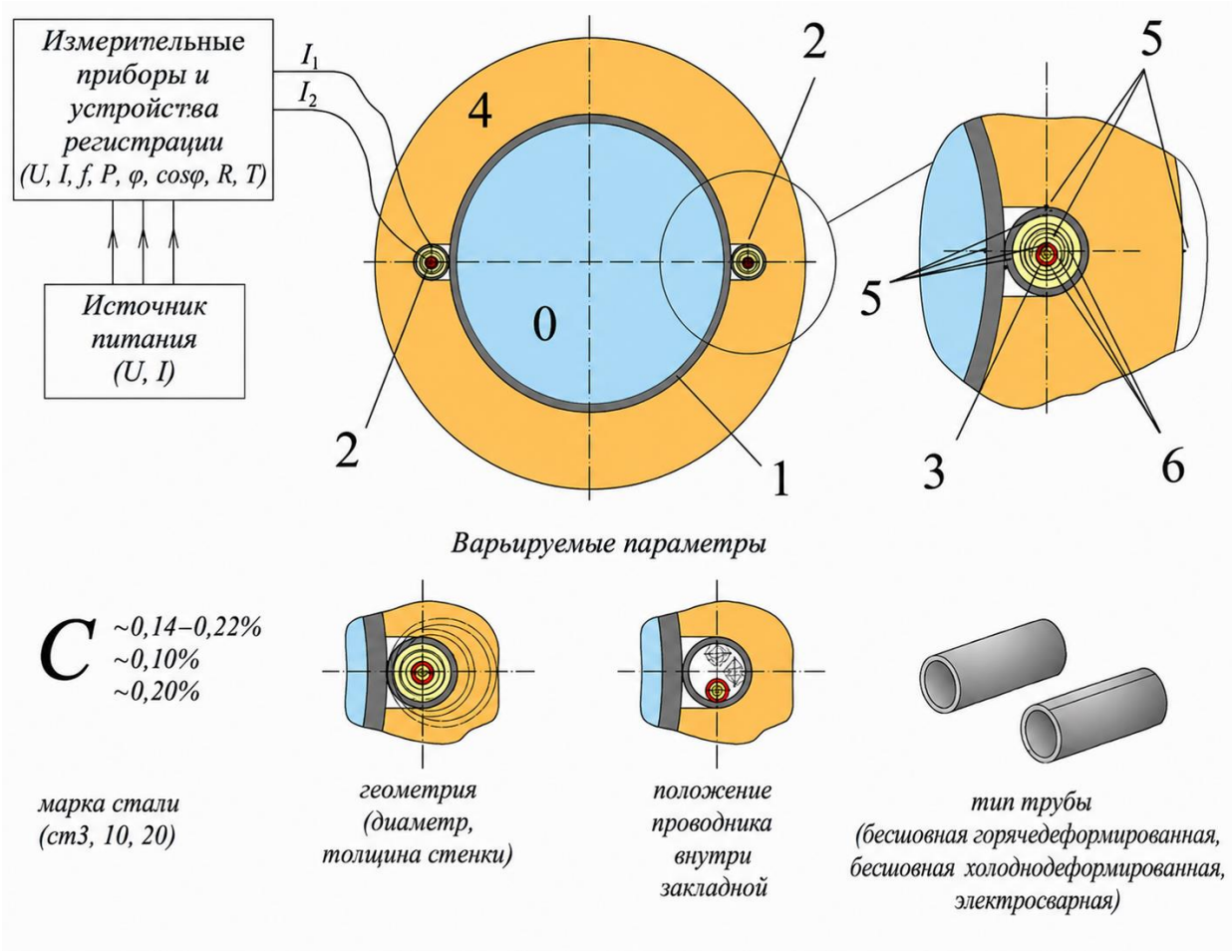


Рисунок 3.28 – Структурная схема экспериментального участка для реализации поверхностного способа электрообогрева. Обозначения на схеме: *0* – продукт в трубе; *1* – обогреваемая стальная труба; *2* – закладная труба (2 шт.); *3* – изолированный проводник; *4* – тепловая изоляция; *5* – термопара (7 шт.), *6* – диэлектрические вставки.

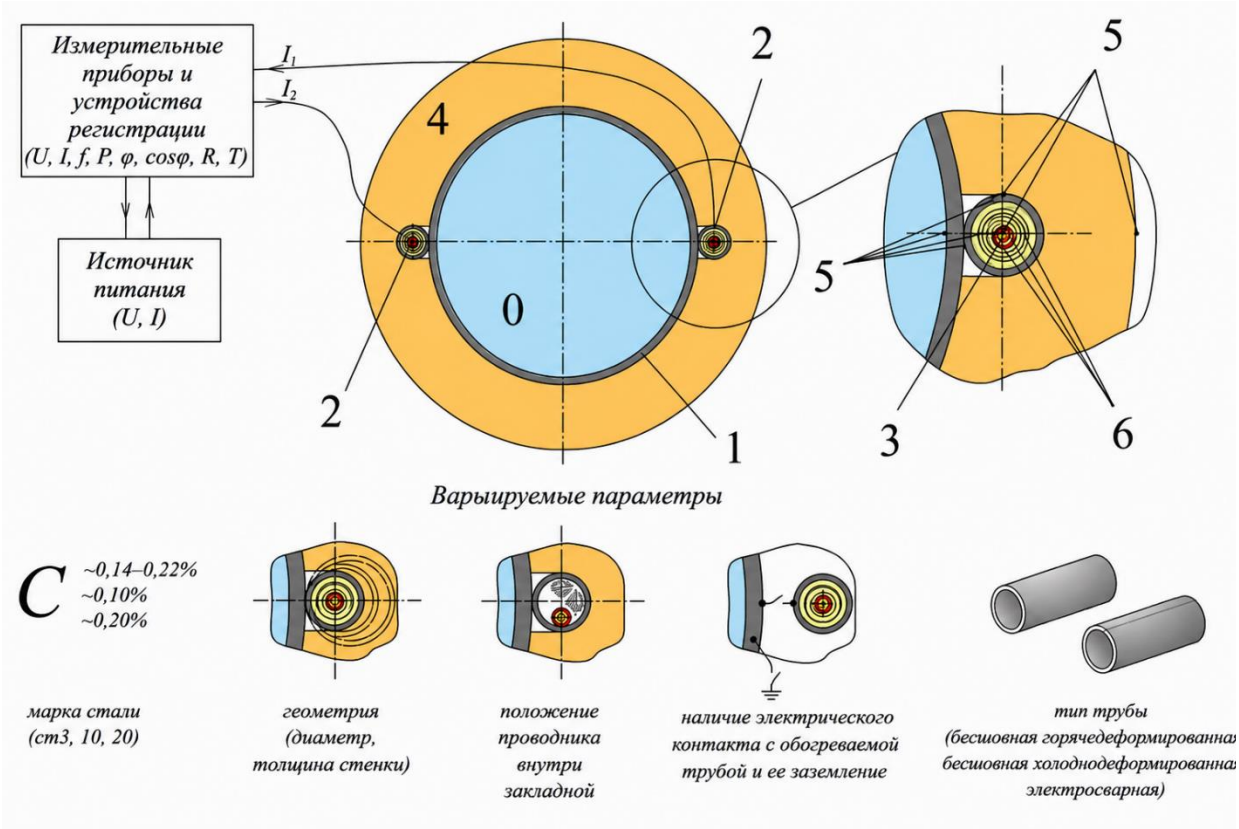


Рисунок 3.29 – Структурная схема экспериментального участка для реализации индукционного и комбинированного способов электрообогрева. Обозначения на схеме: *0* – продукт в трубе; *1* – обогреваемая стальная труба; *2* – закладная труба (2 шт.); *3* – изолированный проводник; *4* – тепловая изоляция; *5* – термопара (7 шт.), *6* – диэлектрические вставки

Представленные схемы отражают конструктивное исполнение исследовательского модуля и перечень основных варьируемых параметров, используемых при проведении экспериментальных исследований. Конструкция модуля предусматривает возможность изменения формы, размеров и расположения закладных элементов, положения нагревательного проводника, конструкции нагревательного кабеля, толщины тепловой изоляции, схемы электрического подключения, а также электрофизических характеристик применяемых материалов.

Комбинированный способ электрообогрева реализуется на базе схем, представленных на рисунке 3.28 и 3.29 посредством изменения расположения изолированных проводников и схемы электрического подключения

трехфазного источника питания, обеспечивая совместное использование резистивного и электромагнитного механизмов преобразования электрической энергии в тепловую.

Разработанный исследовательский модуль обеспечивает экспериментальную проверку результатов численного моделирования, полученных в разделах 3.2–3.4, и апробацию рекомендаций, сформулированных в разделе 3.5. Необходимость такой проверки обусловлена наличием факторов, которые сложно однозначно воспроизвести в численной модели: фактического положения нагревательных элементов, величины воздушных зазоров, качества теплового контакта между элементами конструкции, реальных условий внешнего теплообмена и электрофизических характеристик применяемых материалов.

Методика ранее выполненных экспериментальных исследований приведена в главе 2. В настоящем разделе лабораторно-испытательный комплекс рассматривается как экспериментальная база для последующей проверки расчетных закономерностей и апробации предложенных технических решений.

Для проверки влияния толщины тепловой изоляции и положения закладного канала, рассмотренных в разделе 3.2, исследовательский модуль обеспечивает регистрацию температур трубопровода, закладного элемента, нагревательного кабеля и рабочей среды при различных вариантах теплоизоляции и пространственного расположения источника тепла относительно трубопровода. Применение синхронной многоканальной регистрации необходимо для выявления малых различий температурных режимов, поскольку по результатам моделирования влияние положения закладного канала на интегральные показатели эффективности оказалось незначительным.

Для проверки результатов раздела 3.3 экспериментальная база обеспечивает возможность исследования различных сочетаний «греющий кабель – закладной канал». В состав экспериментальной программы

включаются варианты с круглой и угловой закладной, а также с плоским и круглым кабелем. При этом должны фиксироваться температура токопроводящих жил, температура стенки закладного канала, температура трубопровода, напряжение, ток и активная мощность системы. Это позволит экспериментально оценить влияние воздушного зазора и формы закладного канала на допустимую линейную мощность системы.

Для проверки результатов раздела 3.4 экспериментальная установка обеспечивает реализацию симметричного и асимметричного размещения токопроводящих жил в ферромагнитных закладных элементах. В качестве проверяемых вариантов могут рассматриваться размещение трех жил в одной закладной трубе, схема «2+1» и конструкция типа «труба в трубе». Сопоставление температур жил, температуры ферромагнитных элементов и активной мощности системы позволит оценить наличие дополнительного тепловыделения в стали и его влияние на снижение температурной нагрузки на токопроводящие жилы.

При проведении экспериментальной проверки конструкций с асимметричным размещением жил дополнительный интерес представляет уточнение электромагнитных характеристик ферромагнитных элементов, используемых в расчетной модели. Для этого могут выполняться измерения удельного электрического сопротивления и магнитных характеристик применяемых сталей, позволяющие уточнить величину вихревых и гистерезисных потерь в закладных элементах.

Верификацию результатов численного моделирования предполагается выполнять путем сопоставления расчетных и экспериментальных зависимостей температуры токопроводящих жил, закладных элементов, трубопровода и рабочей среды, а также активной мощности и коэффициента мощности системы. Такое сопоставление позволяет оценить корректность принятых граничных условий, условий теплового контакта, распределения тепловыделения между элементами системы и используемых электрофизических характеристик материалов.

Реализация предусмотренной программы исследований позволит уточнить граничные условия теплообмена и количественно оценить влияние теплоизоляции, конструкции закладных элементов, условий теплового контакта и перераспределения тепловыделения на температурный режим и эффективность систем электрообогрева трубопроводов.

Таким образом, разработан лабораторно-испытательный комплекс, модульная конструкция которого обеспечивает реализацию резистивного, поверхностного, индукционного и комбинированного способов электрообогрева, независимое изменение основных конструктивных и режимных факторов и синхронную регистрацию электрических и тепловых параметров. Исследовательский участок комплекса позволяет воспроизводить условия, рассмотренные при численном моделировании, и выполнять экспериментальную проверку влияния толщины тепловой изоляции, конструкции и положения закладных элементов, условий теплового контакта, пространственного расположения проводников и распределения тепловыделения между токопроводящими и ферромагнитными элементами.

Разработанный комплекс формирует экспериментальную базу для верификации математических моделей, апробации предложенных технических решений и последующего уточнения рекомендаций по выбору конструктивных параметров систем электрообогрева трубопроводов. Возможность дальнейшего подключения циркуляционного контура расширяет область применения комплекса для исследования сопряженных электрических, электромагнитных, тепловых и гидродинамических процессов при различных режимах движения рабочей среды. В следующем разделе диссертации на основании результатов экспериментальных и численных исследований представлена разработанная методика выбора рациональных конструктивных решений систем резистивного электрообогрева трубопроводов и рекомендации по их практическому применению.

3.7 Рекомендации по повышению эффективности систем резистивного электрообогрева трубопроводов

Полученные в разделах 3.1–3.6 результаты позволили установить закономерности, определяющие эффективные условия применения резистивного электрообогрева протяженных трубопроводов. В отличие от традиционного подхода, при котором выбор системы электрообогрева преимущественно основывается на обеспечении требуемой удельной линейной мощности и допустимой температуры транспортируемого продукта, выполненные исследования показали, что область рационального применения конструктивного решения определяется совместным действием электрических, теплотехнических и конструктивных факторов.

Основными ограничениями, определяющими область рационального применения резистивного электрообогрева, являются максимально допустимое рабочее напряжение изоляции нагревательного кабеля и максимально допустимая температура токопроводящих жил. Рабочее напряжение изоляции определяет максимально возможную длину плеча электрообогрева, тогда как температура жил ограничивает максимально допустимую удельную линейную мощность системы. Следовательно, повышение эффективности достигается только при одновременном выполнении обоих ограничений, поскольку увеличение допустимого рабочего напряжения без обеспечения требуемого температурного режима жил либо снижение температуры жил без возможности увеличения рабочего напряжения не обеспечивают пропорционального повышения эксплуатационных характеристик системы.

При проектировании протяженных трубопроводов, для которых определяющим критерием является увеличение длины плеча электрообогрева и сокращение количества источников электроснабжения, приоритетным является применение нагревательных кабелей с повышенным допустимым рабочим напряжением изоляции. Вместе с тем реализация преимуществ таких

кабелей возможна только при обеспечении допустимого температурного режима токопроводящих жил по всей длине системы электрообогрева.

Толщина тепловой изоляции определяет величину тепловых потерь трубопровода и, следовательно, требуемую удельную линейную мощность системы электрообогрева. Поэтому рациональный выбор толщины теплоизоляции должен осуществляться с учетом максимально допустимой удельной линейной мощности рассматриваемого конструктивного решения и требуемой длины плеча электрообогрева. При этом пространственное положение закладного элемента относительно трубопровода может приниматься исходя из конструктивных и технологических требований, поскольку не оказывает значительного влияния не температурный режим системы.

В случаях, когда работа системы осуществляется при высоких удельных линейных мощностях, определяющим фактором становится интенсивность теплоотвода от токопроводящих жил к трубопроводу. При этом эффективность конструкции определяется не только теплопроводностью материалов, но и стабильностью условий теплоотвода при возможном изменении пространственного положения нагревательного кабеля внутри закладного элемента. Следовательно, при разработке новых конструктивных решений необходимо стремиться к минимизации влияния случайных монтажных факторов на температурный режим нагревательного кабеля.

Результаты выполненных исследований показали, что при выборе конструкции нагревательного кабеля для систем резистивного электрообогрева с круглыми закладными элементами наряду с обеспечением требуемой площади теплового контакта необходимо учитывать чувствительность конструкции к изменению пространственного положения кабеля внутри закладного элемента. Среди исследованных конструктивных решений кабель круглой конструкции обеспечивает наименьшую чувствительность температурного режима токопроводящих жил к изменению величины воздушного зазора, вследствие чего может рассматриваться как

одно из наиболее универсальных конструктивных решений для систем электрообогрева с круглыми закладными элементами.

Полученные результаты показывают, что дальнейшее совершенствование конструкций с круглыми закладными элементами целесообразно связывать не с уменьшением внутреннего диаметра закладной трубы, ограничивающим возможность монтажа нагревательного кабеля, а с увеличением наружных размеров самого кабеля при сохранении его требуемых электрических характеристик. Такой подход позволяет уменьшить величину воздушного зазора, улучшить теплоотвод от токопроводящих жил и одновременно сохранить технологичность монтажа системы. Реализация данного направления требует дополнительных исследований и может рассматриваться как одно из перспективных направлений дальнейшего совершенствования конструкций резистивного электрообогрева.

Полученные результаты также расширяют область применения нагревательных кабелей круглой конструкции и показывают, что дальнейшее совершенствование систем электрообогрева может быть связано с разработкой специализированных кабелей, конструкция которых обеспечивает одновременно высокие электрические характеристики (рабочее напряжение изоляции кабеля) и минимальную чувствительность к технологическим отклонениям при монтаже.

Предложенные в работе критерии максимальной длины плеча электрообогрева и потенциальной тепловой производительности одного плеча позволяют выполнять интегральную оценку эффективности конструктивных решений на стадии проектирования. Их совместное использование обеспечивает возможность сопоставления различных вариантов исполнения нагревательного узла не только по отдельным электрическим или тепловым характеристикам, но и по области их рационального применения в конкретных условиях эксплуатации трубопроводов.

На основании выполненных исследований предлагается последовательность выбора рационального конструктивного решения

системы резистивного электрообогрева, представленная на рисунке 3.30. Предлагаемая последовательность отражает порядок выбора конструктивного решения в зависимости от исходных условий эксплуатации и обеспечивает согласованный учет тепловых и электрических ограничений системы.



Рисунок 3.30 – Алгоритм выбора рационального конструктивного решения системы резистивного электрообогрева

На рисунке 3.30 показано, что выбор конструктивного решения начинается с определения требуемой удельной линейной мощности, необходимой для компенсации тепловых потерь трубопровода в заданных условиях эксплуатации. Далее осуществляется согласованный выбор конструкции нагревательного кабеля и закладного элемента, после чего выполняется проверка температурного режима токопроводящих жил и электрических ограничений, определяемых допустимым рабочим напряжением изоляции кабеля. По результатам расчета определяются максимально допустимая длина плеча электрообогрева и потенциальная тепловая производительность одного плеча, которые используются для оценки области рационального применения рассматриваемого

конструктивного решения. Таким образом, эффективные условия применения резистивного электрообогрева протяженных трубопроводов определяются не отдельным конструктивным параметром, а согласованным выбором конструкции нагревательного кабеля, закладного элемента и параметров системы электроснабжения, обеспечивающим одновременное выполнение электрических и температурных ограничений при требуемой удельной линейной мощности, максимально возможной длине плеча электрообогрева и необходимой потенциальной тепловой производительности одного плеча.

Выводы по главе

1. Эффективность электрообогрева трубопроводов в значительной степени определяется способом формирования тепловыделения. Показано, что перенос основной доли тепловыделения из токопроводящих элементов в ферромагнитные элементы конструкции обеспечивает снижение температуры токопроводящих жил при сопоставимой линейной мощности электрообогрева. Для исследованных условий температура жил при поверхностном и индукционном электрообогреве оказывается соответственно до 1,5 и 2 раз ниже по сравнению с резистивным способом нагрева.
2. Среди исследованных теплотехнических факторов наибольшее влияние на эффективность резистивного электрообогрева оказывает толщина тепловой изоляции трубопровода. Уменьшение толщины теплоизоляции со 100 до 55 мм приводит к увеличению энергопотребления системы до 40% и снижение максимальной длины плеча электрообогрева до 26%. При этом влияние пространственного расположения закладного канала на основные характеристики не превышает 0,3%, а вклад естественной конвекции в теплоперенос транспортируемого продукта составляет менее 1%.

3. Одним из факторов, ограничивающих допустимую линейную мощность резистивного электрообогрева, является тепловое сопротивление системы «нагревательный элемент – закладной канал – трубопровод». Установлено, что наличие воздушного зазора между нагревательным элементом и стенками закладного канала может приводить к снижению допустимой линейной мощности до 32,5%. Определено, что эффективность системы зависит как от конструкции нагревательного элемента, так и от геометрии закладного канала.
4. Асимметричное размещение токопроводящих жил в стальных закладных элементах обеспечивает перераспределение тепловыделения между токопроводящими и ферромагнитными элементами системы за счет формирования дополнительных электромагнитных потерь. Для исследованных конструкций снижение температуры жил достигает 10 °C, а дополнительные потери в ферромагнитных элементах составляют до 60% от Джоулевых потерь в проводниках.
5. Область эффективного применения резистивного электрообогрева определяется совместным действием тепловых и электрических ограничений системы. Показано, что максимально допустимая линейная мощность ограничивается температурой токопроводящих жил, а максимальная длина плеча электрообогрева определяется как температурными ограничениями, так и допустимым рабочим напряжением изоляции нагревательного кабеля.
6. Обоснованы эффективные условия применения резистивного электрообогрева протяженных трубопроводов, заключающиеся в комплексном учете параметров теплоизоляции, условий теплопередачи между нагревательным элементом и трубопроводом, конструкции закладного канала, распределения тепловыделения между элементами системы и электрических ограничений нагревательного кабеля. Показано, что совместный учет указанных факторов позволяет существенно расширить область применения резистивного электрообогрева и увеличить

максимальную длину плеча электрообогрева без изменения принципа построения системы электроснабжения.

7. Разработана концепция многофункционального лабораторно-испытательного стенда для исследования систем электрообогрева трубопроводов, обеспечивающего проведение комплексных экспериментальных исследований различных способов электрообогрева, верификацию математических моделей и разработку новых технических решений, направленных на повышение эффективности электрообогрева протяженных трубопроводов.
8. Установлено, что среди исследованных конструктивных решений применение нагревательного кабеля круглой конструкции в круглых закладных элементах обеспечивает наименьшую чувствительность температурного режима токопроводящих жил к изменению величины воздушного зазора. Показано, что данное конструктивное решение может рассматриваться как одно из наиболее универсальных для систем резистивного электрообогрева с круглыми закладными элементами и определяет перспективное направление дальнейшего совершенствования нагревательных кабелей.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ И ВЫВОДЫ

1. Проведенный анализ известных систем электрообогрева трубопроводов позволил выделить наиболее перспективные направления повышения эффективности резистивного электрообогрева и принять его в качестве наиболее доступного для широкой реализации с обеспечением достаточно высоких интегральных показателей энергоэффективности.
2. Разработана экспериментальная методика, разработан и создан лабораторный стенд для проведения исследований интегральных характеристики теплопереноса в системе «элементы электрообогрева – трубопровод» с учетом раздельного и совместного влияния основных внешних и внутренних факторов.
3. В проведенных экспериментах установлены особенности распределения тепловыделения между элементами различных систем электрообогрева трубопроводов, сформирована база данных для разработки и верификации физических и математических моделей.
4. Разработана, валидирована и верифицирована математическая модель резистивной системы электрообогрева, обеспечивающая исследование температурного режима трубопровода и элементов системы и отличающаяся от известных учетом комплекса взаимосвязанных процессов тепломассопереноса и особенностей исполнения трубопроводов.
5. Установлено влияние параметров резистивной системы электрообогрева на температурный режим ее элементов и показатели эффективности электрообогрева.
6. Обобщены полученные результаты проведенных экспериментальных и теоретических исследований с использованием интегральных критериев и карт тепловых режимов трубопроводов. Математическая обработка результатов исследований позволила получить прогностические выражения, устанавливающие зависимости температурных и энергетических характеристик системы электрообогрева от определяющих конструктивных и режимных факторов.

7. Разработан испытательный комплекс, внедренный в состав лабораторного оборудования НИ ТПУ, для верификации результатов лабораторных экспериментов и математического моделирования с возможностью их переноса на разноразмерные системы и апробации предложенных технических решений для повышения эффективности электрообогрева.
8. Разработаны научно обоснованные рекомендации по выбору рациональных технических решений и условий применения резистивной системы электрообогрева с размещением греющего кабеля в закладном канале.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

Сокращения

КПД – коэффициент полезного действия

МКЭ – метод конечных элементов

ППУ – пенополиуретан

ПО – программное обеспечение

ЭВМ – электронно-вычислительная машина

COMSOL Multiphysics – программный комплекс конечно-элементного моделирования

LLS – резистивный нагревательный кабель серии LLS

Обозначения

a – температуропроводность жидкости, м^2/с

B – магнитная индукция, Тл

c_p – удельная теплоёмкость, Дж/(кг·К)

cos φ – коэффициент мощности

d – диаметр, м

D – внутренний диаметр трубопровода, м;

E – напряжённость электрического поля, В/м

f – частота переменного магнитного поля, Гц

F – объемная сила, Н/м^3

g – ускорение свободного падения, м/с^2

H – напряжённость магнитного поля, А/м

I – сила электрического тока, А

J – плотность электрического тока, А/м^2

J_{eddy} – плотность индуцированных вихревых токов, А/м^2

k_h – коэффициент пропорциональности, определяемый электрофизическими свойствами материалами, Вт/м^3

$k_{уст}$ – коэффициент устойчивости конструкции

k_T– температурный коэффициент передачи тепла

L – длина, м

L_{max} – соответствующая максимальная длина плеча электрообогрева, м

M – намагниченность материала, А/м

Nu – число Нуссельта

p – давление, Па

P – активная мощность, Вт

Pr – число Прандтля

q – плотность теплового потока, Вт/м^2

$q_{л,max}$ – максимально допустимая удельная линейная мощность системы, Вт/м

Q – суммарная мощность тепловыделения, определяемая Джоулевыми потерями в токопроводящих элементах, вихретоковыми потерями и потерями на гистерезис, Вт/м^3

Q_J – Джоулево тепловыделение, Вт/м^3

Q_{eddy} – тепловыделение, обусловленное вихревыми токами, Вт/м^3

Q_h – объемная плотность потерь на гистерезис, Вт/м^3

$Q_{пот}$ – потенциальная тепловая производительность одного плеча, Вт

R – электрическое сопротивление, Ом

Ra – число Рэлея

S – площадь поперечного сечения, м^2

t – время, с

T – температура, °С (или К)

T_0 – опорная температура, либо начальная температура элементов расчетной области, °С (К)

T_{max} – максимальная температура, °С

$T_{окр}$ – температура окружающей среды, °С

ΔT – характерный перепад температуры, °С

u – вектор скорости транспортируемого продукта, м/с

u_x – проекция скорости на ось x, м/с

u_y – проекция скорости на ось y, м/с

u_z – проекция скорости на ось z, м/с

u_A – стандартная неопределённость, обусловленная случайными составляющими измерений

u_B – стандартная неопределённость, обусловленная систематическими составляющими

u_C – суммарная стандартная неопределённость экспериментальных результатов

U – напряжение, В

$dU_{ист}/dL$ – продольный градиент потенциала источника питания по длине токопроводящей жилы, В/м

W – энергия, Дж

α – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м^2·К)

α_h и β_h – эмпирические показатели степени, характеризующие зависимость потерь от частоты и магнитной индукции

β – коэффициент объемного теплового расширения жидкости, 1/К

$\beta_э$ – коэффициент температурного расширения металла, мм/(м°С);

λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К)

μ – динамическая вязкость, Па·с

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнитная постоянная

μ_r – относительная магнитная проницаемость материала

ν – кинематическая вязкость, м^2/с

ρ – плотность, кг/м^3

ρ_0 – опорная плотность, кг/м^3

$\rho_{0.э}$ – удельное электрическое сопротивление, Ом·м

ρ_{20} – удельное электрическое сопротивление для постоянного тока при температуре 20 °С, Ом·м

σ – электрическая проводимость, См/м

φ – угол сдвига фаз, рад

$\omega = 2\pi f$ – круговая частота, рад/с

δ – глубина проникновения электромагнитного поля, м;

∇ – оператор Гамильтона (набла)

$\nabla\cdot$– оператор дивергенции

∇^2 – оператор Лапласа (лапсиан)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Katysheva, E. Analysis of the Interconnected Development Potential of the Oil, Gas and Transport Industries in the Russian Arctic / E. Katysheva // Energies. – 2023. – Vol. 16, no. 7. – P. 3124.

2. O'Leary, D. Importance of Detailed Terrain and Geohazard Information for Pipeline and Infrastructure Developments in Arctic Environments / D. O'Leary, A. Garrigus, T. Krzewinski // Offshore Technology Conference. – 2018. – P. D033S016R004.

3. Kozmenko, S. Yu. Development of transport infrastructure in the regions of the Arctic zone of the Russian Federation from the position provisions of national security / S. Yu. Kozmenko, M. V. Ulchenko // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2019. – Vol. 302, no. 1. – P. 012123.

4. Kopteva, A. V. Analysis of the Structure of Viscous Oil Flow for the Development of a System to Prevent the Formation of Paraffin Deposits in Pipelines / A. V. Kopteva, A. Dementyev, V. Koptev // Materials Science Forum. – 2021. – Vol. 1022. – P. 42–51.

5. Nysveen, A. Direct Electrical Heating of Subsea Pipelines – Technology Development and Operating Experience / A. Nysveen, H. Kulbotten, J. K. Lervik, A. H. Børnes, M. Høyer-Hansen, J. J. Bremnes // IEEE Transactions on Industry Applications. – 2007. – Vol. 43, no. 1. – P. 118–129.

6. Record of Conference Papers : Industry Applications Society 58th Annual IEEE Petroleum and Chemical Industry Conference (PCIC), Toronto, ON, 19–21 Sept. 2011 / IEEE Industry Applications Society, Institute of Electrical and Electronics Engineers. – Piscataway, NJ : IEEE, 2011.

7. Фонарев, З. И. Электрообогрев трубопроводов, резервуаров и технологического оборудования в нефтяной промышленности / З. И. Фонарев. – Ленинград : Недра, 1984. – 148 с.

8. Fenster, N. Electric Heat Tracing Design for Impedance and Skin Effect Systems / N. Fenster, D. L. Rosen, S. Sengupta, J. McCormick // IEEE Industry Applications Magazine. – 1996. – Vol. 2, no. 2. – P. 60–65.

9. Garris, N. A. Analysis of Piping Methods in Permafrost Soils / N. A. Garris, Z. R. Glukhova // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2021. – Vol. 666, no. 4. – P. 042046.

10. Чердынцев, Е. Ф. Альтернативная система электрообогрева протяженных трубопроводов / Е. Ф. Чердынцев, В. И. Балабанов // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. – 2016. – № 3. – С. 8–11.

11. Рекомендации американского стандарта по теплоизоляции трубопроводов и резервуаров // Промышленный электрообогрев и электроотопление. – 2012. – № 1. – С. 48–50.

12. Ratnakar, R. K. Flow assurance methods for transporting heavy and waxy crude oils via pipelines without chemical additive intervention / R. K. Ratnakar, S. Pandian, H. Mary, H. Choksi // Petroleum Research. – 2025. – Vol. 10, no. 1. – P. 204–215.

13. Струпинский, М. Л. Проектирование и эксплуатация систем электрического обогрева в нефтегазовой отрасли / М. Л. Струпинский, Н. Н. Хренков, А. Б. Кувалдин. – 2-е изд. – Вологда : Инфра-Инженерия, 2023. – 524 с.

14. Thinn, K. S. Electrical heating technologies for flow assurance of subsea flowlines [Электронный ресурс] / K. S. Thinn // SINTEF Blog. – 2019. – Режим доступа: https://blog.sintef.com/energy/electrical-heating-flow-assurance-subsea-flowlines/ (дата обращения: 28.06.2026).

15. IEEE/CSA 844.4-2019. IEEE/CSA Standard for Impedance Heating of Pipelines and Equipment – Application Guide for Design, Installation, Testing, Commissioning, and Maintenance. – New York : IEEE, 2019.

16. IEEE/IEC 62395-1-2024. Electrical Resistance Trace Heating Systems for Industrial and Commercial Applications – Part 1: General and Testing Requirements. – New York : IEEE, 2024.

17. Heating Cable for Pipe Trace Heating and Freeze Protection: Market Analysis, Insights and Forecast, 2025–2033 [Электронный ресурс] // Data Insights Market. – Режим доступа: https://www.datainsightsmarket.com/reports/heating-cable-for-pipe-trace-heating-and-freeze-protection-102925#summary (дата обращения: 28.06.2026).

18. Кувалдин, А. Б. Моделирование электромагнитного поля в ферромагнитной стали при индукционном, электроконтактном и комбинированном нагреве / А. Б. Кувалдин [и др.] // Индукционный нагрев. – 2010. – № 13. – С. 15–19.

19. Лавринович, М. В. Сравнение характеристик способов электрообогрева трубопроводов / М. В. Лавринович, Д. В. Антонов // Электротехника. – 2026. – № 10. – С. 78–85.

20. Ding, L. Modeling and Control Strategy of Built-in Skin Effect Electric Tracing System / L. Ding, J. Zhang, H. Sun // Computer Modeling in Engineering & Sciences. – 2018. – Vol. 117, no. 2. – P. 213–229.

21. Wang, X. Research on the current frequency forecasting of a power supply converter for heating the oil pipeline based on gradient boosting decision tree / X. Wang [et al.] // International Journal of Electrical Power & Energy Systems. – 2024. – Vol. 162. – P. 110259.

22. Харин, С. В. Исследование процессов резистивного нагрева трубопроводов / С. В. Харин, А. Г. Щербинин // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2019. – № 32. – С. 117–129.

23. Ding, L. A Deep-Sea Pipeline Skin Effect Electric Heat Tracing System / L. Ding, J. Zhang, A. Lin // Energies. – 2019. – Vol. 12, no. 13. – P. 2466.

24. Nysveen, A. Direct Electrical Heating of Subsea Pipelines – Technology Development and Operating Experience / A. Nysveen [et al.] // Record of Conference Papers Industry Applications Society 52nd Annual Petroleum and Chemical Industry Conference. – Denver, CO : IEEE, 2005. – P. 177–187.

25. Конесев, С. Г. Индукционные нагревательные системы для протяженных нефтепроводов / С. Г. Конесев [и др.] // Нефтегазовое дело. – 2014. – Т. 12, № 4. – С. 40–47.

26. Смирнов, В. В. Сравнительный анализ полезного распределения тепла систем электрообогрева технологических трубопроводов / В. В. Смирнов, С. А.

Сихвордт // Вестник Югорского государственного университета. – 2015. – № S2 (37). – С. 114–120.

27. Лавринович, М. В. Экспериментальные и теоретические исследования процессов теплопереноса для повышения эффективности электрообогрева трубопроводов / М. В. Лавринович // Материалы Девятой Российской национальной конференции по теплообмену (РНКТ-9), Москва, 19–24 октября 2026 г. – М. : Издательство МЭИ, 2026. – В печати.

28. Щербинин, А. Г. Экспериментальное и численное исследование индукционно-резистивной системы обогрева трубопроводов / А. Г. Щербинин, А. Е. Терлыч, В. В. Черняев, М. Д. Наумов // Электротехника. – 2023. – № 11. – С. 10–13.

29. Хренков, Н. Н. Результаты экспериментальных исследований тепловых параметров обогреваемых пластиковых трубопроводов / Н. Н. Хренков [и др.] // Промышленный электрообогрев и электроотопление. – 2014. – № 3. – С. 26–33.

30. Fedin, M. Development of a Universal Experimental Bench for Physical Modeling of Induction-Resistive Heating Systems / M. Fedin [et al.] // Vestnik MEI. – 2025. – No. 2. – P. 70–77.

31. Fedin, M. A. Experimental study of electrophysical properties of ferromagnetic steel pipes / M. A. Fedin, A. I. Vasilenko, D. A. Zhgutov, K. V. Severin // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. – 2025. – Vol. 89, no. 9. – P. 1500–1505.

32. Denniel, S. Mechanical and Thermal Qualification of an Electrically Heated Pipe in Pipe (EH-PIP) and Application to Subsea Field Development / S. Denniel [et al.] // 29th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering. Vol. 5, Parts A and B. – Shanghai : ASMEDC, 2010. – P. 375–385.

33. Yao, Z. X. Experimental and numerical study on direct electrical heating for plug removal of subsea waxy crude pipelines / Z. X. Yao [et al.] // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2019. – Vol. 143. – P. 118489.

34. Лавринович, М. В. Интегральные характеристики резистивного, индукционного и поверхностного электрообогрева трубопроводов / М. В.

Лавринович, Д. В. Антонов, П. А. Стрижак // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2026. – Т. 337, № 4. – С. 181-191.

35. Barth, R. Introduction to the New Standards – IEEE STD 844.1-2017/CSA C22.2 No. 293.1-17 and IEEE STD 844.2-2017/CSA C293.2-17 for Skin Effect Trace Heating of Pipelines, Vessels, Equipment, and Structures / R. Barth, F. Chakkalakal // 2018 IEEE Petroleum and Chemical Industry Technical Conference (PCIC). – Cincinnati : IEEE, 2018. – P. 171–178.

36. Barth, R. Introduction to the New Standards – IEEE STD 844.3-2019/CSA C22.2 No. 293.3-19 and IEEE STD 844.4-2019/CSA C293.4-19 for Impedance Heating of Pipelines and Equipment / R. Barth, N. Fenster, F. Chakkalakal // 2021 IEEE IAS Petroleum and Chemical Industry Technical Conference (PCIC). – San Antonio : IEEE, 2021. – P. 183–190.

37. Jez, R. On the Modelling of Long Heating Cables for Electrically Trace Heated Pipe-in-Pipe ETH-PiP Systems / R. Jez, J. Ejma-Multanski, R. Vivet // Offshore Technology Conference. – Houston, 2020. – P. OTC-30650-MS.

38. Chen, A. Analytical and FEM Calculation of Electrical Parameters of Carbon Steel Pipe in DEH Systems / A. Chen, A. Nysveen, M. Høyer-Hansen, J. K. Lervik // 2018 IEEE International Magnetics Conference (INTERMAG). – Singapore : IEEE, 2018. – P. 1–5.

39. Федин, М. А. Разработка математической модели электромагнитного поля и схемы замещения индукционно-резистивной системы нагрева для промышленных трубопроводов / М. А. Федин [и др.] // Промышленная энергетика. – 2023. – № 12. – С. 2–9.

40. Lavrinovich, M. V. Heat transfer of pipelines at electrical heating: effect of three-phase electrical network asymmetry / M. V. Lavrinovich [et al.] // Journal of Engineering Thermophysics. – 2026. – Vol. 35, no. 4. – Принята к печати.

41. Лавринович, М. В. Влияние расположения закладной с греющим кабелем и толщины теплоизоляции на энергетическую эффективность системы электрообогрева надземного трубопровода / М. В. Лавринович, Д. В. Антонов, П.

А. Стрижак // Тепловые процессы в технике. – 2026. – Т. 18, № 4. – Принята к печати.

42. Федин, М. А. Моделирование гистерезиса конструкционной стали в индукционно-резистивной системе нагрева на промышленной и средних частотах / М. А. Федин [и др.] // Вопросы электротехнологии. – 2025. – № 3. – С. 35–47.

43. Fedin, M. Methodology for Determining the Electrophysical Properties of Pipes Made of Structural Steel for Skin Systems / M. Fedin [et al.] // 2025 IEEE 26th International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM). – IEEE, 2025. – P. 880–884.

44. Федин, М. А. Исследование электрофизических свойств стальных труб для индукционно-резистивных систем нагрева / М. А. Федин [и др.] // Электромагнитное поле и материалы (фундаментальные физические исследования). – М. : НИУ «МЭИ», 2024. – С. 148–154.

45. Струпинский, М. Л. Метод определения электрофизических свойств стальных труб / М. Л. Струпинский, Н. Н. Хренков, А. Б. Кувалдин // Электротехника. – 2009. – № 8. – С. 55–60.

46. Кувалдин, А. Б. Расчет электрических и энергетических характеристик стержневого индуктора для нагрева ферромагнитной загрузки / А. Б. Кувалдин [и др.] // Электричество. – 2009. – № 10. – С. 54–61.

47. IEEE Std 844-2000. IEEE Recommended Practice for Electrical Impedance, Induction, and Skin Effect Heating of Pipelines and Vessels. – New York : IEEE, 2000. – 116 p.

48. СТО ИНТИ S.150.3-2023. Системы промышленного электрообогрева трубопроводов на основе скин-эффекта для нефтяной, химической и газовой промышленности. Общие технические требования. – М. : АНО «ИНТИ», 2023.

49. Промышленный электрообогрев : каталог 2020 / ГК «ССТ». – Мытищи : ГК «ССТ», 2020.

50. Commercial Heat-Tracing. Installation and Maintenance Manual. Self-Regulating Heating Cable Systems [Электронный ресурс] / nVent RAYCHEM. – 2017.

– 32 р. – Режим доступа: https://www.nvent.com/raychem (дата обращения: 28.06.2026).

51. Serial Resistance Heating Cables : technical catalogue [Электронный ресурс] / eltherm GmbH. – Burbach : eltherm GmbH, 2024. – 43 p. – Режим доступа: https://eltherm.com/ (дата обращения: 28.06.2026).

52. Руководство по проектированию обогрева комплексных трубопроводов для саморегулирующихся нагревательных кабелей / Thermon. – San Marcos : Thermon, Inc. – 20 с.

53. Хренков, Н. Н. Сопоставление температурных режимов обогрева стальных и пластиковых трубопроводов / Н. Н. Хренков // Промышленный электрообогрев и электроотопление. – 2014. – № 1. – С. 28–33.

54. Santoso, S. B. W. The Effect of Heat Tracing Installation for Wax Prevention on Onshore Buried Swampy Pipelines / S. B. W. Santoso, A. N. Sommeng, C. Dianita // Jurnal Rekayasa Kimia & Lingkungan. – 2024. – Vol. 19, no. 1. – P. 81–94.

55. Xu, M. Economic Optimization of Thermal Insulation Thickness for Insulated and Electrically Traced Pipelines in Drilling Applications / M. Xu, M. Gao, R. Yang, K. Wang, Z. Yuan // Processes. – 2024. – Vol. 12, no. 7. – P. 1506.

56. Choi, M.-Y. Numerical Analysis of Unsteady Heat Transfer for the Location Selection of Anti-freeze for the Fire Protection Piping with Electrical Heat Trace / M.-Y. Choi, D.-W. Lee, H.-G. Choi // Fire Science and Engineering. – 2014. – Vol. 28, no. 1. – P. 52–57.

57. Дегтярева, Е. О. Оптимизация толщины тепловой изоляции обогреваемых трубопроводов / Е. О. Дегтярева // Промышленный электрообогрев и электроотопление. – 2012. – № 1. – С. 42–47.

58. Система ЛонгЛайн на основе кабеля LLS. Электрический нагревательный кабель постоянной мощности для обогрева трубопроводов средней длины [Электронный ресурс] / Инжиниринговая компания «ССТэнергомонтаж». – Мытищи : ООО «ССТэнергомонтаж». – 3 с. – Режим доступа: https://www.sst-em.ru/ (дата обращения: 28.06.2026).

59. Blackmore, D. Skin Effect Pipe Heating System Utilizing Convective and Conductive Heat Transfer / D. Blackmore. – US 4,334,142. – 1982.

60. Trabilcy, W. J. System for Electrically Heating Fluid-Conveying Pipe Lines and Other Structures / W. J. Trabilcy. – US 3,706,872. – 1972.

61. Konesev, S. G. Prospects for the use of electro-technological heating systems in the arctic conditions / S. G. Konesev, P. A. Khlyupin // Power and Autonomous Equipment. – 2019. – Vol. 2, no. 2. – P. 86–101.

62. ThermTrac™ Skin Effect Heating Systems : TEP0096-0217 / Thermon, Inc. – San Marcos : Thermon, Inc., 2017. – 2 p.

63. Трофимова, Т. И. Курс физики : учебное пособие для вузов / Т. И. Трофимова. – 11-е изд., стер. – М. : Издательский центр «Академия», 2006. – 560 с.

64. Микромиллиомметр ИКС-1А. Руководство по эксплуатации / ООО «Челэнергоприбор». – Челябинск : ООО «Челэнергоприбор», 2024. – 16 с.

65. ГОСТ 7229–76. Кабели, провода и шнуры. Метод определения электрического сопротивления токопроводящих жил и проводников. – М. : Издательство стандартов, 1988.

66. Нейман, Л. Р. Теоретические основы электротехники. Т. 2. Теория нелинейных электрических и магнитных цепей. Теория электромагнитного поля / Л. Р. Нейман, К. С. Демирчян. – Ленинград : Энергия, 1975. – 407 с.

67. Таблицы физических величин : справочник / под ред. И. К. Кикоина. – М. : Атомиздат, 1976. – 1008 с.

68. ГОСТ 34100.3–2017/ISO/IEC Guide 98-3:2008. Неопределенность измерения. Часть 3. Руководство по выражению неопределенности измерения. – М. : Стандартинформ, 2017. – VII, 104 с.

69. Fedin, M. Modeling of Structural Steel Hysteresis for Skin Systems at Industrial and Medium Frequencies / M. Fedin [et al.] // 2025 IEEE 26th International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM). – Altai : IEEE, 2025. – P. 850–855.

70. Incropera, F. P. Fundamentals of Heat and Mass Transfer / F. P. Incropera, D. P. DeWitt. – 3rd ed. – New York : John Wiley & Sons, 1990. – 919 p.

71. Ландау, Л. Д. Электродинамика сплошных сред / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. – М. : Государственное издательство технико-теоретической литературы, 1957.

72. Stratton, J. A. Electromagnetic Theory / J. A. Stratton. – Hoboken : Wiley-IEEE Press, 2007. – 640 p.

73. Jiles, D. C. Theory of ferromagnetic hysteresis / D. C. Jiles, D. L. Atherton // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 1986. – Vol. 61, no. 1–2. – P. 48–60.

74. Steinmetz, C. P. On the Law of Hysteresis / C. P. Steinmetz // Transactions of the American Institute of Electrical Engineers. – 1892. – Vol. IX, no. 1. – P. 1–64.

75. Mühlethaler, J. Core Losses Under the DC Bias Condition Based on Steinmetz Parameters / J. Mühlethaler, J. Biela, J. W. Kolar, A. Ecklebe // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2012. – Vol. 27, no. 2. – P. 953–963.

76. Исаченко, В. П. Теплопередача : учебник для энергетических вузов и факультетов / В. П. Исаченко, В. А. Осипова, А. С. Сукомел. – 4-е изд., перераб. и доп. – М. : Энергоиздат, 1981. – 416 с.

77. Лыков, А. В. Теория теплопроводности : учебное пособие / А. В. Лыков. – М. : Высшая школа, 1967. – 599 с.

78. AC/DC Module User’s Guide. Version 6.2 [Электронный ресурс] / COMSOL AB. – 2023. – Режим доступа: https://doc.comsol.com/6.2/doc/com.comsol.help.acdc/ACDCModuleUsersGuide.pdf (дата обращения: 28.06.2026).

79. Хренков, Н. Н. Научные исследования, разработка, организация производства и внедрение системы индукционно-резистивного обогрева длинных и сверхдлинных трубопроводов / Н. Н. Хренков, М. Л. Струпинский, А. Б. Кувалдин // Промышленный электрообогрев и электроотопление. – 2015. – № 1. – С. 32.

80. Fathi, S. Improving transformer cooling performance through advanced heat pipes integration / S. Fathi, A. Ghahremani, M. B. Shafii, M. Sadr, A. Salehzehi // Applied Thermal Engineering. – 2025. – Vol. 267. – P. 125775.

81. Единые технические требования к трубной продукции, соединительным деталям, антикоррозионному покрытию наружному и внутреннему, тепло- и гидроизоляционным материалам : МУ.01.27. – Иркутск : ООО «Иркутская нефтяная компания», 2020. – 191 с.

82. Хренков, Н. Н. Справочные данные по свойствам тепловой изоляции / Н. Н. Хренков // Промышленный электрообогрев и электроотопление. – 2012. – № 1. – С. 51.

83. Общий каталог кабельной продукции / ООО «Холдинг Кабель». – М. : ООО «Холдинг Кабель», 2023. – 600 с.

84. ГОСТ 32931–2015. Трубы стальные профильные для металлоконструкций. Технические условия. – М. : Стандартинформ, 2016. – 82 с.

85. ГОСТ 8731–74. Трубы стальные бесшовные горячедеформированные. Сортамент. – М. : Стандартинформ, 1974. – 48 с.

86. ГОСТ 8734–75. Трубы стальные бесшовные холоднодеформированные. Сортамент. – М. : Стандартинформ, 1975. – 26 с.

87. ГОСТ 10704–91. Трубы стальные электросварные прямошовные. Сортамент. – М. : Издательство стандартов, 1992. – 41 с.

88. ГОСТ 3262–75. Трубы стальные водогазопроводные. Технические условия. – М. : Издательство стандартов, 1975. – 27 с.

89. ГОСТ 8509–2026. Уголки стальные горячекатаные равнополочные. Сортамент. – М. : ФГБУ «Институт стандартизации», 2026. – 14 с.

90. Кувалдин, А. Б. Математические модели для исследования электромагнитного поля в ферромагнитной проводящей среде с учетом гистерезиса / А. Б. Кувалдин [и др.] // Электричество. – 2005. – № 11. – С. 56–61.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Заявки на патенты

Форма № 94 ИЗ,ПМ,ПО-2016

Федеральная служба по интеллектуальной собственности
Федеральное государственное бюджетное учреждение

«Федеральный институт промышленной собственности»
(ФИПС)

Бережковская наб., д. 30, корп. 1, Москва, Г-59, ГСП - 3, 125993 Телефон (8-499) 240-60-15 Факс (8-495) 531-63-18

УВЕДОМЛЕНИЕ О ПРИЕМЕ И РЕГИСТРАЦИИ ЗАЯВКИ

03.06.2026	W26038400	2026117096
Дата поступления (дата регистрации)	*Входящий №*	*Регистрационный №*

ДАТА ПОСТУПЛЕНИЯ (дата регистрации) оригиналов документов заявки	(21) РЕГИСТРАЦИОННЫЙ №	ВХОДЯЩИЙ №
	(85) ДАТА ПЕРЕВОДА международной заявки на национальную фазу	

☐ (86) *(регистрационный номер международной заявки и дата международной подачи, уполномоченное получающее ведомство)*

☐ (87) *(номер и дата международной публикации международной заявки)*

☐ (96) *(номер европейской заявки и дата ее подачи)*

☐ (97) *(номер и дата публикации европейской заявки)*

АДРЕС ДЛЯ ПЕРЕПИСКИ
(почтовый адрес, фамилия и инициалы или наименование адресата)
(630090, Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, 1, Грязнова Наталья Владимировна
(630090, Novosibirsk, prospekt Akademika Lavrentyeva, 1, Markovich Dmitriy Markovich)

Телефон: 83833356200 Факс:
Адрес электронной почты: grishina@tp.nsc.ru
АДРЕС ДЛЯ СЕКРЕТНОЙ ПЕРЕПИСКИ
(заполняется при подаче заявки на секретное изобретение)

ЗАЯВЛЕНИЕ о подаче патента на изобретение	В Федеральную службу по интеллектуальной собственности Бережковская наб., д. 30, корп. 1, г. Москва, Г-59, ГСП-3, 125993, Российская Федерация

(54) **НАЗВАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ**
ТРУБОПРОВОДНЫЙ ЭЛЕКТРОНАГРЕВАТЕЛЬ ТЕКУЧИХ СРЕД

(71) **ЗАЯВИТЕЛЬ** *(фамилия, имя, отчество (последнее – при наличии) физического лица или наименование юридического лица согласно учредительному документу), место жительства или место нахождения, почтовые адреса и почтовый индекс)*	**ИДЕНТИФИКАТОРЫ ЗАЯВИТЕЛЯ**
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук **(Federalnoe gosudarstvennoe biudzhetnoe uchrezhdenie nauki Institut teplofiziki im. S.S. Kutateladze Sibirskogo otdeleniia Rossiiskoi akademii nauk)** **630090, пр. Академика Лаврентьева, 1, г. Новосибирск** **(630090, pr. Akademika Lavrentyeva, 1, g. Novosibirsk)**	**ОГРН 1025403648786** **КПП 540801001** **ИНН 5408100860** **СНИЛС** **ДОКУМЕНТ** *(вид, серия, номер)* **КОД СТРАНЫ** *(если он установлен)* RU

☒ изобретение создано за счет средств федерального бюджета
Заявитель является:
☐ государственным заказчиком ☐ муниципальным заказчиком
исполнитель работ *(указать наименование)*

☒ исполнителем работ по:
☒ государственному контракту ☐ муниципальному контракту
☐ соглашению о предоставлении субсидии
☒ гранту
☐ государственному заданию
☐ инициативному заданию
заказчик работ *(указать наименование)*
Минобрнауки РФ, грант № 075-15-2025-007 от 28.02.2025

Общее количество документов в листах	18	Лицо, зарегистрировавшее документы
Из них: - количество листов комплекта изображений изделия (*для промышленного образца*)		Автоматизированная система
Количество платежных документов	1	

Сведения о состоянии делопроизводства по заявкам размещаются в Открытых реестрах на сайте ФИПС по адресу: *www.fips.ru/registers-web*

Форма № 94 ИЗ,ПМ,ПО-2016

Федеральная служба по интеллектуальной собственности
Федеральное государственное бюджетное учреждение

«Федеральный институт промышленной собственности»
(ФИПС)

Бережковская наб., д. 30, корп. 1, Москва, Г-59, ГСП - 3, 125993 **Телефон (8-499) 240-60-15 Факс (8-495) 531-63-18**

УВЕДОМЛЕНИЕ О ПРИЕМЕ И РЕГИСТРАЦИИ ЗАЯВКИ

23.09.2026	W26065486	2026129111
Дата поступления (дата регистрации)	*Входящий №*	*Регистрационный №*

ДАТА ПОСТУПЛЕНИЯ (дата регистрации) оригиналов документов заявки	(21) **РЕГИСТРАЦИОННЫЙ №**	**ВХОДЯЩИЙ №**
	(85) **ДАТА ПЕРЕВОДА** международной заявки на национальную фазу	

☐ (86) *(регистрационный номер международной заявки и дата международной подачи, установленные получающим ведомством)* ☐ (87) *(номер и дата международной публикации международной заявки)* ☐ (96) *(номер евразийской заявки и дата ее подачи)* ☐ (97) *(номер и дата публикации евразийской заявки)*	**АДРЕС ДЛЯ ПЕРЕПИСКИ** *(почтовый адрес, фамилия и инициалы или наименование адресата)* 630090, Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, 1, Гришина Наталья Владимировна (630090, Novosibirsk, prospekt Akademika Lavrentyeva, 1, Markovich Dmitriy Markovich) Телефон: 83833356290 Факс: Адрес электронной почты: grishina@itp.nsc.ru **АДРЕС ДЛЯ СЕКРЕТНОЙ ПЕРЕПИСКИ** *(заполняется при подаче заявки на секретное изобретение)*
З А Я В Л Е Н И Е **о выдаче патента на изобретение**	**В Федеральную службу по интеллектуальной собственности Бережковская наб., д. 30, корп. 1, г. Москва, Г-59, ГСП-3, 125993, Российская Федерация**

(54) **НАЗВАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ**
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ СТЕНД ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРООБОГРЕВА ТРУБОПРОВОДОВ

(71) **ЗАЯВИТЕЛЬ** *(фамилия, имя, отчество (последнее – при наличии) физического лица или наименование юридического лица (согласно учредительному документу), место жительства или место нахождения, название страны и почтовый индекс)* **Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук** **(Federalnoe gosudarstvennoe biudzhetnoe uchrezhdenie nauki Institut teplofiziki im. S.S. Kutateladze Sibirskogo otdeleniia Rossiiskoi akademii nauk)** **630090, пр. Академика Лаврентьева, 1, г. Новосибирск** **(630090, pr. Akademika Lavrentyeva, 1, g. Novosibirsk)**	**ИДЕНТИФИКАТОРЫ ЗАЯВИТЕЛЯ** **ОГРН 1 02 54 03 64878 6** **КПП 54 08 01 001** **ИНН 54 08 10004 0** **СНИЛС** **ДОКУМЕНТ** *(вид, серия, номер)* **КОД СТРАНЫ** *(если он установлен)* RU
☒ изобретение создано за счет средств федерального бюджета Заявитель является: ☐ государственным заказчиком ☐ муниципальным заказчиком исполнитель работ *(указать наименование)* **Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук** ☒ исполнителем работ по: ☐ государственному контракту ☐ муниципальному контракту ☐ соглашению о предоставлении субсидии ☒ гранту ☐ государственному заданию ☐ инициативному заданию заказчик работ *(указать наименование)* **Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, соглашение № 075-15-2025-007 от 28.02.2025**	

Общее количество документов в листах	27	Лицо, зарегистрировавшее документы
Из них: - количество листов комплекта изображений изделия (*для промышленного образца*)		Автоматизированная система
Количество платежных документов	1	

Сведения о состоянии делопроизводства по заявкам размещаются в Открытых реестрах на сайте ФИПС по адресу: www.fips.ru/registers-web

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Свидетельства о регистрации программ для ЭВМ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2026688076

Определение двумерного температурного поля протяженного трубопровода при резистивном нагреве

Правообладатель: ***Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук (RU)***

Авторы: ***Лавринович Михаил Валериевич (RU), Антонов Дмитрий Владимирович (RU), Стрижак Павел Александрович (RU), Микулич Анастасия Вячеславовна (RU)***



Заявка № **2026687445**

Дата поступления **09 сентября 2026 г.**

Дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ ***15 сентября 2026 г.***

Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной собственности

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат 00a570e4f7add8d531b4b8818e75f29506
Владелец **Зубов Юрий Сергеевич**
Действителен с 04.09.2025 по 28.11.2026

Ю.С. Зубов

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2026688512

Определение температурного поля протяженного трубопровода при скин-эффекте

Правообладатель: ***Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук (RU)***

Авторы: ***Лавринович Михаил Валериевич (RU), Антонов Дмитрий Владимирович (RU), Стрижак Павел Александрович (RU), Микулич Анастасия Вячеславовна (RU)***

Заявка № **2026688026**

Дата поступления **09 сентября 2026 г.**

Дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ ***18 сентября 2026 г.***

Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной собственности

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат 00a570e4f7add8d531b4b8818e75f29506
Владелец **Зубов Юрий Сергеевич**
Действителен с 04.09.2025 по 28.11.2026

Ю.С. Зубов

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Акты о внедрении

TOMSK POLYTECHNIC UNIVERSITY ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

УТВЕРЖДАЮ
Директор ИШЭ, канд. техн. наук
_____ А.С. Матвеев
«31» августа 2026 г.

АКТ О ВНЕДРЕНИИ
результатов диссертационной работы
Лавриновича Михаила Валерьевича
«ТЕПЛОПЕРЕНОС ПРИ РЕЗИСТИВНОМ ЭЛЕКТРООБОГРЕВЕ ПРОТЯЖЕННЫХ ТРУБОПРОВОДОВ»
в научной и образовательной деятельности Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета

Настоящим актом удостоверяется, что результаты диссертационной работы Лавринович М.В. «Теплоперенос при резистивном электрообогреве протяженных трубопроводов», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальностям 2.4.5 – «Энергетические системы и комплексы» и 1.3.14 – «Теплофизика и теоретическая теплотехника», используются в научной и образовательной деятельности Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета при выполнении научно-исследовательских работ в области разработки и исследования систем электрообогрева трубопроводов и при проведении лабораторных работ по дисциплине «Современные материалы и технологии в электроэнергетике и электротехнике» направления подготовки 13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника», образовательная программа «Высоковольтная энергетика, электроизоляционная, и кабельная техника».

Руководитель ООП
«Высоковольтная энергетика, электроизоляционная, и кабельная техника», кандидат технических наук, доцент
Отделение электроэнергетики и электротехники ИШЭ

_____ А.П. Леонов

ОБЩЕСТВО С ОГРАНИЧЕННОЙ ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ «РН-ПРОЕКТИРОВАНИЕ ДОБЫЧА»
(ООО «РН-Проектирование Добыча»)

634027, Российская Федерация, Томская область, городской округ город Томск, город Томск, проспект Мира, дом 70а
Тел.: (3822) 616-100, Факс: (3822) 616-011, e-mail: office@rn-pd.rosneft.ru
ОКПО 71976325, ОГРН 1257000005701, ИНН/КПП 7000028520/168150001

УТВЕРЖДАЮ
Первый заместитель генерального директора по производственным вопросам – главный инженер
ООО «РН-Проектирование Добыча»

А.С. Мальков

АКТ О ВНЕДРЕНИИ

результатов диссертационного исследования
Лавриновича Михаила Валериевича (диссертация кандидата технических наук) на тему
«Теплоперенос при резистивном электрообогреве протяженных трубопроводов»

ООО «РН-Проектирование Добыча» является специализированной проектной организацией, выполняющей разработку проектной документации по обустройству нефтяных и газовых месторождений, включая проектирование систем электрообогрева протяженных трубопроводов. Настоящим актом подтверждается, что результаты диссертационной работы Лавриновича Михаила Валериевича на тему «Теплоперенос при резистивном электрообогреве протяженных трубопроводов» используются в проектной деятельности ООО «РН - Проектирование Добыча» при разработке технических решений систем электрообогрева трубопроводов.

В текущей деятельности Общества используются следующие результаты диссертационного исследования:

- установленные закономерности влияния конструктивного исполнения нагревательного узла, толщины тепловой изоляции, пространственного расположения закладного элемента и положения греющего кабеля на длину плеча электрообогрева трубопроводов;
- научно обоснованные рекомендации по выбору рациональных параметров системы резистивного электрообогрева предизолированных трубопроводов.

Указанные результаты используются при сравнительной оценке вариантов исполнения систем электрообогрева, выборе параметров нагревательных кабелей, закладных элементов и тепловой изоляции, а также при обосновании и выборе рациональных проектных решений на стадии проектирования.

Ученый секретарь, к.т.н. **Ю.С. Захаревич**

Главный энергетик ПиР **Д.Н. Филиппов**