

Некоммерческое акционерное общество
«Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова»

УДК 621.365:697.275.7

На правах рукописи

БУЗЯКОВ РУСТАМ РАВИЛЬЕВИЧ

**Исследование и разработка энергоэффективного электротехнического
нагревательного устройства в качестве альтернативного источника
тепловой энергии**

6D071800 – Электроэнергетика

Диссертация на соискание степени
доктора философии (PhD)

Научный консультант
кандидат технических наук,
профессор А.Д. Мехтиев

Зарубежный научный консультант
доктор технических наук,
профессор А.В. Юрченко
ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский
Томский политехнический университет»

Республика Казахстан
Караганда, 2026

СОДЕРЖАНИЕ

НОРМАТИВНЫЕ ССЫЛКИ.....	4
ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ	6
ВВЕДЕНИЕ.....	9
1 СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ И АНАЛИЗ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ НАГРЕВАТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ КАК ИСТОЧНИКОВ ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ.....	18
1.1 Современное состояние электротеплоснабжения и требования к локальным электротехническим источникам теплоты	18
1.2 Классификация электротехнических нагревательных устройств и сравнительная оценка их характеристик	22
1.3 Тепловые трубки и двухфазные термосифоны как элементы теплопередачи в электротехнических нагревательных устройствах.....	25
1.4 Электровакуумные нагревательные устройства на основе тепловых трубок и термосифонов как перспективное направление развития альтернативных локальных источников тепловой энергии	29
Выводы по главе 1.....	34
2 РАСЧЕТНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЭЛЕКТРОВАКУУМНОЙ ТЕПЛОВОЙ ТРУБКИ В СОСТАВЕ ПЭНД..	36
2.1 Физическая схема ЭВТТ как теплопередающего узла ПЭНД	37
2.2 Электроэнергетическая модель преобразования активной мощности.....	38
2.3 Внешний энергетический баланс и расчет площади теплоотдачи	40
2.4 Численная постановка и проверка теплопереноса в ЭВТТ	43
2.5 Эксплуатационные ограничения и связь с секционным регулированием	46
Выводы по главе 2.....	48
3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПЭНД И ПРОВЕРКА РАСЧЕТНЫХ МОДЕЛЕЙ	50
3.1 Объект экспериментальных исследований, программа и обоснование выбора опытных образцов ПЭНД	50
3.2 Экспериментальный стенд, методы измерения и метрологическое обеспечение исследований ПЭНД.....	52
3.3 Экспериментальные исследования тепловых и температурных характеристик электровакуумной трубки ПЭНД.....	56
3.4 Экспериментальное определение энергетических показателей, поверхностной теплоотдающей способности и регрессионной модели ПЭНД.....	59
3.5 Проверка адекватности физико-математической и численной моделей по результатам экспериментальных исследований	64
3.6 Сравнительная экспериментальная оценка способов электрического теплоподвода и традиционного электрического отопительного прибора	68
Выводы по главе 3.....	76

4 РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ, СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА И ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ПЭНД КАК АЛЬТЕРНАТИВНОГО ИСТОЧНИКА ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ	79
4.1 Конструктивные и технологические решения ПЭНД как отопительного прибора	79
4.2 Инженерная методика расчета и выбора основных параметров ПЭНД ...	83
4.3 Электротехническое обоснование ПЭНД как управляемой электротепловой нагрузки системы электроснабжения	86
4.4 Система мониторинга, автоматического управления и аварийной защиты ПЭНД.....	95
4.5 Технико-экономическое обоснование гибридной системы отопления производственного цеха в Караганде с локальным догревом ПЭНД.....	99
4.6 Область рационального применения и рекомендации по внедрению, эксплуатации и техническому обслуживанию ПЭНД	112
Выводы по главе 4.....	114
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	117
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	120
ПРИЛОЖЕНИЕ А Сравнительная оценка основных групп электротехнических нагревательных устройств по электроэнергетическим, эксплуатационным, нормативным и конструктивно-теплотехническим признакам.....	131
ПРИЛОЖЕНИЕ Б Детализация теплофизической и численной постановки ЭВТТ	140
ПРИЛОЖЕНИЕ В Визуализация результатов численного моделирования ЭВТТ в COMSOL	144
ПРИЛОЖЕНИЕ Г Акт внедрения в учебный процесс	147
ПРИЛОЖЕНИЕ Д Акт внедрения на предприятии	150
ПРИЛОЖЕНИЕ Е Письмо о намерениях по выпуску ПЭНД.....	151
ПРИЛОЖЕНИЕ Ж Патент на полезную модель.....	152
ПРИЛОЖЕНИЕ З Свидетельство о внесении сведений в Государственный реестр прав на объекты, охраняемые авторским правом	

НОРМАТИВНЫЕ ССЫЛКИ

В настоящей диссертационной работе использованы ссылки на следующие нормативные правовые акты, строительные правила, межгосударственные и международные стандарты:

В настоящей диссертационной работе использованы ссылки на следующие нормативные правовые акты, строительные нормы и правила, межгосударственные и международные стандарты:

Указ Президента Республики Казахстан от 30 июля 2024 года № 611 «Об утверждении Национального плана развития Республики Казахстан до 2029 года и признании утратившими силу некоторых указов Президента Республики Казахстан».

Указ Президента Республики Казахстан от 2 февраля 2023 года № 121 «Об утверждении Стратегии достижения углеродной нейтральности Республики Казахстан до 2060 года».

Закон Республики Казахстан от 13 января 2012 года № 541-IV «Об энергосбережении и повышении энергоэффективности» с изменениями и дополнениями.

Закон Республики Казахстан от 8 июля 2024 года № 120-VIII ЗРК «О теплоэнергетике» с изменениями и дополнениями.

Постановление Правительства Республики Казахстан от 26 января 2026 года № 40 «О строительстве и районе строительства ядерной установки “Вторая атомная электрическая станция”».

СП РК 4.02-106-2013* «Автономные источники теплоснабжения».

СП РК 2.04-01-2017 «Строительная климатология».

Постановление Правительства Республики Казахстан от 28 марта 2023 года № 263 «Об утверждении Концепции развития электроэнергетической отрасли Республики Казахстан на 2023–2029 годы».

СП РК 4.02-101-2012* «Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха».

ГОСТ ИЕС 60335-2-30–2013 «Безопасность бытовых и аналогичных электрических приборов. Часть 2-30. Частные требования к комнатным обогревателям».

ГОСТ ИЕС 60335-1–2015 «Бытовые и аналогичные электрические приборы. Безопасность. Часть 1. Общие требования».

ГОСТ ИЕС 60335-2-96–2012 «Безопасность бытовых и аналогичных электрических приборов. Часть 2-96. Частные требования к гибким листовым нагревательным элементам для обогрева помещений».

ГОСТ 32144–2013 «Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения».

ГОСТ 30804.4.7–2013 «Совместимость технических средств электромагнитная. Общее руководство по средствам измерений и измерениям

гармоник и интергармоник для систем электроснабжения и подключаемых к ним технических средств».

IEC 60800:2009 «Heating cables with a rated voltage of 300/500 V for comfort heating and prevention of ice formation».

ГОСТ IEC 60335-2-61–2013 «Безопасность бытовых и аналогичных электрических приборов. Часть 2-61. Частные требования к аккумуляторным комнатным обогревателям».

ГОСТ Р 8.585–2001 «Государственная система обеспечения единства измерений. Термопары. Номинальные статические характеристики преобразования».

ГОСТ 34100.3–2017/ISO/IEC Guide 98-3:2008 «Неопределенность измерения. Часть 3. Руководство по выражению неопределенности измерения».

ГОСТ 8.417–2024 «Государственная система обеспечения единства измерений. Единицы величин».

ГОСТ 29322–2014 (IEC 60038:2009) «Напряжения стандартные».

Приказ Министра энергетики Республики Казахстан от 20 марта 2015 года № 230 «Об утверждении Правил устройства электроустановок».

Приказ Министра энергетики Республики Казахстан от 30 марта 2015 года № 246 «Об утверждении Правил технической эксплуатации электроустановок потребителей».

Приказ Министра энергетики Республики Казахстан от 19 марта 2015 года № 222 «Об утверждении Правил техники безопасности при эксплуатации электроустановок потребителей».

ГОСТ 147–2013 (ISO 1928:2009) «Топливо твердое минеральное. Определение высшей теплоты сгорания и расчет низшей теплоты сгорания».

Приказ Министра здравоохранения Республики Казахстан от 16 февраля 2022 года № ҚР ДСМ-15 «Об утверждении Гигиенических нормативов к физическим факторам, оказывающим воздействие на человека» с изменениями и дополнениями.

ГОСТ 12.1.005–88 «Система стандартов безопасности труда. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны».

СН РК 4.02-01-2011 «Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха».

СН РК 2.04-07-2022 «Тепловая защита зданий».

СП РК 2.04-107-2022 «Тепловая защита зданий».

ГОСТ 5916–70 – стандарт, примененный в спецификации 3D-модели ПЭНД для контргайки 2М18×1,5-6Н.04.

ГОСТ 11650–80 – стандарт, примененный в спецификации 3D-модели ПЭНД для винта М4×12.01.

Приказ Министра энергетики Республики Казахстан от 24 декабря 2025 года № 508 «Об утверждении предельных тарифов на электрическую энергию».

ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

РК	– Республика Казахстан
ВИЭ	– возобновляемые источники энергии
АЭС	– атомная электрическая станция
ВВЭР-1200	– водо-водяной энергетический реактор электрической мощностью класса 1200 МВт
Power-to-Heat	– преобразование электрической энергии в тепловую энергию
4GDH	– 4th Generation District Heating, теплоснабжение четвертого поколения
PM _{2.5}	– взвешенные частицы диаметром до 2,5 мкм
ПДК	– предельно допустимая концентрация
ПЭНД	– паровой электрообогреватель низкого давления; разработанное в работе локальное электротехническое нагревательное устройство на основе электровакуумной тепловой трубки
ЭВТТ	– электровакуумная тепловая трубка
ЭВНУ	– электровакуумное нагревательное устройство
ЭТНУ	– электротехническое нагревательное устройство
COMSOL Multiphysics	– программный комплекс численного моделирования физических процессов
ИИ	– искусственный интеллект
МНВО РК	– Министерство науки и высшего образования Республики Казахстан
ИРН	– индивидуальный регистрационный номер научного проекта
НАО	– некоммерческое акционерное общество
PhD	– Doctor of Philosophy, доктор философии
ТОО	– товарищество с ограниченной ответственностью
ТЭЦ	– теплоэлектроцентраль
СП РК	– строительные правила Республики Казахстан
ИК	– инфракрасный
ГОСТ IEC	– межгосударственный стандарт, гармонизированный со стандартом IEC
ГОСТ IEC	– межгосударственный стандарт – International Electrotechnical Commission, Международная электротехническая комиссия
ТЭН	– трубчатый электронагреватель
PF	– Power Factor, коэффициент мощности
LPG	– Liquefied Petroleum Gas, сжиженный углеводородный газ
CFD	– Computational Fluid Dynamics, численное моделирование гидро- и газодинамических процессов

IAPWS-IF97	– промышленная формуляция IAPWS для термодинамических свойств воды и водяного пара
S01–S40	– основная программа экспериментальных серий ПЭНД
LOO	– Leave-One-Out, проверка модели с исключением одного наблюдения
V01–V19	– специальная экспериментальная серия для оценки влияния начального остаточного давления
LCO	– Leave-One-Configuration-Out, проверка модели с исключением одной конфигурации
VIF	– Variance Inflation Factor, фактор инфляции дисперсии
MAE	– Mean Absolute Error, средняя абсолютная ошибка
RMSE	– Root Mean Square Error, среднеквадратическая ошибка
ШИМ	– широтно-импульсная модуляция
OIL-500	– контрольный масляный обогреватель мощностью 500 Вт, использованный в сравнительных испытаниях
ПЭНД-600, ПЭНД-800, ПЭНД-1000	– приборные модули ПЭНД номинальной мощностью 600, 800 и 1000 Вт соответственно
zero-cross	– коммутация или пакетное регулирование при переходе напряжения через ноль
SSR	– Solid State Relay, твердотельное реле
THD	– Total Harmonic Distortion, коэффициент гармонических искажений
УЗО	– устройство защитного отключения
PE	– Protective Earth, защитный проводник
Pt100, Pt1000	– платиновые термопреобразователи сопротивления с номинальным сопротивлением 100 и 1000 Ом соответственно
DS18B20	– цифровой температурный датчик для низкотемпературных зон контроля
Arduino	– микроконтроллерная платформа, использованная в опытной системе мониторинга и управления
OneWire	– однопроводная цифровая шина обмена данными с температурными датчиками
LCD	– Liquid Crystal Display, жидкокристаллический дисплей
USB-COM	– виртуальный последовательный порт через интерфейс USB
CSV	– Comma-Separated Values, текстовый формат записи табличных данных
PyQt6, PyQtGraph	– библиотеки Python, использованные в опытной программе оператора для интерфейса и визуализации данных
KBp-0,3	– водогрейный твердотопливный котел тепловой мощностью 0,3 МВт
СН РК	– строительные нормы Республики Казахстан

ПУЭ	– Правила устройства электроустановок
ПТЭ	– Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей
ПТБ	– Правила техники безопасности при эксплуатации электроустановок потребителей
GCI	– Grid Convergence Index, индекс сеточной сходимости численного решения

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы. Электроэнергетика Республики Казахстан развивается в условиях роста электрических нагрузок, высокого износа генерирующих и сетевых активов, необходимости повышения энергоэффективности и перехода к низкоуглеродной модели развития. Согласно Национальному плану развития Республики Казахстан до 2029 года, в 2023 году разница между производством и потреблением электроэнергии составила 2,2 млрд кВт·ч, а к 2029 году может достигнуть 6,9 млрд кВт·ч. При этом доля электростанций старше 30 лет составляет 56%, средний износ электрических сетей – 74%, а потери при распределении электроэнергии достигают 14 % [1]. На энергетический сектор приходится 77,6% национальных нетто-эмиссий, а вклад угля превышает 55,7%, что усиливает значение энергосбережения и повышения эффективности конечного использования электрической энергии [2, 3].

Актуальность управляемых электрических нагрузок возрастает на фоне изменения структуры генерации. По оценкам Agora Energiewende, к 2030 году солнечная и ветровая генерация могут стать наиболее экономически привлекательными источниками новой электроэнергии в Казахстане [4]. Доля возобновляемых источников энергии в производстве электроэнергии составила 6,4% в 2024 году, или 7,55 млрд кВт·ч [5], и 7% в 2025 году, или 8,62 млрд кВт·ч, при целевом ориентире 15% к 2030 году [4, 6]. Одновременно в стране формируются предпосылки развития атомной генерации как источника низкоуглеродной базовой мощности [7, 8]. В этих условиях возрастает значение управляемых электрических нагрузок, в том числе электротепловых, способных изменять режим потребления активной мощности и согласовывать тепловой спрос с режимами работы энергосистемы.

В международной практике такое направление рассматривается как согласованное развитие электроэнергетики и теплоснабжения. Технологии преобразования электрической энергии в тепловую позволяют использовать электротепловые нагрузки для интеграции возобновляемой генерации, гибкого управления нагрузкой и замещения ископаемого топлива [9]. Поэтому преобразование электрической энергии в теплоту для отопления, локального обогрева и автономного теплоснабжения потребителей является не только теплотехнической, но и электроэнергетической задачей, связанной с режимами потребления активной мощности и рациональным использованием электроэнергии.

Переход к локальному и децентрализованному электротеплоснабжению согласуется с задачами повышения надежности и эффективности теплоснабжения, закрепленными в законодательстве Республики Казахстан о теплоэнергетике [10]. Для большинства регионов страны характерен отопительный период продолжительностью более шести месяцев. По данным Международного энергетического агентства, около 30% домохозяйств Казахстана используют уголь или дрова, а удельное потребление энергии

зданиями в 2–3 раза выше, чем в северной части Западной Европы [11]. Концепция теплоснабжения четвертого поколения рассматривает тепловые нагрузки как часть энергетических систем, где электрические, тепловые и газовые сети работают согласованно [12].

Дополнительным фактором, усиливающим актуальность локального электротеплоснабжения, является сезонное загрязнение атмосферного воздуха при использовании твердого топлива. В 2021 году среднегодовые концентрации PM_{2.5} в Астане и Алматы превышали ориентир Всемирной организации здравоохранения соответственно в 4,5 и 7,1 раза [13]. В Караганде в 2024 году было зафиксировано 46 256 превышений предельно допустимых концентраций загрязняющих веществ, при этом около 25 тыс. домохозяйств использовали твердотопливные печи, потребляя за сезон порядка 290 тыс. тонн угля [14]. По оценке Всемирного банка, малые бытовые печи и котлы относятся к значимым источникам выбросов PM_{2.5} [15].

Локальные электротехнические нагревательные устройства в этих условиях приобретают значение как элементы распределенного электротеплоснабжения. Их преимуществами являются простота подключения, возможность автоматизации, секционного регулирования мощности и непосредственного преобразования активной электрической мощности в тепловую энергию в месте потребления. Вместе с тем традиционные электрические отопительные приборы не всегда обеспечивают одновременное сочетание секционного или ступенчатого регулирования мощности, ограниченной тепловой инерционности, равномерной теплоотдачи и ограничения температуры доступной поверхности, работы без внешнего водяного контура, наблюдаемости и совместимости с автоматическим контролем, электробезопасности и качества потребления электрической энергии.

Перспективным направлением повышения эффективности таких устройств является использование двухфазного теплопереноса в тепловых трубках и термосифонах. Современные исследования подтверждают возможности тепловых труб в системах передачи и перераспределения теплоты [16], а теоретические основы процессов в тепловых трубках и двухфазных термосифонных системах изложены в работах Dunn и Reay [17], Chi [18], Безродного, Piro и Костюка [19], а также Faghri [20]. Такие системы обеспечивают перенос теплоты за счет испарения рабочего тела, движения пара в зону конденсации и возврата конденсата без внешнего водяного контура и циркуляционного насоса.

Несмотря на развитую теоретическую базу по тепловым трубкам и термосифонам, применительно к паровому электрообогревателю низкого давления (ПЭНД) на основе электровакуумной тепловой трубки (ЭВТТ) гравитационного типа сохраняются три научно-технические лакуны. В известной литературе не представлено физико-математическое и численное описание ЭВТТ как электротеплового узла ПЭНД при подводе активной мощности в испарительную зону. Экспериментально не установлены

зависимости температурного поля теплоотдающей поверхности ПЭНД от электрических режимов теплоподвода, количества рабочего тела, начального остаточного давления и геометрии секции. Недостаточно разработано электроэнергетическое обоснование ПЭНД как управляемой электротепловой нагрузки, включая секционное управление, мониторинг температурных и электрических параметров и требования к безопасному применению.

В настоящей работе указанное направление рассматривается на примере ПЭНД. По физическому принципу ЭВТТ ПЭНД представляет собой бесфитильный двухфазный закрытый гравитационный термосифон. Введение такого устройства в предметную область исследования обусловлено необходимостью разработки энергоэффективного, управляемого и конструктивно простого электротехнического нагревательного устройства, способного выполнять функции альтернативного локального источника тепловой энергии без применения внешнего водяного контура.

Таким образом, актуальность диссертационной работы определяется потребностью электроэнергетики Республики Казахстан в повышении эффективности конечного энергопотребления, развитии управляемых электротепловых нагрузок и снижении зависимости локального теплоснабжения от твердого топлива, а также отсутствием в известной литературе целостного физико-математического, экспериментального и электроэнергетического обоснования ПЭНД как электротехнического нагревательного устройства с внутренним двухфазным теплопередающим элементом. Это обуславливает необходимость исследования и разработки энергоэффективного электротехнического нагревательного устройства как альтернативного источника тепловой энергии для локального автономного, децентрализованного и гибридного электротеплоснабжения.

Цель диссертационной работы – исследование и разработка энергоэффективного электротехнического нагревательного устройства, обеспечивающего функции альтернативного источника тепловой энергии для локального автономного, децентрализованного и гибридного электротеплоснабжения.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи**:

– выполнить анализ современного состояния электрического теплоснабжения и электротехнических нагревательных устройств, обобщить свойства тепловых труб и двухфазных термосифонов, выявить ограничения существующих решений и обосновать научно-технический пробел в исследовании электровакуумных нагревательных устройств отопительного назначения;

– разработать физико-математическую и численную модель электровакуумной тепловой трубки ПЭНД, выполнить расчетный анализ температурных полей, тепловых потоков и энергетического баланса, определить условия устойчивой работы двухфазного цикла и предельные режимы устройства;

– разработать экспериментальный стенд и провести стендовые исследования опытных образцов ПЭНД для получения температурных, тепловых и энергетических характеристик, оценки влияния конструктивно-режимных параметров и проверки расчетных положений модели;

– обосновать конструктивно-технологические и электротехнические решения ПЭНД, включая секционную структуру, систему мониторинга и автоматического управления, инженерную методику выбора параметров и область рационального применения устройства в локальных, автономных, децентрализованных и гибридных схемах электротеплоснабжения.

Объектом исследования является паровой электрообогреватель низкого давления (ПЭНД) на основе электровакуумной тепловой трубки гравитационного типа – электротехническое нагревательное устройство секционной модульной конструкции, предназначенное для локального автономного, децентрализованного и гибридного электротеплоснабжения потребителей.

Предметом исследования являются закономерности электротеплового преобразования, фазового тепломассопереноса и формирования температурного поля в электровакуумной тепловой трубке ПЭНД при изменении электрической мощности, количества рабочего тела, параметров вакуумированной полости, геометрии устройства и условий внешней теплоотдачи.

Идея работы состоит в реализации управляемого электротеплового преобразования активной электрической мощности в секционном электротехническом нагревательном устройстве, где зона электрического теплоподвода совмещена с испарительной зоной электровакуумной тепловой трубки, а распределение теплоты по теплоотдающей поверхности обеспечивается за счет фазового перехода рабочего тела и двухфазного тепломассопереноса в вакуумированной среде.

Повышение эффективности ПЭНД достигается за счет разделения зоны высокоинтенсивного электротеплового преобразования и зоны распределенной теплоотдачи, снижения локальной тепловой напряженности нагревательного узла, выравнивания температурного поля теплоотдающей поверхности и согласования режима работы секций с фактической тепловой нагрузкой помещения. Под энергоэффективностью ПЭНД в настоящей работе понимается не повышение коэффициента полезного действия преобразования электрической энергии в теплоту, который у устройств прямого электротеплового преобразования близок к единице, а более равномерное распределение теплоты по теплоотдающей поверхности, снижение локальной тепловой напряженности, сокращение времени выхода на режим и управляемость электротепловой нагрузки.

Методы исследования. Научные и практические результаты диссертационной работы получены с использованием теоретического анализа, физико-математического и численного моделирования, методов теплопередачи, тепломассопереноса, теории фазовых переходов,

электротехники, планирования эксперимента и статистической обработки данных.

Модель учитывает нестационарную теплопроводность твердых элементов, фазовый переход рабочего тела, парожидкостный перенос, возврат конденсата, энергетический баланс и внешний теплообмен. Численная реализация выполнена в COMSOL Multiphysics; подвод активной электрической мощности в испарительной зоне задан эквивалентным тепловым потоком.

Экспериментальные исследования проведены на лабораторном стенде с контролем электрической мощности, напряжения, тока, температуры, остаточного давления, времени и параметров окружающей среды. Обработка данных включала определение средних значений, доверительных интервалов, регрессионных зависимостей, погрешностей и сопоставление расчетных и экспериментальных результатов.

Научная новизна диссертационной работы заключается в следующем:

- впервые для парового электрообогревателя низкого давления на основе электровакуумной тепловой трубки гравитационного типа разработана физико-математическая и численная модель электротеплового преобразования при интеграции электрического нагревателя в зону испарителя и с ее использованием установлены зависимости интегральных тепловых потоков, времени выхода на режим и температурного поля теплоотдающей поверхности от динамических режимов электрического теплоподвода, а также определены условия устойчивой работы двухфазного цикла при заданных значениях электрической мощности, объема рабочего тела и геометрии испарительной зоны;

- установлены для исследованных диапазонов электрической мощности, количества рабочего тела, начального остаточного давления и геометрических параметров новые зависимости температурных и энергетических характеристик электровакуумной тепловой трубки ПЭНД от указанных параметров, в том числе при сопоставлении трубчатого и индукционного способов электротеплоподвода;

- определены расчетные и экспериментальные признаки работоспособного двухфазного режима ПЭНД, включающие энергетический баланс подвода и отвода теплоты, допустимый температурный уровень испарительной зоны, устойчивый возврат жидкой фазы, соответствие давления и температуры условию насыщения рабочего тела и воспроизводимость пусковых температурно-временных кривых;

- научно обоснованы конструктивно-режимные принципы согласования двухфазного тепломассопереноса в электровакуумной тепловой трубке секционного ПЭНД с алгоритмами автоматического управления электрической нагрузкой, обеспечивающие применение прибора как управляемой электрической нагрузки в автономных и гибридных схемах электротеплоснабжения, согласующейся с режимами работы низкоуглеродной генерации.

Основные научные положения, выносимые на защиту:

– физико-математическая и численная модель электротеплового преобразования в электровакуумной тепловой трубке ПЭНД, учитывающая подвод активной электрической мощности, двухфазный теплоперенос, возврат конденсата и внешний теплообмен;

– экспериментально установленные регрессионные зависимости локального перегрева рабочей поверхности секции ПЭНД от удельной электротепловой нагрузки, удельного конструктивно-массового параметра и объема рабочего тела, позволяющие прогнозировать температурный режим секции;

– конструктивно-режимные принципы построения секционного ПЭНД как управляемой электротепловой нагрузки с регулированием активной мощности, температурным мониторингом и контролем напряжения, тока и мощности;

– инженерная методика выбора параметров ПЭНД, связывающая тепловую нагрузку помещения, число секций, установленную мощность, температурный режим и эксплуатационные ограничения устройства.

Практическая значимость работы состоит в использовании полученных результатов при проектировании и эксплуатации локальных электротехнических нагревательных устройств на основе электровакуумных тепловых трубок. Разработанная модель, экспериментальные зависимости и инженерная методика позволяют выбирать мощность и число секций, параметры рабочего тела, вакуумирования, теплоотдачи и температурного контроля с учетом тепловой нагрузки помещения и доступной электрической мощности.

Практическим результатом является конструктивно-технологическое решение ПЭНД как секционного электротехнического нагревательного устройства с системой мониторинга, автоматического управления и электрической защиты.

Область рационального применения результатов включает автономные и отдельно стоящие здания без доступа к тепловым сетям, реконструируемые объекты, в которых прокладка водяного контура затруднена или экономически нецелесообразна, помещения с зонально-неравномерной тепловой нагрузкой, гибридные схемы промышленных и общественных зданий, а также локальный догрев рабочих зон. ПЭНД позиционируется как управляемый локальный электротехнический источник теплоты, дополняющий централизованное и водяное отопление в указанных сценариях при наличии достаточной электрической мощности, соответствующих тарифных условий и технической возможности подключения.

Обоснованность и достоверность научных положений, результатов и выводов обеспечиваются применением апробированных положений электротехники, теплопередачи, тепломассопереноса, теории фазовых переходов и термодинамики, корректной постановкой физико-математической

модели, контролем энергетического баланса и сопоставлением расчетных данных с экспериментальными результатами.

Экспериментальная достоверность подтверждается использованием лабораторного стенда, контролем температуры, электрической мощности, напряжения, тока, остаточного давления, массы и геометрических параметров, а также проведением серий испытаний при различных режимах работы ПЭНД. Оценка результатов выполнена с учетом погрешностей измерений, статистической обработки данных и определения доверительных интервалов.

Личный вклад автора состоит в постановке цели и задач исследования, формулировании рабочей гипотезы, разработке физико-математической модели электровакуумной тепловой трубки ПЭНД и ее численной реализации в COMSOL Multiphysics, проектировании и сборке экспериментального стенда, проведении стендовых испытаний, статистической обработке результатов и верификации расчетной модели, обосновании конструктивно-технологических и электротехнических решений секционного ПЭНД, разработке системы мониторинга и автоматического управления, инженерной методики выбора параметров, технико-экономической оценки, а также в обобщении полученных результатов, формулировании выводов диссертационного исследования и практических рекомендаций.

Использование технологий искусственного интеллекта. На завершающем этапе подготовки окончательной редакции диссертационной работы автором использовалась технология генеративного искусственного интеллекта ChatGPT, производитель/правообладатель – OpenAI, модели/версии: GPT-5.2, GPT-5.3 и GPT-5.4; период обращения и использования: январь-апрель 2026 года. Технология применялась исключительно как вспомогательный цифровой инструмент для сверки авторского текста с англоязычными первоисточниками, вспомогательного перевода отдельных фрагментов, унификации терминологии, сокращений и обозначений, а также технической компоновки отдельных автором подготовленных рисунков и схем без изменения их научного содержания. Научные положения, модели, расчетные и экспериментальные результаты, интерпретация данных, выводы и рекомендации сформированы автором самостоятельно. Материалы и предложения, полученные при обращении к ChatGPT, проверялись автором по первоисточникам, технической документации, нормативным материалам и исходным данным исследования. Запросы к ChatGPT не были направлены на создание новых научных результатов, замену авторского анализа, фабрикации данных либо уменьшение возможности выявления заимствований. Персональные данные, конфиденциальная и иная охраняемая законом информация не раскрывались.

Связь работы с научными программами. Диссертационное исследование выполнено в рамках научного проекта грантового финансирования Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан по программе «Жас ғалым» (проект ИРН AP25795573 «Разработка энергоэффективного парового электровакуумного нагревателя для бытового и

промышленного отопления», договор №92 ЖФ-25-27 от 27 февраля 2025 года, на основании решения Национального научного совета «Энергия, передовые материалы и транспорт» от 11 февраля 2025 года). Автор диссертационной работы является научным руководителем указанного проекта.

Апробация и внедрение результатов исследования.

Основные научные и практические результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на IV Международной научной конференции «Приоритетные направления инновационной деятельности в промышленности» (г. Казань, 29–30 апреля 2020 г.) и Международной научно-практической online конференции «Интеграция науки, образования и производства – основа реализации Плана нации» (Сагиновские чтения № 12, г. Караганда, 18–19 июня 2020 г.).

Результаты исследования также обсуждались на заседаниях кафедры «Автоматизация производственных процессов» и научно-технического совета НАО «Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова».

Результаты диссертационного исследования внедрены в учебный процесс НАО «Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова» при изучении дисциплины «Электромеханика и электротехническое оборудование» образовательной программы 6В07107 «Электроэнергетика», что подтверждается актом внедрения в учебный процесс (Приложение Г).

Практическая апробация результатов работы проведена в ТОО «Global light LLP» при рассмотрении вопросов применения разработанных конструктивно-технологических и электротехнических решений ПЭНД для локального электротеплоснабжения, что подтверждается актом внедрения в производство (Приложение Д).

Результаты работы также представлены в ТОО «Silumin of Qazaqstan» («Силумин оф Казахстан»), специализирующемся на производстве радиаторов отопления. На предприятии рассмотрены возможности изготовления и последующего выпуска разработанного радиатора на основе электровакуумной тепловой трубки, что подтверждается письмом о намерениях (Приложение Е).

Материалы диссертационной работы отражены в 10 публикациях и охранных документах.

По теме исследования опубликованы 2 статьи в международных научных изданиях, входящих в базу данных Scopus, 4 статьи в изданиях, рекомендованных Комитетом по обеспечению качества в сфере науки и высшего образования МНВО РК, и 2 публикации в материалах международных научно-практических конференций.

Получены 2 охранных документа на объекты интеллектуальной собственности: патент Республики Казахстан на полезную модель №10146 (Приложение Ж) и свидетельство об авторском праве №63992 (Приложение З).

Структура диссертации. Диссертационная работа состоит из нормативных ссылок, обозначений и сокращений, введения, четырех глав, заключения, списка использованных источников и приложений.

Благодарности. Автор чтит светлую память своего первого научного руководителя, д.т.н., профессора И.В. Брейдо, под руководством которого в 2018–2021 гг. были определены общее направление исследования, исходная проблематика и получены первые научные результаты.

Автор выражает благодарность первому зарубежному научному консультанту, д.т.н., профессору С.М. Стажкову, за научные консультации и ценные рекомендации на начальном этапе выполнения диссертационной работы.

Автор выражает глубокую признательность научному консультанту, к.т.н., профессору А.Д. Мехтиеву, за значительный вклад в развитие исследования, последовательное научное сопровождение работы, ценные рекомендации и поддержку на всех этапах выполнения диссертации.

Автор также выражает благодарность зарубежному научному консультанту, д.т.н., профессору А.В. Юрченко, за научное сопровождение исследования на завершающем этапе, экспертные рекомендации и поддержку при подготовке диссертации к защите.

Автор выражает искреннюю благодарность коллективу Карагандинского технического университета имени Абылкаса Сагинова, кафедры Автоматизации производственных процессов за содействие, поддержку и создание благоприятных условий для выполнения диссертационного исследования.

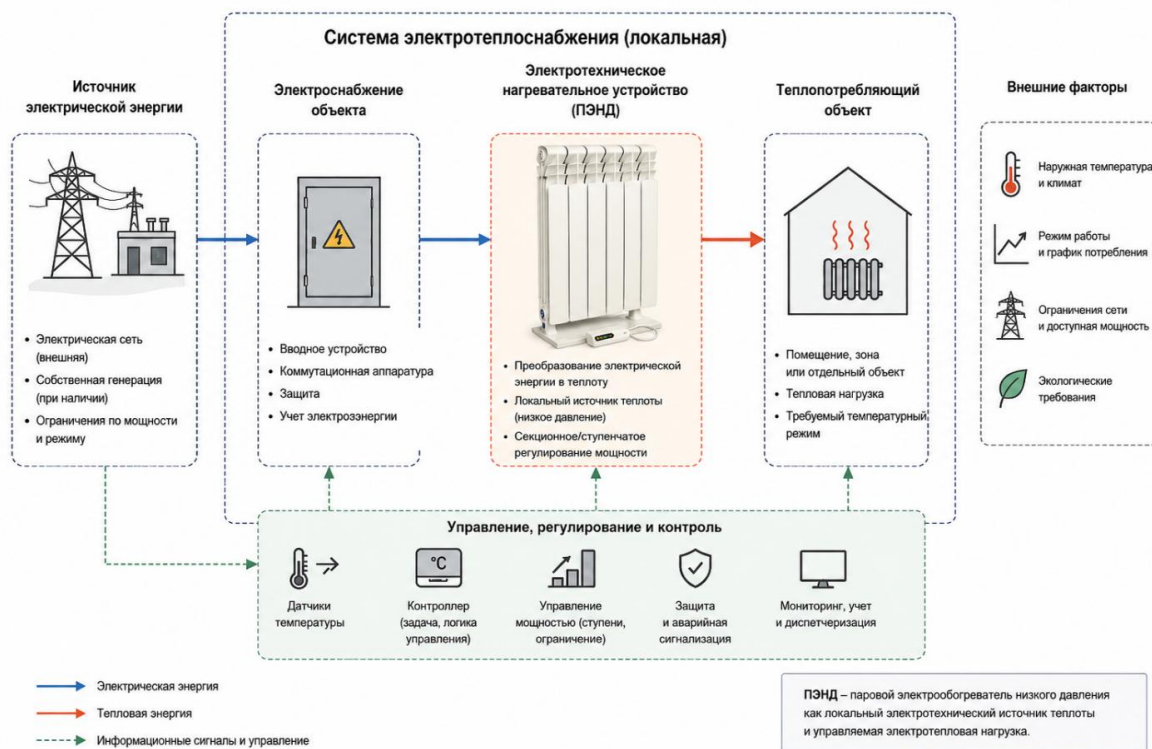
1 СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ И АНАЛИЗ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ НАГРЕВАТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ КАК ИСТОЧНИКОВ ТЕПЛОЙ ЭНЕРГИИ

1.1 Современное состояние электротеплоснабжения и требования к локальным электротехническим источникам теплоты

Рассмотрение локальных электротехнических источников теплоты целесообразно начать с общего представления о теплоснабжении как взаимосвязанной инженерной системе. В такой системе источник теплоты, средства ее передачи и теплопотребляющие установки работают как единый комплекс. В учебной литературе она обычно описывается через производство теплоты, ее транспортирование и использование у потребителя [21–23]. Закон Республики Казахстан «О теплоэнергетике» определяет систему теплоснабжения как комплекс установок для производства, транспортировки и использования теплоносителя, а источник тепловой энергии – как теплоэлектроцентраль, котельную или иную установку, предназначенную для производства теплоты [10].

В данной работе рассматривается та часть теплоснабжения, в которой электрическая энергия преобразуется в теплоту непосредственно у потребителя: в здании, помещении, технологической зоне или вблизи места тепловой нагрузки. В таком понимании электротеплоснабжение не ограничивается отдельным нагревателем. Оно включает источник электропитания, электротехническое нагревательное устройство (далее – ЭТНУ), средства регулирования, учета и автоматического контроля, а также режимы взаимодействия с электрической сетью [3; 24–26]. Поэтому ЭТНУ выступает одновременно приемником электрической энергии и локальным источником теплоты.

Паровой электрообогреватель низкого давления (ПЭНД) относится к такому классу устройств и рассматривается как локальный источник теплоты, совмещенный с управляемой электротепловой нагрузкой. Конструкция ПЭНД и процессы внутри его теплопередающего узла рассматриваются далее. Здесь важно определить место прибора в системе электротеплоснабжения объекта – с учетом тепловой нагрузки, режима электропотребления, средств регулирования и автоматического контроля [25–26]. Обобщенная схема включения ПЭНД в локальную систему электротеплоснабжения приведена на рисунке 1.1.



Примечание – Составлено автором
 Рисунок 1.1 – Место ПЭНД в системе локального электротеплоснабжения объекта

По назначению ПЭНД относится к локальным электротехническим источникам теплоты. Наиболее естественная область его применения связана с децентрализованными, местными, индивидуальными, автономными и комбинированными схемами электротеплоснабжения. В таких схемах источник теплоты приближается к потребителю, протяженный водяной контур отсутствует либо требуется дополнительный управляемый догрев отдельных зон [9; 24–25].

Для Казахстана этот вопрос имеет не только теоретическое, но и прикладное значение. Значительная часть территории страны отличается низкими температурами холодного периода, длительным отопительным сезоном и повышенными требованиями к теплозащите зданий [27]. Вне зоны действия тепловых сетей выбор источника теплоты зависит от доступности газа, угля, электроэнергии и от технических условий подключения объекта [22; 28–30]. В этой связи электрическое отопление занимает прежде всего ту область, где локальный управляемый источник теплоты технически, энергетически и эксплуатационно оправдан. Такой подход согласуется с задачами повышения энергоэффективности, снижения локальных выбросов и учета структуры электроэнергетики Казахстана [1–2; 5; 11; 15; 31–32].

Эффективность локального ЭТНУ в данной работе понимается в функционально-режимном, а не только в узком балансовом смысле. Поскольку у устройств прямого электротеплового преобразования КПД преобразования

электрической энергии в теплоту близок к единице [49–50], сопоставление таких устройств по этому показателю малоинформативно. Поэтому оценка ведется по равномерности теплоотдачи, времени выхода на режим, управляемости электротепловой нагрузки, возможности замещения топлива и согласования работы устройства с режимами энергосистемы.

С электроэнергетических позиций в такой постановке на первый план выходит управляемость электротепловой нагрузки. Концепция развития электроэнергетической отрасли Республики Казахстан на 2023–2029 годы указывает на дефицит мощности, недостаток маневренных резервов, технические ограничения генерирующего оборудования и необходимость цифровизации управления энергосистемой [33]. Для этих условий практически значимы нагревательные устройства, способные работать с учетом доступной мощности, графика потребления, температурных уставок и сигналов автоматики.

Близкая логика прослеживается и в международной практике, где развитие электроэнергетики все чаще рассматривается совместно с развитием теплоснабжения. Технологии преобразования электрической энергии в теплоту позволяют использовать электротепловые нагрузки для интеграции возобновляемой генерации, управления спросом и согласования режимов электрических и тепловых систем [9; 24; 34–37]. При проектировании учитываются состояние внутренней электрической инфраструктуры, пропускная способность распределительных сетей, уровень тепловой нагрузки, режим эксплуатации и стоимость электроэнергии [38–40].

С этой точки зрения практический интерес представляют локальные электрические нагревательные устройства, обеспечивающие быстрый догрев, работу без внешнего водяного контура и управляемое потребление активной мощности. В теплотрубных отопительных приборах применение двухфазных теплопередающих элементов повышает плотность теплоотдачи и уменьшает тепловую инерционность. Поэтому этот подход является существенным для анализа ПЭНД как локального ЭТНУ [41–42].

Отсюда следует, что перспективное локальное ЭТНУ должно оцениваться двояко: как источник теплоты и как электрическая нагрузка. Для данной работы исходными являются требования, приведенные в таблице 1.1; среди них отдельно выделяется наблюдаемость температурных и электрических параметров при автоматическом контроле.

Состав требований таблицы 1.1 определен пересечением двух групп условий: теплотехнических требований к локальному отопительному прибору (равномерная теплоотдача, ограничение температуры доступной поверхности, ограниченная тепловая инерционность, работа без внешнего водяного контура) и электроэнергетических требований к управляемой электротепловой нагрузке (секционное регулирование мощности, наблюдаемость, электробезопасность и качество потребления), вытекающих из нормативной базы [10; 46–47] и задач управления электротепловыми нагрузками [33; 37]. Массогабаритные, ресурсные и стоимостные показатели не включены в число

отборочных требований, поскольку они определяются конкретным исполнением и установленной мощностью и учитываются на стадии расчетно-конструкторской проработки. Экономическая целесообразность электроотопления зависит прежде всего от тарифных условий и доступности альтернативных энергоносителей, поэтому в данной главе она рассматривается как условие, ограничивающее область рационального применения локальных ЭТНУ, а не как сравнительный признак отдельных групп устройств.

Таблица 1.1 – Требования к перспективному локальному ЭТНУ

Требование	Содержание и обоснование требования применительно к ПЭНД
Секционное или ступенчатое регулирование мощности	Согласование теплового режима с фактической нагрузкой помещения и с выделенной электрической мощностью объекта [37; 43]
Ограниченная тепловая инерционность	Быстрый выход на режим, оперативное ограничение мощности и возможность участия в гибком потреблении [37; 44]
Равномерная теплоотдача и ограничение температуры доступной поверхности	Ограничение температуры доступной поверхности готового прибора с кожухом и оребрением в пределах требований к бытовым электрическим отопительным приборам; снижение локальных перегревов теплоотдающей поверхности [45–47]
Работа без внешнего водяного контура	Применение в автономных, реконструируемых, удаленных и локальных зонах без прокладки трубопроводной сети [30; 48]
Наблюдаемость и совместимость с автоматическим контролем	Работа по температурным уставкам, учет режима потребления, мониторинг температурных и электрических параметров, согласование с цифровыми средствами управления объектом [3; 25–26; 33]
Электробезопасность и качество потребления	Выполнение требований к электрическим отопительным приборам; учет коммутации, защиты и качества электрической энергии при выборе схемы управления [46–47]

Примечание – Составлено автором на основании источников [3; 25–26; 30; 33; 37; 43–48]

Итак, современное электротеплоснабжение закономерно развивается в сторону локальных управляемых электротехнических источников теплоты. В условиях Казахстана область их рационального применения задается климатом, неоднородностью теплоснабжения и газоснабжения, экологическими факторами, структурой электроэнергетики и необходимостью управления электротепловыми нагрузками. В этой системе ПЭНД рассматривается как локальное ЭТНУ для автономных, децентрализованных и комбинированных схем электротеплоснабжения.

Следующим шагом является рассмотрение существующих групп электротехнических нагревательных устройств и тех технических

предпосылок, которые приводят к применению внутреннего двухфазного теплопередающего элемента.

1.2 Классификация электротехнических нагревательных устройств и сравнительная оценка их характеристик

Классификационный анализ ЭТНУ позволяет определить, какие решения уже сложились в локальных и автономных системах отопления и какие задачи они решают наиболее успешно. В данной работе ЭТНУ понимаются как электротепловые преобразователи, предназначенные для получения, передачи и распределения теплоты при нагреве воздуха, жидкого теплоносителя, поверхностей ограждающих конструкций либо отдельных зон помещения. Подробное сопоставление групп устройств, включая оценочную матрицу соответствия требованиям таблицы 1.1, приведено в приложении А, а в настоящем разделе выделяются положения, необходимые для перехода к анализу двухфазных теплопередающих элементов.

Для диссертационного исследования важны не только теплотехнические показатели ЭТНУ, но и их свойства как электрических нагрузок: характер потребляемой мощности, возможность ступенчатого или секционного регулирования, совместимость с автоматикой, влияние на питающую сеть, требования к коммутационной аппаратуре и электробезопасности. Такой подход соответствует профилю электроэнергетики, так как нагревательный прибор рассматривается не изолированно, а как элемент системы электроснабжения и электротеплоснабжения объекта.

В теории электротермических установок преобразование электрической энергии в теплоту связывается с тепловым действием электрического тока или электромагнитного поля [49]. В обзорах современных технологий к основным направлениям относят электрические котлы, нагреватели сопротивления, электродные котлы, индукционные устройства, инфракрасные нагреватели и системы теплового аккумулирования [24]. Для целей настоящей работы важно отделить устройства прямого электротеплового преобразования от смежных устройств теплоснабжения, работающих по другому физическому циклу.

ЭТНУ можно классифицировать по способу электротеплового преобразования, способу передачи теплоты, рабочей среде, конструктивному исполнению, регулированию мощности, температурному уровню и области рационального применения. Нормативная оценка электробезопасности при этом выполняется по стандартам, относящимся к конкретной группе устройств. Для комнатных электрических обогревателей применимы требования ГОСТ ИЕС 60335-2-30–2013; для других групп используются специальные стандарты либо общие положения ГОСТ ИЕС 60335-1 в пределах их области применения [46–47].

Наиболее распространенной остается группа устройств нагрева сопротивлением. К ней относятся ТЭНовые водяные котлы, водонагреватели, электроконвекторы, тепловентиляторы, масляные радиаторы, электрические

панели, нагревательные кабели и часть пленочных систем. Эти устройства отличаются простой конструкцией, технологичностью изготовления, удобством регулирования мощности и высоким коэффициентом преобразования электрической энергии в теплоту [50]. Водяные ТЭНовые котлы и водонагреватели хорошо работают в системах с гидравлическим контуром, циркуляцией теплоносителя и соответствующей обвязкой; этим и определяется их область применения по сравнению с локальными приборами без внешнего водяного контура [50–51].

Электроконвекторы, тепловентиляторы, электрические панели и масляные радиаторы обеспечивают прямой локальный нагрев помещения и поэтому широко применяются в быту. Конвективные приборы просты и удобны для термостатного управления, однако температурное поле помещения зависит от циркуляции воздуха, расположения прибора и теплопотерь [40; 52]. Масляные и жидкостные комнатные обогреватели выравнивают температуру поверхности за счет внутренней теплоемкости; вместе с тем это увеличивает тепловую инерционность и время выхода на режим [46; 52].

Электродные и индукционные водонагревательные устройства отличаются от нагревателей сопротивлением способом ввода энергии. В электродных устройствах рабочая жидкость включается в электрическую цепь, поэтому учитываются ее состав, электропроводность, водоподготовка, коррозия электродов и защита от токов утечки [53]. Для ионопроводящих сред существенны характер протекания тока и возможность электрохимических процессов, что отмечается в исследованиях джоулевого нагрева ионных проводников [54]. Индукционные устройства используют вихревые токи и электромагнитное поле; для них учитываются коэффициент мощности, реактивная мощность, параметры силового преобразователя и возможность компенсации [55]. В типовом исполнении оба класса связаны с жидкостным контуром или теплообменной поверхностью, поэтому применяются в системах с соответствующей гидравлической частью.

Инфракрасные излучатели, панельно-лучистые, кабельные и пленочные системы формируют локальный либо распределенный нагрев. Инфракрасные приборы удобны для рабочих зон и помещений периодического использования; при их выборе рассчитываются зона действия, расстояние до объекта и допустимая температура поверхности [56–57]. Кабельные и пленочные системы дают равномерную теплоотдачу по площади и обычно закладываются в строительные конструкции; поэтому заранее учитываются инерционность основания и защита от локального перегрева или повреждения [58–59]. Аккумуляционные электрические системы позволяют переносить потребление во времени, но относятся к устройствам с повышенной тепловой инерционностью [24; 44; 60].

Тепловые насосы в данном анализе выделяются как смежная категория электротеплоснабжения. Они используют термодинамический цикл с хладагентом, компрессором, испарителем, конденсатором и регулирующим

устройством, а не прямое преобразование электрической энергии в теплоту [61–63].

Электротехнический режим ЭТНУ зависит от способа преобразования энергии и от принятого метода регулирования мощности. Нагреватели сопротивлением при непосредственном включении работают преимущественно как активная нагрузка. Индукционные устройства имеют активную и реактивную составляющие, поэтому для них учитываются коэффициент мощности и параметры силового преобразователя [55]. Электродные устройства чувствительны к электропроводности теплоносителя и составу рабочей среды [53–54]. В результате сравнение ЭТНУ в электроэнергетическом аспекте включает активную мощность, реактивную мощность, коэффициент мощности, способ коммутации, устойчивость регулирования и совместимость с аппаратами защиты.

Наиболее простым остается релейное термостатное регулирование. Секционное регулирование дает возможность включать отдельные группы нагревателей, уменьшать скачок мощности и согласовывать работу устройства с выделенной электрической мощностью объекта. При частой коммутации ЭТНУ применяются твердотельные реле, тиристорные ключи и силовые контроллеры; при их выборе учитываются токи утечки, тепловой режим силовых элементов, перенапряжения и влияние способа коммутации на качество электрической энергии [64–65]. Качество электрической энергии при работе регулируемых нагрузок оценивается с учетом ГОСТ 32144–2013 и ГОСТ 30804.4.7–2013 [66–67]. Для специальных групп действуют отдельные нормативные требования, в том числе IEC 60800 для нагревательных кабелей и ГОСТ IEC 60335-2-61–2013 для аккумуляционных комнатных обогревателей [68–69].

Развернутое сопоставление основных групп ЭТНУ и смежных электротехнических устройств теплоснабжения по конструктивно-теплотехническим, электроэнергетическим, эксплуатационным и нормативным признакам вынесено в приложение А (таблицы А.1–А.3). Для существующих групп устройств это сопоставление составлено на основании источников [24; 40; 44–69], а для парокapельных / теплотрубных электрических отопительных приборов дополнительно использованы источники по ПЭНД и ЭВТТ, рассмотренные в разделах 1.3 и 1.4 [81; 84–90]. ПЭНД в настоящей работе рассматривается не как отдельная классификационная группа, а как конкретное секционное исполнение указанного направления; его расчетно-экспериментальная оценка выполняется в последующих главах по установленной мощности, удельной электротепловой нагрузке, времени выхода на режим, температурному полю теплоотдающей поверхности и электрическим показателям. Правила выставления качественных оценок («+», «+-», «-») и принятые допущения приведены в примечании к таблице А.3.

Рассмотренные группы устройств имеют собственные области рационального применения. ТЭНовые водяные котлы и водонагреватели, а

также электродные и индукционные водонагревательные устройства в основном рассчитаны на жидкостный контур, циркуляцию теплоносителя и гидравлическую инфраструктуру. Конвекторы, электрические панели, тепловентиляторы и инфракрасные излучатели могут работать без внешнего водяного контура; равномерность их теплоотдачи определяется воздухообменом, размещением прибора, направлением теплового потока или зоной облучения. Масляные и жидкостные комнатные обогреватели выравнивают температуру поверхности за счет внутренней теплоемкости. Кабельные, пленочные и аккумуляционные системы обеспечивают распределенную или накопленную теплоотдачу и требуют учета условий монтажа и регулируемости.

С электроэнергетической стороны большинство нагревателей сопротивлением являются преимущественно активной нагрузкой, но их фактический режим задается способом коммутации, цикличностью включения и суммарной установленной мощностью. Электродные устройства зависят от электропроводности и состава теплоносителя; индукционные – от активной и реактивной составляющих; силовые регуляторы требуют оценки влияния на качество электрической энергии. Тепловые насосы в приложении А приведены как смежная категория, поскольку они работают по термодинамическому циклу с хладагентом и компрессором и не являются прямым функциональным аналогом ПЭНД.

Сопоставление, приведенное в настоящем разделе и приложении А, в том числе оценочная матрица таблицы А.3, показывает, что каждая группа устройств имеет свою рациональную область применения. В рамках принятой экспертной оценки и для типовых исполнений ни одна из рассмотренных групп ЭТНУ и смежных устройств, включая парокапельные / теплотрубные электрические отопительные приборы, не обеспечивает одновременно всю совокупность шести требований таблицы 1.1. Наиболее близкой к ПЭНД является группа парокапельных / теплотрубных приборов, однако для нее в общем случае не являются обязательными секционное управление мощностью, расширенная наблюдаемость температурных и электрических параметров и расчетно подтвержденное ограничение температурного поля теплоотдающей поверхности. Это обосновывает целесообразность перехода к внутреннему двухфазному теплопередающему элементу, способному перераспределять теплоту от зоны электрического теплоподвода к развитой теплоотдающей поверхности. К таким элементам относятся тепловые трубки и двухфазные термосифоны, рассматриваемые в разделе 1.3.

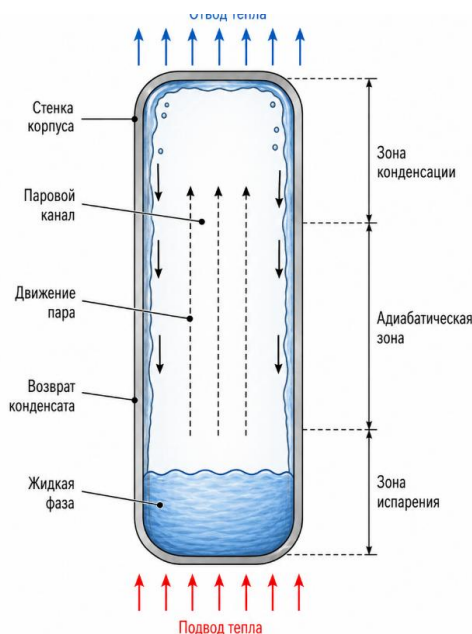
1.3 Тепловые трубки и двухфазные термосифоны как элементы теплопередачи в электротехнических нагревательных устройствах

В разделе 1.2 показано, что для локальных ЭТНУ существенны равномерное распределение теплоты, умеренная тепловая инерционность и работа без промежуточного жидкостного контура. Решение этой задачи

связано с применением внутри нагревательного устройства замкнутого двухфазного теплопередающего элемента. К таким элементам относятся тепловые трубки и двухфазные закрытые гравитационные термосифоны, в которых теплота переносится испарением рабочего тела, движением пара, конденсацией и возвратом жидкой фазы в зону испарения [16–20; 70–72].

Для дальнейшего изложения необходимо развести два близких термина – «теплоноситель» и «рабочее тело». Теплоносителем называется среда внешнего отопительного контура. Рабочее тело – это жидкая и паровая фазы, находящиеся внутри замкнутой вакуумированной полости тепловой трубки или гравитационного термосифона.

Тепловая трубка в общем виде представляет собой герметичный корпус, частично заполненный рабочим телом в жидкой и паровой фазах. Вдоль корпуса выделяют зону испарения, транспортную, или адиабатическую, зону и зону конденсации. При подводе теплоты к зоне испарения жидкая фаза нагревается до состояния насыщения и испаряется. Образующийся пар перемещается к зоне конденсации под действием перепада давления насыщенного пара, отдает стенке корпуса скрытую теплоту парообразования и вновь переходит в жидкое состояние. Конденсат возвращается в зону испарения, замыкая внутренний циркуляционный цикл (рисунок 1.2) [17–18; 20; 72–73].



Примечание – Составлено автором по [17–18; 20; 72–73]

Рисунок 1.2 – Обобщенная схема работы двухфазного закрытого гравитационного термосифона

В отличие от обычного металлического теплопроводника тепловая трубка и термосифон переносят теплоту не только теплопроводностью стенки. Существенная часть переноса связана с фазовым переходом рабочего тела. Благодаря скрытой теплоте парообразования значительные тепловые потоки

могут передаваться при сравнительно малом перепаде температур между зонами подвода и отвода теплоты. Поэтому тепловые трубки относят к пассивным теплопередающим устройствам с высокой эффективной теплопроводностью, не требующим насосов и других подвижных элементов для внутреннего переноса теплоты [16–18; 20; 70; 72–73].

В электротехническом нагревательном устройстве такой элемент фактически становится внутренним распределителем теплоты. Он принимает теплоту от локализованной зоны электрического теплоподвода и передает ее к развитой теплоотдающей поверхности, уменьшая локальные перегревы, температурные градиенты и неравномерность нагрева корпуса [20; 48; 74–75].

Для ПЭНД это обстоятельство имеет принципиальное значение: важен не только сам электрический нагрев, но и последующее распределение теплоты по корпусу прибора. В теплотрубных радиаторах для низкотемпературного отопления показано, что разделение зоны подвода теплоты и развитой зоны теплоотдачи повышает конструктивную компактность и улучшает динамику выхода на режим по сравнению с традиционными жидкостными радиаторами [42].

По способу возврата жидкой фазы в испарительную зону различают капиллярные тепловые трубки и двухфазные закрытые гравитационные термосифоны. В капиллярной тепловой трубке жидкость возвращается капиллярными силами в пористой структуре фитиля; его свойства определяются пористостью, проницаемостью, эффективным радиусом пор, смачиваемостью и теплопроводностью [18; 20; 70; 76–77]. В гравитационном термосифоне фитиль отсутствует, а конденсат возвращается в зону испарения под действием силы тяжести. Поэтому для устойчивой работы зона испарения должна располагаться ниже зоны конденсации или близко к такому положению [17–20; 72].

Для нагревательных устройств с вертикальной теплоотдающей поверхностью наиболее близка именно бесфитильная схема гравитационного термосифона. При подводе теплоты к нижней части корпуса рабочее тело испаряется, пар поднимается в зону конденсации и отдает теплоту стенке, а жидкая фаза стекает вниз по стенке или в виде пленки конденсата. Для такой схемы определяющими являются угол установки, степень заполнения рабочим телом, соотношение зон испарения и конденсации, геометрия парового канала, а также устойчивость встречного движения пара и конденсата [19; 71–72; 78].

Экспериментальные и численные исследования гравитационных термосифонов показывают, что ориентация, диаметр канала, рабочая жидкость, степень заполнения и величина тепловой нагрузки заметно влияют на тепловую эффективность [79–80]. В ПЭНД эти факторы принимаются как конструктивно-режимные параметры, от которых зависят запуск двухфазного цикла, тепловое сопротивление и равномерность температурного поля.

Рабочее тело выбирается с учетом температурного диапазона, давления насыщения, скрытой теплоты парообразования, теплофизических свойств жидкой и паровой фаз, смачиваемости, химической стабильности,

температуры замерзания и совместимости с материалом корпуса [16; 20; 72–73]. В данной работе рассматривается дистиллированная вода. Ее выбор связан с высокой скрытой теплотой парообразования, доступностью, технологической безопасностью и пригодностью для низко- и среднетемпературного диапазона отопительных устройств. Работоспособность водяного двухфазного теплопередающего элемента определяется давлением насыщения, степенью заполнения, удалением неконденсируемых газов, герметичностью корпуса и условиями теплоотвода [16; 19–20; 72].

Начальное вакуумирование полости тепловой трубки или термосифона нужно прежде всего для удаления воздуха и других неконденсируемых газов. После пуска и нагрева рабочее давление чистого рабочего тела в герметичной полости определяется температурой насыщения; остаточные неконденсируемые газы при этом оттесняются паром в верхнюю часть зоны конденсации и снижают эффективность ее работы [16; 20; 72]. Для воды снижение начального абсолютного давления позволяет перейти к состоянию насыщения при температурах ниже нормальной температуры кипения. Поэтому термин «низкого давления» применительно к ПЭНД относится к испарительно-конденсационному циклу в герметичной вакуумированной полости [16; 20; 72; 81].

Работоспособность тепловых трубок и термосифонов ограничивается предельными режимами. Для капиллярных тепловых трубок главным является капиллярный предел, то есть достаточность капиллярного давления для возврата жидкости в испарительную зону [17–18; 20; 70; 72; 76]. Для гравитационных термосифонов существенны гидродинамические ограничения: при росте тепловой нагрузки восходящий поток пара влияет на стекание конденсата, унос капель, устойчивость жидкой пленки и возврат жидкости в испарительную часть [19–20; 71–72; 78; 82].

В общей теории водяных тепловых труб выделяются звуковой, вязкостный, капиллярный пределы, предел уноса жидкости и предел кипения. При этом капиллярный предел относится прежде всего к фитильным конструкциям. Для бесфитильной гравитационной ЭВТТ ПЭНД наибольшее значение имеют устойчивость гравитационного возврата конденсата, отсутствие локального пересыхания испарительной зоны и учет давления насыщения рабочего тела [83].

Для двухфазных теплопередающих элементов также учитываются сухой ход и залив. Сухой ход возникает при недостаточном количестве рабочей жидкости или при нарушении ее возврата в зону испарения; в этом случае испарительно-конденсационный цикл нарушается, а температура стенки в зоне теплоподвода возрастает. Залив, напротив, связан с избытком рабочего тела: свободный паровой объем уменьшается, гидравлическое сопротивление возрастает, конденсация ухудшается, а тепловая инерционность устройства может увеличиваться [16; 19–20; 71–72; 78]. К эксплуатационным факторам относятся накопление неконденсируемых газов, нарушение герметичности

корпуса, коррозия, загрязнение или деградация рабочего тела и условия пуска [16; 20; 72; 82].

В электротехническом нагревательном устройстве двухфазный теплопередающий элемент работает не как источник энергии, а как внутренний распределитель теплоты. Электрическая энергия сначала преобразуется в теплоту в зоне электрического теплоподвода, после чего тепловая трубка или термосифон передает ее по корпусу за счет испарительно-конденсационного цикла. В работах по электровакуумным нагревательным элементам и радиаторам с электровакуумными тепловыми трубками такая схема связана с размещением электрического теплоподвода в герметичной полости, использованием рабочего тела и передачей теплоты к развитой поверхности прибора [81; 84–85]. Предшествующее радиаторное решение с жидким теплоносителем учитывается как конструктивная база [86], а исследования энергосберегающих радиаторов и автономного теплоснабжения показывают возможность передачи теплоты к развитой поверхности прибора [48; 74–75; 87–88].

Для ПЭНД основными параметрами исследования становятся подводимая активная электрическая мощность, геометрия секции, количество рабочего тела, начальное остаточное давление, условия внешней теплоотдачи и организация возврата конденсата. Эти параметры должны быть отражены в физико-математической модели и проверены экспериментально.

Таким образом, тепловые трубки и двухфазные закрытые гравитационные термосифоны образуют группу пассивных теплопередающих элементов, пригодных для внутреннего распределения теплоты в электротехнических нагревательных устройствах. На этой основе в разделе 1.4 рассматриваются электровакуумные нагревательные устройства, где двухфазный теплопередающий элемент объединен с электрическим теплоподводом в герметичной вакуумированной полости.

1.4 Электровакуумные нагревательные устройства на основе тепловых трубок и термосифонов как перспективное направление развития альтернативных локальных источников тепловой энергии

Дальнейший анализ ПЭНД связан с тем, как электрический теплоподвод сочетается с внутренним переносом теплоты в приборе. Физические основы двухфазного испарительно-конденсационного цикла изложены в разделе 1.3; в настоящем подразделе эти положения применяются к электровакуумным нагревательным устройствам.

В ПЭНД двухфазный теплопередающий элемент принимает теплоту от локальной зоны нагрева и распределяет ее к развитой теплоотдающей поверхности. Именно эта внутренняя передача определяет тепловую работу прибора [16; 72; 81; 84–88].

В отопительных системах тепловые трубки и термосифоны используются как средства повышения эффективности теплоотдачи

отопительных приборов, радиаторных систем и ограждающих конструкций [74]. Поэтому при анализе ЭТНУ важно учитывать не только тип нагревательного элемента, но и путь передачи теплоты от локализованной зоны электрического теплоподвода к развитой теплоотдающей поверхности.

Под электровакуумным нагревательным устройством в данной работе понимается ЭТНУ, в котором электрический теплоподвод совмещен с герметичной вакуумированной полостью, содержащей двухфазное рабочее тело. Электровакуумная тепловая трубка (ЭВТТ) используется далее как конструктивно-функциональное обозначение основного теплопередающего узла отопительного ЭТНУ. По физическому принципу рассматриваемая ЭВТТ представляет собой бесфитильный двухфазный закрытый гравитационный термосифон. Перенос теплоты в ней идет за счет испарения рабочего тела, движения пара, конденсации и гравитационного возврата конденсата в зону испарения [72; 81; 84–85].

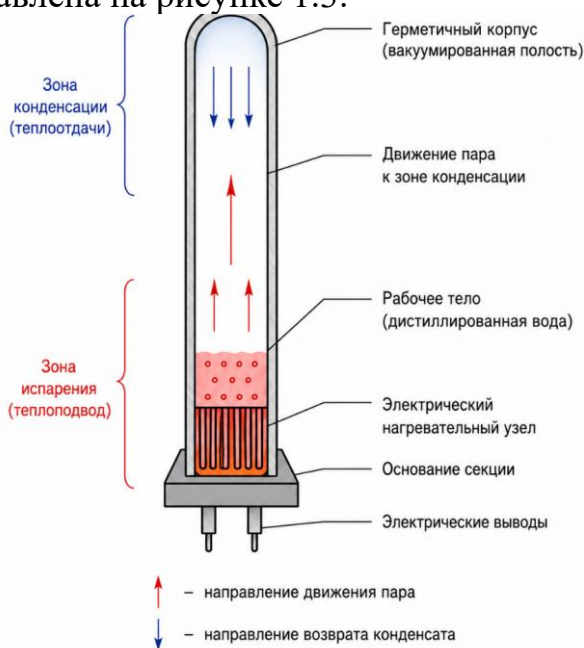
В патентных решениях по радиаторам отопления ЭВТТ описана как вертикальная трубка с вакуумированной внутренней полостью, рабочим телом, оребренной теплоотдающей поверхностью и электрическим нагревательным узлом [84–85]. Более раннее решение по радиатору отопления с жидким теплоносителем рассматривается как предшествующая конструктивная база, но не отождествляется с электровакуумной тепловой трубкой [86]. Общая применимость тепловых труб в отопительных терминалах зданий подтверждается обзорными исследованиями [74], а работы по автономному теплоснабжению задают практический контекст использования местных источников теплоты без протяженных тепловых сетей [75].

Наиболее близким конструктивным аналогом является электрический нагреватель паракапельного типа. Он выполнен в виде радиатора с верхним и нижним коллекторами, вертикальными тепловыми трубками, малым количеством воды, ТЭНом и комнатным регулятором температуры [89]. Этот аналог позволяет точнее определить место ПЭНД в ряду известных решений и выделить вопросы, связанные с ЭВТТ, электрическими режимами теплоподвода, устойчивостью двухфазного цикла и автоматическим контролем.

Термин «электровакуумный» имеет здесь конструктивно-функциональный смысл и относится к устройству с вакуумированной двухфазной полостью. Такое употребление отличается от традиционного для электронной техники, где электровакуумные приборы включают электронно-лучевые, фотоэлектронные, газоразрядные и другие вакуумные приборы [90]. Далее это обозначение применяется только к вакуумированной двухфазной полости отопительного ЭТНУ.

С учетом принятой в приложении А классификации ПЭНД рассматривается как конкретное секционное исполнение паракапельного/теплотрубного электрического отопительного прибора, построенное на ЭВТТ гравитационного типа с дистиллированной водой в качестве рабочего тела. Каждая секция включает вертикально

ориентированную герметичную трубку; в нижней части расположены электрический нагревательный узел и зона испарения, в верхней – зона конденсации и теплоотдачи. Паровой канал служит для движения пара от зоны электрического теплоподвода к зоне конденсации, а конденсат возвращается вниз по внутренней поверхности корпуса. Внешняя оребренная поверхность увеличивает площадь теплоотдачи, защитный кожух отделяет электрические соединения и элементы управления от пользователя [85]. Принципиальная схема секции представлена на рисунке 1.3.



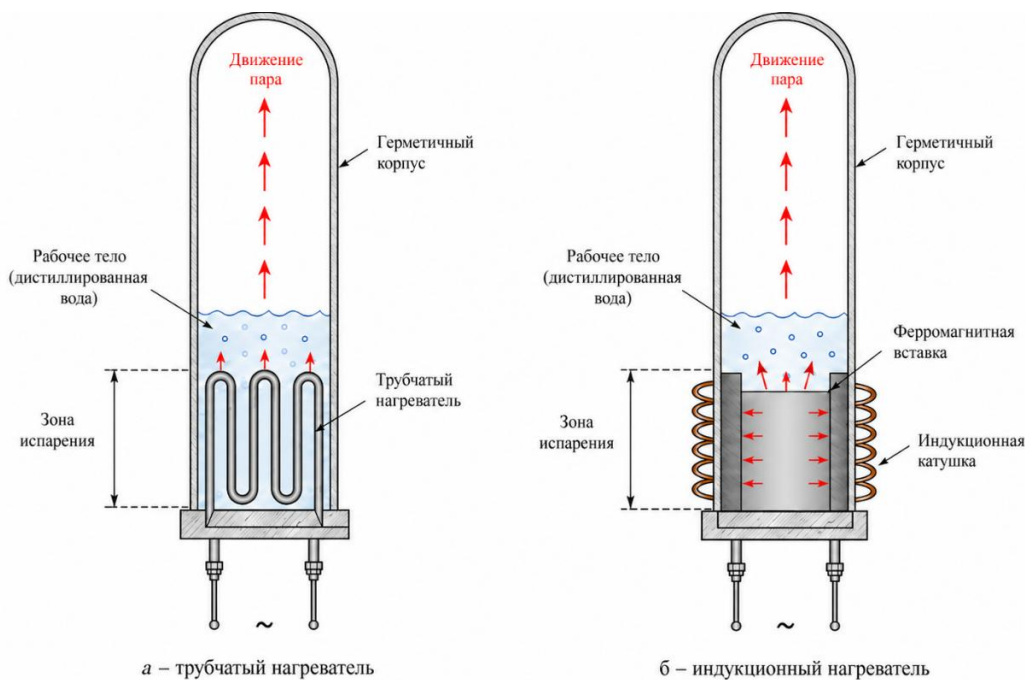
Примечание – Составлено автором по [85]
 Рисунок 1.3 – Принципиальная схема секции ПЭНД на основе ЭВТТ гравитационного типа

Работа секции ПЭНД может быть представлена как последовательное преобразование и перенос энергии. Активная электрическая мощность преобразуется в теплоту в нижнем нагревательном узле, передается рабочему телу в зоне испарения, переносится паровой фазой в зону конденсации и далее отдается стенке трубки и внешнему оребрению. Таким образом, зона электрического теплоподвода и зона распределенной теплоотдачи пространственно разделены, а внутренняя передача теплоты обеспечивается испарительно-конденсационным циклом [72; 81; 85].

Технологическое разрежение перед герметизацией является одним из условий нормальной работы ЭВТТ. В патентах на радиатор с индукционным нагревателем и радиатор с электровакуумными тепловыми трубками указано разрежение во внутренней полости до 1–2 кПа (0,01–0,02 атм) [84–85], а в опубликованной работе по ПЭНД приведены экспериментальные исполнения с начальным давлением порядка 4–5 кПа (0,04–0,05 атм) [81]. Эти значения относятся к начальному остаточному давлению перед герметизацией. Физический смысл начального разрежения состоит прежде всего в удалении

воздуха и других неконденсируемых газов: для чистого пара давление в герметичной полости в рабочем режиме определяется температурой насыщения рабочего тела, тогда как остаточные неконденсируемые газы скапливаются в верхней части зоны конденсации, частично блокируют ее поверхность и ухудшают равномерность температурного поля [16; 20; 72]. Поэтому различие между патентными (1–2 кПа) и экспериментальными (4–5 кПа) значениями не сводится к технологическому допуску: с ростом начального остаточного давления возрастает доля неконденсируемых газов и их влияние на работу зоны конденсации. В данной работе начальное остаточное давление рассматривается как технологический параметр запуска двухфазного цикла и как фактор, определяющий содержание неконденсируемых газов в полости; его расчетное и экспериментальное обоснование приведено в главах 2 и 3.

В зоне испарения ПЭНД возможны два способа электрического теплоподвода: трубчатый электрический нагреватель и индукционный нагреватель. В первом случае теплота выделяется в резистивном элементе и передается рабочему телу [85]. Во втором случае индукционная обмотка создает переменное магнитное поле, которое вызывает вихревые токи в ферромагнитной вставке активной зоны испарителя; нагретая вставка передает теплоту рабочему телу во внутренней полости корпуса [55; 84]. Общая классификация электротермических установок как устройств, использующих тепловое действие электрического тока и электромагнитного поля, приведена в учебной литературе [49]. Варианты электрического теплоподвода в зоне испарения ПЭНД представлены на рисунке 1.4.



Примечание – Составлено автором по [55; 84–85]

Рисунок 1.4 – Варианты электрического теплоподвода в зоне испарения ПЭНД: трубчатый и индукционный нагреватели

Оба варианта теплоподвода выполняют одну функцию – создают управляемый тепловой поток в зоне испарения ЭВТТ. В трубчатом нагревателе тепловыделение связано с резистивным элементом, в индукционном – с наведенными токами и локализацией тепловыделения в ферромагнитной активной вставке. С электроэнергетической стороны они различаются характером электрической нагрузки, способом подвода мощности, особенностями коммутации и требованиями к системе управления. Поэтому сопоставление выполняется по температурному режиму, энергетическим и пусковым характеристикам устройства.

Энергетические характеристики ПЭНД определяются подведенной активной электрической мощностью, тепловым потоком в зоне испарения и теплоотдачей с поверхности корпуса [81]. Для индукционных нагревательных устройств дополнительно учитываются коэффициент мощности, реактивная составляющая и параметры силового преобразователя [55]. Поскольку ПЭНД является электротехническим устройством, вопросы безопасности рассматриваются с учетом требований к бытовым и аналогичным электрическим приборам: защиты от доступа к токоведущим частям, допустимого нагрева доступных поверхностей, электрической прочности, влагостойкости, устойчивости к ненормальным режимам и корректной работы цепей управления [46–47].

Обобщение источников по ПЭНД и радиаторам с ЭВТТ [81; 84–90], гравитационным термосифонам [71–72; 78] и электротермическим, в том числе индукционным, устройствам [49; 55] дает конструктивную и физическую базу исследования. Вместе с тем применительно к ПЭНД как локальному ЭТНУ остаются недостаточно разработанными следующие научно-технические вопросы:

1) модели двухфазных закрытых гравитационных термосифонов разработаны достаточно подробно и охватывают тепловое сопротивление, режимы кипения и конденсации, влияние степени заполнения и геометрии [71–72; 79–80; 83], однако применительно к ЭВТТ как электротепловому узлу ПЭНД – с локализованным подводом активной электрической мощности в испарительную зону, секционной геометрией и граничными условиями отопительного прибора – в проанализированных источниках не выявлено связанного физико-математического и численного описания [81; 84–85];

2) недостаточно представлены экспериментальные зависимости температурного поля теплоотдающей поверхности ПЭНД от электрических режимов теплоподвода, количества рабочего тела, начального остаточного давления и геометрии секции [71; 78; 81];

3) недостаточно разработано электроэнергетическое обоснование ПЭНД как управляемой электротепловой нагрузки, включая секционное управление,

мониторинг температурных и электрических параметров и требования к безопасному применению [46–47; 74–75; 84–85].

Таким образом, электровакuumные нагревательные устройства можно рассматривать как конструктивно-функциональное направление развития локальных ЭТНУ. В них электрический теплоподвод объединен с герметичной вакуумированной двухфазной полостью и развитой теплоотдающей поверхностью. Для Казахстана ПЭНД представляет практический интерес в автономных, реконструируемых и гибридных схемах теплоснабжения, где востребованы управляемые электротепловые нагрузки, работа без внешнего водяного контура и согласование теплового режима с доступной электрической мощностью. Это направление согласуется с задачами повышения управляемости и цифровизации электроэнергетической отрасли [33].

Выводы по главе 1

1) Анализ современного состояния электротеплоснабжения показал потребность в локальных управляемых электротехнических источниках теплоты для автономных, децентрализованных, реконструируемых и гибридных схем отопления. Для такого источника сформулированы требования: секционное регулирование мощности, ограниченная тепловая инерционность, равномерная теплоотдача и ограничение температуры доступной поверхности готового прибора, работа без внешнего водяного контура, наблюдаемость температурных и электрических параметров, автоматический контроль, электробезопасность и качество потребления электрической энергии с учетом нормативной базы теплоснабжения и стратегических задач развития электроэнергетики [10; 33].

2) Сравнительная оценка существующих групп ЭТНУ показала, что они решают важные частные задачи электрического отопления и имеют собственные области рационального применения. В рамках принятой экспертной оценки ни одна из рассмотренных групп ЭТНУ и смежных устройств в типовом исполнении не обеспечивает одновременно всю совокупность шести требований таблицы 1.1. Наиболее близкой к ПЭНД является группа парокapельных / теплотрубных электрических отопительных приборов, но для нее в общем случае не являются обязательными секционное управление, расширенный мониторинг и расчетно подтвержденное ограничение температурного поля поверхности. Это обосновывает целесообразность исследования ПЭНД как конкретного секционного исполнения устройства с внутренним двухфазным теплопередающим элементом, перераспределяющим теплоту от зоны электрического теплоподвода к развитой теплоотдающей поверхности.

3) На основе анализа литературы показано, что тепловые трубки и двухфазные закрытые гравитационные термосифоны могут использоваться как внутренние теплопередающие элементы, перераспределяющие теплоту от

локальной зоны электрического теплоподвода к развитой теплоотдающей поверхности.

4) Обосновано, что ЭВТТ гравитационного типа является перспективным теплопередающим узлом ПЭНД, поскольку в одном конструктивном элементе объединяются локальный электрический теплоподвод, фазовый перенос теплоты, гравитационный возврат конденсата и распределенная теплоотдача.

5) Определены направления дальнейшего расчетно-экспериментального исследования ПЭНД: моделирование ЭВТТ, анализ устойчивости двухфазного режима, сравнение трубчатого и индукционного теплоподвода, выбор рациональных параметров, а также разработка системы мониторинга и автоматического управления.

2 РАСЧЕТНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЭЛЕКТРОВАКУУМНОЙ ТЕПЛОВОЙ ТРУБКИ В СОСТАВЕ ПЭНД

Во второй главе формируется расчетная основа для перехода от активной электрической мощности нагревательного узла к полезной теплоотдаче секции парового электрообогревателя низкого давления (ПЭНД). Основным объектом моделирования – одиночная электровакуумная тепловая трубка (ЭВТТ), выполняющая роль теплопередающего узла между зоной электротеплового подвода и наружной теплоотдающей поверхностью.

В основном тексте приведены электрическая модель, внешний энергетический баланс, расчет площади теплоотдачи, критерии устойчивой работы и связь с экспериментальной идентификацией. Детализация теплофизической и численной постановки ЭВТТ приведена в приложении Б; визуализация результатов численного моделирования ЭВТТ в COMSOL приведена в приложении В.

Физическая классификация ЭВТТ как гравитационного двухфазного термосифона опирается на классические работы по тепловым трубкам и термосифонам [16–20]. Современные подходы к расчету и численному моделированию тепловых трубок и термосифонов, включая CFD-постановки, влияние геометрии, ориентации и условий внешней конвекции, учитываются по источникам [70; 72–74; 78–79]. Для проверки внутренних предельных режимов водяных тепловых трубок дополнительно используются результаты [83]. Теплофизические свойства воды и водяного пара задаются по IAPWS-IF97 [91], а численная реализация выполнена в логике модулей COMSOL для теплопереноса, CFD и пористых сред [92–94]. Конструктивная и экспериментальная связь ЭВТТ с ПЭНД и низконапорными паровыми электрообогревателями опирается на профильные публикации [81; 87–88; 95–100]. Внешний конвективно-радиационный баланс и принятые сценарии коэффициента теплоотдачи и степени черноты уточнены по источникам [101–102].

Режимные обозначения. В дальнейшем рабочим режимом ПЭНД считается диапазон наружной поверхности 70–90 °С, при котором давление насыщенного водяного пара составляет примерно 0,031–0,070 МПа. Проверочные уровни 164–203 °С относятся к расчетным случаям одиночной гладкой ЭВТТ с обработанной или окрашенной поверхностью при теплоподводе 80 Вт и используются для обоснования недостаточности ее собственной площади теплоотдачи. Контрольный вариант для голой меди дает еще более высокий уровень около 309 °С и рассматривается как предельная оценка чувствительности.

Основные обозначения в главе вводятся по месту первого использования и расшифровываются после соответствующих формул. В тексте последовательно различаются три группы величин: электрические параметры нагревательного узла, тепловые потоки ЭВТТ и параметры внешнего энергетического баланса. Активная мощность в главе 2 обозначается P_{act} ; в

главах 3–4 та же активная мощность одной секции обозначается P . Удельная электротепловая нагрузка наружной поверхности обозначается q во всех главах.

2.1 Физическая схема ЭВТТ как теплопередающего узла ПЭНД

ЭВТТ представляет собой герметичный вертикальный элемент, внутри которого находится ограниченное количество дистиллированной воды. Перед запуском из внутренней полости удаляется воздух; начальное остаточное давление задает пусковые условия и снижает влияние неконденсируемых газов. В нижней части трубки расположена зона электротеплового подвода, а боковая и верхняя части корпуса выполняют функцию теплоотдающей поверхности. В общепринятой теплотехнической терминологии такой узел соответствует закрытому гравитационному двухфазному термосифону, или *gravity-assisted wickless heat pipe*; термин «электровакuumная тепловая трубка» далее используется как конструктивное обозначение элемента ПЭНД.

Количество рабочего тела и начальное остаточное давление рассматриваются как технологические параметры сборки. Для внутреннего объема рассматриваемой одиночной трубки порядка $2,4 \cdot 10^{-4}$ м³ ориентировочная заправка 5–15 % внутреннего объема соответствует примерно 12–36 г воды; точное значение фиксируется в протоколе изготовления опытного образца. Для ограничения влияния неконденсируемых газов в расчетной постановке вводится ориентир начального остаточного давления не выше 5 кПа: при пересчете к 90 °С это дает парциальное давление газа менее 10 % от давления насыщенного водяного пара и не должно доминировать над фазовым переносом.

Термин «низкого давления» в работе относится к технологическому начальному разрежению и к проектному рабочему диапазону наружной поверхности 70–90 °С. В установившемся нагретом состоянии давление в ЭВТТ определяется не начальным вакуумом как самостоятельной величиной, а температурой рабочего тела и кривой насыщения воды [91].

Ключевое физическое условие модели – локальное фазовое равновесие на границе жидкость–пар:

$$p_v = p_{\text{sat}}(T_i) \quad (2.1)$$

где p_v – давление паровой фазы у межфазной поверхности, Па; p_{sat} – давление насыщенного пара рабочего тела, Па; T_i – температура межфазной поверхности, К.

В рабочем режиме теплота, выделяемая нагревательным узлом, локализуется в испарительной зоне, вызывает испарение части рабочего тела, переносится паровой фазой в более холодную область и выделяется при конденсации на внутренней поверхности корпуса. Возврат конденсата вниз обеспечивается гравитацией и смачиванием внутренней поверхности;

реальный пленочный возврат в численной модели представлен эквивалентным слоем, детальная постановка которого приведена в приложении Б.

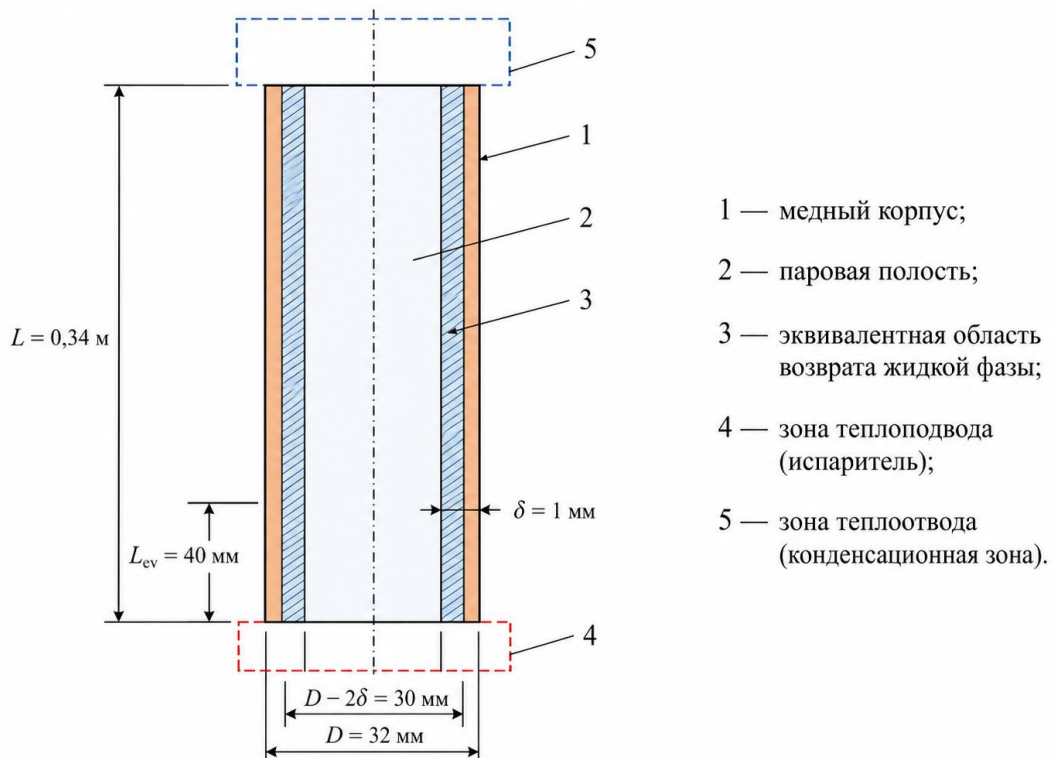


Рисунок 2.1 – Осесимметричная расчетная область ЭВТТ ПЭНД

2.2 Электроэнергетическая модель преобразования активной мощности

Для электроэнергетической постановки принципиально важно не смешивать три величины: активную электрическую мощность P_{act} , тепловую мощность, локализуемую в испарителе Q_{in} , и полезную теплоотдачу выбранной наружной поверхности Q_{out} . Их равенство возможно только в идеализированном стационарном случае при $\eta_{ev} = 1$, отсутствии тепловых потерь и совпадении выбранной поверхности с полной теплоотдающей поверхностью прибора. Для реального ПЭНД эти условия заранее не принимаются.

При этом для электрического прибора, целиком расположенного в отапливаемом помещении, в установившемся режиме практически вся активная мощность в итоге переходит в теплоту помещения (см. главу 3); разделение P_{act} , Q_{in} и Q_{out} в настоящей главе нужно не для оценки полного теплового вклада, а для корректного описания локализации мощности в испарителе и доли, отводимой именно выбранной наружной поверхностью.

В синусоидальном однофазном режиме активная мощность нагревательного узла определяется выражением:

$$P_{\text{act}} = U_{\text{rms}} I_{\text{rms}} \cos\varphi \quad (2.2)$$

где U_{rms} – действующее значение напряжения, В; I_{rms} – действующее значение тока, А; $\cos\varphi$ – коэффициент мощности, о.е.

При фазовом управлении, коммутации твердотельными реле или несинусоидальных формах напряжения и тока активная мощность должна определяться как среднее значение мгновенной мощности за интервал усреднения:

$$P_{\text{act}} = \frac{1}{\tau} \int_{t_0}^{t_0+\tau} u(t) i(t) dt \quad (2.3)$$

где $u(t)$ – мгновенное напряжение, В; $i(t)$ – мгновенный ток, А; τ – интервал усреднения, с.

Тепловая мощность, реально локализуемая в испарительной зоне, задается через коэффициент локализации:

$$Q_{\text{in}} = \eta_{\text{ev}} P_{\text{act}} \quad (2.4)$$

Для рассматриваемой компоновки нагреватель расположен вблизи испарительной зоны, поэтому коэффициент локализации активной мощности в предварительном расчете задается как конструктивный параметр. При хорошем тепловом контакте и теплоизоляции узла допустимо использовать оценочный диапазон 0,90–0,98; снижение ниже этого уровня отражает рост контактных и торцевых тепловых составляющих и учитывается при экспериментальной идентификации.

Полезная теплоотдача выбранной наружной поверхности связывается с активной мощностью через коэффициент полезной теплоотдачи:

$$Q_{\text{out}} = \eta_{\text{use}} \cdot P_{\text{act}} \quad (2.5)$$

где η_{use} – коэффициент полезной теплоотдачи выбранной поверхности, о.е.; тепловые составляющие, не отнесенные к этой поверхности, далее рассматриваются как учетная разность между активной мощностью и выбранной полезной теплоотдачей. Если прибор полностью расположен в отапливаемом помещении, эти составляющие также в конечном счете переходят в теплоту помещения, однако в расчетной модели ЭВТТ они отделяются для корректной оценки выбранной поверхности теплоотдачи.

Для нестационарного цикла разогрева и дальнейшей работы вводится интегральный показатель полезной теплоотдачи:

$$\eta_{\text{cycle}} = \frac{\int_{t_1}^{t_2} Q_{\text{out}}(t) dt}{\int_{t_1}^{t_2} P_{\text{act}}(t) dt} \quad (2.6)$$

где t_1, t_2 – начало и конец анализируемого цикла, с.

Показатель интегральной полезной теплоотдачи за цикл используется для энергетического учета нестационарного режима при наличии синхронных временных рядов мгновенной активной мощности и теплоотдачи.

Для расчетной интерпретации введенные коэффициенты ограничены интервалами $0 \leq \eta_{ev} \leq 1$ и $0 \leq \eta_{use} \leq 1$. Для одиночной гладкой ЭВТТ при фиксированном ограничении $T_s = 90 \text{ }^\circ\text{C}$ отношение $Q_{out}(T_s = 90 \text{ }^\circ\text{C})/P_{act}$ следует трактовать не как стационарный η_{use} , а как долю целевой мощности, которую собственная поверхность способна отвести при заданной температуре; по таблице 2.3 она составляет примерно 0,30–0,40. В стационаре при $P_{act} = 80 \text{ Вт}$ такая трубка вышла бы на более высокий температурный уровень, тогда как для полной секции с требуемой площадью η_{use} стремится к единице.

При переходе от одиночной ЭВТТ к полной секции ПЭНД суммарная мощность представляется как сумма мощностей отдельных элементов:

$$P_{\Sigma} = \sum_{j=1}^n P_{act,j} \quad (2.7)$$

где n – число активных теплопередающих элементов секции, шт.; $P_{act,j}$ – активная мощность j -го элемента, Вт.

Таблица 2.1 – Разделение режимов 80 Вт

Режим	Значение 80 Вт	Рассчитываемая величина	Вывод
Тест одиночной гладкой ЭВТТ	$Q_{in}^{test} = 80 \text{ Вт}$	температурное поле при заданном подводе в испаритель	при собственной малой площади трубка выходит на высокий температурный уровень
Проект полной секции	$Q_{out,target} = 80 \text{ Вт}$	требуемая внешняя площадь при заданном $T_{s,max}$	нужна развитая поверхность, группа ЭВТТ или секционное регулирование
Экспериментальная идентификация	$P_{act} \approx 80 \text{ Вт}$	фактические $U, I, P_{act}(t)$ и приведенная чувствительность α_{app}	уточняется по измерениям главы 3; коэффициент мощности и качество электроэнергии – в главе 4

Такое разделение исключает искусственное равенство $P_{act} = Q_{in} = Q_{out} = 80 \text{ Вт}$ и связывает расчетную главу с последующей экспериментальной обработкой электрических и температурных данных. Электротехнические аспекты измерения активной мощности, качества питания, коммутационных устройств и требований эксплуатации опираются на источники [49; 64–67; 103–104].

2.3 Внешний энергетический баланс и расчет площади теплоотдачи

Внешний теплообмен наружной поверхности с помещением задается суммой конвективной и радиационной составляющих:

$$q_{\text{out}} = h(T_s - T_{\text{air}}) + \varepsilon\sigma(T_s^4 - T_{\text{rad}}^4) \quad (2.8)$$

где q_{out} – плотность теплового потока наружной поверхности, Вт/м²; T_{rad} – радиационная температура окружающих поверхностей, К. В радиационном члене температуры задаются в абсолютной шкале; при инженерной оценке принимается $T_{\text{rad}} \approx T_{\text{air}}$.

Полезная теплоотдача выбранной поверхности определяется интегрированием по площади:

$$Q_{\text{out}} = \int_A [h(T_s - T_{\text{air}}) + \varepsilon\sigma(T_s^4 - T_{\text{rad}}^4)] dA \quad (2.9)$$

Для инженерного расчета при усредненной температуре поверхности требуемая площадь определяется выражением:

$$A_{\text{req}} = \frac{Q_{\text{out,target}}}{h(T_s - T_{\text{air}}) + \varepsilon\sigma(T_s^4 - T_{\text{rad}}^4)} \quad (2.10)$$

Удельная электротепловая нагрузка наружной поверхности гладкого цилиндрического участка рассчитывается по формуле:

$$q = \frac{P_{\text{act}}}{A_s} = \frac{P_{\text{act}}}{\pi DL} \quad (2.11)$$

где q – удельная электротепловая нагрузка наружной поверхности, Вт/м²; $A_s = \pi DL$ – наружная площадь гладкого теплоотдающего участка, м².

Для одиночной гладкой трубки диаметром 32 мм и длиной 340 мм собственная наружная площадь составляет около 0,034 м². Поэтому при температуре поверхности 70–90 °С такая трубка не способна отдать 80 Вт без повышения температуры, увеличения площади или улучшения внешней теплоотдачи. Этот результат является ключевым для перехода от одиночной ЭВТТ к полной секции ПЭНД.

Таблица 2.2 – Геометрические и расчетные параметры

Параметр	Обозначение	Значение	Единица измерения	Основание
Длина расчетной области	L	340	мм	геометрия одиночной ЭВТТ
Наружный диаметр трубки	D	32	мм	геометрия одиночной ЭВТТ
Толщина стенки	δ	1	мм	конструктивное допущение
Длина испарительной зоны	L_{ev}	40	мм	постановка теплоподвода
Материал корпуса	–	медь	–	конструктивное решение
Теплопроводность меди	λ	≈390	Вт/(м·К)	справочные данные [102]

Рабочее тело	–	дистиллированная вода	–	экспериментальная постановка
Свойства воды и пара	–	IAPWS-IF97	–	источник [91]
Температура воздуха	T_{air}	20	°C	граничное условие
Коэффициент конвекции	h	6 базовое; 8 оптимистичная граница; 4–18 диапазон чувствительности	Вт/(м ² ·К)	свободная конвекция вертикальной поверхности; расчетные сценарии по [101]
Степень черноты	ε	0,50 для обработанной поверхности; 0,90 для окрашенной поверхности; 0,10 контроль для голой меди	о.е.	состояние поверхности и радиационная составляющая по [102]

Базовым принят консервативный (нижний) уровень свободной конвекции; бóльшие значения h в таблице 2.3 отражают улучшение внешней теплоотдачи. Выбор диапазона h связан с инженерной оценкой свободноконвективного теплообмена около вертикальной поверхности [101]. Степень черноты ε задана как параметр состояния поверхности: $\varepsilon = 0,10$ соответствует контрольному варианту голой или слабоокисленной меди, $\varepsilon = 0,50$ – обработанной/окисленной поверхности, $\varepsilon = 0,90$ – окрашенной высокоэмиссионной поверхности; такая градация используется для оценки чувствительности радиационной составляющей [102]. Среди вариантов степени черноты строка $\varepsilon = 0,90$ ближе всего к реальному бытовому прибору, а $\varepsilon = 0,10$ оставлена как контрольная нижняя граница излучательной способности металлической поверхности.

Контрольная строка $h(\Delta T)$ в таблице 2.3 рассчитана в критериальной форме свободной конвекции около вертикальной поверхности: $Gr = g\beta(T_s - T_{air})L^3/\nu^2$, $Pr = \nu/a$, $Nu = f(Gr \cdot Pr)$, $h(\Delta T) = Nu \cdot \lambda_{air}/L$; свойства воздуха принимаются при средней температуре пограничного слоя, а сама строка служит проверкой порядка величины [101].

В таблице 2.3 коэффициент конвективной теплоотдачи в основных строках фиксируется по расчетным сценариям. Дополнительно введена контрольная строка с критериальной оценкой свободной конвекции, в которой коэффициент зависит от температурного напора. Для поверхности 90 °C она дает практически тот же уровень теплоотдачи, а для отвода 80 Вт снижает расчетный температурный уровень одиночной гладкой трубки примерно до 191 °C. Этот результат все равно существенно выше рабочего диапазона 70–90 °C и подтверждает вывод о необходимости развитой поверхности секции.

Таблица 2.3 – Внешний энергетический баланс гладкой одиночной трубки и требуемая площадь сечения

Расчетный случай	$h; \varepsilon$	Q_{out} при $T_s = 90$ °С, Вт	A_{req} для 80 Вт при $T_s = 90$ °С, м ²	T_s для гладкой трубки $A_0 \approx 0,034$ м ² , °С
Консервативная база: естественная конвекция, обработанная поверхность	6; 0,50	24,1	0,114	≈ 203
Окрашенная высокоэмиссионная поверхность, естественная конвекция	6; 0,90	31,8	0,086	≈ 164
Оптимистичная естественная конвекция, обработанная поверхность	8; 0,50	28,8	0,095	≈ 184
Улучшенная теплоотдача или развитая поверхность	18; 0,50	52,8	0,052	≈ 123
Контроль для голой меди без обработки поверхности	6; 0,10	16,3	0,168	≈ 309
Контроль $h(\Delta T)$, обработанная поверхность	$h(\Delta T); 0,50$	$\approx 24,0$	$\approx 0,114$	≈ 191

Из таблицы 2.3 следует, что при собственной площади гладкой трубки около 0,034 м² для отвода 80 Вт требуется температурный уровень выше проектного диапазона: около 164 °С для окрашенной высокоэмиссионной поверхности, около 184 °С для оптимистичной естественной конвекции при обработанной поверхности и около 203 °С для консервативной базы с постоянным коэффициентом теплоотдачи. Контроль по переменному коэффициенту свободной конвекции дает около 191 °С, что не меняет основного вывода. Поэтому 80 Вт рассматривается как целевая мощность полной сечения, реализуемая за счет развитой поверхности, оребрения, объединения нескольких ЭВТТ и регулирования числа активных элементов.

Площадь, рассчитанная по таблице 2.3, является приведенной изотермической площадью теплоотдачи при заданной температуре поверхности. При переходе к оребрению следует использовать приведенную площадь с учетом эффективности ребра: геометрическая площадь оребрения должна быть больше расчетной площади, если эффективность ребра меньше единицы.

2.4 Численная постановка и проверка теплопереноса в ЭВТТ

Численная модель проверяет согласованность внутреннего фазового переноса с внешним энергетическим балансом (2.8)–(2.10). Внешний баланс определяет уровень температуры поверхности, а численная постановка подтверждает выравнивание температурного поля за счет испарительно-конденсационного переноса теплоты. Такой подход соответствует практике совмещения эксперимента и численного моделирования термосифонов [79], а программная реализация опирается на модули COMSOL [92–94]. Детализация расчетной постановки приведена в приложении Б, исходные поля температуры, сетка и визуализации COMSOL – в приложении В.

Контрольный однофазный режим используется для сравнения с двухфазной работой ЭВТТ. В этом расчете испарение, конденсация и перенос скрытой теплоты отключены, а внутренняя полость рассматривается как условная однофазная среда без эффективного фазового выравнивания температуры. Рисунок 2.2 показывает распределение температуры при отсутствии испарительно-конденсационного механизма: максимум сосредоточен вблизи испарительной зоны, а вдоль высоты сохраняется выраженный температурный градиент.

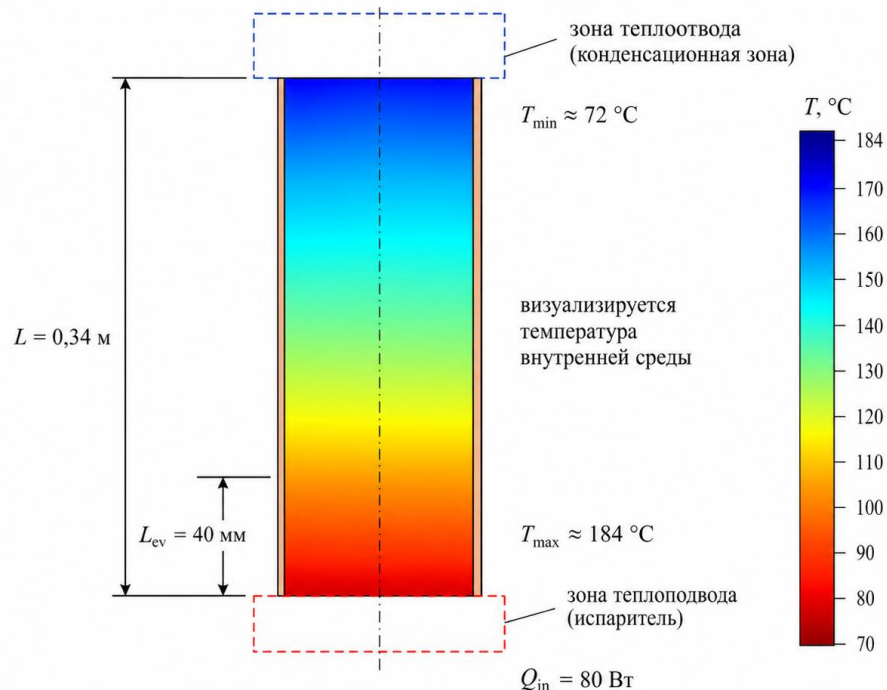


Рисунок 2.2 – Температурное поле в контрольном однофазном режиме при теплоподводе 80 Вт; фазовый перенос отключен, сценарий внешнего теплообмена: $h = 8 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, $\varepsilon = 0,50$; исходная визуализация COMSOL приведена в приложении В

Двухфазный режим на рисунке 2.3 показывает, что фазовый перенос сглаживает температурное поле по высоте при сохранении внешнего

энергетического баланса. Рисунок относится к проверочному случаю одиночной гладкой ЭВТТ при теплоподводе 80 Вт и параметрам строки $h = 8 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, $\varepsilon = 0,50$ таблицы 2.3. Уровень около 184–185 °С используется для оценки достаточности собственной площади трубки.

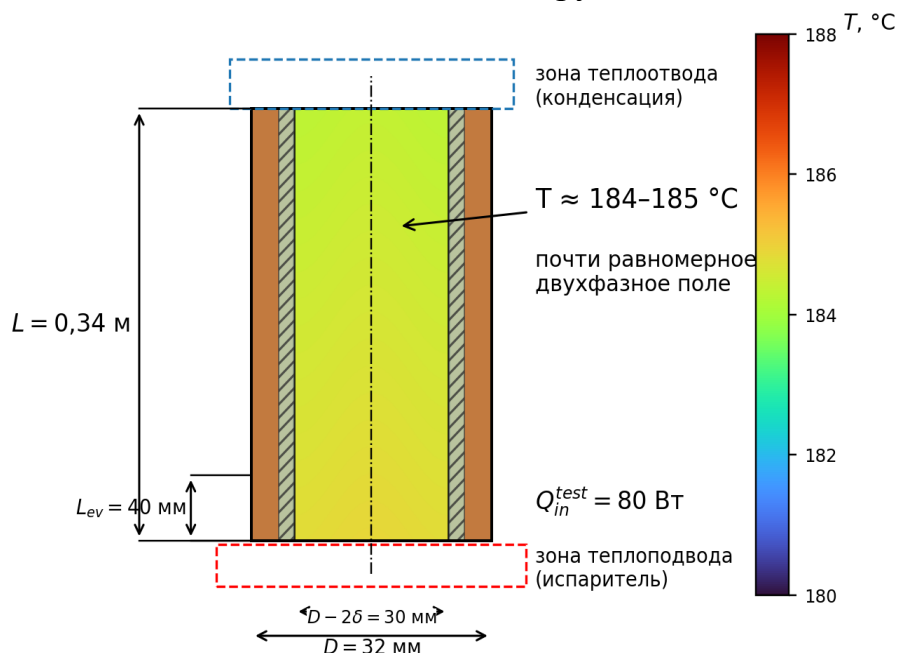


Рисунок 2.3 – Распределение температуры в проверочном двухфазном режиме одиночной ЭВТТ при теплоподводе 80 Вт; сценарий таблицы 2.3: $h = 8 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, $\varepsilon = 0,50$; исходная визуализация COMSOL приведена в приложении В

Энергетическая невязка расчета контролируется по независимому балансу теплоподвода, внешней теплоотдачи и изменения внутренней энергии:

$$\delta_E = \frac{|Q_{in} - Q_{out} - \frac{dU}{dt}|}{Q_{in}} \cdot 100\% \quad (2.12)$$

Для стационарного расчета член dU/dt равен нулю, поэтому невязка сводится к отношению $|Q_{in} - Q_{out}|/Q_{in}$. Подробная проверка устойчивости результата приведена в приложении Б (таблицы Б.1 и Б.2): при переходе к уточненной сетке изменения максимальной температуры и полезной теплоотдачи малы, а варьирование эквивалентной проницаемости не приводит к сухим зонам. Эти данные подтверждают устойчивость балансово согласованного расчетного режима и слабую чувствительность интегральной теплоотдачи к принятым численным аппроксимациям.

Кривая насыщения на рисунке 2.4 показывает, что рабочее давление в ЭВТТ определяется температурой рабочего тела. В диапазоне 70–90 °С давление насыщенного водяного пара составляет примерно 0,031–0,070 МПа.

Для уровня рисунка 2.3, равного 184–185 °С, давление насыщения составляет около 1,10 МПа; значение 1,14 МПа относится к контрольной точке 186 °С.

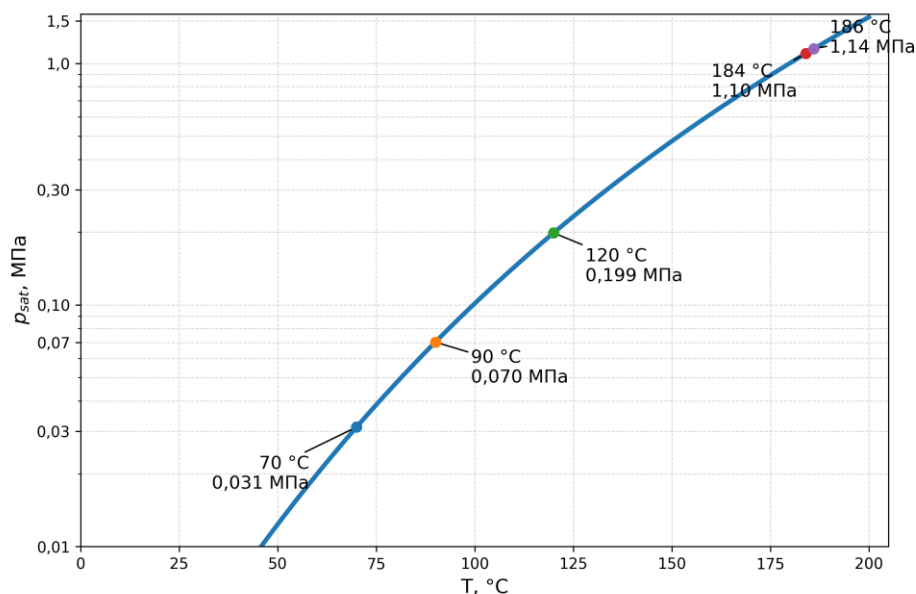


Рисунок 2.4 – Зависимость давления насыщенного пара воды от температуры

2.5 Эксплуатационные ограничения и связь с секционным регулированием

Для ПЭНД решающим ограничением является не только возможность внутреннего фазового переноса, но и способность наружной поверхности отвести подведенную мощность без превышения допустимого температурного уровня. В обобщенном виде условие работоспособности сначала записывается как ограничение мощности, подводимой к одному элементу:

$$Q_{in} \leq \min\{Q_{return}, Q_{boil}, Q_{vap}, Q_{ext,lim}\} \quad (2.13)$$

где Q_{return} – предел возврата жидкости, Вт; Q_{boil} – предел локального кипения или перегрева испарителя, Вт; Q_{vap} – гидродинамический предел переноса пара, Вт; $Q_{ext,lim}$ – предел внешней теплоотдачи выбранной поверхности, Вт.

Для электроэнергетической задачи главный практический смысл имеет внешний предел:

$$Q_{ext,lim} = A[h(T_{s,max} - T_{air}) + \varepsilon\sigma(T_{s,max}^4 - T_{rad}^4)] \quad (2.14)$$

Если внешний предел выбранной поверхности меньше целевой полезной теплоотдачи одного элемента или секции, требуемый режим нельзя обеспечить одной гладкой трубкой без роста температуры. Тогда необходимы увеличение приведенной площади, изменение покрытия, оребрение, применение группы ЭВТТ, снижение мощности одного элемента или секционное регулирование.

Для проектирования секции это условие удобно записать через предельную удельную нагрузку наружной поверхности и минимальное число активных элементов:

$$q_i = \frac{P_{act,i}}{A_i} \leq q_{lim,i}(T_{s,max}, h_i, \varepsilon_i) = h_i(T_{s,max} - T_{air}) + \varepsilon_i \sigma (T_{s,max}^4 - T_{rad}^4) \quad (2.15)$$

$$n_{min} = \min\{n \in \mathbb{N}: n \cdot A_i \cdot q_{lim,i} \geq Q_{out,target}\}, \quad s_i \leq \frac{L_s}{n_{min}} \quad (2.16)$$

где q_i – удельная нагрузка i -го элемента, Вт/м²; A_i – приведенная наружная теплоотдающая площадь i -го элемента, м²; $q_{lim,i}$ – предельная удельная теплоотдача выбранной наружной поверхности, Вт/м²; n_{min} – минимальное число активных элементов секции, шт.; $Q_{out,target}$ – целевая полезная теплоотдача секции, Вт; минимальное число элементов выбирается с округлением вверх до целого числа; s_i – предварительный шаг размещения элементов при равномерном распределении по длине L_s , м. Запись q_i через полную активную мощность $P_{act,i}$ в (2.15) принята как консервативная: при наличии тепловых составляющих, не отнесенных к выбранной поверхности, фактическая нагрузка наружной поверхности будет ниже.

Практически условия (2.13)–(2.16) задают пять групп эксплуатационных требований. Наружная поверхность должна отвести подведенную мощность без превышения заданной температуры; поэтому внешний баланс определяет требуемую приведенную площадь секции, допустимую мощность одного элемента, минимальное число активных элементов и предварительный шаг их размещения. Испарение не должно опережать возврат конденсата, в зоне испарения не должны возникать сухие участки, давление насыщения должно оставаться в безопасном диапазоне, а электрическое регулирование должно изменять мощность секции без выхода за тепловые ограничения.

Таким образом, эксплуатационные ограничения используются не как отдельная классификационная таблица, а как расчетные требования к площади теплоотдачи, мощности одного элемента, допустимой температуре поверхности, давлению и алгоритму включения секций.

Ограничение $T_{s,max} = 90$ °С принято как расчетный критерий низкотемпературного режима наружной поверхности и ориентир для сравнения конструктивных вариантов. Оно не заменяет специальные испытания безопасности, но позволяет выполнить предварительную энергетическую оценку площади и мощности секции. Требования к бытовым электронагревательным приборам, электробезопасности и эксплуатации электроустановок дополнительно учитываются по источникам [46–47; 103–104].

Прочностная оценка используется для контроля допустимости расчетных давлений. В рабочем диапазоне поверхности до 90°С внутреннее давление насыщенного водяного пара не превышает 0,070 МПа, поэтому ориентировочное окружное напряжение по среднему радиусу 15,5 мм и толщине стенки 1 мм составляет около 1,1 МПа. Нормативное допускаемое напряжение для меди задается по марке, состоянию материала, температуре и

технологии соединений в конструктивном расчете корпуса. В данной модели этот блок фиксирует порядок действующих напряжений и требования к конструктивной проверке.

Научный результат главы заключается в формировании расчетного критерия проектирования секции ПЭНД: предельная удельная нагрузка наружной поверхности определяется внешним конвективно-радиационным балансом при заданной температуре поверхности, а число активных ЭВТТ и шаг их размещения выбираются из условия, что суммарная полезная теплоотдача секции не превышает внешний предел теплоотдачи. Тем самым двухфазный перенос внутри трубки используется как средство выравнивания температуры, а не как основание автоматически считать одиночную гладкую ЭВТТ полноценной секцией мощностью 80 Вт.

Выводы по главе 2

1. В главе сформирована расчетная постановка для оценки ЭВТТ в составе ПЭНД: активная электрическая мощность P_{act} связана с теплоподводом Q_{in} , полезной теплоотдачей Q_{out} , внешней площадью секции и секционным регулированием; детализация теплофизической и численной постановки приведена в приложении Б, а визуализация результатов COMSOL – в приложении В.

2. Разведены три режима использования величины 80 Вт. $Q_{in}^{test} = 80$ Вт используется для расчетного теста одиночной трубки; $Q_{out,target} = 80$ Вт задает проектную мощность полной секции; $P_{act} \approx 80$ Вт является экспериментально измеряемой активной мощностью. Поэтому в главе не принимается искусственное равенство $P_{act} = Q_{in} = Q_{out} = 80$ Вт.

3. Показано, что одиночная гладкая ЭВТТ диаметром 32 мм и длиной 340 мм при температуре поверхности 70–90 °С отдает существенно меньше 80 Вт. При $T_s = 90$ °С она составляет лишь около 24–32 Вт (таблица 2.3).

4. Для отвода 80 Вт при температуре поверхности 90 °С требуется внешняя площадь порядка 0,09–0,11 м², что в несколько раз больше собственной площади гладкой трубки ($\approx 0,034$ м²). Поэтому проект ПЭНД должен опираться на развитую теплоотдающую поверхность, учет эффективности оребрения, группу ЭВТТ и/или секционное регулирование.

5. Численная модель обосновывает применение усредненной температуры поверхности во внешнем балансе и подтверждает физическую реализуемость фазового переноса. Двухфазный режим сглаживает температурное поле по высоте, но температурный уровень задается внешним балансом.

6. Сформированы основные расчетные признаки устойчивого режима: выполнение энергетического баланса, отсутствие монотонного роста температуры, отсутствие сухих зон, сохранение возврата конденсата, достаточный внешний предел теплоотдачи, допустимые давления и выполнение критерия предельной удельной нагрузки наружной поверхности.

7. Полученные расчетные ориентиры проверяются и используются в последующих главах. В главе 3 подтверждается энергетическая нормировка $q = \frac{P_{act}}{\pi DL}$, введенная в разделе 2.3; определяется приведенная чувствительность поверхности к удельной нагрузке α_{app} как экспериментальный аналог коэффициента полезной теплоотдачи η_{use} ; температурные ряды и расчет COMSOL сопоставляются с экспериментом. Электротехнические аспекты – измерение активной мощности при регулировании, коэффициент мощности и качество электроэнергии – рассматриваются в главе 4. Коэффициенты η_{ev} и η_{cycle} введены как элементы энергетического учета; их прямое экспериментальное определение выполняется при наличии отдельной регистрации локализации мощности и временных рядов мощности.

3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПЭНД И ПРОВЕРКА РАСЧЕТНЫХ МОДЕЛЕЙ

3.1 Объект экспериментальных исследований, программа и обоснование выбора опытных образцов ПЭНД

Объект экспериментальных исследований – электровакуумная теплопередающая секция ПЭНД, герметичная вертикальная трубка, работающая по принципу двухфазного термосифона [16–20, 70, 72–74, 78]; конструкция и характеристики ПЭНД исследованы в работах автора [96–100]. В нижней части секции расположен электрический нагревательный элемент, в полости находится ограниченное количество дистиллированной воды, а предварительное вакуумирование обеспечивает сниженное начальное остаточное давление и быстрый запуск испарительно-конденсационного цикла.

В работе последовательно разделены три уровня объекта исследования. Первый уровень – одиночная лабораторная электровакуумная трубка, по которой определяются собственные температурные характеристики и строится регрессионная модель. Второй уровень – оребренная секция или опытный прототип ПЭНД как отопительный прибор, используемый в сравнительных опытах. Третий уровень – автономная беструбная система отопления здания на основе ПЭНД; системные показатели рассматриваются в главе 4 и задают область применения результатов настоящей главы.

Основная программа включает 40 серий опытов S01–S40 с одинаковыми значениями начального остаточного давления и длительности регистрации. Исходные условия основной программы заданы ниже.

$$p_0 = 9,807 \text{ кПа}; \quad n = 50 \text{ отсчетов},$$

где p_0 – начальное остаточное давление в полости секции перед запуском, кПа; n – длительность регистрации одного опыта, выраженная числом температурных отсчетов, шт.

Формирование основной регрессионной выборки выполнено по заранее заданным детерминированным критериям. В выборку S01–S40 включены серии с полной записью температурного ряда, квазистационарным завершением опыта, устойчивой герметичностью и вакуумом, согласованностью повторов при совпадающих исходных параметрах, корректной принадлежностью к группе по объему теплоносителя и расхождением между $T_{\text{мах}}$ и $T_{\text{посл}}$ в пределах расчетного допуска. Серии, выходящие за указанные критерии, систематизированы в приложении А; коэффициенты модели рассчитаны по основной выборке S01–S40.

Выбор фиксированного начального остаточного давления соответствует технологическому остаточному давлению 9,807 кПа (0,1 кгс/см², около 0,097 атм). При таком давлении температура насыщения воды составляет около 45,4 °С [91]; двухфазный испарительно-конденсационный цикл гарантированно запускается уже в начальной стадии нагрева, ниже типичных температур

стенки лабораторной секции. Фиксация p_0 на одном уровне в основной программе исключает начальное давление из числа источников статистической неоднородности регрессионной модели.

В качестве зависимой переменной в регрессионной обработке принята установившаяся локальная температура верхней зоны секции – последнее зарегистрированное значение $T_{\text{посл}}$. По выборке S01–S40 расхождение между максимальной и последней зарегистрированной температурой не превышает расчетного допуска; $T_{\text{посл}}$ принят как устойчивый показатель квазистационарного завершения опыта. Диапазоны факторов основной температурной программы представлены в таблице 3.1.

$$T_{\text{max}} - T_{\text{посл}} \leq 1,0 \text{ } ^\circ\text{C},$$

где T_{max} – максимальная зарегистрированная температура в серии, $^\circ\text{C}$;
 $T_{\text{посл}}$ – последняя зарегистрированная температура верхней зоны секции, $^\circ\text{C}$.

Таблица 3.1 – Диапазоны факторов основной температурной программы S01–S40

Параметр	Обозначение	Единица	Диапазон / уровни	Примечание
Подводимая электрическая мощность	P	Вт	60; 80; 100	Режимный фактор
Объем теплоносителя	V	мл	10; 15	Технологический фактор заливки
Наружный диаметр секции	D	мм	20; 28; 32	Используется при расчете A
Длина секции	L	см	25–45	Переводится в метры
Масса секции с теплоносителем	m	г	235–573	Переводится в килограммы
Начальное остаточное давление	p_0	кПа	9,807	Постоянное условие основной выборки
Площадь боковой поверхности	A	м^2	0,0157–0,0452	$A = \pi DL$
Удельная электротепловая нагрузка	q	Вт/ м^2	1326,3–3819,7	расчет по формуле (3.1)
Удельная масса	μ	кг/ м^2	10,04–19,67	расчет по формуле (3.1)
Установившаяся температура	$T_{\text{посл}}$	$^\circ\text{C}$	85,0–201,0	Локальная температура верхней зоны

Выбор опытных образцов основан на необходимости охватить практически значимые типоразмеры электровакуумных секций при мощности одной секции 60–100 Вт. Диаметры 20, 28 и 32 мм позволяют оценить влияние

площади теплоотдачи; длины 25–45 см соответствуют компактным вертикальным элементам бытового отопительного прибора; массы 235–573 г отражают различия толщины стенки, конструктивного исполнения и частично развитости теплоотдающей поверхности. Абсолютная масса m рассматривается через удельный конструктивно-массовый параметр μ .

3.2 Экспериментальный стенд, методы измерения и метрологическое обеспечение исследований ПЭНД

Экспериментальный стенд обеспечивал регулируемый электротепловой подвод, вакуумирование полости секции, дозированную заливку рабочего тела и регистрацию температуры в контрольной зоне. Принципиальная схема установки приведена на рисунке 3.1, внешний вид лабораторного стенда – на рисунке 3.2.

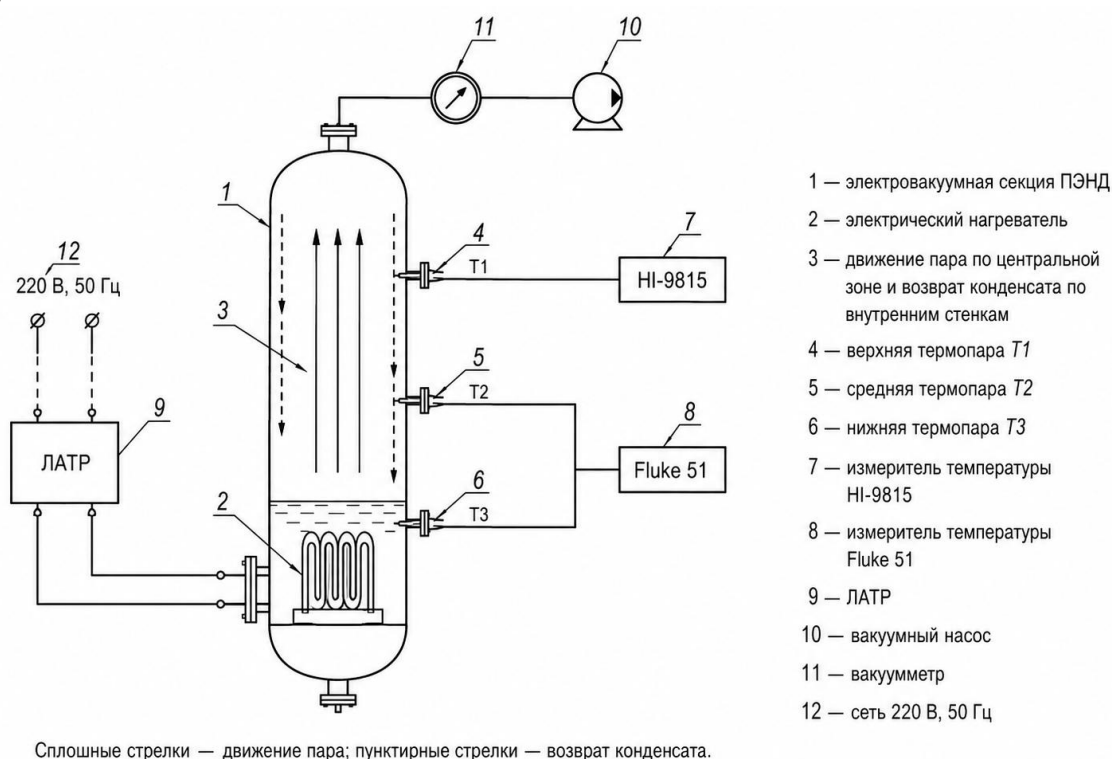


Рисунок 3.1 – Схема экспериментальной установки для исследования электровacuумной секции ПЭНД



Рисунок 3.2 – Внешний вид лабораторного стенда для исследования электровакуумной секции ПЭНД

Измерительный тракт включал контроль напряжения и тока цифровыми мультиметрами, дополнительный контроль активной мощности ваттметром, регистрацию температуры контактными термопарами, тепловизионный контроль температурного поля поверхности и контроль начального остаточного давления вакуумметром. Такое описание фиксирует воспроизводимую цепь измерений от электрического режима нагревателя до температурной реакции секции.

Подводимая электрическая мощность задавалась через регулируемый источник питания и контролировалась по току и напряжению. В стационарном режиме активная электрическая мощность нагревательного элемента рассматривается как тепловая нагрузка секции, поскольку вся подведенная энергия в конечном итоге переходит в тепло. При анализе локальной тепловой напряженности в зоне испарения используется величина Q_{in} , а при анализе внешней поверхности – удельная нагрузка, рассчитываемая по формуле (3.1).

Перед включением секция охлаждалась до температуры помещения, внутренняя полость заполнялась заданным количеством дистиллированной воды, после чего выполнялось вакуумирование и герметизация. В основной программе начальное остаточное давление p_0 принято равным 9,807 кПа. Начальное технологическое давление отличается от рабочего давления насыщенного водяного пара в нагретом режиме: рабочее давление определяется текущей температурой жидкости и не равно p_0 .

Единичный опыт выполнялся по единой последовательности: охлаждение секции до температуры помещения; дозированная заливка дистиллированной воды; вакуумирование и герметизация полости; запись

начальных условий; включение нагревателя с заданной активной мощностью; регистрация температурного ряда; контроль выхода на плато и последующее охлаждение перед следующим опытом. В работе различаются: время достижения 90 °С как эксплуатационный показатель, время достижения 200 °С как показатель интенсивности лабораторного нагрева, время выхода на плато и постоянная времени экспоненциальной модели разогрева:

$$t_{90} = t(T = 90 \text{ } ^\circ\text{C}); \quad t_{200} = t(T = 200 \text{ } ^\circ\text{C}); \quad \tau_{0,9} = t(T = 0,9 \cdot T_{\text{плато}}),$$

где t_{90} – время достижения температуры поверхности 90 °С, с или мин; t_{200} – время достижения локальной температуры 200 °С, с; $\tau_{0,9}$ – время достижения 90 % уровня плато $T_{\text{плато}}$, с; $T_{\text{плато}}$ – квазистационарная температура соответствующей контрольной точки, °С.

$$T(t) = T_{\infty} - (T_{\infty} - T_0) \cdot \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right),$$

где $T(t)$ – температура контрольной точки в момент времени t , °С; T_{∞} – предельная температура экспоненциальной модели, °С; T_0 – начальная температура, °С; τ – тепловая постоянная разогрева, с; t – время от начала нагрева, с.

Разграничение динамических показателей сохраняет состав выборки S01–S40 и обеспечивает корректную интерпретацию температурно-временных рядов: времени достижения заданной температуры, времени выхода на плато и тепловой постоянной разогрева.

Основные измеряемые величины и расчетные показатели приведены для воспроизводимости эксперимента. Исходными измеряемыми величинами являются активная мощность P , объем теплоносителя V , наружный диаметр D , длина L , масса секции m , температура помещения $T_{\text{пом}}$ и последняя зарегистрированная температура $T_{\text{посл}}$. Расчетные показатели A , q , μ и ΔT определяются формулами (3.1)–(3.2).

Для корректной интерпретации результатов разграничены температурные понятия. Температура $T_{\text{посл}}$ в основной модели – это локальная температура верхней зоны лабораторной электровакуумной трубки в точке установки термопары. Она отличается от средней температуры корпуса и от температуры поверхности, доступной для прикосновения готового отопительного прибора с кожухом и оребрением. Локальные температурные значения лабораторной трубки используются для анализа физического режима; оценка поверхностей готового изделия выполняется по требованиям безопасности бытовых электрических отопительных приборов [46, 47].

Для визуального контроля распределения температуры по поверхности использовалась тепловизионная съемка. Она фиксировала температурное поле поверхности и локальные зоны нагрева; в расчет регрессионной модели включались контактные температурные измерения, геометрические параметры и активная электрическая мощность.

Основные источники неопределенности – инструментальная погрешность термопар и электрических измерений, дозирование

теплоносителя, положение датчика, качество теплового контакта нагревателя и разброс изготовления секций. Остаточная дисперсия основной программы связана с конструктивными различиями опытных образцов и совокупным влиянием этих факторов.

Метрологические характеристики измерительных каналов заданы следующим образом. Напряжение и ток нагревателя контролировались мультиметрами, активная мощность – ваттметром до 500 Вт с погрешностью порядка 2 % по модулю, температура поверхности – термопарами типа ХА(К) по ГОСТ Р 8.585-2001 [105] с типовой инструментальной неопределенностью канала около 1,5 °С по модулю, начальное остаточное давление – вакуумметром насосной станции, объем теплоносителя – дозирующим шприцем с погрешностью около 1 мл по модулю.

Итоговые оценки инструментальной неопределенности приведены ниже. Расчет по ГОСТ 34100.3-2017 [106] приведен в приложении Б; в тексте главы используется его основной вывод: остаточный разброс модели определяется преимущественно технологической вариативностью образцов и условиями установки датчика.

$$U(\Delta T) \approx 4,2 \text{ }^\circ\text{C}; \quad u(q)/q \approx 5 - 6 \text{ } \%,$$

где $U(\Delta T)$ – расширенная инструментальная неопределенность перегрева, °С; $u(q)/q$ – относительная неопределенность удельной электротепловой нагрузки, %.

$$u_c(\Delta T) = \sqrt{u^2(T_{\text{посл}}) + u^2(T_{\text{пом}})} \approx \sqrt{1,5^2 + 1,5^2} = 2,1 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$U(\Delta T) = k \cdot u_c(\Delta T) \approx 2 \cdot 2,1 = 4,2 \text{ }^\circ\text{C}, \quad k \approx 2,$$

где $u_c(\Delta T)$ – суммарная стандартная неопределенность перегрева, °С; $u(T_{\text{посл}})$ и $u(T_{\text{пом}})$ – стандартные неопределенности температурных измерений, °С; $U(\Delta T)$ – расширенная неопределенность перегрева, °С; k – коэффициент охвата.

Повторяемость температурной реакции оценена по группам номинально близких конфигураций. Для групп с совпадающими Р, V, D и L среднее внутригрупповое стандартное отклонение температуры составляет примерно 12 °С, а для более широких групп с совпадающими Р, D и L – около 9 °С. Эти значения сопоставимы со средней ошибкой кросс-валидации и подтверждают технологическую природу остаточной дисперсии модели.

В основной модели контролируемым технологическим фактором принят объем теплоносителя V в диапазоне 10–15 мл. Физически обобщенная характеристика заполнения определяется степенью заполнения внутренней полости φ .

$$\varphi = V / V_{\text{внутр}},$$

где φ – степень заполнения внутренней полости, безразмерная величина; V – объем залитого теплоносителя, м³ или мл; $V_{\text{внутр}}$ – внутренний объем полости секции, м³ или мл.

3.3 Экспериментальные исследования тепловых и температурных характеристик электровакуумной трубки ПЭНД

Температурная программа S01–S40 показывает, что локальная установившаяся температура верхней зоны секции меняется в широком диапазоне; численные границы, среднее значение и средний перегрев приведены ниже. Разброс отражает варьирование мощности, геометрии, объема заливки и конструктивно-массового параметра.

$$T_{\text{посл}} \in [85,0; 201,0] \text{ } ^\circ\text{C}; \quad T_{\text{посл}} = 142,5 \text{ } ^\circ\text{C}; \quad \Delta T = 118,2 \text{ } ^\circ\text{C},$$

где $T_{\text{посл}}$ – локальная установившаяся температура верхней зоны секции, $^\circ\text{C}$; $T_{\text{посл}}$ – среднее значение $T_{\text{посл}}$ по выборке S01–S40, $^\circ\text{C}$; ΔT – средний перегрев по выборке, $^\circ\text{C}$.

Распределение опытов по уровням мощности отражает многофакторный характер экспериментальной программы. Неравномерность числа серий учитывается при статистической интерпретации: верхний уровень мощности представлен пятью опытами, а устойчивость модели проверена методами исключения одного наблюдения (LOO) и исключения близких конфигураций.

$$NS60 = 22; \quad NS80 = 13; \quad NS100 = 5,$$

где $NS60, NS80$ и $NS100$ – число опытных серий при подводимой активной мощности 60, 80 и 100 Вт соответственно, шт.

Сводные характеристики основной выборки по уровням мощности представлены в тексте. Для уровня 60 Вт выполнено 22 серии: средняя температура $T_{\text{посл}}$ составила 128,2 $^\circ\text{C}$ при диапазоне 85,0–176,5 $^\circ\text{C}$; средние q и μ равны 2261,4 Вт/м² и 13,4 кг/м². Для уровня 80 Вт выполнено 13 серий: средняя $T_{\text{посл}}$ составила 158,0 $^\circ\text{C}$ при диапазоне 129,4–201,0 $^\circ\text{C}$; средние q и μ равны 2392,1 Вт/м² и 11,8 кг/м². Для уровня 100 Вт выполнено 5 серий: средняя $T_{\text{посл}}$ составила 165,6 $^\circ\text{C}$ при диапазоне 133,0–184,0 $^\circ\text{C}$; средние q и μ равны 2771,7 Вт/м² и 13,3 кг/м².

$$T_{60} = 128,2 \text{ } ^\circ\text{C}; \quad T_{80} = 158,0 \text{ } ^\circ\text{C}; \quad T_{100} = 165,6 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

$$\bar{q}_{60} = 2261,4 \text{ Вт/м}^2; \quad \bar{q}_{80} = 2392,1 \text{ Вт/м}^2; \quad \bar{q}_{100} = 2771,7 \text{ Вт/м}^2.$$

$$\bar{\mu}_{60} = 13,4 \text{ кг/м}^2; \quad \bar{\mu}_{80} = 11,8 \text{ кг/м}^2; \quad \bar{\mu}_{100} = 13,3 \text{ кг/м}^2,$$

где индекс 60, 80 или 100 относится к уровню подводимой активной мощности, Вт; T – среднее значение $T_{\text{посл}}$, $^\circ\text{C}$; \bar{q} – средняя удельная электротепловая нагрузка, Вт/м²; $\bar{\mu}$ – средняя удельная масса, кг/м².

Увеличение абсолютной мощности в среднем повышает температуру, однако в выборке S01–S40 сама по себе мощность P недостаточна как предиктор. Например, секция большей площади и массы при 100 Вт может иметь меньшую локальную температуру, чем компактная секция при 80 Вт. Для физически корректного сопоставления используется удельная электротепловая нагрузка q . Связь перегрева с q показана на рисунке 3.3.

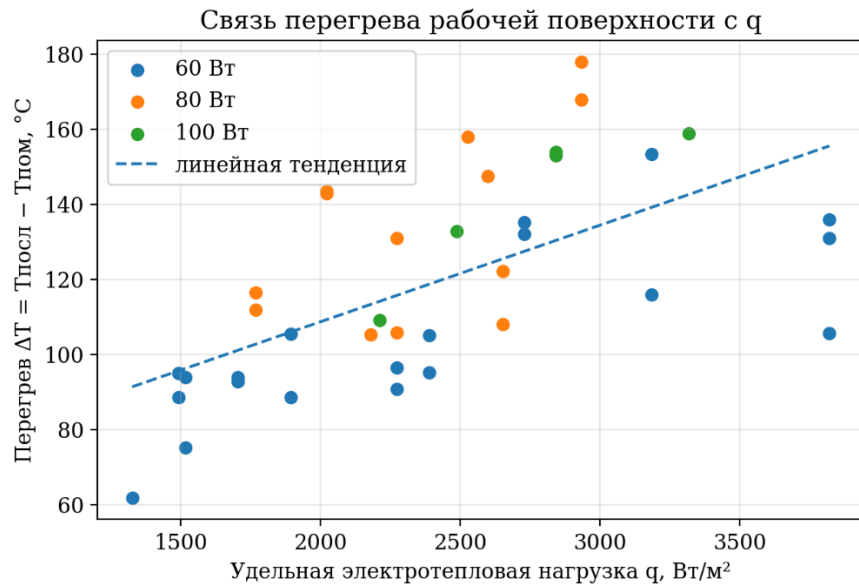


Рисунок 3.3 – Связь локального перегрева верхней зоны секции с удельной электротепловой нагрузкой q

График на рисунке 3.3 подтверждает основной энергетический вывод: локальный перегрев верхней зоны секции возрастает с увеличением удельной электротепловой нагрузки q . Такой результат согласуется с внешним тепловым балансом и пропорциональной связью перегрева с q при фиксированных условиях теплоотдачи. Разброс точек относительно простой зависимости $\Delta T(q)$ объясняется влиянием объема теплоносителя, массы, геометрии и конструктивного исполнения секции. Связь перегрева с удельной массой μ представлена на рисунке 3.4.

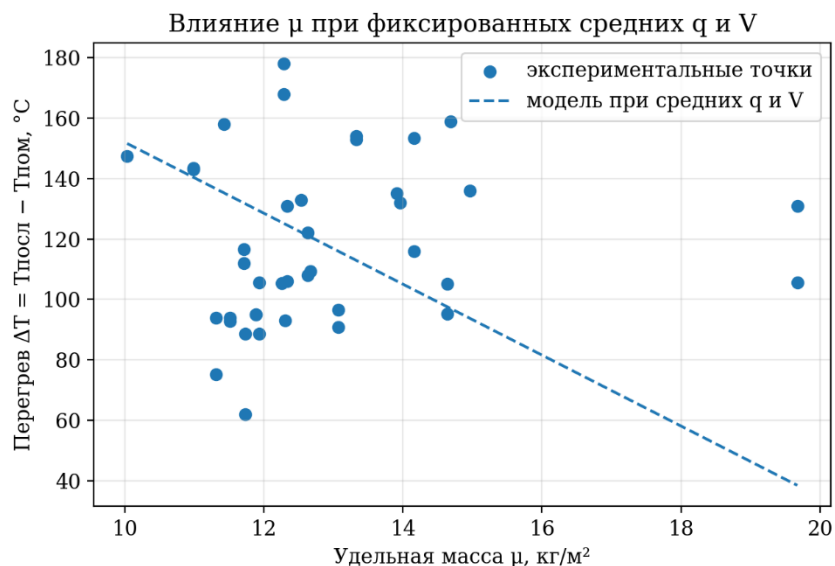


Рисунок 3.4 – Связь локального перегрева верхней зоны секции с удельной массой μ

Удельная масса μ имеет отрицательную связь с температурой: при большем конструктивно-массовом параметре локальная температура верхней зоны, как правило, ниже. Физически больший μ при той же площади A означает большую тепловую инерцию, более развитую или массивную стенку, иной характер аксиального распределения тепла и более равномерное вовлечение боковой теплоотдающей поверхности. Параметр μ выступает обобщенным эмпирическим показателем, объединяющим влияние массы, толщины стенки, материала, развитости поверхности и распределения тепла по высоте.

Влияние объема теплоносителя в выборке S01–S40 выражено слабее, чем влияние q и μ . В пределах 10–15 мл объем используется как эмпирический технологический фактор; для обобщенного описания применяется степень заполнения ϕ . Физически зависимость от заполнения немонотонна: недостаток жидкости создает риск осушения зоны испарения, а избыток уменьшает паровой объем и частично затопляет зону конденсации. Коэффициент при V в полной модели интерпретируется как технологическая поправка для исследованного диапазона заливки. Тепловизионная картина локального нагрева представлена на рисунке 3.5.

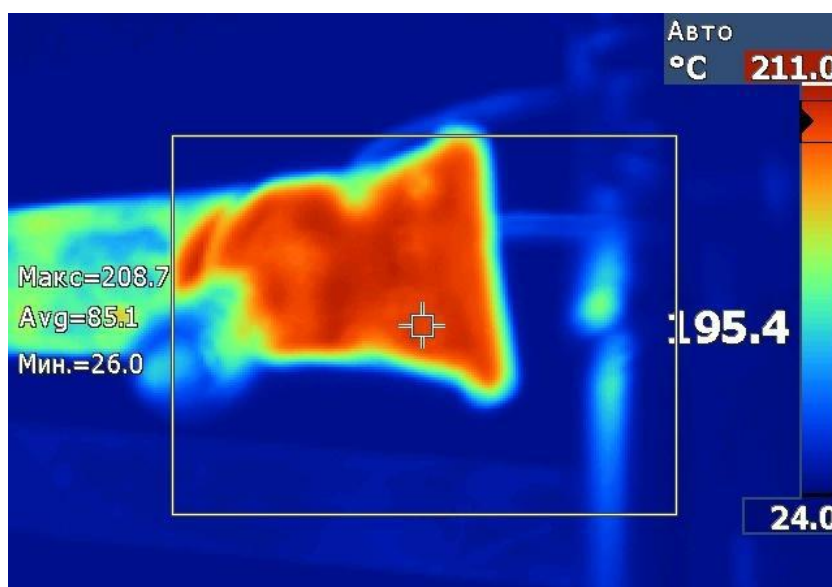


Рисунок 3.5 – Тепловизионная картина локального нагрева лабораторной секции ПЭНД

Тепловизионная картина на рисунке 3.5 используется как визуальное подтверждение распределения температурного поля и локальных зон нагрева. Количественные выводы регрессионной модели основаны на контактных температурных измерениях, геометрических параметрах и активной электрической мощности.

Специальная серия V01–V19 при другом начальном остаточном давлении выделена в отдельный методический блок и используется для оценки влияния p_0 на запуск двухфазного цикла. Численные параметры специальной

серии заданы ниже; серия показывает влияние снижения начального остаточного давления на условия запуска и температурный режим. Регрессионная модель основной выборки строится отдельно от серии V01–V19.

$$p_{0,V} = 5,066 \text{ кПа}; T_{\text{посл},V} \in [80,4; 232,3] \text{ } ^\circ\text{C}; qV \in [1326,3; 4174,6] \text{ Вт/м}^2,$$

где $p_{0,V}$ – начальное остаточное давление в специальной серии V01–V19, кПа; $T_{\text{посл},V}$ – последняя температура в опытах специальной серии, $^\circ\text{C}$; qV – диапазон удельной электротепловой нагрузки в специальной серии, Вт/м².

3.4 Экспериментальное определение энергетических показателей, поверхностной теплоотдающей способности и регрессионной модели ПЭНД

3.4.1 Выбор формы регрессионной модели и нормированных факторов

Для перехода от описательных температурных рядов к инженерной модели введены три расчетных показателя: площадь наружной боковой поверхности A , удельная электротепловая нагрузка q и удельная масса μ . Во всех формулах D и L переводятся в метры, масса m – в килограммы.

$$A = \pi DL; \quad q = \frac{P}{A} = \frac{P}{\pi DL}; \quad \mu = \frac{m}{A} = \frac{m}{\pi DL}, \quad (3.1)$$

где A – площадь наружной боковой поверхности секции, м²; D – наружный диаметр секции, м; L – длина секции, м; q – удельная электротепловая нагрузка наружной поверхности, Вт/м²; P – подводимая активная электрическая мощность, Вт; μ – удельная масса секции, кг/м²; m – масса секции с теплоносителем, кг.

В качестве зависимой переменной принята величина локального перегрева верхней зоны секции над температурой помещения. В качестве $T_{\text{посл}}$ принимается последнее зарегистрированное значение температуры. Как показано в разделе 3.1, для выборки S01–S40 расхождение $T_{\text{max}} - T_{\text{посл}}$ не превышает 1,0 $^\circ\text{C}$, поэтому использование $T_{\text{посл}}$ в качестве зависимой переменной методически обосновано.

$$\Delta T = T_{\text{посл}} - T_{\text{пом}}, \quad (3.2)$$

где ΔT – локальный перегрев верхней зоны секции над температурой помещения, $^\circ\text{C}$; $T_{\text{посл}}$ – последняя зарегистрированная температура верхней зоны секции, $^\circ\text{C}$; $T_{\text{пом}}$ – температура помещения перед опытом, $^\circ\text{C}$.

Сравнение основных форм модели показывает, что сочетание q и μ обеспечивает физически интерпретируемую инженерную зависимость. Удельная электротепловая нагрузка описывает энергетический тренд, а удельная масса учитывает конструктивно-массовое исполнение секции. Объем теплоносителя V в диапазоне 10–15 мл включен в расширенную технологическую форму как поправочный фактор. Результаты сравнения представлены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Сравнение рабочих регрессионных моделей по выборке S01–S40

Модель	Факторы	R ² fit	R ² adj	R ² LOO	MAE, °C (LOO)	RMSE, °C (LOO)
D	q, V, μ	0,712	0,688	0,637	14,10	16,39
F	q, μ	0,700	0,684	0,634	14,07	16,46

Сокращенная модель F и расширенная модель D дают близкое качество при проверке с исключением одного наблюдения (LOO). В качестве основной расчетной формы используется модель D, а параметрически экономная форма F подтверждает, что основным сигналом несут удельная электротепловая нагрузка и удельная масса.

Расширенная регрессионная модель в системе СИ имеет вид:

$$\Delta T = 134,64 + 0,05073 \cdot q + 1,222 \cdot 10^6 \cdot V - 11,744 \cdot \mu, \quad (3.3)$$

где ΔT – расчетный перегрев, °C; q – удельная электротепловая нагрузка, Вт/м²; V – объем теплоносителя в записи СИ, м³; μ – удельная масса, кг/м²; 134,64, 0,05073, 1,222 · 10⁶ и – 11,744 – эмпирические коэффициенты расширенной модели D.

В формуле (3.3) q выражается в Вт/м², V – в м³, μ – в кг/м², ΔT – в °C. Для удобства инженерного использования модель дополнительно записана с объемом в миллилитрах:

$$\Delta T = 134,64 + 0,05073 \cdot q + 1,222 \cdot V_{\text{мл}} - 11,744 \cdot \mu, \quad (3.4)$$

где $V_{\text{мл}}$ – объем теплоносителя в миллилитрах, мл; остальные обозначения и единицы измерения соответствуют формуле (3.3). В диапазоне 10–15 мл коэффициент при $V_{\text{мл}}$ характеризует технологическую поправку к расчету локального перегрева.

3.4.2 Коэффициенты, статистическая диагностика и физическая интерпретация модели

Статистические характеристики коэффициентов расширенной модели подтверждают значимость q и μ ; коэффициент при V характеризует технологическую поправку в диапазоне заливки 10–15 мл. Уровни значимости заданы ниже.

$$tb = 9,21; \quad pb < 0,001; \quad td = -6,18; \quad pd < 0,001; \quad pc = 0,225,$$

где tb и td – t-статистики коэффициентов при q и μ ; pb, pd и pc – p-значение для коэффициентов при q, μ и V соответственно.

$$a = 134,64; \quad b = 0,05073; \quad c = 1,222 \cdot 10^6; \quad d = -11,744,$$

где a – свободный член модели, °C; b – коэффициент при q , °C·м²/Вт; c – коэффициент при V в записи СИ, °C/м³; d – коэффициент при μ , °C·м²/кг.

Показатели качества расширенной модели и проверки с исключением одной конфигурации (LCO) заданы ниже. Они подтверждают работоспособность модели как на отдельных точках, так и при исключении близких конфигураций.

$$R^2_{\text{fit}} = 0,712; \quad R^2_{\text{adj}} = 0,688; \quad R^2_{\text{LOO}} = 0,637.$$

$$MAELOO = 14,10 \text{ }^\circ\text{C}; RMSELOO = 16,39 \text{ }^\circ\text{C}; R^2LCO = 0,621; MAELCO = 14,53 \text{ }^\circ\text{C},$$

где R^2_{fit} – коэффициент детерминации на обучающей выборке; R^2_{adj} – скорректированный коэффициент детерминации; R^2_{LOO} , $MAELOO$ и $RMSELOO$ – показатели проверки с исключением одного наблюдения (LOO); R^2_{LCO} и $MAELCO$ – показатели проверки с исключением одной конфигурации (LCO).

Дополнительная диагностика показала отсутствие критической мультиколлинеарности и приемлемость нормальности остатков по критерию Шапиро–Уилка. Тест Бройша–Пагана указывает на признаки гетероскедастичности; поэтому выводы опираются прежде всего на проверку с исключением одного наблюдения (LOO), проверку с исключением одной конфигурации (LCO) и физическую интерпретацию коэффициентов.

$$VIF(q) = 2,29; VIF(V) = 1,01; VIF(\mu) = 2,28; pSW = 0,204; pBP = 0,010,$$

где VIF – фактор инфляции дисперсии соответствующего предиктора; pSW – р-значение теста Шапиро–Уилка; pBP – р-значение теста Бройша–Пагана.

Сокращенная форма F практически не уступает полной форме D, что видно по таблице 3.2. Информационные критерии AIC/BIC благоприятнее для формы F, а расчетная форма D используется для учета технологической поправки по объему заливки. Сопоставление измеренной и расчетной температуры и остатки модели представлены на рисунках 3.6 и 3.7.

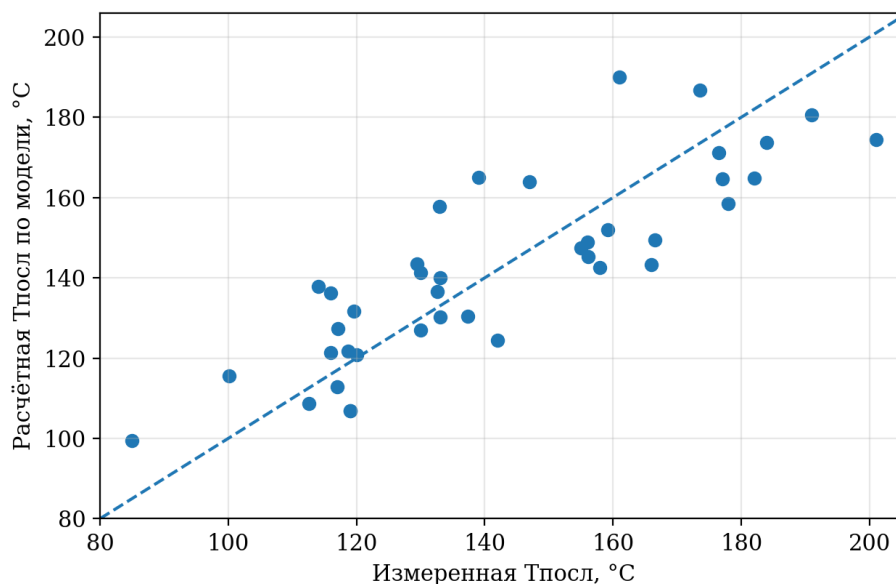


Рисунок 3.6 – Сопоставление измеренной и расчетной температуры по модели (3.3)

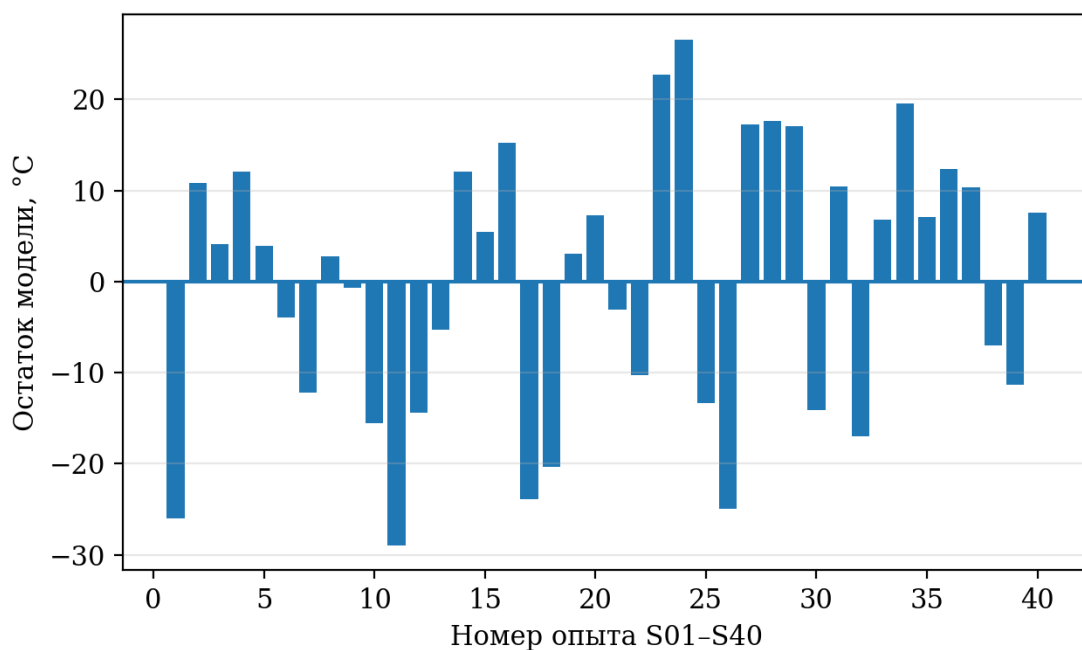


Рисунок 3.7 – Остатки регрессионной модели (3.3) по сериям S01–S40

Графики на рисунках 3.6 и 3.7 показывают отсутствие выраженного направленного отклонения расчета в основной области температур. Формальные тесты уточняют этот вывод: нормальность остатков не отвергается, но есть признаки неодинаковой дисперсии. Такая гетероскедастичность характерна для многофакторной инженерной выборки с различной геометрией, массой, тепловым контактом и положением датчика. Оценка пригодности модели опирается на проверку с исключением одного наблюдения (LOO), проверку с исключением одной конфигурации (LCO) и физическую согласованность коэффициентов.

Проверка значимости модели по F-критерию Фишера показывает, что расчетное значение F-критерия существенно превышает критическое; модель статистически значима.

$$n = 40; k = 3; df_1 = 3; df_2 = 36.$$

$$F_{расч} = 29,69 > F_{крит}(0,95; 3; 36) = 2,87; p = 7,67E - 10,$$

где n – число наблюдений, шт.; k – число факторов, шт.; df_1 и df_2 – степени свободы; $F_{расч}$ – расчетное значение критерия; $F_{крит}$ – критическое значение; p – уровень значимости.

Коэффициент b при удельной нагрузке имеет важную физическую интерпретацию. Его обратная величина задает приведенный, или кажущийся, коэффициент чувствительности поверхности к удельной нагрузке:

$$\alpha_{app} = \frac{1}{b} = \frac{1}{0,05073} \approx 19,7 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°С}), \quad (3.5)$$

где α_{app} – приведенная чувствительность поверхности к удельной нагрузке, Вт/(м²·°С); b – коэффициент при q в регрессионной модели, °С·м²/Вт.

Значение α_{app} – приведенная чувствительность поверхности к удельной нагрузке, рассчитанная по локальной температуре верхней зоны и

эмпирической регрессии. Различие между регрессионной чувствительностью и независимой оценкой суммарной внешней теплоотдачи составляет около четверти и связано с локальностью точки измерения, вкладом торцевых поверхностей, нелинейным ростом излучения при высоких температурах, фактической степенью черноты поверхности и технологической неоднородностью образцов. В модели α_{arr} характеризует приведенную чувствительность поверхности к q .

Расчет внешней теплоотдачи, выполненный по классическим соотношениям теплообмена [101, 102], сопоставляется с оценкой α_{arr} . Численные оценки свободной конвекции, излучения, суммарной внешней теплоотдачи и регрессионной чувствительности приведены ниже.

$$\alpha_{своб} \approx 7,5 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°C}); \alpha_{изл} \approx 8,2 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°C}); \alpha_{сумм} \approx 15,7 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°C}); \alpha_{arr} \approx 19,7 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°C}),$$

где $\alpha_{своб}$ – коэффициент свободной конвекции, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°C})$; $\alpha_{изл}$ – лучистая составляющая теплоотдачи, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°C})$; $\alpha_{сумм}$ – суммарная внешняя теплоотдача, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°C})$; α_{arr} – приведенная регрессионная чувствительность, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°C})$.

3.4.3 Инженерное использование модели

В качестве основной расчетной формы используется расширенная модель D по формулам (3.3)–(3.4), применяемая при известном объеме заливки в диапазоне 10–15 мл. Сокращенная форма F подтверждает, что основной сигнал несут удельная электротепловая нагрузка и удельная масса. В прямой задаче по заданным исходным геометрическим, массовым и режимным параметрам сначала вычисляют нормированные показатели, затем находят перегрев и локальную температуру. Точность прогноза в пределах исследованной области составляет порядка 14–16 °C по результатам кросс-валидации.

В обратной задаче при заданной целевой температуре $T_{цел}$ и известных R , D , L , V требуемая удельная масса определяется по формуле (3.6), полученной из расширенной модели (3.3):

$$\mu_{треб} = \frac{a+bq+cV-\Delta T_{цел}}{|d|}, \quad \Delta T_{цел} = T_{цел} - T_{пом}, \quad (3.6)$$

где $\mu_{треб}$ – требуемая удельная масса секции, $\text{кг}/\text{м}^2$; a, b, c и d – коэффициенты расширенной модели; q – удельная электротепловая нагрузка, $\text{Вт}/\text{м}^2$; V – объем теплоносителя, м^3 ; $\Delta T_{цел}$ – целевой перегрев, °C; $T_{цел}$ – целевая локальная температура, °C; $T_{пом}$ – температура помещения, °C.

После этого требуемая масса секции оценивается по формуле (3.7):

$$m_{треб} = \mu_{треб} \cdot \pi DL, \quad (3.7)$$

где $m_{треб}$ – требуемая масса секции с теплоносителем, кг; $\mu_{треб}$ – требуемая удельная масса, $\text{кг}/\text{м}^2$; D – наружный диаметр, м; L – длина секции, м.

Полученная величина используется как проектная оценка для лабораторной секции.

Далее приведен числовой пример прямой инженерной задачи.

Для иллюстрации работоспособности технологической записи модели (3.4) приведен один прямой расчет в пределах области применимости выборки S01–S40.

Прямая задача. Рассматривается секция с заданными геометрическими, массовыми и режимными параметрами; исходные данные и последовательность расчета задаются следующими расчетными соотношениями.

$$D = 28 \text{ мм} = 0,028 \text{ м}; L = 35 \text{ см} = 0,35 \text{ м}; m = 380 \text{ г} = 0,380 \text{ кг}.$$

$$P = 80 \text{ Вт}; V_{\text{мл}} = 12 \text{ мл}; T_{\text{пом}} = 24 \text{ }^\circ\text{C},$$

где D – наружный диаметр секции; L – длина секции; m – масса секции с теплоносителем; P – подводимая активная электрическая мощность; $V_{\text{мл}}$ – объем теплоносителя; $T_{\text{пом}}$ – температура помещения.

$$A = \pi \cdot D \cdot L = \pi \cdot 0,028 \cdot 0,35 = 0,03079 \text{ м}^2$$

$$q = \frac{P}{A} = \frac{80}{0,03079} = 2598,4 \text{ Вт/м}^2$$

$$\mu = \frac{m}{A} = \frac{0,380}{0,03079} = 12,34 \text{ кг/м}^2$$

$$\Delta T = 134,64 + 0,05073 \cdot 2598,4 + 1,222 \cdot 12 - 11,744 \cdot 12,34 = 136,2 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$T_{\text{посл}} = T_{\text{пом}} + \Delta T = 24 + 136,2 = 160,2 \text{ }^\circ\text{C},$$

где A – расчетная площадь боковой поверхности, м^2 ; q – расчетная удельная электротепловая нагрузка, Вт/м^2 ; μ – расчетная удельная масса, кг/м^2 ; ΔT – расчетный перегрев, $^\circ\text{C}$; $T_{\text{посл}}$ – расчетная локальная температура верхней зоны, $^\circ\text{C}$.

Полученное расчетное значение последней температуры лежит около $160 \text{ }^\circ\text{C}$, то есть в характерном диапазоне основной выборки для секций близкой геометрии и мощности. Средняя ошибка проверки с исключением одного наблюдения (LOO) составляет около $14 \text{ }^\circ\text{C}$.

Прямой расчет иллюстрирует применение технологической записи модели в диапазоне S01–S40; обратная задача выбора массы и установленной мощности используется далее в инженерной методике главы 4.

В электротехнических расчетах используется фактическая активная мощность, поступающая в испарительную зону. Квадратичная зависимость мощности от напряжения справедлива для нерегулируемого резистивного нагревателя с практически постоянным сопротивлением; при регулируемом источнике питания, широтно-импульсном управлении или индукционном преобразователе средняя мощность определяется алгоритмом управления и измерением активной мощности. Коэффициент мощности, способы регулирования и качество электроэнергии рассмотрены в разделе 4.3.

3.5 Проверка адекватности физико-математической и численной моделей по результатам экспериментальных исследований

Проверка адекватности модели главы 2 выполнена по нескольким независимым признакам. Первый признак – подтверждение энергетической нормировки по формуле (3.1). В разделе 2.3 эта величина вводится как удельная электротепловая нагрузка наружной поверхности секции. Экспериментальная обработка главы 3 показывает, что q выступает статистически значимым и физически интерпретируемым предиктором температурного режима; учет μ дополнительно снижает остаточный разброс относительно простой зависимости $\Delta T(q)$; при этом сравнение форм D и F показывает, что основной расчетный сигнал задают q и μ .

Второй признак – сопоставление приведенного коэффициента чувствительности α_{arr} с независимой оценкой внешней теплоотдачи. Значения этих величин приведены в подразделе 3.4.2 и в формуле (3.5); регрессионная чувствительность и независимая оценка внешней теплоотдачи находятся в согласованном инженерном диапазоне. Тем самым приведенная чувствительность α_{arr} играет роль экспериментального аналога коэффициента полезной теплоотдачи η_{use} , введенного в главе 2: она характеризует эффективность отвода подведенной удельной нагрузки выбранной наружной поверхностью и подтверждает энергетическую постановку главы 2 через согласованную интегральную чувствительность поверхности.

Третий признак – подтверждение двухфазного характера внутреннего переноса. Численная модель главы 2 разделяет сухой контрольный режим и насыщенный рабочий режим. В сухом режиме теплоперенос преимущественно теплопроводный, а в насыщенном режиме расчет дает сглаженное температурное поле и наличие зон испарения и конденсации по распределению скрытой теплоты. Экспериментально этот вывод поддерживается сравнением ПЭНД с масляным обогревателем TDM МИНИ-5 и конструктивной серией N1–N5: при организации возврата конденсата и распределенного теплопереноса перепад температур по высоте уменьшается.

Для количественной проверки численной модели главы 2 выполнено локальное сопоставление экспериментальной температуры $T_{посл}$ с расчетными значениями COMSOL Multiphysics [92–94] в зоне установки термопары для семи характерных опытов основной выборки. Для каждого опыта расчетная модель главы 2 настраивалась на фактическую геометрию (D, L) и материал корпуса соответствующей секции. Результаты представлены в таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Локальное сопоставление $T_{\text{посл}}$ и расчета COMSOL для характерных опытов основной выборки

Опыт	Режим и геометрия	$T_{\text{посл}}$, °C	T_{COMSOL} , °C	ΔCOMSOL , °C	Оценка
S01	60 Вт; диаметр 20 мм; длина 30 см; масса 267 г; объем 10 мл	139,0	142–145	+3...+6	до 10 °C по модулю
S07	60 Вт; диаметр 28 мм; длина 30 см; масса 345 г; объем 10 мл	119,6	115–120	-5...0	до 10 °C по модулю
S11	60 Вт; диаметр 20 мм; длина 25 см; масса 235 г; объем 10 мл	161,0	160–165	-1...+4	до 10 °C по модулю
S24	80 Вт; диаметр 28 мм; длина 31 см; масса 335 г; объем 10 мл	201,0	180–190	-21...-11	границная высокотемпературная точка
S26	80 Вт; диаметр 32 мм; длина 30 см; масса 381 г; объем 10 мл	132,9	135–140	+2...+7	до 10 °C по модулю
S34	100 Вт; диаметр 32 мм; длина 35 см; масса 469 г; объем 10 мл	178,0	170–175	-8...-3	до 10 °C по модулю
S37	100 Вт; диаметр 32 мм; длина 30 см; масса 443 г; объем 15 мл	184,0	180–190	-4...+6	до 10 °C по модулю

Примечание к таблице 3.3. Интервал T_{COMSOL} отражает диапазон расчетной температуры в локальной зоне установки термопары по ближайшим расчетным узлам; ΔCOMSOL приведена как разность между границами этого интервала и экспериментальной $T_{\text{посл}}$.

где ΔCOMSOL – знаковое отклонение расчета COMSOL от эксперимента, °C; T_{COMSOL} – расчетная локальная температура, °C; $T_{\text{посл}}$ – экспериментальная локальная температура, °C; δCOMSOL – относительное отклонение, %; ΔT – экспериментальный перегрев, °C.

Таблица 3.3 показывает, что расчетная модель COMSOL в шести из семи характерных режимов воспроизводит экспериментальную температуру в пределах 10 °C по модулю. Наибольшее абсолютное расхождение получено для опыта S24; относительная оценка этого отклонения задана ниже. Локальное сопоставление по характерным режимам подтверждает, что численная модель главы 2 передает порядок температур и основные режимные особенности двухфазного переноса в исследованной области параметров.

$$\delta S24 = [-21; -11] / 178 \cdot 100 \% = [-11,8; -6,2] \%$$

где $\delta S24$ – относительное отклонение расчета COMSOL для опыта S24; $[-21; -11]$ – диапазон знакового отклонения, °C; 178 – экспериментальный перегрев в опыте S24, °C.

Опыт S24 выделен как граничная высокотемпературная точка. Его ключевые расчетные параметры заданы ниже. При такой температуре вклад излучения резко возрастает по закону T^4 ; изменение принятой степени черноты поверхности на 0,05–0,10 дает температурный эквивалент порядка 6–12 °C. Дополнительный вклад дает смещение фактической точки измерения на несколько миллиметров к зоне локального максимума, что при компактной геометрии соответствует еще примерно 5–10 °C. Совокупность этих факторов согласуется с наблюдаемым расхождением COMSOL для S24 в пределах принятой области применимости.

$L/D = 31/2,8 \approx 11,1$; $qS24 = 2933,7 \text{ Вт/м}^2$; $T_{\text{посл}, S24} = 201 \text{ °C}$,
где L/D – отношение длины секции к ее наружному диаметру, безразмерная величина; $qS24$ – удельная нагрузка опыта S24, Вт/м²; $T_{\text{посл}, S24}$ – локальная температура верхней зоны в опыте S24, °C.

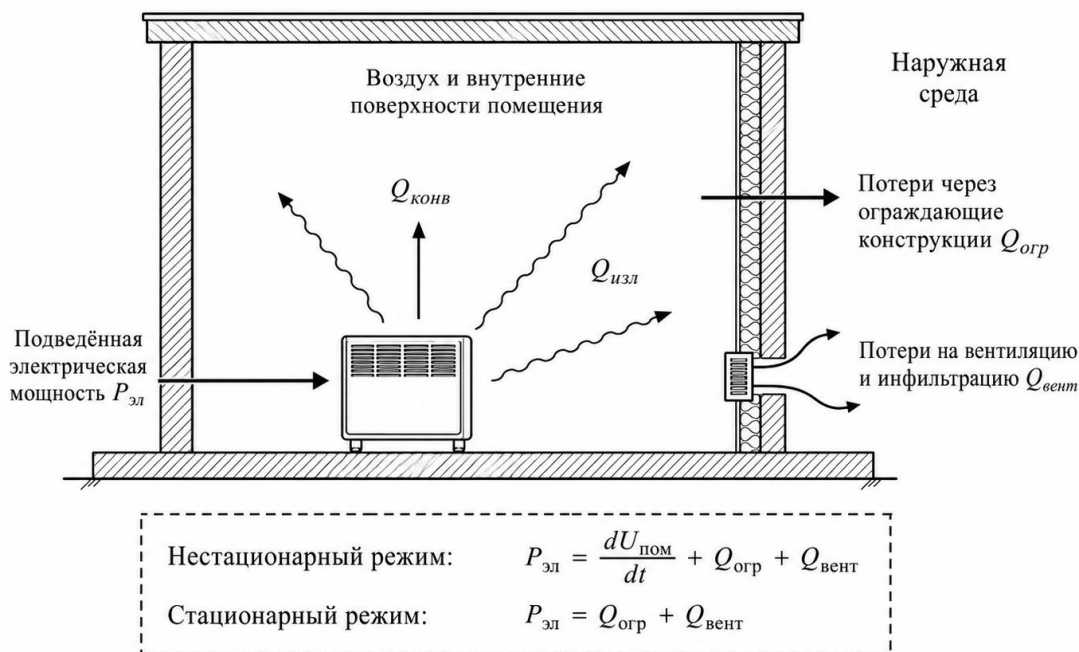
Адекватность численной модели оценена по инженерному критерию согласования: в основной области применимости расчет воспроизводит локальную температуру в зоне измерения с расхождением порядка 10 °C по модулю, а граничные высокотемпературные точки имеют физически объяснимую причину отклонения. Критерий применен к семи характерным режимам основной выборки.

Четвертый признак – корректное разделение начального остаточного давления и рабочего давления насыщенного пара. Значения начального технологического разрежения для основной выборки и специальной серии заданы ниже. В нагретом режиме давление в герметичной полости определяется температурой насыщения и может существенно превышать p_0 . Опыты при разных p_0 обработаны отдельно.

$$p_{0,S} = 9,807 \text{ кПа}; \quad p_{0,V} = 5,066 \text{ кПа},$$

где $p_{0,S}$ – начальное остаточное давление основной регрессионной выборки S01–S40, кПа; $p_{0,V}$ – начальное остаточное давление специальной серии V01–V19, кПа.

Численная модель главы 2 представляет собой осесимметричную постановку с эквивалентным слоем возврата жидкой фазы; экспериментальные образцы различаются массой, тепловым контактом, фактической площадью поверхности и положением датчика. Адекватность модели оценивается по согласованию физических трендов, энергетической нормировки, независимой оценки внешней теплоотдачи, признаков двухфазного цикла и локального сопоставления температур. Энергетический баланс помещения с электрическим обогревателем показан на рисунке 3.8.



Вся подведённая электрическая мощность в конечном итоге превращается в теплоту в помещении и далее компенсирует теплопотери здания.

Рисунок 3.8 – Энергетический баланс помещения с электрическим обогревателем

Энергетический баланс на рисунке 3.8 показывает, что в стационарном режиме электрический обогреватель, расположенный внутри помещения, передает в помещение тепловой поток, практически равный подведенной электрической мощности [40]. Преимущество ПЭНД проявляется в динамике выхода на режим, распределении температуры по корпусу, управляемости и технологической безопасности.

3.6 Сравнительная экспериментальная оценка способов электрического теплоподвода и традиционного электрического отопительного прибора

3.6.1 Сравнение трубчатого и индукционного теплоподвода

Сравнение способов электрического теплоподвода выполнено как отдельный экспериментальный блок. Сопоставлялись трубчатый нихромовый нагреватель и индукционный нагреватель при сопоставимых геометрических и режимных условиях. Конструкция радиатора отопления с индукционным нагревателем защищена патентом Республики Казахстан на полезную модель [108], а параметры индукционного электровакуумного нагревателя исследованы в работе автора [96]. Для индукционного варианта величина мощности относится к активной мощности, измеренной по входу преобразователя, а не к расчетной мощности электромагнитного поля в зоне нагрева. Диапазон начального остаточного давления в этом сравнительном опыте составлял 5–10 кПа.

Исходные условия и результаты сравнения трубчатого и индукционного теплоподвода представлены ниже. Диаграммы максимальной температуры и времени достижения 200 °С приведены на рисунках 3.9 и 3.10.

$P = 120$ Вт; $V = 15$ мл; $m = 230$ г; $L = 21$ см; $D = 22$ мм.

$T_{max,тр} = 212$ °С; $T_{max,инд} = 247$ °С.

$t_{200,тр} = 300$ с; $t_{200,инд} = 180$ с,

где P – активная мощность; V – объем теплоносителя; m – масса секции; L – длина; D – наружный диаметр; $T_{max,тр}$ и $T_{max,инд}$ – максимальные температуры для трубчатого и индукционного нагрева; $t_{200,тр}$ и $t_{200,инд}$ – времена достижения 200 °С.

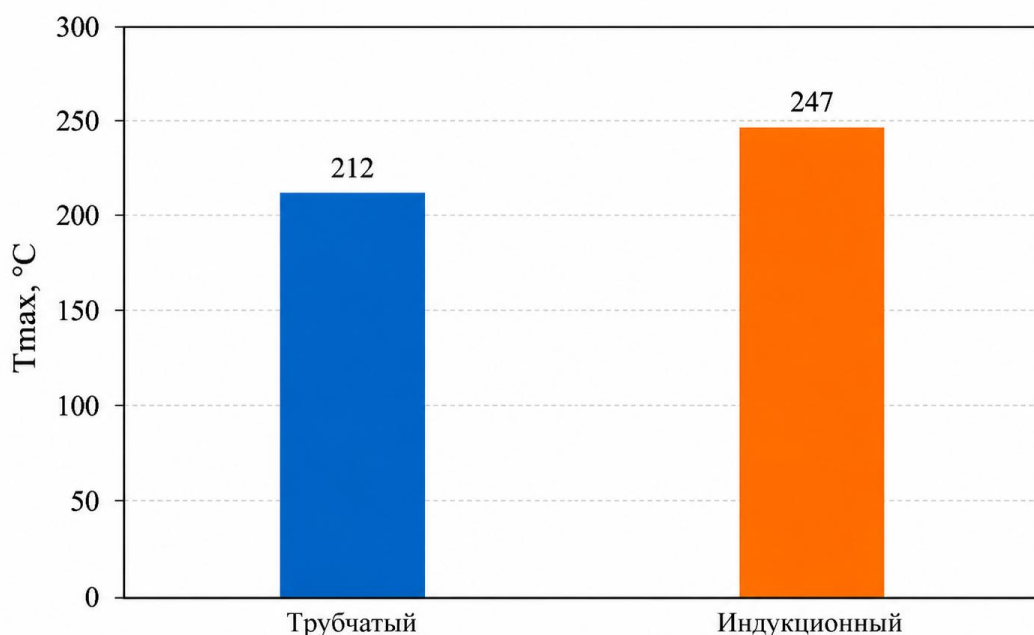


Рисунок 3.9 – Максимальная достигнутая температура при двух способах теплоподвода

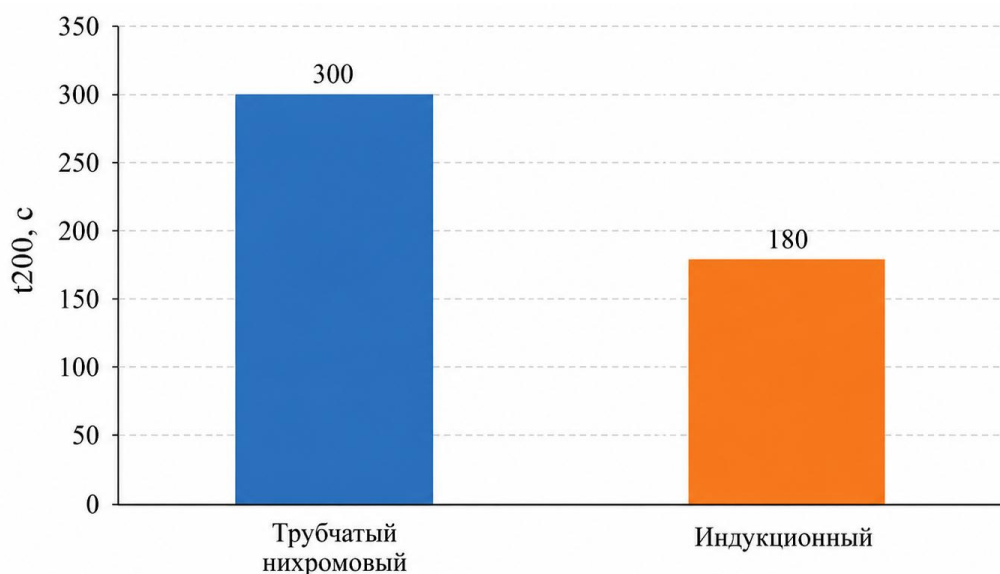


Рисунок 3.10 – Время достижения локальной температуры 200 °С при двух способах теплоподвода

Индукционный нагреватель обеспечивает более высокую максимальную температуру за время опыта и сокращает время достижения 200 °С. Относительное ускорение ввода энергии в активную зону характеризуется коэффициентом kt . При размещении в помещении оба нагревателя в стационарном режиме отдают помещению одинаковую тепловую мощность; преимущество индукционного варианта проявляется в динамике и распределении тепловыделения.

$$kt = t_{200, \text{тр}} / t_{200, \text{инд}} = 300 / 180 \approx 1,67,$$

где kt – коэффициент ускорения достижения локальной температуры 200 °С; $t_{200, \text{тр}}$ – время достижения 200 °С для трубчатого нихромового нагревателя, с; $t_{200, \text{инд}}$ – время достижения 200 °С для индукционного нагревателя, с.

С позиций режимов работы питающей сети трубчатый нихромовый нагреватель представляет собой практически активную нагрузку с коэффициентом мощности, близким к единице; при его применении расчет токов и потерь в линии выполняется по активной мощности. Индукционный вариант включает высокочастотный полупроводниковый преобразователь и оценивается также по коэффициенту мощности, гармоническому составу тока и требованиям электромагнитной совместимости [66, 67].

Для серийного применения индукционного варианта в электротехническую методику включается оценка коэффициента мощности $\cos \varphi$, коэффициента гармонических искажений тока THD и электромагнитной совместимости. Для резистивного варианта указанное требование существенно слабее, поскольку нагрузка по входу близка к активной.

3.6.2 Конструктивная программа N1–N5

Конструктивная серия N1–N5 предназначена для оценки влияния внутренней организации возврата конденсата и оребрения на температурную равномерность. Все пять конфигураций имеют одинаковые базовые геометрические и массовые параметры; N1–N4 испытаны на нижнем уровне мощности конструктивной серии, N5 – на повышенном уровне. Серия N1–N5 обработана отдельно от S01–S40, поскольку имеет другой уровень массы, иной режимный уровень и специально изменяемую конструкцию.

$$m_N = 850 \text{ г}; V_N = 15 \text{ мл}; L_N = 30 \text{ см}; D_N = 28 \text{ мм}.$$

$$P_{N1 - N4} = 80 \text{ Вт}; P_{N5} = 100 \text{ Вт},$$

где m_N, V_N, L_N и D_N – масса, объем заливки, длина и наружный диаметр образцов конструктивной серии; $P_{N1 - N4}$ и P_{N5} – активная мощность вариантов N1–N4 и N5 соответственно.

Результаты конструктивной программы N1–N5 показывают влияние схемы возврата конденсата на температурную равномерность. Для вариантов N1–N2 с возвратом конденсата только по стенкам максимальный перепад между T2 и T3 составил 27–34 °С. Для вариантов N3–N4 с дренажным каналом перепад снизился до 6–7 °С; для варианта N5 при повышенной мощности

перепад остался около 7 °С. Время выхода на 0,9 от уровня T2 для вариантов с дренажным каналом составляло около 30 с. Графическое сопоставление приведено на рисунке 3.11.

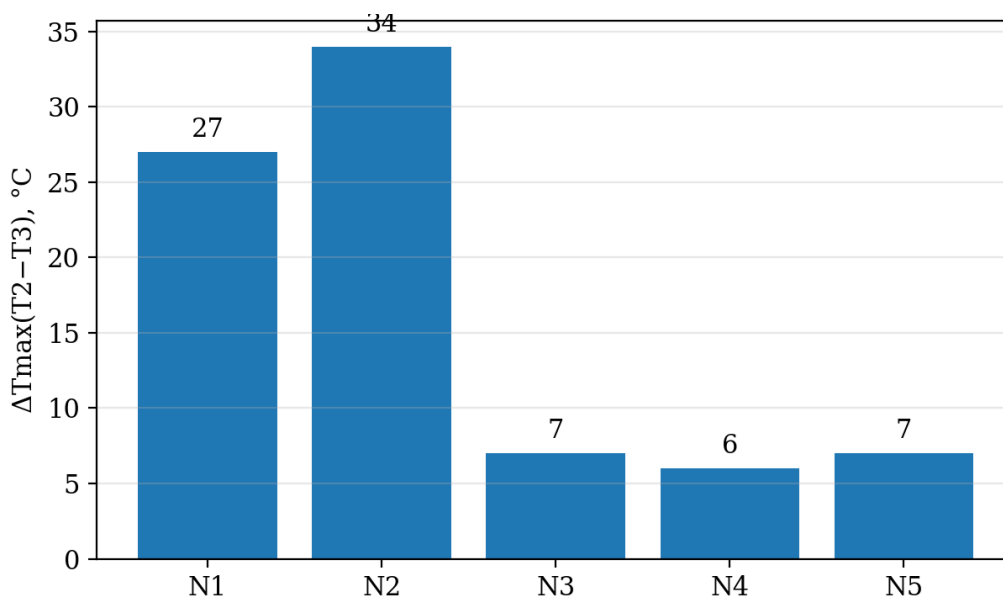


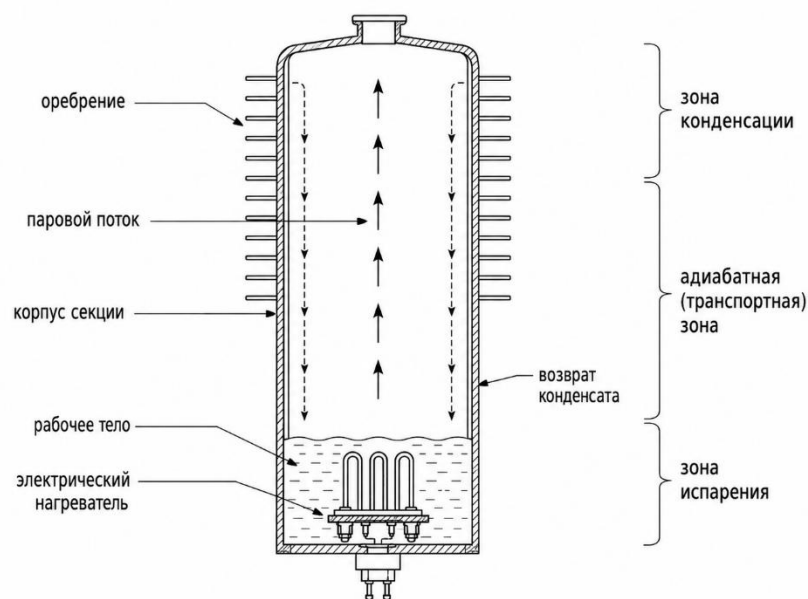
Рисунок 3.11 – Перепад температур в конструктивной программе N1–N5

Переход от возврата конденсата только по стенкам к схеме с дренажным каналом резко снижает перепад температур между контрольными точками. Максимальный перепад определяется расчетным соотношением, приведенным ниже. Опыт N5 при повышенной мощности показывает, что для конфигурации с дренажным каналом и боковыми ребрами низкий перепад температур сохраняется и при повышенной мощности. Этот результат экспериментально подтверждает, что конструктивная организация возврата жидкой фазы и распределения теплоотдачи напрямую влияет на устойчивость и равномерность двухфазного теплопереноса.

$$\Delta T_{max} = T_{2,max} - T_{3,max}; \quad \Delta T_{max}(N1 - N2) = 27 - 34 \text{ } ^\circ\text{C}; \quad \Delta T_{max}(N3 - N5) = 6 - 7 \text{ } ^\circ\text{C},$$

где ΔT_{max} – максимальный перепад температур между контрольными точками, °С; $T_{2,max}$ – максимальная температура средней контрольной точки, °С; $T_{3,max}$ – максимальная температура нижней контрольной точки, °С; N1 – N5 – варианты конструктивной программы.

Серия N1–N5 демонстрирует устойчивый инженерный эффект перехода от схем N1–N2 к N3–N5: снижение $\Delta T_{max}(T2-T3)$ с 27–34 °С до 6–7 °С многократно превышает типичную инструментальную неопределенность и сопоставимо с ранее оцененным технологическим разбросом. Конструктивная схема секции с оребрением и внутренним двухфазным переносом показана на рисунке 3.12.



Сплошные стрелки — движение пара; пунктирные стрелки — возврат конденсата.

Рисунок 3.12 – Эскиз секции ПЭНД с оробрением и внутренним двухфазным теплопереносом

3.6.3 Сравнение ПЭНД с масляным обогревателем TDM МИНИ-5 при одинаковой мощности

Сравнение ПЭНД и серийного контрольного прибора выполнено при одинаковой подведенной активной электрической мощности 500 Вт. В качестве контрольного прибора использовался масляный обогреватель МИНИ-5, 500 Вт, 5 секций, термостат, TDM, арт. SQ2501-0907 [107] (далее – OIL-500). Этот самостоятельный приборный блок предназначен для оценки эксплуатационных различий: времени выхода на рабочую температуру, равномерности температурного поля и характера распределения тепла.

Сопоставимость исходных условий обеспечивалась равной активной мощностью. Активная мощность обоих устройств контролировалась ваттметром; напряжение питания и ток фиксировались в протоколе опыта. Испытания выполнялись поочередно в одной лабораторной зоне при одинаковой начальной температуре корпуса; отклонение начальных температур между сравниваемыми объектами не превышало 2 °С.

$$T_0 \approx 22 - 24 \text{ }^\circ\text{C}; \quad |\Delta T_0| \leq 2 \text{ }^\circ\text{C},$$

где T_0 – начальная температура корпуса перед сравнительным опытом, °С; $|\Delta T_0|$ – модуль различия начальных температур сравниваемых объектов, °С.

Паспортные и испытательные характеристики контрольного прибора: OIL-500 – масляный обогреватель TDM МИНИ-5, 500 Вт, 5 секций, с механическим термостатом, артикул SQ2501-0907; номинальное питание 230 В, 50 Гц, масса около 2,85 кг, габариты 390×140×235 мм, степень защиты IP20, класс защиты I [107]. В сравнительном опыте контролировались активная мощность 500 Вт, температуры T1–T3 и тепловизионная картина поверхности.

Внешний вид контрольного масляного обогревателя, использованного в сравнительных испытаниях, представлен на рисунке 3.13.



Рисунок 3.13 – Внешний вид контрольного масляного обогревателя TDM МИНИ-5, использованного в сравнительных испытаниях

Обозначение OIL-500 относится к контрольному масляному обогревателю TDM МИНИ-5 мощностью 500 Вт; его паспортные данные и условия испытаний приведены выше. Приборное сравнение приведено в таблице 3.4. Сравнительные диаграммы динамики и перепада температур представлены на рисунках 3.14 и 3.15.

Таблица 3.4 – Приборное сравнение ПЭНД и OIL-500 при одинаковой активной мощности $P = 500$ Вт

Объект	Масса, кг	Тверх, °С	Тсред, °С	Тниз, °С	ΔT_{max} , °С	t_{90} , мин
РЕНД-500 / ПЭНД	2,95	118	89	112	29	менее 2 мин
OIL-500 / TDM МИНИ-5	2,85	102	77	113	36	более 10 мин

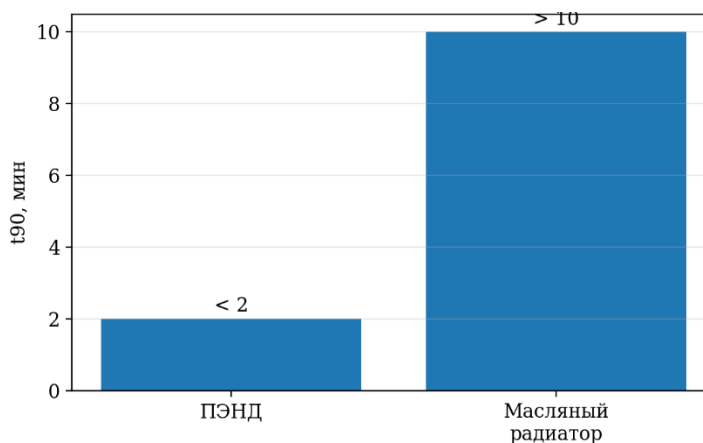


Рисунок 3.14 – Время выхода на температуру поверхности 90 °С для ПЭНД и масляного обогревателя TDM МИНИ-5

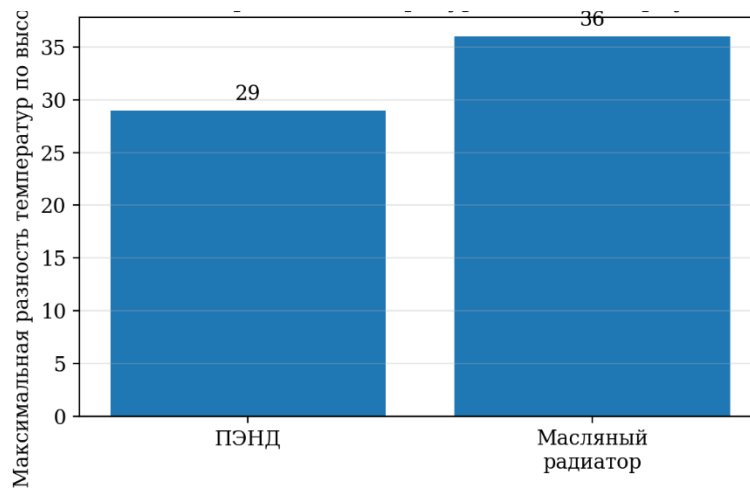


Рисунок 3.15 – Максимальная разность температур по высоте корпуса для ПЭНД и масляного обогревателя TDM МИНИ-5

При одинаковой активной мощности в протоколе зафиксирован более быстрый выход ПЭНД на температуру поверхности 90 °С и меньшая максимальная разность температур по высоте корпуса. Сравнительные показатели характеризуются коэффициентами, заданными ниже. Пороговый характер показателя t_{90} обусловил интервальную запись. Профиль температуры по высоте корпуса представлен на рисунке 3.16.

$$P = 500 \text{ Вт}; t_{90, \text{ПЭНД}} < 2 \text{ мин}; t_{90, \text{OIL}} > 10 \text{ мин.}$$

$$\Delta T_{\text{max, ПЭНД}} = 29 \text{ °C}; \Delta T_{\text{max, OIL}} = 36 \text{ °C},$$

где P – подведенная активная мощность каждого прибора, Вт; t_{90} – время достижения температуры поверхности 90 °С, мин; ΔT_{max} – максимальная разность температур по высоте корпуса, °С; OIL – контрольный масляный обогреватель TDM МИНИ-5.

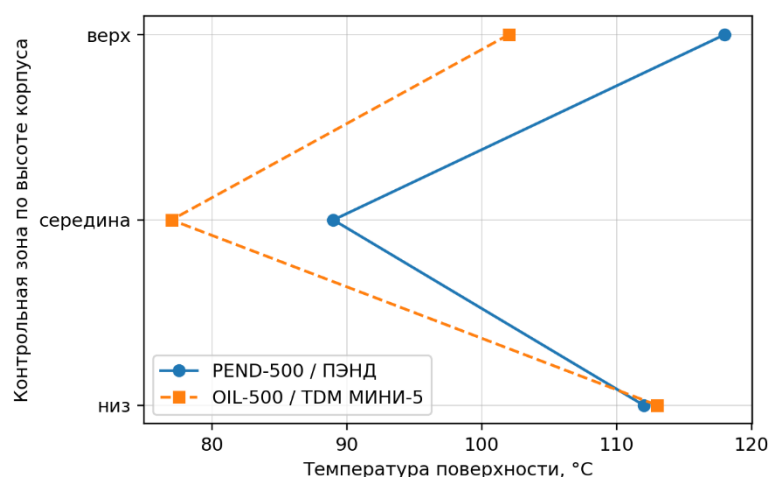


Рисунок 3.16 – Профиль температуры по высоте корпуса ПЭНД и масляного обогревателя TDM МИНИ-5 при одинаковой активной мощности 500 Вт

Профиль $T(z)$ по трем контрольным зонам показывает, что у масляного обогревателя максимум локализован в нижней зоне около нагревательного элемента, тогда как у ПЭНД верхняя зона получает большую долю тепла за счет внутреннего парокапельного переноса. Это подтверждает измененное распределение температуры и меньший максимальный перепад по высоте корпуса при той же подведенной мощности.

Тепловизионный контроль в сравнительном блоке использовался для качественного подтверждения характера температурного распределения на поверхности опытных образцов. Энергетический баланс сравнения принимался по подведенной активной мощности 500 Вт и контактными температурам T_1 – T_3 .

В стационарном режиме оба устройства отдают помещению одинаковую тепловую мощность. Различие между ними проявляется в скорости выхода на режим, распределении температуры по корпусу и пригодности к секционному электронному управлению. Конструктивное оформление лабораторного прототипа и оребренной секции показано на рисунке 3.17.

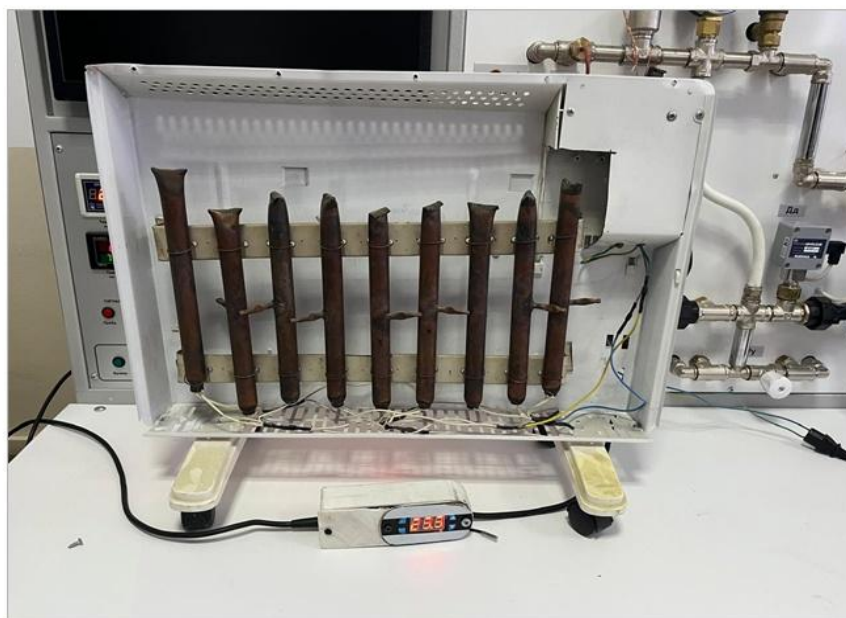


Рисунок 3.17 – Конструктивное оформление лабораторного прототипа и оребренной секции ПЭНД

Данные таблицы 3.4 характеризуют контрольные точки на корпусе опытных образцов и показывают эксплуатационное различие между ПЭНД и контрольным масляным обогревателем при одинаковой активной мощности 500 Вт.

Выводы по главе 3

По результатам экспериментальных исследований установлено следующее.

1. Сформирована экспериментальная программа S01–S40 из 40 серий с фиксированным начальным остаточным давлением; его численное значение задано в разделе 3.1. Дополнительные блоки (другое p_0 , конструктивные и приборные сравнения) рассмотрены как самостоятельные экспериментальные серии.

2. Подтверждено, что абсолютная электрическая мощность P при одновременном изменении геометрии недостаточна как предиктор температурного режима секции. Основной энергетический параметр – удельная электротепловая нагрузка q , а конструктивно-массовое влияние учитывается через удельную массу μ ; обе величины определены формулой (3.1) с пояснением единиц измерения.

3. Сравнение основных форм модели показало, что расчетная модель D и параметрически экономная форма F дают близкое качество; численные показатели приведены в таблице 3.2. В расчетах используется модель D с технологической поправкой на V в диапазоне 10–15 мл; основной физической сигнал несут q и μ .

4. Метрологическое обеспечение эксперимента показывает, что расширенная инструментальная неопределенность температуры $U(\Delta T)$ составляет около $4,2^\circ\text{C}$, а относительная неопределенность q – порядка 5–6 %. Эти значения ниже остаточного разброса модели; следовательно, ошибка прогноза определяется главным образом технологической неоднородностью опытных секций и условиями измерения.

5. На основе модели сформулированы прямая и обратная инженерные задачи. Прямая задача позволяет оценивать локальную температуру верхней зоны секции по исходным режимным, геометрическим, массовым и технологическим параметрам; обратная задача используется для предварительного выбора удельной массы или установленной мощности секции под заданный температурный режим. Для электротехнических расчетов необходимо контролировать фактическую активную мощность, поступающую в испарительную зону.

6. Согласованность с расчетной моделью главы 2 подтверждена по энергетической нормировке, приведенному коэффициенту чувствительности, независимой оценке внешней теплоотдачи и локальному сопоставлению расчета COMSOL с экспериментом по характерным режимам. Численные значения приведены в подразделе 3.4.2; в шести из семи режимов COMSOL воспроизводит локальную температуру в зоне измерения с отклонением до 10°C по модулю. Опыт S24 – граничная высокотемпературная точка, расхождение в которой объясняется вкладом излучения и локальностью измерения. При этом α_{arr} выступает экспериментальным аналогом η_{use} главы 2.

7. При одинаковой активной мощности индукционный теплоподвод сокращает время достижения 200 °С; коэффициент ускорения рассчитан в разделе 3.6.1. Стационарная тепловая отдача в помещение одинакова по активной мощности, а электротехническая оценка индукционного варианта включает коэффициент мощности, гармоники тока и электромагнитную совместимость.

8. Конструктивная программа N1–N5 показала: дренажный канал снижает перепад температур между контрольными точками с 27–34 °С до 6–7 °С; опыт N5 при 100 Вт подтвердил сохранение низкого перепада. Полученный результат подтверждает влияние организации возврата конденсата на равномерность температурного поля.

9. При одинаковой активной мощности и начальных условиях ПЭНД достигал 90 °С менее чем за 2 мин, а масляный обогреватель – более чем за 10 мин; перепад по высоте составил 29 °С против 36 °С. Преимущество ПЭНД проявляется в динамике, распределении температуры и управляемости.

10. Результаты подтверждают предпосылку для секционного электронного управления ПЭНД: малую тепловую инерцию и быстрый отклик теплоотдачи. Управляемая электротепловая нагрузка и системное применение ПЭНД рассматриваются в главе 4.

4 РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ, СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА И ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ПЭНД КАК АЛЬТЕРНАТИВНОГО ИСТОЧНИКА ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ

4.1 Конструктивные и технологические решения ПЭНД как отопительного прибора

Переход от одиночной электровакуумной тепловой трубки к отопительному прибору требует объединения нескольких функций в единой конструкции: подвода электрической мощности к зоне испарения, устойчивого фазового переноса внутри герметичной полости, передачи теплоты на развитую наружную поверхность, ограничения температуры доступных поверхностей и автоматического управления режимом работы.

В настоящей главе термин «секция» используется для обозначения отдельной электровакуумной тепловой трубки (ЭВТТ) как базового теплопередающего узла. Термин «модуль» ПЭНД используется для законченного отопительного прибора номинальной мощностью 600, 800 или 1000 Вт, объединяющего несколько секций, корпус, орebrение, узел управления и элементы защиты. Такое разграничение исключает смешение внутреннего конструктивного уровня и приборного исполнения при расчете групповой мощности.

Конструктивно ПЭНД формируется по секционному принципу. Каждая секция содержит герметичную электровакуумную трубку с ограниченным количеством дистиллированной воды, зону электрического теплоподвода в нижней части, зону испарения, паровой канал, зону конденсации, элементы возврата конденсата, орebrение и защитный кожух. Начальное остаточное давление задается технологически перед герметизацией полости. В нагретом режиме рабочее давление определяется температурой насыщения воды и фактическим тепловым состоянием секции, а не только величиной начального технологического разрежения.

Расчетная часть главы выполнена для резистивного исполнения ПЭНД с трубчатым электрическим нагревателем. Индукционное исполнение, связанное с патентной новизной конструкции, рассматривается как перспективная конструктивная линия; его сетевые токи, коэффициент мощности и гармонический состав определяются параметрами силового преобразователя. Поэтому в электротехнических и технико-экономических расчетах ниже используются характеристики резистивной активной нагрузки.

Обобщенная конструктивно-функциональная схема ПЭНД приведена на рисунке 4.1.



Рисунок 4.1 – Обобщенная конструктивно-функциональная схема ПЭНД как секционного отопительного прибора

Результаты конструктивно-экспериментальной программы N1–N5, приведенные в главе 3, используются как экспериментальное основание для выбора внутренней схемы секции. Переход от возврата конденсата только по стенкам к схеме с дренажным каналом снижает перепад температур между контрольными точками с 27–34 °С до 6–7 °С. Следовательно, дренажный канал и рациональная организация возврата жидкой фазы являются экспериментально подтвержденным фактором повышения равномерности двухфазного теплопереноса.

Конструктивная новизна решения подтверждена патентом Республики Казахстан на полезную модель № 10146 «Радиатор отопления с индукционным нагревателем» [108] и свидетельством об авторском праве № 63992 на компьютерную 3D-модель энергоэффективного парового электровакуумного нагревателя [109]. Актуальная публикация 2025 г. по эффективности низконапорных паровых электрообогревателей дополнительно подтверждает инженерную направленность применения ПЭНД в системах отопления зданий [100]. Указанные источники фиксируют конструктивную и прикладную базу решения, а расчетная эффективность оценивается по результатам моделирования, экспериментальных исследований и расчетов настоящей главы.

Назначение основных конструктивных элементов ПЭНД приведено в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Основные конструктивные элементы ПЭНД и их назначение

Элемент	Назначение	Инженерное ограничение
Электровакуумная трубка	Перенос теплоты от зоны электрического теплоподвода к зоне теплоотдачи за счет испарения, движения пара, конденсации и возврата конденсата	Работоспособность определяется герметичностью, начальным разрежением, количеством рабочего тела и

		устойчивостью возврата конденсата
Рабочее тело	Дистиллированная вода в объеме, обеспечивающем запуск двухфазного цикла и отсутствие осушения зоны испарения	Для исследованных секций использован диапазон 10–15 мл
Электрический нагреватель	Преобразование активной электрической мощности в теплоту в зоне испарения	Резистивное исполнение близко к активной нагрузке; индукционное исполнение зависит от характеристик преобразователя
Дренажный канал возврата конденсата	Снижение препятствий встречному движению пара и жидкости, повышение равномерности температурного поля	Эффект подтвержден конструктивной программой N1–N5
Оребрение и кожух	Увеличение теплоотдающей поверхности и защита пользователя от контакта с горячими элементами	Температура доступной поверхности нормируется для готового прибора с кожухом и оребрением
Блок управления и защиты	Секционное включение, поддержание уставки, контроль температуры, напряжения, тока и мощности	Функции эксплуатационного управления отделены от независимой аварийной защиты

4.1.1 Компьютерная 3D-модель и натурные образцы ПЭНД

Компьютерная 3D-модель характеризует переход от одиночной электровакуумной трубки к сборочной конструкции отопительного прибора. Модель используется для анализа компоновки корпуса, задника, штатива, электровакуумных трубок, шайб, держателей, опор, крепежных элементов, верхней зоны оребрения и воздушного канала. Наличие разрезов и видов позволяет проверить размещение трубок внутри кожуха, доступность креплений, направление конвективных потоков и технологичность сборки.

В спецификации 3D-модели зафиксирован секционный состав одного компоновочного варианта прибора: корпус – 1 шт., задник – 1 шт., штатив – 1 шт., трубка – 11 шт., шайба – 33 шт., держатель правый – 1 шт., держатель левый – 1 шт., опора – 2 шт.; стандартные изделия включают контргайки 2M18×1,5-6H.04 и винты M4×12.01. Указанное количество трубок относится к демонстрационной 3D-компоновке и подтверждает секционный принцип построения прибора. В серийном приборном модуле число внутренних электровакуумных секций определяется требуемой мощностью модуля и выбранной мощностью одной секции: например, модуль ПЭНД-800 может формироваться группой из восьми секций по 100 Вт либо десяти секций по 80 Вт.

Компоновочный вариант 3D-модели с разрезом по плоскости электровакуумных трубок показан на рисунке 4.2.

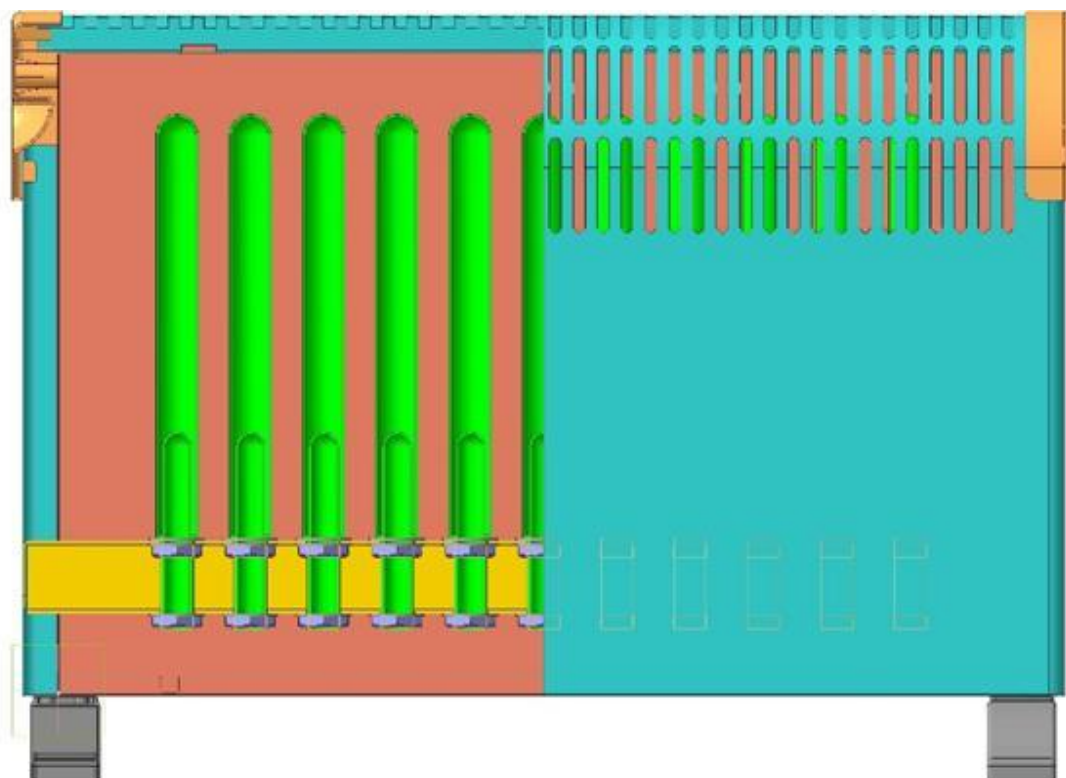


Рисунок 4.2 – Компьютерная 3D-модель ПЭНД с разрезом по плоскости электровакuumных трубок [109]

Материалы 3D-моделирования дополняют экспериментальные результаты главы 3: расчетные и стендовые данные задают допустимые тепловые режимы секции, а модель корпуса и оребрения показывает, каким образом эти секции объединяются в безопасный и обслуживаемый отопительный прибор. Для подтверждения конструктивной реализуемости в текст включены натурные фотографии прототипа и опытных приборных образцов. Натурные прототипы и опытные приборные образцы показаны на рисунках 4.3 и 4.4.



Рисунок 4.3 – Натурные прототипы и опытные приборные образцы ПЭНД: а) прототип ПЭНД-600; б) образцы 600, 800 и 1000 Вт; в) ПЭНД-800 с подключенным блоком управления, фото автора



а) общий вид секции



б) фронтальный вид с блоком управления

Рисунок 4.4 – Опытный образец ПЭНД на основе дюралюминиевой секции отопительного радиатора с конвективными ребрами и микропроцессорным блоком управления, фото автора

4.2 Инженерная методика расчета и выбора основных параметров ПЭНД

Инженерная методика связывает тепловую потребность помещения, экспериментально подтвержденные параметры внутренней электровакуумной секции и условия электрического питания готового приборного модуля. В отличие от подбора только по площади помещения, методика использует нормированные параметры, полученные и проверенные в главе 3: площадь боковой поверхности электровакуумной секции, удельную электротепловую нагрузку и удельный конструктивно-массовый параметр. Энергетическое обоснование нормировки $q = P_{\text{секц}}/(\pi DL)$ и критерия требуемой площади теплоотдачи приведено в разделе 2.3.

Обозначения физических величин, их единицы измерения и запись производных единиц в настоящей главе приведены в единой системе обозначений; для мощности, энергии, температуры, электрического тока, сопротивления и экономических показателей используется согласованная запись единиц в соответствии с ГОСТ 8.417–2024 [113].

В инженерной методике применяется расширенная технологическая форма модели главы 3, в которой учитываются удельная электротепловая нагрузка q , объем рабочего тела V и удельный конструктивно-массовый параметр μ . Статистические характеристики модели, полученные в разделе

3.4.2, составляют: $R^2_{adj} = 0,688$, $MAE = 14,1$ °C, $RMSE = 16,4$ °C при кросс-валидации, $VIF \leq 2,3$ и $F = 29,7$; коэффициент при V рассматривается как технологическая поправка ($p = 0,225$). Данная форма используется только в экспериментально подтвержденном диапазоне объема заливки $V = 10–15$ мл и соответствующих диапазонах геометрических и мощностных параметров секции. При отсутствии необходимости учитывать объем заливки допускается сокращенная инженерная интерпретация через q и μ . $qV\mu V = 10–15$ мл $q\mu$

Последовательность инженерного выбора параметров ПЭНД приведена на рисунке 4.5.

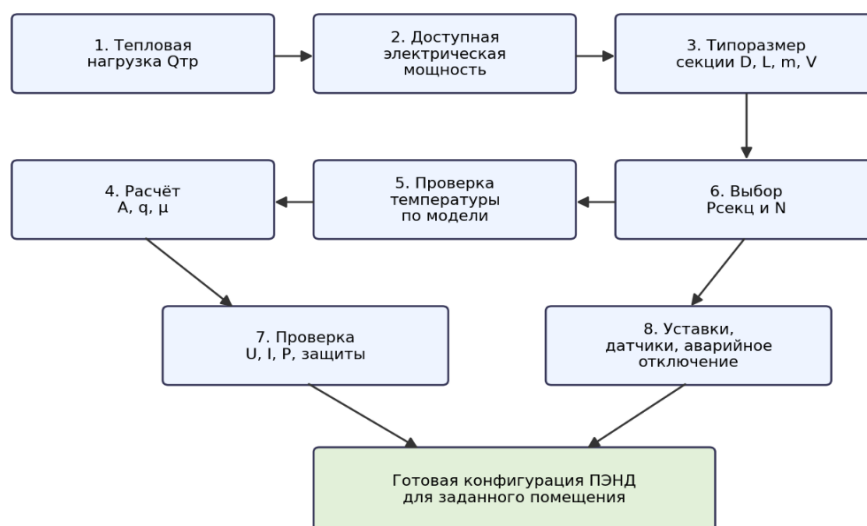


Рисунок 4.5 – Блок-схема инженерной методики выбора параметров ПЭНД

Для выбранной электровакуумной секции сначала определяется наружная боковая поверхность:

$$A_6 = \pi DL \quad (4.1)$$

где A_6 – площадь боковой поверхности электровакуумной секции, m^2 ; D – наружный диаметр секции, м; L – длина секции, м.

Удельная электротепловая нагрузка секции определяется выражением:

$$q = \frac{P_{секц}}{A_6} = \frac{P_{секц}}{\pi DL} \quad (4.2)$$

где q – удельная электротепловая нагрузка, $Вт/m^2$; $P_{секц}$ – активная электрическая мощность одной электровакуумной секции, Вт; A_6 – площадь боковой поверхности секции, m^2 ; D – наружный диаметр секции, м; L – длина секции, м.

Удельный конструктивно-массовый параметр секции определяется как:

$$\mu = \frac{m}{A_6} \quad (4.3)$$

где μ – удельная масса секции, $кг/m^2$; m – масса секции с рабочим телом, кг; A_6 – площадь боковой поверхности секции, m^2 .

Локальная температура верхней зоны секции определяется через расчетный перегрев над температурой помещения по технологической форме регрессионной модели главы 3:

$$\Delta T = 135 + 0,0507q + 1,22V - 11,7\mu \quad (4.4)$$

где ΔT – расчетный перегрев верхней зоны секции над температурой помещения, °С; q – удельная электротепловая нагрузка, Вт/м²; V – объем рабочего тела, мл; μ – удельная масса секции, кг/м²; 135, 0,0507, 1,22 и 11,7 – эмпирические коэффициенты модели главы 3, применимые в пределах экспериментальной области.

Расчетная локальная температура секции определяется суммированием температуры помещения и локального перегрева:

$$T_{\text{расч}} = T_{\text{пом}} + \Delta T \quad (4.5)$$

где $T_{\text{расч}}$ – расчетная локальная температура верхней зоны секции, °С; $T_{\text{пом}}$ – температура воздуха помещения, °С; ΔT – расчетный перегрев верхней зоны секции, °С.

Для обратной инженерной задачи – подбора мощности секции под заданную целевую температуру – определяется требуемая удельная нагрузка:

$$q_{\text{тр}} = \frac{T_{\text{ц}} - T_{\text{пом}} - 135 - 1,22V + 11,7\mu}{0,0507} \quad (4.6)$$

где $q_{\text{тр}}$ – требуемая удельная электротепловая нагрузка, Вт/м²; $T_{\text{ц}}$ – целевая локальная температура секции, °С; $T_{\text{пом}}$ – температура воздуха помещения, °С; V – объем рабочего тела, мл; μ – удельная масса секции, кг/м².

Активная мощность секции при известной требуемой удельной нагрузке равна:

$$P_{\text{секц}} = q_{\text{тр}}A_{\text{б}} \quad (4.7)$$

где $P_{\text{секц}}$ – активная электрическая мощность электровакуумной секции, Вт; $q_{\text{тр}}$ – требуемая удельная электротепловая нагрузка, Вт/м²; $A_{\text{б}}$ – площадь боковой поверхности секции, м².

Число электровакуумных секций в одном приборном модуле определяется по номинальной мощности модуля:

$$N_{\text{секц, мод}} = \text{ceil}(P_{\text{мод}} / P_{\text{секц}}) \quad (4.8)$$

где $N_{\text{секц, мод}}$ – число внутренних электровакуумных секций в одном приборном модуле ПЭНД, шт.; $P_{\text{мод}}$ – номинальная мощность приборного модуля ПЭНД, Вт; $P_{\text{секц}}$ – активная мощность одной электровакуумной секции, Вт; $\text{ceil}()$ – округление в большую сторону до целого числа.

Число приборных модулей и установленная мощность группы ПЭНД для локальной зоны определяются как:

$$N_{\text{мод}} = \text{ceil}(Q_{\text{тр}} / P_{\text{мод}}), \quad P_{\text{уст}} = N_{\text{мод}} \cdot P_{\text{мод}} / 1000, \\ E = P_{\text{уст}} \cdot \tau \cdot K_{\text{и}} \quad (4.9)$$

где $N_{\text{мод}}$ – число приборных модулей ПЭНД, шт.; $Q_{\text{тр}}$ – расчетная тепловая нагрузка локальной зоны, Вт; $P_{\text{мод}}$ – номинальная мощность одного приборного модуля, Вт; $P_{\text{уст}}$ – установленная мощность группы ПЭНД, кВт; E – потребление электрической энергии за расчетный период, кВт·ч; τ –

продолжительность расчетного периода, ч; $K_{и}$ – коэффициент использования установленной мощности, безразмерная величина; $\text{ceil}(\)$ – округление в большую сторону до целого числа.

Пример прямого расчета для электровакуумной секции с параметрами $D = 28$ мм, $L = 0,35$ м, $m = 0,38$ кг, $V = 12$ мл, $P_{\text{секц}} = 80$ Вт и $T_{\text{пом}} = 24$ °С записывается в виде:

$$\begin{aligned} A_{\text{б}} &= \pi \cdot 0,028 \cdot 0,35 = 0,0308 \text{ м}^2; \\ q &= 80 / 0,0308 = 2597 \text{ Вт/м}^2; \\ \mu &= 0,38 / 0,0308 = 12,35 \text{ кг/м}^2 \quad (4.10) \end{aligned}$$

где $A_{\text{б}}$ – площадь боковой поверхности секции, м^2 ; q – удельная электротепловая нагрузка, Вт/м^2 ; μ – удельная масса секции, кг/м^2 ; D – наружный диаметр секции, м; L – длина секции, м; m – масса секции, кг; $P_{\text{секц}}$ – мощность секции, Вт.

Подстановка этих значений в модель (4.4) дает:

$$\begin{aligned} \Delta T &= 135 + 0,0507 \cdot 2597 + 1,22 \cdot 12 - 11,7 \cdot 12,35 = 136 \text{ °С}; \\ T_{\text{расч}} &= 24 + 136 = 160 \pm 16 \text{ °С} \quad (4.11) \end{aligned}$$

где ΔT – расчетный перегрев верхней зоны секции, °С; $T_{\text{расч}}$ – расчетная локальная температура верхней зоны секции, °С. Полученная температура относится к верхней зоне внутренней лабораторной секции; температура доступной поверхности готового приборного модуля определяется конструкцией кожуха, оребрения и режимом конвекции.

Область применения модели (4.4) соответствует исследованным диапазонам: $P_{\text{секц}} = 60$ – 100 Вт, $V = 10$ – 15 мл, $D = 20$ – 32 мм, $L = 25$ – 45 см, $q = 1326$ – 3820 Вт/м^2 и $\mu = 10,0$ – $19,7$ кг/м^2 . Перенос модели на другие типоразмеры выполняется через дополнительную экспериментальную проверку, а в главе 4 модель используется как инженерная основа для выбора приборной компоновки, а не как повторная статистическая обработка главы 3.

4.3 Электротехническое обоснование ПЭНД как управляемой электротепловой нагрузки системы электроснабжения

Приборное исполнение ПЭНД формируется объединением электровакуумных секций базового типоразмера. Например, приборный модуль ПЭНД-800 мощностью 800 Вт соответствует группе из десяти секций номинальной мощностью 80 Вт либо восьми секций по 100 Вт при выбранном конструктивном шаге. Это связывает расчет внутренней секции в разделе 4.2 с электротехническим расчетом приборных исполнений 600, 800 и 1000 Вт.

ПЭНД рассматривается как тепловой прибор и одновременно как электроприемник – управляемая электротепловая нагрузка системы электроснабжения объекта. Поэтому при проектировании и эксплуатации обосновываются номинальные токи, сечение и потери в питающей линии, пусковой режим, способ регулирования мощности, воздействие на качество электрической энергии, распределение нагрузки по фазам, селективность коммутационно-защитной аппаратуры и требования электробезопасности.

Нормативная привязка раздела выполнена с учетом стандартных напряжений [114], норм качества электрической энергии [66], методики измерения гармоник и интергармоник [67], правил устройства и эксплуатации электроустановок [103; 104; 115] и требований к бытовым и аналогичным электрическим приборам [46; 47].

С научной точки зрения групповое применение ПЭНД целесообразно рассматривать в логике управляемой электротепловой нагрузки: установленная мощность, график включения, коэффициенты регулирования и одновременности должны согласовываться с прогнозируемым профилем потребления объекта. Такой подход соответствует современным исследованиям по краткосрочному прогнозированию электропотребления промышленных объектов и прямому управлению нагрузкой в интеллектуальных сетях [116; 117].

Расчетные соотношения раздела сформулированы для однофазного приборного исполнения с паспортным напряжением, частотой 50 Гц и номинальными уровнями активной мощности 600, 800 и 1000 Вт. Значение 220 В принято как расчетная база приборного исполнения и фактическое фазное напряжение объекта; при подключении к стандартной системе 230/400 В выполняется штатный пересчет токов, мощностей, защит и теплового режима линий по ГОСТ 29322–2014 [114]. Для группового применения дополнительно учитываются распределение нагрузки по фазам, ток нейтрального проводника, параметры групповых линий и характеристики коммутационно-защитной аппаратуры щита.

4.3.1 Номинальные токи, выбор сечения и потери в питающей линии

Номинальный ток приборного исполнения для резистивной нагрузки определяется выражением:

$$I_{\text{н}} = \frac{P_{\text{н}}}{U_{\text{н}}} \quad (4.12)$$

где $I_{\text{н}}$ – номинальный ток модуля ПЭНД, А; $P_{\text{н}}$ – номинальная активная мощность модуля, Вт; $U_{\text{н}}$ – номинальное фазное напряжение питания, В.

Для исполнений $P_{\text{н}} = 600, 800$ и 1000 Вт при $U_{\text{н}} = 220$ В расчетные номинальные токи составляют:

$$I_{600} = \frac{600}{220} = 2,73 \text{ А}, \quad I_{800} = \frac{800}{220} = 3,64 \text{ А}, \quad I_{1000} = \frac{1000}{220} = 4,55 \text{ А}. \quad (4.13)$$

где I_{600}, I_{800} и I_{1000} – номинальные токи модулей мощностью 600, 800 и 1000 Вт соответственно, А.

Активная мощность, поступающая в зону испарения ЭВТТ, отличается от мощности, потребляемой из сети, на величину потерь в питающем кабеле и переходных контактах. Сопротивление двухпроводной питающей линии оценивается по выражению:

$$R_{\text{л}} = \frac{2\rho L_{\text{л}}}{S} \quad (4.14)$$

где $R_{л}$ – активное сопротивление двухпроводной питающей линии, Ом; ρ – удельное сопротивление материала проводника, Ом·мм²/м; $L_{л}$ – длина линии от группового щита до прибора, м; S – сечение жилы, мм²; коэффициент 2 учитывает прямой и обратный проводники. Для меди при температуре около 20 °С принято $\rho_{Cu} = 0,0175$ Ом·мм²/м.

Активные потери, падение напряжения и относительное падение напряжения в линии определяются как:

$$\Delta P_{л} = I_{н}^2 R_{л}, \quad \Delta U = I_{н} R_{л}, \quad \delta_U = \frac{\Delta U}{U_{н}} \cdot 100\% \quad (4.15)$$

где $\Delta P_{л}$ – активные потери мощности в линии, Вт; $I_{н}$ – номинальный ток нагрузки, А; $R_{л}$ – сопротивление линии, Ом; ΔU – падение напряжения в линии, В; δ_U – относительное падение напряжения, %; $U_{н}$ – номинальное напряжение, В.

Таблица 4.2 – Расчетные электрические параметры приборных исполнений ПЭНД 600, 800 и 1000 Вт при $U_{н} = 220$ В, $L_{л} = 25$ м, $\rho_{Cu} = 0,0175$ Ом·мм²/м и температуре 20 °С

$P_{н}$, Вт	$I_{н}$, А	$R_{наг}$, Ом	Сечение питающей линии S , мм ²	$\Delta P_{л}$ при $L_{л} = 25$ м, Вт (% от $P_{н}$)	ΔU , В (% от $U_{н}$)
600	2,73	80,7	1,5	4,3 (0,71 %)	1,57 (0,71 %)
800	3,64	60,5	1,5	7,6 (0,95 %)	2,09 (0,95 %)
1000	4,55	48,4	1,5 / 2,5	11,9 / 7,1 (1,19 / 0,71 %)	2,61 / 1,57 (1,19 / 0,71 %)

Примечание – для строки 1000 Вт через дробь показано сравнение питающей линии сечением 1,5 и 2,5 мм² при одинаковой длине 25 м.

По действующим Правилам устройства электроустановок [103; 104; 115] допустимый длительный ток выбранного проводника принимается с учетом материала жилы, способа прокладки, температуры окружающей среды и числа совместно проложенных цепей. При принятых расчетных условиях линия $S_{и}$ 1,5 мм² обеспечивает требуемые токовые параметры и параметры потерь для одиночного приборного исполнения 600–1000 Вт на длине до 25 м. Окончательный выбор сечения выполняется по способу прокладки, температуре окружающей среды, допустимому длительному току, падению напряжения и условиям защитного отключения. Для групповых линий расчет выполняется по суммарному длительному току, коэффициенту одновременности и фактической схеме распределения нагрузки по фазам.

4.3.2 Пусковой режим резистивного исполнения

В резистивном исполнении ПЭНД нагревательный элемент представляет собой трубчатый электрический нагреватель со спиралью из сплава Х20Н80 или аналогичного материала, размещенной в металлической гильзе с электроизоляционным наполнителем. Холодное сопротивление

спирали отличается от горячего за счет температурного коэффициента сопротивления нихрома. Для расчета принят коэффициент $\alpha_R = 1,7 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$, что соответствует малой положительной температурной зависимости сопротивления.

Зависимость горячего и холодного сопротивления записывается как:

$$R_{\Gamma} = R_x(1 + \alpha_R \Delta T_{\text{сп}}) \quad (4.16)$$

где R_{Γ} – сопротивление спирали в установившемся тепловом режиме, Ом; R_x – сопротивление при температуре окружающей среды, Ом; α_R – температурный коэффициент сопротивления материала, K^{-1} ; $\Delta T_{\text{сп}}$ – разность температур спирали и окружающей среды, К.

Кратность пускового тока для резистивного исполнения определяется как:

$$K_{\text{п}} = \frac{I_{\text{п}}}{I_{\text{н}}} = \frac{R_{\Gamma}}{R_x} = 1 + \alpha_R \Delta T_{\text{сп}} \quad (4.17)$$

где $K_{\text{п}}$ – кратность пускового тока, безразмерная величина; $I_{\text{п}}$ – пусковой ток холодного нагревателя, А; $I_{\text{н}}$ – номинальный ток нагретого нагревателя, А; R_{Γ} – горячее сопротивление, Ом; R_x – холодное сопротивление, Ом; α_R – температурный коэффициент сопротивления, K^{-1} ; $\Delta T_{\text{сп}}$ – перегрев спирали, К.

Для гильзового ТЭНа в зоне испарения ЭВТТ при $\Delta T_{\text{сп}} \approx 470 \text{ K}$ получаем:

$$K_{\text{п}} = 1 + 1,7 \cdot 10^{-4} \cdot 470 = 1,08. \quad (4.18)$$

где $K_{\text{п}}$ – расчетная кратность пускового тока, безразмерная величина; $\alpha_R = 1,7 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$ – температурный коэффициент сопротивления; $\Delta T_{\text{сп}} = 470 \text{ K}$ – расчетный перегрев спирали.

Таблица 4.3 – Пусковые токи резистивного исполнения ПЭНД при $U_{\text{н}} = 220 \text{ В}$ и температуре проводника около $20 \text{ }^{\circ}\text{C}$

$P_{\text{н}}, \text{ Вт}$	$I_{\text{н}}, \text{ А}$	$R_x, \text{ Ом}$	$I_{\text{п}}, \text{ А}$	$K_{\text{п}}$
600	2,73	74,4	2,96	1,08
800	3,64	55,8	3,94	1,08
1000	4,55	44,6	4,93	1,08

Малая кратность пускового тока имеет два следствия. Во-первых, выбор автоматического выключателя ограничивается не электромагнитной отсечкой, а длительно допустимым током линии. Во-вторых, длительность переходного процесса прогрева спирали определяется тепловой постоянной нагревательного узла; в составе ЭВТТ она дополнительно сглаживается тепловой инерцией рабочего тела и стенки корпуса. Раздельный пуск модулей группового ПЭНД не приводит к опасным импульсам тока и не требует ограничительных резисторов или мягкого пуска.

Для индукционного исполнения пусковой режим определяется параметрами входной цепи силового полупроводникового преобразователя. Емкость входного фильтра преобразователя при включении заряжается

импульсом тока, кратность которого зависит от схемы преобразователя и наличия встроенного ограничителя пускового тока. Поэтому параметры индукционного исполнения нормируются по характеристикам преобразователя.

4.3.3 Качество электрической энергии при различных способах регулирования мощности

При прямом подключении резистивного ПЭНД к синусоидальному источнику напряжения ток нагрузки повторяет форму напряжения, коэффициент мощности близок к единице, а гармонические составляющие тока практически отсутствуют. В этом режиме влияние ПЭНД на сеть определяется главным образом величиной тока, падением напряжения в питающей линии и режимом коммутации.

Регулирование тепловой мощности ПЭНД может выполняться тремя способами: секционным включением и отключением; пакетным импульсным управлением с коммутацией при переходе напряжения через ноль (zero-cross SSR, burst control); фазоимпульсным управлением с регулируемым углом отпирания. Предпочтительными для групповой нагрузки являются секционное управление и пакетное zero-cross-регулирование, так как форма тока в проводящем интервале остается синусоидальной.

При фазоимпульсном регулировании на резистивной нагрузке ток отсекается на отрезке полупериода от 0 до угла отпирания. Действующее значение тока выражается через угол отпирания:

$$I_{\alpha} = I_m \sqrt{\frac{\pi - \alpha_{\text{тир}} + 0,5\sin(2\alpha_{\text{тир}})}{2\pi}} \quad (4.19)$$

где I_{α} – действующее значение тока при фазоимпульсном управлении, А; I_m – амплитуда синусоидального тока до отсечки, А; $\alpha_{\text{тир}}$ – угол отпирания тиристора, рад.

Доля активной мощности относительно режима прямого подключения определяется выражением:

$$\frac{P_{\alpha}}{P_0} = \frac{\pi - \alpha_{\text{тир}} + 0,5\sin(2\alpha_{\text{тир}})}{\pi}. \quad (4.20)$$

где P_{α} – активная мощность при фазоимпульсном управлении, Вт; P_0 – активная мощность при прямом подключении, Вт; $\alpha_{\text{тир}}$ – угол отпирания тиристора, рад.

Коэффициент гармонических искажений тока определяется как:

$$THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_1} \cdot 100\% \quad (4.21)$$

где THD_I – коэффициент гармонических искажений тока, %; I_n – действующее значение n-й гармоники тока, А; I_1 – действующее значение основной гармоники тока, А; n – номер гармоники, безразмерная величина.

Таблица 4.4 – Сравнительная оценка способов регулирования мощности резистивного ПЭНД по показателям качества электрической энергии

Способ регулирования	Рабочие точки / диапазон	λ (расчетная оценка)	THD_I , % (расчетная оценка)	Оценка применимости
Прямое подключение	100 %	≈ 1	< 1	Применимо
Секционное включение/отключение	Дискретные ступени	≈ 1	< 1	Применимо; контролируются коммутационные колебания напряжения
Пакетное управление с переходом через ноль	0–100 % по коэффициенту заполнения	≈ 1 в проводящем интервале	малый уровень низкочастотных гармоник	Предпочтительно; контролируются период коммутации, колебания напряжения и фликер
Фазоимпульсное регулирование	$P/P_0 = 91\%$ при $\alpha_{\text{тир}} = 45^\circ$; $P/P_0 = 50\%$ при $\alpha_{\text{тир}} = 90^\circ$	0,95 / 0,71	26 / 65	Не принимается как основное решение для групповой нагрузки

Примечание – в строке фазоимпульсного регулирования значения λ и THD_I приведены через дробь для двух рабочих точек: $\alpha_{\text{тир}} = 45^\circ$ и $\alpha_{\text{тир}} = 90^\circ$.

Из таблицы 4.4 следует, что для ПЭНД предпочтительны секционное управление и пакетное zero-cross-регулирование. Фазоимпульсное регулирование не принимается как основное решение для групповой нагрузки, поскольку оно ухудшает форму тока, увеличивает гармонические составляющие и при наличии гармоник, кратных трем, создает дополнительный ток в нейтральном проводнике. ГОСТ 32144–2013 [66] используется для оценки качества напряжения в точке присоединения, а измерение гармоник и интергармоник выполняется по ГОСТ 30804.4.7–2013 [67]. Для групповой электротепловой нагрузки учет несимметрии, несинусоидальности и связанных с ними потерь особенно важен, что подтверждается исследованиями казахстанских авторов по режимам электрических сетей и программной оценке потерь электроэнергии [118; 119].

4.3.4 Групповое включение приборных модулей и распределение нагрузки по фазам

В сценарии зонального отопления, рассмотренном в разделе 4.5, суммарная установленная мощность группы ПЭНД принимается равной 14,4 кВт при 18 приборных модулях ПЭНД-800 номинальной мощностью 800 Вт каждый. Такое значение соответствует фактическому объекту площадью 840

м² и высотой 9 м: часть приборных модулей размещается в офисно-бытовом блоке, а часть – в распределенных рабочих зонах производственного цеха. Распределение приборных модулей позволяет согласовать тепловой режим с фактической занятостью зон и обеспечить равномерное подключение к трехфазной сети 380/220 В.

Установленная мощность, нагрузка на фазу и токи подгрупп определяются следующим расчетом:

$$\begin{aligned}
 P_{\text{уст}} &= \frac{N_{\text{мод}} P_{\text{мод}}}{1000} = \frac{18 \cdot 800}{1000} = 14,4 \text{ кВт}, \\
 P_{\varphi} &= \frac{P_{\text{уст}}}{3} = \frac{14,4}{3} = 4,8 \text{ кВт}, \\
 I_{\varphi} &= \frac{P_{\varphi} \cdot 1000}{U_{\varphi}} = \frac{4,8 \cdot 1000}{220} = 21,8 \text{ А}, \\
 P_{\text{подгр}} &= \frac{3 \cdot 800}{1000} = 2,4 \text{ кВт}, \\
 I_{\text{подгр}} &= \frac{2,4 \cdot 1000}{220} = 10,9 \text{ А}.
 \end{aligned} \tag{4.22}$$

где $P_{\text{уст}}$ – установленная мощность группы ПЭНД, кВт; $N_{\text{мод}}$ – число приборных модулей ПЭНД-800, шт.; $P_{\text{мод}}$ – номинальная мощность одного приборного модуля ПЭНД-800, Вт; P_{φ} – нагрузка на одну фазу, кВт; I_{φ} – фазный ток, А; U_{φ} – фазное напряжение, В; $P_{\text{подгр}}$ – мощность одной подгруппы из трех приборных модулей, кВт; $I_{\text{подгр}}$ – ток одной подгруппы, А.

Несбалансированное распределение приборных модулей по фазам приводит к возникновению тока в нейтральном проводнике и увеличению потерь в линии. Для оценки тока нейтрали при активной нагрузке без высших гармоник и сдвигом фазных токов 120° применяется выражение:

$$I_N = \sqrt{I_A^2 + I_B^2 + I_C^2 - I_A I_B - I_B I_C - I_C I_A} \tag{4.23}$$

где I_N – ток нейтрального проводника, А; I_A , I_B и I_C – действующие значения токов фаз А, В и С, А.

При перекосе фаз $\pm 20\%$ относительно среднего значения 21,8 А фазные токи принимают значения:

$$I_A = 26,2 \text{ А}, \quad I_B = 21,8 \text{ А}, \quad I_C = 17,5 \text{ А}, \quad I_N = 7,6 \text{ А}. \tag{4.24}$$

где I_A , I_B , I_C – фазные токи при неравномерном распределении нагрузки, А; I_N – ток нейтрального проводника, А. Поэтому распределение приборных модулей по фазам принимается с отклонением не выше $\pm 10\%$ от средней нагрузки фазы.

Алгоритм управления приборными модулями исключает одновременное включение всех 18 приборных модулей ПЭНД-800 при выходе системы на режим из холодного состояния. Для этого применяется поочередная подача мощности с задержкой между подгруппами 2–3 с. Такая задержка снижает вероятность одновременного включения большой нагрузки,

уменьшает амплитуду переходного процесса во вводной линии и облегчает работу коммутационно-защитной аппаратуры объекта.

Сводные электротехнические параметры группового включения ПЭНД приведены в таблице 4.5.

Таблица 4.5 – Электротехнические параметры группового включения ПЭНД для сценария зонального догрева 14,4 кВт

Параметр	Значение	Комментарий
Установленная мощность $P_{уст}$	14,4 кВт	Принято для цеха 840 м ²
Число приборных модулей $N_{мод}$ ($P_{мод} = 800$ Вт)	18	18 приборных модулей ПЭНД-800; $18 \cdot 800 = 14,4$ кВт
Распределение по фазам А/В/С	6/6/6	Равномерное
Нагрузка на фазу	4,8 кВт	При равномерном распределении
Фазный ток I_{ϕ}	21,8 А	4800/220
Подгруппа (3 приборных модуля \times 800 Вт)	2,4 кВт; 10,9 А	Линия Си не менее 2,5 мм ² ; автомат класса С 16 А
Количество подгрупп на фазу	2	6 приборных модулей = 2×3
Вводной автоматический выключатель	3Р, 32–40 А	По длительному току, сечению вводного кабеля и селективности
Допустимый перекос фаз	$\leq \pm 10$ %	По средней нагрузке фазы; контроль по (4.23)
Задержка пуска между подгруппами	2–3 с	Снижение пускового импульса

4.3.5 Селективность защит и электробезопасность

Электротехническая защита ПЭНД строится по двухуровневому принципу. На уровне конечной линии или приборного исполнения предусматриваются устройство защитного отключения с дифференциальным током срабатывания 30 мА, термopредохранитель в нагревательном узле и защитное заземление открытых проводящих частей. На уровне группового щита применяются автоматические выключатели групповых линий и селективное УЗО ввода с дифференциальным током срабатывания 100 или 300 мА. Раздельное подключение цепей силового питания нагревателя и цепей измерения и управления, а также применение класса защиты I по ГОСТ ИЕС 60335-1–2015 [47] обеспечивают электробезопасность готового прибора.

Селективность по току обеспечивается иерархией номинальных токов вводного и группового аппаратов защиты:

$$I_{авт,вв} = 32-40 \text{ А} > I_{авт,гр} = 16 \text{ А} > I_{подгр} = 10,9 \text{ А}. \quad (4.25)$$

где $I_{авт,вв}$ – номинальный ток вводного трехфазного автоматического выключателя группы ПЭНД, А; $I_{авт,гр}$ – номинальный ток автоматического

выключателя подгруппы, А; $I_{\text{подгр}}$ – расчетный ток подгруппы из трех модулей, А.

Селективность по дифференциальному току обеспечивается применением селективного УЗО типа S на вводе щита с дифференциальным током срабатывания 100–300 мА и быстродействующих УЗО на конечных линиях с дифференциальным током срабатывания 30 мА. При большом числе приборных модулей учитываются собственные токи утечки нагревателей, фильтров и полупроводниковых ключей; поэтому чувствительные УЗО 30 мА устанавливаются на конечных линиях или подгруппах, а не на вводе всей группы. Тип УЗО выбирается по характеру нагрузки: для чисто резистивного исполнения без силовой электроники допускаются тип АС или А; для цепей с электронным управлением предпочтительны тип А; для индукционных преобразователей и устройств с возможной постоянной составляющей тока утечки тип защиты принимается по требованиям изготовителя преобразователя, включая тип В при наличии такого требования. Металлический приборный модуль с подключением открытых проводящих частей к РЕ-проводнику относится к классу защиты I.

Контроль теплового и электрического режима приборного модуля и его внутренних секций выполняется средствами эксплуатационного контроллера, а независимая аварийная защита действует параллельно программному циклу контроллера и обеспечивает отключение питания независимо от его работоспособности.

4.3.6 Режим работы при отклонениях напряжения и кратковременных перерывах питания

ПЭНД как тепловая нагрузка относится к категории малочувствительных к кратковременным перерывам питания. При провалах напряжения и кратковременных перерывах продолжительностью до 1 с тепловая инерция нагревательного узла и рабочего тела ЭВТТ компенсирует кратковременное прекращение электротеплового подвода без существенного изменения температуры теплоотдающей поверхности. Цепи управления после восстановления питания выполняют сохранение уставок, самодиагностику и поочередное включение модулей.

Для резистивной нагрузки зависимость активной мощности от напряжения имеет квадратичный вид:

$$P(U) = P_{\text{н}} \left(\frac{U}{U_{\text{н}}} \right)^2, \quad P(0,9U_{\text{н}}) = 0,81P_{\text{н}}, \quad P(1,1U_{\text{н}}) = 1,21P_{\text{н}}. \quad (4.26)$$

где $P(U)$ – активная мощность при фактическом напряжении, Вт; $P_{\text{н}}$ – номинальная активная мощность, Вт; U – фактическое фазное напряжение, В; $U_{\text{н}}$ – номинальное фазное напряжение, В. Следовательно, снижение напряжения на 10 % уменьшает мощность примерно на 19 %, а повышение напряжения на 10 % увеличивает ее примерно на 21 %.

4.3.7 Сводные электротехнические требования к ПЭНД

Электротехнические требования к ПЭНД как к управляемой электротепловой нагрузке системы электроснабжения объекта сведены в таблицу 4.6.

Таблица 4.6 – Сводные электротехнические требования к ПЭНД

Параметр	Значение / требование	Источник нормы
Номинальное напряжение, частота	220 В / 50 Гц как расчетная база приборного исполнения	ГОСТ 29322–2014 [114]; проектные данные сети
Отклонение напряжения	Влияние на мощность учитывается по квадратичной зависимости $P(U)$	ГОСТ 32144 [66]
Кратность пускового тока резистивного исполнения	$K_{II} \approx 1,08$	Расчет по (4.16)–(4.18)
Сечение питающей линии	Си 1,5 мм ² для одиночного прибора 600–1000 Вт до 25 м; для подгруппы 2,4 кВт – Си не менее 2,5 мм ²	ПУЭ РК [103]; ПТЭ [104]; ПТБ [115]; расчет по току и падению напряжения
Падение напряжения в линии	Контролируется по (4.14)–(4.15)	Проектное ограничение
Коэффициент мощности резистивного исполнения	$\lambda \approx 1$ при прямом, секционном и zero-cross-регулировании	Расчет; проектный критерий
Гармонический состав тока	Для прямого и zero-cross-регулирования THD_I мал; фазоимпульсное управление не используется как основное	ГОСТ 30804.4.7 [67]
Рекомендуемый способ регулирования	Секционное включение и пакетное управление zero-cross	Раздел 4.3.3
Защита от поражения током	УЗО 30 мА на конечной линии или подгруппе; класс защиты I	ГОСТ ИЕС 60335-1 [47]; ПУЭ РК [103]; ПТБ [115]
Селективность по дифференциальному току	Селективное УЗО 100–300 мА типа S на вводе; конечные УЗО 30 мА	ПУЭ РК [103; 104; 115]
Перекас фаз при групповом включении	Не выше $\pm 10\%$ по средней нагрузке фазы; контроль по (4.23)	Расчет по (4.23)
Задержка пуска между подгруппами	2–3 с	Алгоритм управления
Защитное заземление	Класс защиты I; контроль сопротивления изоляции	ГОСТ ИЕС 60335-1 [47]; ПУЭ РК [103]; ПТБ [115]

Таким образом, раздел формирует электротехническую часть инженерной методики выбора параметров ПЭНД: определяет расчетные токи,

потери, режимы регулирования, требования к качеству электрической энергии, защитам и фазному балансу.

4.4 Система мониторинга, автоматического управления и аварийной защиты ПЭНД

Система мониторинга, автоматического управления и защиты ПЭНД строится по трехуровневому принципу: измерительно-информационный уровень, эксплуатационный контроллер и независимая аварийная защита. Такое разделение исключает зависимость безопасности приборного модуля только от программного цикла микроконтроллера. Архитектура мониторинга, автоматического управления и аварийной защиты ПЭНД приведена на рисунке 4.6.

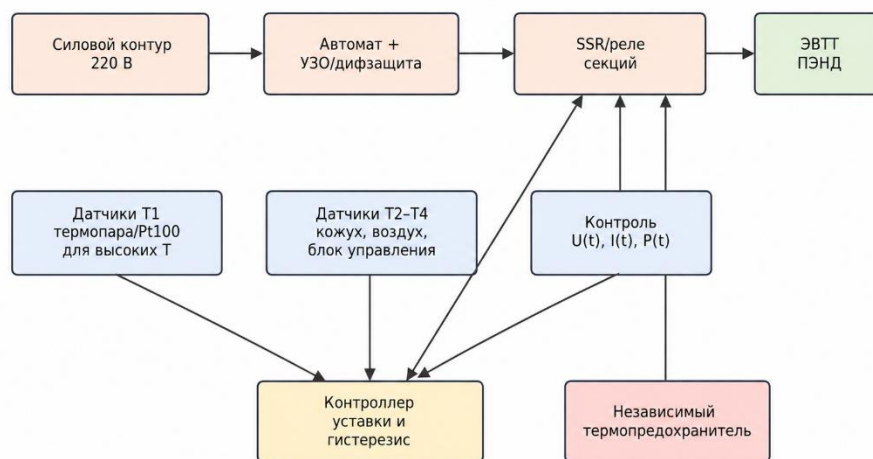


Рисунок 4.6 – Обобщенная архитектура мониторинга, автоматического управления и аварийной защиты ПЭНД

Измерительно-информационный уровень обеспечивает регистрацию температур, напряжения, тока, активной мощности и состояния нагрузки. Эксплуатационный контроллер поддерживает заданный температурный режим с гистерезисом, выполняет секционное включение и отключение нагревательных элементов и снижает частоту переключений. Независимая аварийная защита отключает питание при перегреве, токе утечки, коротком замыкании, нарушении изоляции или отказе температурного канала.

Базовый закон двухпозиционного управления с гистерезисом записывается как:

$$u_i(t) = \begin{cases} 1, & T_i(t) \leq T_{\text{вкл}}, \\ 0, & T_i(t) \geq T_{\text{откл}}, \\ u_i(t - \Delta t), & T_{\text{вкл}} < T_i(t) < T_{\text{откл}}. \end{cases} \quad (4.27)$$

где $u_i(t)$ – состояние i -й управляемой секции или подгруппы в момент времени t , безразмерная величина; значение 1 соответствует включению, значение 0 – отключению; $T_i(t)$ – контролируемая температура, °С; $T_{\text{вкл}}$ – уставка включения, °С; $T_{\text{откл}}$ – уставка отключения, °С; Δt – шаг дискретного управления, с.

Для температурного контроля разграничиваются диапазоны датчиков. Каналы внутренней электровакуумной секции и зоны нагрева, где возможны температуры выше 100 °С, выполняются на термопарах типа К (ХА), Pt100/Pt1000 или других датчиках, рассчитанных на соответствующий диапазон. Цифровые датчики типа DS18B20 применяются для низкотемпературных зон: доступной поверхности кожуха, воздуха, блока управления и окружающей среды.

Ключевые каналы мониторинга и защиты ПЭНД приведены в таблице 4.7.

Таблица 4.7 – Ключевые каналы мониторинга, управления и аварийной защиты ПЭНД

Контролируемый узел или канал	Датчик / исполнительный элемент	Контролируемый параметр	Назначение в системе управления и защиты
Внутренняя электровакуумная секция	Термопара типа К (ХА), Pt100 или Pt1000	Температура зоны нагрева T_1 , °С	Контроль высокотемпературного режима теплопередающего узла и отключение при перегреве
Кожух и доступная поверхность	DS18B20 или аналогичный низкотемпературный датчик	Температура кожуха T_2 , °С	Подтверждение безопасности доступной поверхности готового приборного модуля
Воздух и зона обребрения	DS18B20 или аналогичный датчик	Температура воздуха / выходящего потока T_3 , °С	Оценка теплоотдачи, выявление ухудшенной конвекции, запыления или перекрытия воздушного канала
Электрический вход приборного модуля	Модуль измерения напряжения, тока и мощности	U_t , В; I_t , А; P_t , Вт	Контроль фактической активной мощности, перегрузки, отклонения напряжения и режима включения
Коммутационный элемент	SSR zero-cross или электромеханическое реле	Состояние нагрузки, число циклов, температура узла	Секционное управление мощностью и предупреждение перегрева контактов или радиатора SSR

Независимая аварийная защита	Автоматический выключатель, УЗО, РЕ-проводник, термомпредохранитель, контроль изоляции	Ток перегрузки, ток утечки, сопротивление изоляции, предельная температура	Отключение питания независимо от микроконтроллера и программы оператора
------------------------------	--	--	---

4.4.1 Программно-аппаратная реализация мониторинга и управления

Материалы опытной системы управления конкретизируют измерительно-информационный уровень ПЭНД. Встроенный уровень включает микроконтроллерный блок, температурные каналы T_1-T_4 , модуль измерения напряжения, тока и активной мощности, локальную LCD-индикацию и исполнительные выходы на SSR-реле или электромеханические реле. Компьютерный уровень обеспечивает связь через USB-COM, визуализацию температурных и электрических каналов, изменение уставок и сохранение журнала испытаний в CSV-формате.

В качестве опытной реализации использованы Arduino, шина OneWire для цифровых температурных датчиков, внешний модуль $U/I/P$, LCD-дисплей 20×4 , SSR-реле и программа оператора на Python с библиотеками PyQt6 и PyQtGraph. Для готового прибора температурный канал T_1 относится к внутренней секции и зоне нагрева, поэтому выполняется на термопаре типа К (ХА) или Pt100/Pt1000; каналы T_2-T_4 относятся к кожуху, воздуху и блоку управления, поэтому могут выполняться на DS18B20 или аналогичных низкотемпературных датчиках.

Программно-аппаратная архитектура мониторинга ПЭНД на опытном стенде показана на рисунке 4.7.

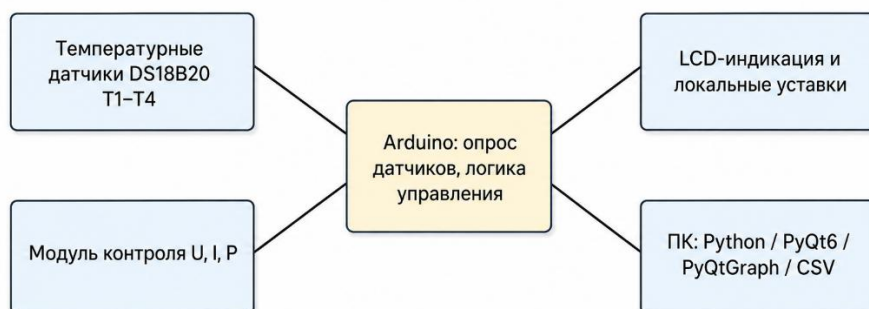


Рисунок 4.7 – Программно-аппаратная архитектура мониторинга ПЭНД на опытном стенде: T_1 – термопара типа К (ХА) или Pt100/Pt1000 для внутренней секции; T_2-T_4 – DS18B20 или аналогичные датчики для кожуха, воздуха и блока управления

Дополнительно к архитектурной схеме приведены натурные и схемные материалы опытного блока управления. Они фиксируют переход от простого термореле с индикацией к расширенной системе регистрации T_1-T_4 , U_t , I_t , P_t ,

управлению SSR-реле и архивированию результатов испытаний. Натурные и схемные элементы системы мониторинга и управления ПЭНД приведены на рисунке 4.8.

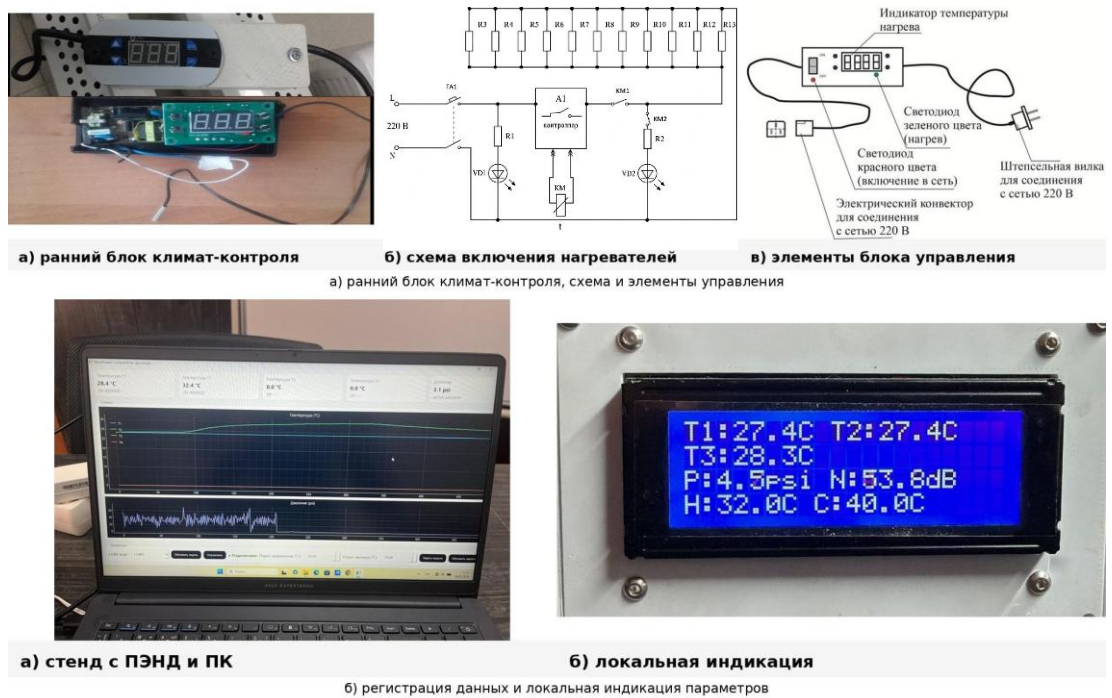


Рисунок 4.8 – Натурные и схемные элементы системы мониторинга и управления ПЭНД: ранний блок климат-контроля, схема включения нагревателей, индикация и регистрация данных; составлено автором с учетом [64; 112]

Алгоритм сбора данных реализуется в непрерывном цикле контроллера. Выполняется опрос температурных каналов, считывание напряжения, тока и активной мощности, формирование строки данных с текущими уставками и состоянием нагрузки, передача записи на компьютер и обновление локальной индикации. Такая синхронизация позволяет сопоставлять температурный отклик секции не с паспортной, а с фактической подведенной электрической мощностью. Накопленный архив режимов применяется для расчета фактических коэффициентов регулирования и одновременности, что согласуется с подходами к прогнозному управлению электрической нагрузкой и direct load control [116; 117].

Автоматическое управление выполняется по уставкам включения и отключения с гистерезисом, что снижает частоту коммутации и повышает ресурс реле/SSR. Для группового ПЭНД алгоритм дополнительно обеспечивает поочередное включение подгрупп, ограничение одновременной мощности, переход в безопасное состояние при отказе датчика и восстановление режима после кратковременного отключения питания.

Приемочная программа готового ПЭНД включает режимы 600, 800 и 1000 Вт, работу при нормальной и ухудшенной конвекции, частичное

перекрытие воздухопроводов, проверку отказа датчика, восстановление питания после отключения, контроль температуры доступной поверхности, проверку срабатывания термопредохранителя, УЗО/дифференциальной защиты, защитного заземления, сопротивления изоляции, герметичности секций и ресурса коммутационных элементов. Температура внутренней лабораторной секции используется как исследовательский показатель; безопасность готового приборного модуля подтверждается контролем доступной поверхности кожуха и штатной работой независимой аварийной защиты.

4.5 Технико-экономическое обоснование гибридной системы отопления производственного цеха в Караганде с локальным догревом ПЭНД

Технико-экономическое обоснование выполнено для производственного цеха в г. Караганде площадью 840 м², высотой 9 м и строительным объемом 7560 м³. План здания принят 56×15 м, периметр наружных стен – 142 м. Объект имеет две воротные зоны размером 3×6 м каждая, 14 оконных проемов ориентировочной площадью 105 м², кирпичные стены толщиной около 510 мм, покрытие из железобетонных плит по стальным фермам с рулонным ковром, встроенный офисно-бытовой блок площадью около 100 м² в трех уровнях и распределенные по объему рабочие зоны. Исходные геометрические и эксплуатационные данные приняты по материалам обследования объекта [130].

Климатическая база расчета принята по СП РК 2.04-01-2017: для г. Караганды расчетная температура наиболее холодной пятидневки обеспеченностью 0,92 составляет –28,9 °С, средняя температура периода со средней суточной температурой воздуха не выше 8 °С составляет –4,8 °С, продолжительность указанного периода – 207 сут [27]. Установленная мощность источников проверяется по расчетной наружной температуре, а сезонная потребность в теплоте – по средней температуре отопительного периода.

В расчетах используются две временные базы: нормативная продолжительность периода 207 сут (4968 ч) применяется для климатической части расчета, а эксплуатационный сезон 7,6 мес (228 сут) – для режимов закупки топлива, работы ворот и графика ПЭНД.

Исходная система теплоснабжения основана на водогрейном угольном котле КВр-0,3 мощностью 0,3 МВт с ручной колосниковой топкой. Типовые технические характеристики котлов КВр-0,3 подтверждают тепловую мощность 0,3 МВт и применение твердого топлива [131]. Фактический расход угля марки «Рапид» составляет 15 т в месяц отопления, расчетная сезонная продолжительность закупки топлива – 7,6 мес, сезонный расход – 114 т/год. Низшая теплота сгорания рабочего топлива принята равной 20,5 МДж/кг; методика определения высшей и расчета низшей теплоты сгорания твердого минерального топлива соответствует ГОСТ 147-2013 [125].

Вентиляционный фактор принят по фактической компоновке цеха: четыре вытяжных вентилятора установлены в верхней зоне оконных проемов. Для типоразмера ВО 06-300 №4 рабочий диапазон производительности составляет 2,0–3,2 тыс. м³/ч на один вентилятор, что дает расчетный суммарный расход около 12 400 м³/ч, или 3,44 м³/с [132]. Тариф электроэнергии принят по действующим ценам энергоснабжающей организации для небытовых потребителей г. Караганды: 38,87 тг/(кВт·ч) с НДС [126]. Требования к микроклимату рабочей зоны учитываются по гигиеническим нормативам Республики Казахстан и ГОСТ 12.1.005-88 [123; 124].

Фотофиксация обследованного промышленного объекта, подтверждающая состояние наружных ограждений, покрытие из железобетонных плит по стальным фермам, встроенный офисно-бытовой блок и распределенный характер рабочих мест, приведена на рисунке 4.9.



Рисунок 4.9 – Фотофиксация промышленного объекта: фасад с оконными проемами и воротной зоной; общий вид цеха; встроенный офисно-бытовой блок; рабочая зона с железобетонными плитами покрытия, фото автора; материалы обследования объекта [130]

Сводные исходные данные, использованные в расчете, приведены в таблице 4.8.

Таблица 4.8 – Исходные данные для расчета гибридной схемы отопления производственного цеха

Показатель	Обозначение	Значение	Источник / расчетная база
План здания	L×B	56×15 м	материалы обследования [130]
Площадь цеха	Fц	840 м ²	56×15 м
Высота помещения	H	9 м	материалы обследования [130]
Строительный объем	Vзд	7560 м ³	Fц·H
Периметр наружных стен	P	142 м	2·(56+15)
Ворота	Авор	2×(3×6)=36 м ²	материалы обследования [130]
Окна	Аок	14×(3,0×2,5)=105 м ²	по фотообследованию и обмерной схеме [130]
Стены нетто	Аст	1137 м ²	P·H–Авор–Аок
Кровля	Акр	840 м ² ; покрытие из железобетонных плит по стальным фермам с рулонным ковром	материалы обследования [130]
Офисно-бытовой блок	Фоф	≈100 м ²	три уровня, ПВХ-окна
Котел	–	КВр-0,3, 300 кВт	типовая характеристика [131]
Уголь	–	«Рапид», Q _{нр} =20,5 МДж/кг	материалы объекта и ГОСТ 147-2013 [125; 130]
Сезонный расход угля	Вуг,1	114 т/год	15 т/мес × 7,6 мес
Цена угля	Суг	25 000 тг/т	материалы обследования [130]
Тариф электроэнергии	Сэл	38,87 тг/(кВт·ч)	действующие цены г. Караганды [126]
ПЭНД	Nмод	18 модулей ПЭНД-800	6 – офисный блок, 12 – рабочие зоны
Установленная мощность ПЭНД	Руст	14,4 кВт	18×0,8 кВт

4.5.1 Расчет теплотерь и верификация исходных данных

Расчетная схема теплотерь включает трансмиссионные потери через стены, окна, ворота, кровлю и пол по грунту, а также инфильтрационные потери, возникающие при открывании ворот и работе вытяжных вентиляторов. Коэффициенты теплопередачи ограждающих конструкций

приняты по результатам фотообследования и укрупненной теплотехнической оценки: стены – 1,2 Вт/(м²·К), окна – 4,5 Вт/(м²·К), ворота – 4,5 Вт/(м²·К), кровля – 1,5 Вт/(м²·К). Для пола по грунту использован зонный метод с итоговым значением $U_{\text{Пол}}=223$ Вт/К. Методическая основа расчета соответствует положениям по отоплению, вентиляции, строительной климатологии и тепловой защите зданий [23; 27; 45; 120; 121; 122].

$$V_{\text{зд}} = F_{\text{ц}} \cdot H = 840 \cdot 9 = 7560 \text{ м}^3 \quad (4.28)$$

где $V_{\text{зд}}$ – строительный объем здания, м³; $F_{\text{ц}}$ – площадь цеха, м²; H – высота помещения, м.

$$\begin{aligned} A_{\text{ст}} &= P \cdot H - A_{\text{вор}} - A_{\text{ок}} = 142 \cdot 9 - 36 - 105 \\ &= 1137 \text{ м}^2 \quad (4.29) \end{aligned}$$

где $A_{\text{ст}}$ – расчетная площадь наружных стен без ворот и окон, м²; P – периметр здания, м; H – высота помещения, м; $A_{\text{вор}}$ – площадь ворот, м²; $A_{\text{ок}}$ – площадь окон, м².

$$\begin{aligned} UA &= \Sigma(U_i \cdot A_i) + U_{\text{Пол}}; \\ UA &= 1,2 \cdot 1137 + 4,5 \cdot 105 + 4,5 \cdot 36 + 1,5 \cdot 840 + 223; \\ UA &= 3482 \text{ Вт/К} \approx 3,48 \text{ кВт/К} \quad (4.30) \end{aligned}$$

где UA – суммарная теплопроводность ограждающих конструкций здания, Вт/К; U_i – коэффициент теплопередачи i -й конструкции, Вт/(м²·К); A_i – площадь i -й конструкции, м²; $U_{\text{Пол}}$ – теплопроводность пола по грунту, Вт/К.

Полученное значение показывает структуру трансмиссионных потерь: стены дают 1364 Вт/К, кровля – 1260 Вт/К, окна – 473 Вт/К, ворота – 162 Вт/К, пол по грунту – 223 Вт/К. Суммарная доля стен и кровли составляет около 75 % трансмиссионной теплопроводности, что определяет приоритет мероприятий варианта 3.

Коэффициент теплопередачи кровли принят для покрытия из железобетонных плит по стальным фермам с рулонным ковром. Послойная оценка сопротивления теплопередаче включает: железобетонную плиту $R \approx 0,11$ м²·К/Вт, засыпной утеплитель 100–150 мм $R \approx 0,4$ – $0,6$ м²·К/Вт, стяжку и рулонный ковер $R \approx 0,07$ м²·К/Вт, сопротивления теплоотдаче $R \approx 0,16$ м²·К/Вт. Суммарное сопротивление составляет $R \approx 0,66$ – $0,77$ м²·К/Вт, поэтому для расчета принято $U_{\text{кр}} = 1,5$ Вт/(м²·К) по верхней границе диапазона.

Если состав покрытия не содержит утепляющего слоя и фактический коэффициент теплопередачи кровли достигает $U_{\text{кр}} \approx 3,0$ Вт/(м²·К), суммарная теплопроводность здания возрастает до $\approx 4,7$ кВт/К. В этом случае баланс (4.37) закрывается при среднеобъемной температуре $\approx 7,5$ °С, расчетная нагрузка при $-28,9$ °С составляет 222 кВт и остается ниже мощности котла, а оценки эффекта вариантов 2 и 3 и рамки равного комфорта являются консервативными: фактический эффект модернизации будет выше расчетного.

$$\begin{aligned} Q_{\text{расч}} &= UA \cdot (T_{\text{норм}} - T_{\text{н, расч}}) = 3,48 \cdot (18 - (-28,9)) \\ &= 163,3 \text{ кВт} \quad (4.31) \end{aligned}$$

где $Q_{расч}$ – расчетная трансмиссионная тепловая нагрузка при наружной температуре наиболее холодной пятидневки, кВт; UA – суммарная теплопроводность здания, кВт/К; $T_{норм}$ – нормируемая температура рабочей зоны, °С; $T_{н,расч}$ – расчетная наружная температура наиболее холодной пятидневки обеспеченностью 0,92, °С.

Расчетная трансмиссионная нагрузка 163,3 кВт меньше паспортной тепловой мощности котла КВр-0,3, равной 300 кВт. Следовательно, установленной мощности котла достаточно; эксплуатационная проблема связана с фактическим КПД, ручным режимом топки, распределением теплоты по высоте, инфильтрацией через ворота и работой вытяжки.

Принятый набор температур соответствует стратифицированному состоянию объема: нижняя рабочая зона ≈ 8 °С (далее принимается как $T_{баз}$), среднеобъемная температура ≈ 10 °С, верхняя зона ≈ 17 °С.

$$Q_{тр,сез} = UA \cdot (T_{ср.об} - T_{н,ср}) \cdot \tau_n / 1000 = 3,48 \cdot (10 - (-4,8)) \cdot 4968 / 1000 = 256,0 \text{ МВт} \cdot \text{ч/год} \quad (4.32)$$

где $Q_{тр,сез}$ – сезонные трансмиссионные теплотери при фактической среднеобъемной температуре производственного объема, МВт·ч/год; UA – суммарная теплопроводность здания, кВт/К; $T_{ср.об}$ – фактическая среднеобъемная температура производственного объема, °С; $T_{н,ср}$ – средняя наружная температура отопительного периода, °С; τ_n – нормативная продолжительность периода со средней суточной температурой не выше 8 °С, ч/год; 1000 – коэффициент перевода кВт·ч в МВт·ч.

$$Q_{вент} = c_p \cdot \rho \cdot L_{вент} \cdot (T_{верх} - T_{н,ср}) = 1,005 \cdot 1,20 \cdot 3,44 \cdot (17 - (-4,8)) = 90,4 \text{ кВт} \quad (4.33)$$

где $Q_{вент}$ – тепловая мощность, уносимая вытяжной вентиляцией, кВт; c_p – удельная теплоемкость воздуха, кДж/(кг·К); ρ – плотность воздуха, кг/м³; $L_{вент}$ – суммарный расход вытяжных вентиляторов, м³/с; $T_{верх}$ – температура воздуха в верхней зоне, °С; $T_{н,ср}$ – средняя наружная температура отопительного периода, °С.

$$E_{вент} = Q_{вент} \cdot \tau_{вент} / 1000 = 90,4 \cdot 650 / 1000 = 58,8 \text{ МВт} \cdot \text{ч/год} \quad (4.34)$$

где $E_{вент}$ – сезонные теплотери при работе вытяжных вентиляторов, МВт·ч/год; $Q_{вент}$ – тепловая мощность уноса, кВт; $\tau_{вент}$ – годовая продолжительность работы вытяжных вентиляторов в отопительный период, принята 650 ч/год по данным эксплуатации объекта [130]; 1000 – коэффициент перевода кВт·ч в МВт·ч.

$$L_{вор} = (1/3) \cdot \mu_{пр} \cdot A_{вор,1} \cdot \sqrt{(g \cdot H_{вор} \cdot (T_{в} - T_{н}) / T_{ср})}$$

где $L_{вор}$ – расчетный расход воздуха через воротный проем, м³/с; $\mu_{пр}$ – коэффициент расхода проема, принятый равным 0,95, безразмерная величина; $A_{вор,1}$ – площадь одного воротного проема, м²; g – ускорение свободного падения, м/с²; $H_{вор}$ – высота воротного проема, м; $T_{в}$ – внутренняя абсолютная температура воздуха, К; $T_{н}$ – наружная абсолютная температура воздуха, К; $T_{ср}$ – средняя абсолютная температура воздуха в проеме, К. При

расчетном перепаде температур формула дает $L_{вор} = 10,1 \text{ м}^3/\text{с}$; при перепаде $19,8 \text{ К}$ она воспроизводит значение $L_{вор} \approx 11,6 \text{ м}^3/\text{с}$.

$$\begin{aligned} Q_{вор} &= c_p \cdot \rho \cdot L_{вор} \cdot (T_{ср.об} - T_{н,ср}) \\ &= 1,005 \cdot 1,20 \cdot 10,1 \cdot (10 - \\ &\quad (-4,8)) = 180,3 \text{ кВт} \quad (4.35) \end{aligned}$$

где $Q_{вор}$ – тепловая мощность залпового воздухообмена через один открытый воротный контур, кВт; c_p – удельная теплоемкость воздуха, кДж/(кг·К); ρ – плотность воздуха, кг/м³; $L_{вор}$ – расчетный расход воздуха через воротный проем, м³/с; $T_{ср.об}$ – фактическая среднеобъемная температура воздуха в цехе, °С; $T_{н,ср}$ – средняя наружная температура отопительного периода, °С.

$$\begin{aligned} E_{вор} &= Q_{вор} \cdot t_{вор} / 1000 = 180,3 \cdot 228 / 1000 \\ &= 41,1 \text{ МВт} \cdot \text{ч/год} \quad (4.36) \end{aligned}$$

где $E_{вор}$ – сезонные теплопотери при суммарном открытии ворот, МВт·ч/год; $Q_{вор}$ – тепловая мощность залпового воздухообмена, кВт; $t_{вор}$ – суммарное время открытого состояния ворот в отопительный период, ч/год; 1000 – коэффициент перевода кВт·ч в МВт·ч.

$$\begin{aligned} E_{баланс} &= Q_{тр,сез} + E_{вент} + E_{вор} = 256,0 + 58,8 + 41,1 \\ &= 355,9 \text{ МВт} \cdot \text{ч/год} \quad (4.37) \end{aligned}$$

где $E_{баланс}$ – расчетная сезонная потребность, полученная по тепловому балансу здания, МВт·ч/год; $Q_{тр,сез}$ – трансмиссионные теплопотери, МВт·ч/год; $E_{вент}$ – теплопотери при работе вытяжки, МВт·ч/год; $E_{вор}$ – теплопотери при открытии ворот, МВт·ч/год.

$$\begin{aligned} \delta_{бал} &= (Q_{пол,1} - E_{баланс}) / Q_{пол,1} = (373,3 - 355,9) / 373,3 \\ &= 0,047 \approx 4,7 \% \end{aligned}$$

где $\delta_{баланс}$ – относительная невязка теплового баланса, безразмерная величина или %; $Q_{пол,1}$ – полезная теплота текущего угольного варианта, МВт·ч/год; $E_{баланс}$ – расчетная сезонная потребность по тепловому балансу здания, МВт·ч/год.

Верификация по фактическому расходу топлива выполняется сравнением $E_{баланс}$ с полезной теплотой, полученной от угля при эксплуатационном КПД котла. Невязка баланса составляет 4,7 %, поэтому принятые площади, коэффициенты теплопередачи, вентиляционные и воротные потери согласуются с фактическими эксплуатационными данными объекта.

4.5.2 Расчет полезной теплоты угля и текущих затрат

Полезная теплота от 1 т угля определяется по низшей теплоте сгорания рабочего топлива и эксплуатационному коэффициенту полезного использования котла. Для ручной топки, износа поверхностей нагрева, нестационарной загрузки топлива и потерь при золоудалении расчетный эксплуатационный КПД принят равным 0,575. Для анализа чувствительности дополнительно используется верхняя граница $\eta_k=0,70$.

$$q_{уг} = Q_{нр} \cdot \eta_k / 3,6 = 20,5 \cdot 0,575 / 3,6 = 3,274 \text{ МВт} \cdot \text{ч/т} \quad (4.38)$$

где $q_{уг}$ – полезная теплота от 1 т угля, МВт·ч/т; $Q_{нр}$ – низшая теплота сгорания рабочего топлива, МДж/кг; η_k – эксплуатационный коэффициент полезного использования котла, безразмерная величина; 3,6 – коэффициент пересчета МДж/кг топлива в МВт·ч/т.

$$V_{уг,1} = b_{мес} \cdot t_{экспл} = 15 \cdot 7,6 = 114,0 \text{ т/год} \quad (4.39)$$

где $V_{уг,1}$ – сезонный расход угля в текущем варианте, т/год; $b_{мес}$ – средний расход угля в месяц отопления, т/мес; $t_{экспл}$ – эксплуатационная продолжительность закупки и сжигания топлива, мес/год.

$$Q_{пол,1} = V_{уг,1} \cdot q_{уг} = 114,0 \cdot 3,274 = 373,3 \text{ МВт} \cdot \text{ч/год} \quad (4.40)$$

где $Q_{пол,1}$ – полезная теплота текущего угольного варианта, МВт·ч/год; $V_{уг,1}$ – сезонный расход угля, т/год; $q_{уг}$ – полезная теплота от 1 т угля, МВт·ч/т.

$$q_{уг,0,70} = 20,5 \cdot 0,70 / 3,6 = 3,986 \text{ МВт} \cdot \text{ч/т};$$

$$Q_{пол,0,70} = 114,0 \cdot 3,986 = 454,4 \text{ МВт} \cdot \text{ч/год} \quad (4.41)$$

где $q_{уг,0,70}$ – полезная теплота от 1 т угля при $\eta_k=0,70$, МВт·ч/т; $Q_{пол,0,70}$ – полезная теплота текущего угольного варианта при $\eta_k=0,70$, МВт·ч/год; η_k – коэффициент полезного использования котла, безразмерная величина.

$$C1 = V_{уг,1} \cdot C_{уг} / 10^6 + C_{обсл} = 114,0 \cdot 25\,000 / 10^6 + 0,75 \\ = 3,60 \text{ млн тг/год} \quad (4.42)$$

где $C1$ – годовые эксплуатационные затраты текущего варианта, млн тг/год; $V_{уг,1}$ – сезонный расход угля, т/год; $C_{уг}$ – цена угля, тг/т; $C_{обсл}$ – годовые затраты на обслуживание угольного котла и топливного хозяйства, млн тг/год; 10^6 – коэффициент перевода тенге в млн тг.

При таком балансе целевая температура 15 °С является уставкой существующего режима, а не гарантированной температурой во всех точках рабочего объема. Расчет показывает, что фактический расход 114 т/год обеспечивает полезную теплоту 373–454 МВт·ч/год в зависимости от эксплуатационного КПД. Для равно-комфортного варианта, рассчитанного по (4.32)–(4.36) при среднеобъемной температуре 18–21 °С и $\eta_k = 0,575$, требуемый расход угля составляет 169–192 т/год.

$$C_{уг,норм} = 4,22 \dots 4,80 \text{ млн тг/год};$$

$$C_{норм} = C_{уг,норм} + C_{обсл} = 4,97 \dots 5,55 \text{ млн тг/год} \quad (4.43)$$

где $C_{уг,норм}$ – годовые затраты на уголь при доведении всего производственного объема до нормируемого уровня комфорта только угольным отоплением, млн тг/год; 4,22...4,80 – диапазон затрат при расходе 169–192 т/год, $T_{ср.об} = 18\text{--}21$ °С и $\eta_k = 0,575$; $C_{норм}$ – полные годовые эксплуатационные затраты угольного варианта равного комфорта, млн тг/год; $C_{обсл}$ – затраты на обслуживание угольного котла, млн тг/год.

4.5.3 Расчет локального догрева ПЭНД и установленной мощности

Компоновка локального догрева принята по схеме: 18 приборных модулей ПЭНД-800 суммарной установленной мощностью 14,4 кВт, из них 6 модулей размещаются в офисно-бытовом блоке, 12 модулей – в шести рабочих

зонах по два модуля на зону. Электротехническое распределение по фазам составляет 6/6/6, что согласуется с расчетом раздела 4.3.4.

$$P_{\text{уст}} = N_{\text{мод}} \cdot P_{\text{мод}} / 1000 = 18 \cdot 800 / 1000 = 14,4 \text{ кВт} \quad (4.44)$$

где $P_{\text{уст}}$ – установленная электрическая мощность группы ПЭНД, кВт; $N_{\text{мод}}$ – число приборных модулей ПЭНД-800, шт.; $P_{\text{мод}}$ – номинальная мощность одного приборного модуля, Вт; 1000 – коэффициент перевода Вт в кВт.

$$\text{траб} = 8 \cdot 5 \cdot 4,34 \cdot 7,6 = 1320 \text{ ч/год} \quad (4.45)$$

где траб – продолжительность работы ПЭНД в отопительный период, ч/год; 8 – продолжительность рабочего дня, ч/сут; 5 – число рабочих дней в неделю, дн./нед.; 4,34 – среднее число недель в месяце, нед./мес; 7,6 – эксплуатационная продолжительность отопительного периода, мес/год.

$$\begin{aligned} E_{\text{ПЭНД, 2}} &= P_{\text{уст}} \cdot \text{траб} \cdot k_{\text{рег}} \cdot k_{\text{одн}} / 1000; \\ E_{\text{ПЭНД, 2}} &= 14,4 \cdot 1320 \cdot 0,70 \cdot 0,70 / 1000 \\ &= 9,31 \text{ МВт} \cdot \text{ч/год} \quad (4.46) \end{aligned}$$

где $E_{\text{ПЭНД, 2}}$ – годовое потребление электроэнергии ПЭНД во втором варианте, МВт·ч/год; $P_{\text{уст}}$ – установленная электрическая мощность группы ПЭНД, кВт; траб – продолжительность работы, ч/год; $k_{\text{рег}}$ – коэффициент регулирования, безразмерная величина; $k_{\text{одн}}$ – коэффициент одновременности, безразмерная величина; 1000 – коэффициент перевода кВт·ч в МВт·ч.

Расчет одного рабочего поста выполняется для локального объема $15 \text{ м}^2 \times 3 \text{ м} = 45 \text{ м}^3$. Базовая температура зоны перед включением локального догрева принимается $8 \text{ }^\circ\text{C}$, требуемая температура локального комфорта – $18\text{--}20 \text{ }^\circ\text{C}$, время восстановления температуры – $10\text{--}15$ мин, коэффициент запаса по мощности – 1,2.

$$\begin{aligned} Q_{\text{дин}} &= \rho \cdot V_{\text{лок}} \cdot c_p \cdot (T_{\text{комф}} - T_{\text{баз}}) / t_{\text{восст}} \\ &= 0,60 \dots 1,09 \text{ кВт} \quad (4.47) \end{aligned}$$

где $Q_{\text{дин}}$ – динамическая добавка мощности для восстановления температуры локальной зоны, кВт; ρ – плотность воздуха, кг/м³; $V_{\text{лок}}$ – объем локальной рабочей зоны, м³; c_p – удельная теплоемкость воздуха, Дж/(кг·К); $T_{\text{комф}}$ – требуемая температура локального комфорта, °C; $T_{\text{баз}}$ – базовая температура зоны до локального догрева, °C; $t_{\text{восст}}$ – требуемое время восстановления температуры, с.

$$\begin{aligned} Q_{\text{дин, зап}} &= K_{\text{зап}} \cdot Q_{\text{дин}} = 1,2 \cdot (0,60 \dots 1,09) \\ &= 0,72 \dots 1,30 \text{ кВт} \quad (4.48) \end{aligned}$$

где $Q_{\text{дин, зап}}$ – динамическая мощность с запасом, кВт; $K_{\text{зап}}$ – коэффициент запаса, безразмерная величина; $Q_{\text{дин}}$ – динамическая добавка мощности, кВт.

$$\begin{aligned} Q_{\text{лок}} &= \rho \cdot c_p \cdot n_{\text{лок}} \cdot V_{\text{лок}} \cdot (T_{\text{комф}} - T_{\text{баз}}) / 3600 \\ &= 0,30 \dots 0,54 \text{ кВт} \quad (4.49) \end{aligned}$$

где $Q_{\text{лок}}$ – стационарная мощность для компенсации обмена локальной зоны с остальным объемом цеха, кВт; ρ – плотность воздуха, кг/м³; c_p –

удельная теплоемкость воздуха, Дж/(кг·К); плок – кратность обмена воздуха между локальной зоной и цехом, принята 2–3 ч⁻¹ по укрупненной оценке для открытых рабочих зон; $V_{\text{лок}}$ – объем локальной рабочей зоны, м³; $T_{\text{комф}}$ – температура локального комфорта, °С; $T_{\text{баз}}$ – базовая температура воздуха, °С; 3600 – число секунд в часе, с/ч.

$$P_{\text{зона}} = 2 \cdot P_{\text{ПЭНД}} - 800 = 2 \cdot 0,8 = 1,6 \text{ кВт} \\ \geq Q_{\text{дин, зап}} + Q_{\text{лок}} \quad (4.50)$$

где $P_{\text{зона}}$ – установленная мощность ПЭНД в одной рабочей зоне, кВт; $P_{\text{ПЭНД-800}}$ – номинальная мощность одного приборного модуля ПЭНД-800, кВт; $Q_{\text{дин, зап}}$ – динамическая мощность с запасом, кВт; $Q_{\text{лок}}$ – стационарная тепловая потребность локальной зоны, кВт.

В наиболее жестком сочетании параметров ($T_{\text{комф}} = 20$ °С, $t_{\text{восст}} = 10$ мин, $\text{плок} = 3$ ч⁻¹) суммарная потребность с запасом составляет 1,84 кВт. При установленной мощности 1,6 кВт время восстановления увеличивается до ≈ 10–12 мин (614 с по энергетическому балансу зоны), что остается в допустимом диапазоне. Коэффициент запаса 1,2 выполняется для базового сочетания 18 °С / 15 мин.

Следовательно, компоновка «2×ПЭНД-800 на рабочую зону» подтверждается расчетом динамического восстановления температуры и стационарного обмена локального объема с более холодным фоном цеха. Это обосновывает принятую схему 12 модулей для шести рабочих зон и 6 модулей для офисно-бытового блока.

4.5.4 Экономика гибридной схемы и оценка капитальных затрат

Экономический расчет выполнен в двух рамках. Первая рамка – консервативная: сравнение ведется с фактическим текущим расходом угля 114 т/год, а экономия формируется только за счет сокращения расхода топлива на 25 % при сохранении обслуживания котла. Вторая рамка – равный комфорт: базой сравнения является стоимость доведения всего объема цеха до нормируемого уровня комфорта только угольным отоплением, тогда как гибридная система обеспечивает требуемый комфорт в рабочих зонах при сохранении локального характера догрева.

$$V_{\text{уг, 2}} = V_{\text{уг, 1}} \cdot (1 - d_{\text{гибр}}) = 114,0 \cdot (1 - 0,25) \\ = 85,5 \text{ т/год} \quad (4.51)$$

где $V_{\text{уг, 2}}$ – сезонный расход угля во втором варианте, т/год; $V_{\text{уг, 1}}$ – сезонный расход угля в текущем варианте, т/год; $d_{\text{гибр}}$ – доля снижения расхода угля при гибридном режиме, безразмерная величина.

$$C_2 = C_{\text{уг, 2}} + C_{\text{эл, ПЭНД, 2}} + C_{\text{обсл}} = 2,14 + 0,36 + 0,75 \\ = 3,25 \text{ млн тт/год} \quad (4.52)$$

где C_2 – годовые эксплуатационные затраты второго варианта, млн тт/год; $C_{\text{уг, 2}}$ – затраты на уголь во втором варианте, млн тт/год; $C_{\text{эл, ПЭНД, 2}}$ – затраты на электроэнергию ПЭНД во втором варианте, млн тт/год; $C_{\text{обсл}}$ – затраты на обслуживание угольного котла, млн тт/год.

Для варианта 3 к гибричному режиму добавляется повышение тепловой защиты здания. Для кровли принимается утепление по железобетонным плитам сверху: минераловатные или PIR-плиты под новый рулонный ковер с доведением коэффициента теплопередачи до $U_{кр} \approx 0,3 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$. Расчетная теплопроводность кровли уменьшается с 1,5 до 0,3 $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, окон – с 4,5 до 2,0 $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, воротные и инфильтрационные потери снижаются за счет герметизации ворот и организации тамбурно-завесного режима. Пересчет дает новую суммарную теплопроводность ограждений около 2,10 кВт/К, то есть снижение на 39,6 % относительно исходного $UA = 3,48 \text{ кВт}/\text{К}$.

$$UA' = 0,3 \cdot 840 + 2,0 \cdot 105 + 4,5 \cdot 36 - 110 + 1,2 \cdot 1137 + 223 \\ = 2101 \text{ Вт}/\text{К} \approx \\ 2,10 \text{ кВт}/\text{К} \quad (4.53)$$

где UA' – суммарная теплопроводность здания после мероприятий по тепловой защите, $\text{Вт}/\text{К}$; 0,3 – коэффициент теплопередачи утепленной кровли, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$; 840 – площадь кровли, м^2 ; 2,0 – коэффициент теплопередачи новых оконных блоков, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$; 105 – площадь окон, м^2 ; 4,5 – коэффициент теплопередачи ворот, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$; 36 – площадь ворот, м^2 ; 110 – снижение воротных и инфильтрационных потерь, $\text{Вт}/\text{К}$; 1,2 – коэффициент теплопередачи кирпичных стен, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$; 1137 – площадь стен, м^2 ; 223 – теплопроводность пола по грунту, $\text{Вт}/\text{К}$.

$$\delta UA = (UA - UA') / UA = (3,48 - 2,10) / 3,48 = 0,396 \\ \approx 39,6 \% \quad (4.54)$$

где δUA – относительное снижение суммарной теплопроводности здания после мероприятий по тепловой защите, безразмерная величина или %; UA – исходная суммарная теплопроводность здания, кВт/К; UA' – суммарная теплопроводность после теплозащитных мероприятий, кВт/К.

Трансмиссионная составляющая верифицированного баланса равна 256,0/355,9 ≈ 72 %. Снижение UA на 39,6 % дает около 28 % полной сезонной потребности. В сумме с гибридным режимом локального догрева, для которого принято $d_{гибр} = 25$ %, расчетный потенциал составляет около 53 %; в варианте 3 консервативно принято $d_{ут} = 45$ %.

$$V_{уг,3} = V_{уг,1} \cdot (1 - d_{ут}) = 114,0 \cdot (1 - 0,45) \\ = 62,7 \text{ т}/\text{год} \quad (4.55)$$

где $V_{уг,3}$ – сезонный расход угля в третьем варианте, т/год; $V_{уг,1}$ – сезонный расход угля в текущем варианте, т/год; $d_{ут}$ – доля снижения расхода угля за счет гибридного режима и тепловой защиты, безразмерная величина.

$$EP_{ЭНД,3} = EP_{ЭНД,2} \cdot (1 - d_{эл,ут}) = 9,31 \cdot (1 - 0,15) \\ = 7,92 \text{ МВт} \cdot \text{ч}/\text{год} \quad (4.56)$$

где $EP_{ЭНД,3}$ – годовое потребление электроэнергии ПЭНД в третьем варианте, $\text{МВт} \cdot \text{ч}/\text{год}$; $EP_{ЭНД,2}$ – годовое потребление электроэнергии ПЭНД во втором варианте, $\text{МВт} \cdot \text{ч}/\text{год}$; $d_{эл,ут}$ – доля снижения электропотребления ПЭНД после повышения тепловой защиты, безразмерная величина.

$$C_3 = C_{уг,3} + C_{эл,ПЭНД,3} + C_{обсл} = 1,57 + 0,31 + 0,75 \\ = 2,63 \text{ млн тг}/\text{год} \quad (4.57)$$

где C_3 – годовые эксплуатационные затраты третьего варианта, млн тг/год; $C_{уг,3}$ – затраты на уголь в третьем варианте, млн тг/год; $C_{эл,ПЭНД,3}$ – затраты на электроэнергию ПЭНД в третьем варианте, млн тг/год; $C_{обсл}$ – затраты на обслуживание угольного котла, млн тг/год.

$$d_{кр} = C_{эл,ПЭНД} / C_{уг,1} = 0,362 / 2,85 = 0,127 \approx 12,7 \% \quad (4.58)$$

где $d_{кр}$ – критическая доля снижения расхода угля для компенсации затрат на электроэнергию ПЭНД, безразмерная величина или %; $C_{эл,ПЭНД}$ – годовые затраты на электроэнергию ПЭНД во втором варианте, млн тг/год; $C_{уг,1}$ – стоимость угля в текущем варианте, млн тг/год.

$$\Delta C_2 = C_1 - C_2 = 3,60 - 3,25 = 0,35 \text{ млн тг/год} \quad (4.59)$$

где ΔC_2 – годовая эксплуатационная экономия второго варианта, млн тг/год; C_1 – годовые затраты текущего варианта, млн тг/год; C_2 – годовые затраты второго варианта, млн тг/год.

$$\Delta C_3 = C_1 - C_3 = 3,60 - 2,63 = 0,97 \text{ млн тг/год} \quad (4.60)$$

где ΔC_3 – годовая эксплуатационная экономия третьего варианта, млн тг/год; C_1 – годовые затраты текущего варианта, млн тг/год; C_3 – годовые затраты третьего варианта, млн тг/год.

Капитальные затраты локального электротеплового контура включают 18 модулей ПЭНД-800, автоматику, силовую электрику, несущие конструкции с теплоотражающими экранами, строительно-монтажные и пусконаладочные работы. Расчетная стоимость локального контура ПЭНД составляет 1,84 млн тг.

Таблица 4.9 – Расчет капитальных затрат локального контура ПЭНД для производственного цеха

Позиция	Количество	Цена, тг	Сумма, тг
Модули ПЭНД-800 (калькуляция изготовителя опытной партии, цены 2026 г.)	18 шт.	55 000	990 000
Автоматика: контроллер, датчики, SSR	1 компл.	180 000	180 000
Электрика: щит, кабель ВВГнг, УЗО, автоматы	1 компл.	250 000	250 000
Несущие конструкции и теплоотражающие экраны	1 компл.	120 000	120 000
СМР и пусконаладка	1 компл.	300 000	300 000
Итого КПЭНД	–	–	1 840 000

$$T_{ок, конс} = КПЭНД / \Delta C_2 = 1,84 / 0,35 = 5,3 \text{ года} \quad (4.61)$$

где Ток,конс – простой срок окупаемости локального контура ПЭНД в консервативной рамке сравнения, лет; КПЭНД – капитальные затраты на локальный контур ПЭНД, млн тг; ΔС2 – годовая эксплуатационная экономия второго варианта, млн тг/год.

$$\begin{aligned} \Delta C_{\text{сравн}} &= C_{\text{норм}} - (C_1 + C_{\text{эл, ПЭНД}}); \\ \Delta C_{\text{сравн}} &= (4,97 \dots 5,55) - (3,60 + 0,36) \\ &= 1,0 \dots 1,6 \text{ млн тг/год} \quad (4.62) \end{aligned}$$

где ΔСсравн – избежанные годовые затраты при сравнении с вариантом равного комфорта, млн тг/год; Снорм – затраты угольного варианта при доведении всего объема до нормируемого уровня комфорта, млн тг/год; С1 – фактические годовые затраты текущего угольного режима, млн тг/год; Сэл,ПЭНД – годовые затраты на электроэнергию ПЭНД, млн тг/год.

$$\begin{aligned} T_{\text{ок, равн}} &= \text{КПЭНД} / \Delta C_{\text{сравн}} = 1,84 / (1,0 \dots 1,6) \\ &= 1,2 \dots 1,8 \text{ года} \quad (4.63) \end{aligned}$$

где Ток,равн – простой срок окупаемости локального контура ПЭНД в рамке равного комфорта, лет; КПЭНД – капитальные затраты на локальный контур ПЭНД, млн тг; ΔСсравн – избежанные годовые затраты, млн тг/год.

Расчетное сравнение трех вариантов отопления приведено в таблице 4.10.

Таблица 4.10 – Расчетное сравнение вариантов отопления производственного цеха 840 м²

Показатель	Вариант 1: текущее угольное отопление	Вариант 2: угольная база + ПЭНД	Вариант 3: угольная база + ПЭНД + теплозащита
Принцип схемы	Котел и регистры формируют общий фоновый режим	Котел держит фон; ПЭНД догревает офисный блок и рабочие зоны	Теплозащита снижает UA; котел держит фон; ПЭНД догревает зоны
Расход угля, т/год	114,0	85,5	62,7
Снижение расхода угля	0 %	25 %	45 %
Полезная теплота от угля при ηк=0,575, МВт·ч/год	373,3	279,9	205,3
Электроэнергия ПЭНД, МВт·ч/год	0	9,31	7,92
Затраты на уголь, млн тг/год	2,85	2,14	1,57
Затраты на электроэнергию ПЭНД, млн тг/год	0	0,36	0,31
Обслуживание угольного котла, млн тг/год	0,75	0,75	0,75

Итого эксплуатационные затраты, млн тт/год	3,60	3,25	2,63
Экономия к текущему варианту, млн тт/год	–	0,35	0,97
Расчетный вывод	Базовая точка сравнения	Эффект положителен при снижении угля выше 12,7 %	Наиболее эффективная схема по эксплуатационным затратам

Из таблицы 4.10 следует, что гибридная схема снижает годовые эксплуатационные затраты с 3,60 до 3,25 млн тт/год при локальном догреве ПЭНД и до 2,63 млн тт/год при сочетании ПЭНД с тепловой защитой здания. Вариант 2 экономит 0,35 млн тт/год в консервативной рамке и имеет простой срок окупаемости 5,3 года. В рамке равного комфорта избежанные затраты составляют 1,0–1,6 млн тт/год, а срок окупаемости локального контура составляет 1,2–1,8 года.

Сравнение годовых эксплуатационных затрат для трех вариантов отопления приведено на рисунке 4.11.

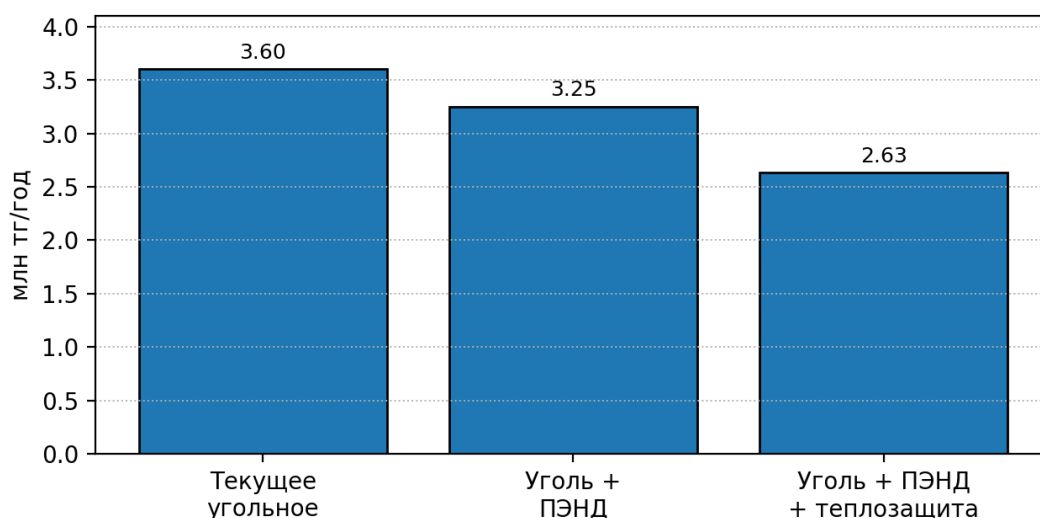


Рисунок 4.11 – Сравнение годовых эксплуатационных затрат для трех вариантов отопления производственного цеха 840 м²

Устойчивость экономического вывода проверяется чувствительностью к коэффициенту использования ПЭНД, тарифу электроэнергии, цене угля и фактической доле снижения расхода топлива. Результаты приведены в таблице 4.11.

Таблица 4.11 – Чувствительность экономического результата локального контура ПЭНД

Расчетный случай	Электроэнергия ПЭНД, МВт·ч/год	Годовая экономия, млн тт/год	Простой срок окупаемости, лет
------------------	--------------------------------	------------------------------	-------------------------------

Базовый консервативный: Кисп=0,49; dгибр=0,25	9,31	0,35	5,3
Пониженный Кисп=0,30	5,70	0,49	3,8
dгибр=0,15	9,31	0,07	28,1
dгибр=0,35	9,31	0,64	2,9
Цена угля -20 %	9,31	0,21	8,9
Цена угля +20 %	9,31	0,49	3,7
Тариф электроэнергии -20 %	9,31	0,42	4,4
Тариф электроэнергии +20 %	9,31	0,28	6,6
Рамка равного комфорта	9,31	1,0...1,6	1,2...1,8

Таблица чувствительности показывает, что эксплуатационный результат наиболее чувствителен к фактической доле снижения расхода угля и цене топлива. При снижении расхода угля на 25% локальный контур ПЭНД компенсирует собственное электропотребление с запасом относительно критического порога 12,7%. При достижении равного комфорта в рабочих зонах без прогрева всего верхнего объема цеха экономический эффект увеличивается до 1,0–1,6 млн тт/год.

4.6 Область рационального применения и рекомендации по внедрению, эксплуатации и техническому обслуживанию ПЭНД

На основании расчетных, экспериментальных и электротехнических результатов ПЭНД целесообразно позиционировать как управляемый локальный электротехнический источник теплоты для объектов, где требуется адресный подвод тепла, секционное регулирование и ограничение установленной мощности. Наиболее выраженный эффект достигается при подаче теплоты не во весь объем здания, а в конкретную функциональную зону, в заданный период времени и с регистрацией фактических параметров работы. Такая постановка соответствует современному направлению управляемой нагрузки и demand response в интеллектуальных сетях [116; 117].

Рациональная область применения ПЭНД – гибридные схемы промышленных, складских, административных и общественных зданий, в которых базовая система отопления поддерживает фоновое тепловое состояние здания, а ПЭНД обеспечивает комфортный догрев рабочих мест, офисных помещений, постов охраны, зон ожидания, ремонтных участков и других локальных зон с непостоянной тепловой нагрузкой. ПЭНД также целесообразен при реконструкции помещений, где прокладка трубопроводов

затруднена или экономически не оправдана, а также на автономных объектах без доступа к тепловым сетям при наличии достаточной выделенной электрической мощности.

Для производственного цеха, рассмотренного в разделе 4.5, ПЭНД применяется как динамический локальный контур гибридной системы с учетом требований к отоплению и вентиляции производственных помещений [45; 120]. Угольный котел сохраняется как базовый источник фонового теплового состояния производственного объема, а ПЭНД размещается в офисно-бытовом блоке и в рабочих зонах, распределенных по всему цеху. Экономический эффект формируется за счет работы догрева только в рабочее время, снижения перегрева верхнего объема, уменьшения потерь при инфильтрации через две воротные зоны, секционного управления и фактического сокращения расхода угля.

Рациональная процедура внедрения включает инженерное обследование объекта, выбор зон локального догрева, расчет установленной мощности и электрической схемы, опытную эксплуатацию ограниченного участка с регистрацией температуры и энергии, а затем масштабирование на остальные зоны. Система мониторинга из раздела 4.4 используется как инструмент эксплуатационного энергоаудита: регистрируются температура рабочей зоны, профиль температуры по высоте, состояние модулей, активная мощность, длительность работы и аварийные события. Накопленные данные применяются для расчета фактических коэффициентов крег, кодн и Кисп, что связывает систему мониторинга с экономической частью главы.

Проектирование ПЭНД выполняется по принципу «от зоны к мощности». Сначала задается перечень зон локального догрева, затем рассчитываются установленная мощность, число приборных модулей, график включения и допустимая одновременная нагрузка. Для группового применения предпочтительны секционное управление и коммутация через zero-cross SSR или реле с достаточным запасом по току и тепловому режиму. При размещении приборов сохраняются воздушные зазоры для конвекции, предотвращается перекрытие обрешетки и обеспечивается защита доступных поверхностей от случайного контакта. Управление группой ПЭНД может быть дополнено прогнозным ограничением нагрузки по профилю потребления объекта и алгоритмами прямого управления нагрузкой [116; 117; 129].

Перед вводом в эксплуатацию выполняется комплексная приемочная проверка теплового режима и безопасности. Контролируются фактическая активная мощность, напряжение, ток, температура доступной поверхности кожуха, температура выходящего воздуха, работа термостата, гистерезис, последовательность включения приборных модулей и корректность восстановления после кратковременного отключения питания. Отдельно проверяются аварийные режимы: отказ температурного датчика, ухудшенная конвекция, частичное перекрытие воздухопроводов, срабатывание термопредохранителя, УЗО, автоматического выключателя, защитное заземление и сопротивление изоляции.

Эксплуатация ПЭНД строится на управляемом графике. В рабочее время задается температура, необходимая для конкретной зоны, а в нерабочие периоды система переводится в пониженный режим или отключается при сохранении безопасной фоновой температуры от базового источника. Уставки задаются с гистерезисом, чтобы уменьшить частоту коммутации и продлить ресурс реле или SSR. Данные мониторинга – температура, активная мощность, состояние внутренних секций и приборных модулей, длительность работы и аварийные события – сохраняются в журнале и используются для сравнения фактической экономии с расчетной, а также для обновления прогнозной модели управляемой нагрузки [116; 119].

Техническое обслуживание ПЭНД включает сезонные и текущие операции. Перед началом отопительного сезона проверяются крепления, состояние кожуха и оребрения, целостность кабельных вводов, работа датчиков, заземление, УЗО/дифференциальная защита, термopедохранитель и корректность показаний контроллера. В течение сезона выполняются визуальный осмотр, очистка оребрения от пыли, контроль нагрева контактов и коммутационных элементов, проверка свободного движения воздуха через конвективный канал и анализ журнала аварийных событий. После завершения сезона фиксируются фактическое время работы, потребление электроэнергии и расход топлива.

Таким образом, рациональное внедрение ПЭНД выполняется поэтапно: обследование и выбор зон, расчет установленной мощности и электрической схемы, опытная эксплуатация на ограниченном участке с регистрацией параметров, последующее масштабирование на остальные зоны. Такая последовательность позволяет использовать преимущества ПЭНД – беструбность, быстрый выход на режим, секционность и автоматическое управление – при контролируемом уровне электрической нагрузки и сохранении локального характера догрева.

Выводы по главе 4

1. На основе физико-математического, численного и компьютерного 3D-моделирования, а также экспериментальных исследований сформирована конструкция ПЭНД как секционного локального электротехнического источника теплоты. В главе разведены понятия внутренней электровакуумной секции и приборного модуля ПЭНД: секция рассматривается как теплопередающий элемент, а приборный модуль – как законченное отопительное изделие с кожухом, оребрением, опорами, блоком управления и независимой защитой.

2. Сформирована инженерная методика выбора параметров ПЭНД. Методика включает расчет площади боковой поверхности секции, удельной электротепловой нагрузки, удельного конструктивно-массового параметра, локального перегрева по технологической форме модели главы 3, числа секций в приборном модуле, числа модулей в зоне, установленной мощности

и сезонного потребления энергии. Модель применяется в пределах экспериментальной области главы 3, а энергетическое обоснование нормировки $q=P/(\pi DL)$ связано с положениями раздела 2.3.

3. Разработан электротехнический блок применения ПЭНД как управляемой электротепловой нагрузки. Выполнены расчеты номинальных токов, сопротивления и потерь линии, пусковых токов, способов регулирования мощности, фазного баланса, тока нейтрали, селективности защит и режима работы при отклонениях напряжения. Паспортное напряжение 220 В принято как расчетная база действующего объекта, а пересчет на систему 230/400 В выполняется как штатная проектная процедура.

4. Сформирована трехуровневая система мониторинга, управления и защиты: измерительно-информационный уровень, эксплуатационный контроллер и независимая аварийная защита. Высокотемпературный канал внутренней секции выполняется на термопаре типа К (ХА), Pt100 или Pt1000, а низкотемпературные каналы кожуха, воздуха и блока управления – на DS18B20 или аналогичных датчиках. В опытной реализации использованы контроль Т1–Т4, регистрация напряжения, тока и активной мощности, LCD-индикация, SSR-реле, программа оператора на Python/PyQt6/PyQtGraph и CSV-архив.

5. Технико-экономическая оценка выполнена для производственного цеха в Караганде площадью 840 м², высотой 9 м и строительным объемом 7560 м³. Теплотехническая модель объекта включает стены площадью 1137 м², окна площадью 105 м², ворота площадью 36 м², кровлю площадью 840 м² и пол по грунту. Суммарная теплопроводность ограждений составляет 3,48 кВт/К, расчетная трансмиссионная нагрузка при –28,9 °С – 163,3 кВт, что ниже мощности котла КВр-0,3, равной 300 кВт.

6. Выполнена верификация исходных данных по фактическому расходу топлива. При низшей теплоте сгорания угля 20,5 МДж/кг и эксплуатационном КПД котла 0,575 полезная теплота от 114 т угля составляет 373,3 МВт·ч/год. Расчетный тепловой баланс по трансмиссионным потерям, вытяжным вентиляторам и воротам дает 355,9 МВт·ч/год; невязка составляет 4,7 %, что подтверждает согласованность принятых геометрических и эксплуатационных параметров объекта.

7. Подтверждена компоновка локального догрева: 18 приборных модулей ПЭНД-800 суммарной мощностью 14,4 кВт, из них 6 модулей размещаются в офисно-бытовом блоке, а 12 модулей – в шести рабочих зонах по два модуля на зону. Для локальной зоны объемом 45 м³ динамическая добавка мощности с запасом составляет 0,72–1,30 кВт, стационарная потребность – 0,30–0,54 кВт; установленная мощность 2×ПЭНД-800 равна 1,6 кВт и покрывает расчетную потребность рабочего поста.

8. Экономический эффект гибридной схемы имеет физическое и расчетное основание: снижение общего температурного напора уменьшает трансмиссионные и инфильтрационные потери, а низкоинерционный локальный контур ПЭНД компенсирует тепловую потребность рабочих зон

только в период занятости. Вариант «уголь + ПЭНД» снижает эксплуатационные затраты с 3,60 до 3,25 млн тг/год, то есть на 0,35 млн тг/год. Вариант «уголь + ПЭНД + теплозащита» снижает затраты до 2,63 млн тг/год, то есть на 0,97 млн тг/год. Критический порог снижения расхода угля для компенсации затрат на электроэнергию ПЭНД составляет 12,7 %.

9. Капитальные затраты локального контура ПЭНД для рассматриваемого цеха составляют 1,84 млн тг. В консервативной рамке сравнения простой срок окупаемости равен 5,3 года. В рамке равного комфорта, где базой является стоимость доведения всего объема цеха до нормируемого уровня только угольным отоплением, избежанные затраты составляют 1,0–1,6 млн тг/год, а простой срок окупаемости локального контура ПЭНД – 1,2–1,8 года.

10. Определена рациональная область применения ПЭНД: локальный догрев офисно-бытового блока и рабочих зон, гибридные схемы промышленных и общественных зданий, автономные и реконструируемые объекты, помещения с неравномерной тепловой нагрузкой, а также здания с улучшенной теплоизоляцией и возможностью секционного управления. Для рассмотренного цеха значимыми факторами являются герметизация двух больших ворот, управление работой четырех вытяжных вентиляторов, ремонт остекления и снижение теплопотерь через кровельные конструкции высокого пролета.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе достигнута поставленная цель – выполнены исследование и разработка энергоэффективного электротехнического нагревательного устройства – парового электрообогревателя низкого давления (ПЭНД), предназначенного для локального автономного, децентрализованного и гибридного электротеплоснабжения. ПЭНД обоснован как локальный управляемый источник теплоты и как электротепловая нагрузка системы электроснабжения объекта.

В основе разработанного решения лежит применение электровакуумной тепловой трубки гравитационного типа. Активная электрическая мощность подводится к зоне испарения, а распределение теплоты по поверхности обеспечивается испарением рабочего тела, движением пара, конденсацией и возвратом конденсата. Энергоэффективность ПЭНД в работе понимается как повышение равномерности теплоотдачи, снижение локальной тепловой напряженности, ускорение выхода на режим и управляемость электротепловой нагрузки.

По результатам диссертационного исследования получены следующие основные результаты.

Выполнен анализ современного состояния электротеплоснабжения, электротехнических нагревательных устройств, тепловых труб и двухфазных термосифонов. Показано, что для автономных, реконструируемых, децентрализованных и гибридных схем теплоснабжения востребованы локальные электротехнические источники теплоты, сочетающие работу без внешнего водяного контура, секционное регулирование мощности, ограниченную тепловую инерционность, равномерную теплоотдачу, температурный мониторинг и электробезопасность.

Разработана физико-математическая и численная модель электровакуумной тепловой трубки ПЭНД, учитывающая подвод активной электрической мощности, внешний конвективно-радиационный баланс, фазовый переход рабочего тела и возврат жидкой фазы. Расчеты показали, что одиночная гладкая ЭВТТ диаметром 32 мм и длиной 340 мм при температуре поверхности 70–90 °С не обеспечивает отвод мощности порядка 80 Вт без превышения рационального температурного уровня. Следовательно, приборное исполнение ПЭНД должно включать развитую теплоотдающую поверхность, ребрение, секционное построение или регулирование числа активных элементов.

Проведены экспериментальные исследования электровакуумных секций ПЭНД. Установлено, что температурный режим секции определяется удельной электротепловой нагрузкой, удельным конструктивно-массовым параметром, геометрией секции и объемом рабочего тела. Получена инженерная регрессионная зависимость локального перегрева с $R^2_{adj} = 0,688$, $MAE = 14,1$ °С и $RMSE = 16,4$ °С. Экспериментально подтверждено, что дренажный канал снижает перепад температур между контрольными точками

с 27–34 °С до 6–7 °С, что повышает равномерность двухфазного теплопереноса.

Разработаны конструктивно-технологические и электротехнические решения ПЭНД как секционного отопительного прибора. Разграничены внутренняя электровакуумная секция и приборный модуль ПЭНД: секция рассматривается как теплопередающий элемент, а приборный модуль – как законченное отопительное изделие с корпусом, оребрением, кожухом, блоком управления и независимой защитой. Сформирована инженерная методика выбора параметров ПЭНД, связывающая тепловую потребность помещения, параметры секции, число секций и модулей, установленную мощность и сезонное потребление электроэнергии.

Обосновано применение ПЭНД как управляемой электротепловой нагрузки системы электроснабжения. Для резистивного исполнения выполнены расчеты номинальных токов, потерь в линии, пускового режима, фазного распределения групповой нагрузки и селективности защит. Предпочтительными способами регулирования определены секционное включение и пакетное zero-cross-регулирование. Разработанная система мониторинга, автоматического управления и аварийной защиты обеспечивает регистрацию температурных и электрических параметров, поддержание уставок, поочередное включение подгрупп и независимое отключение питания при аварийных режимах.

Выполнена технико-экономическая оценка применения ПЭНД в гибридной системе отопления производственного цеха в г. Караганде площадью 840 м². Для объекта обоснована компоновка локального догрева на основе 18 модулей ПЭНД-800 суммарной установленной мощностью 14,4 кВт. Годовое потребление электроэнергии ПЭНД составляет 9,31 МВт·ч/год. Эксплуатационные затраты снижаются с 3,60 до 3,25 млн тг/год при варианте «уголь + ПЭНД» и до 2,63 млн тг/год при варианте «уголь + ПЭНД + теплозащита». Простой срок окупаемости составляет 5,3 года в консервативной рамке и 1,2–1,8 года в рамке равного комфорта.

Определена область рационального применения ПЭНД. Устройство целесообразно использовать не как универсальную замену всем существующим системам отопления, а как управляемый локальный электротехнический источник теплоты для офисно-бытовых помещений, рабочих зон, автономных и реконструируемых объектов, помещений с неравномерной тепловой нагрузкой, а также гибридных схем промышленных и общественных зданий.

Таким образом, диссертационная работа представляет собой завершенное исследование, в котором решена актуальная научно-техническая задача разработки и обоснования энергоэффективного электротехнического нагревательного устройства как альтернативного локального источника тепловой энергии. Полученные модели, экспериментальные зависимости, конструктивные решения, система мониторинга и инженерная методика могут

быть использованы при дальнейшем совершенствовании управляемых электротепловых нагрузок и локальных систем электротеплоснабжения.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 Об утверждении Национального плана развития Республики Казахстан до 2029 года и признании утратившими силу некоторых указов Президента Республики Казахстан: Указ Президента Республики Казахстан от 30 июля 2024 года № 611. Раздел 2.3 «Энергетика», подраздел «Энергобезопасность» // Информационно-правовая система нормативных правовых актов Республики Казахстан «Әділет». – URL: <https://adilet.zan.kz/rus/docs/U2400000611>.

2 Об утверждении Стратегии достижения углеродной нейтральности Республики Казахстан до 2060 года: Указ Президента Республики Казахстан от 2 февраля 2023 года № 121. Раздел 2 «Анализ текущей ситуации» // Информационно-правовая система нормативных правовых актов Республики Казахстан «Әділет». – URL: <https://adilet.zan.kz/rus/docs/U2300000121>.

3 Об энергосбережении и повышении энергоэффективности: Закон Республики Казахстан от 13 января 2012 года № 541-IV, с изменениями и дополнениями // Информационно-правовая система нормативных правовых актов Республики Казахстан «Әділет». – URL: <https://adilet.zan.kz/rus/docs/Z1200000541>.

4 Agora Energiewende. Modernising Kazakhstan's Coal-Dependent Power Sector through Renewables: Challenges, Solutions and Scenarios up to 2030 and Beyond. – Berlin: Agora Energiewende, 2024. – URL: <https://www.agora-energiewende.org/publications/modernising-kazakhstans-coal-dependent-power-sector-through-renewables>.

5 Энергия развития: Годовой отчет АО «КЕГОС» за 2024 год [Электронный ресурс] / АО «Казахстанская компания по управлению электрическими сетями (КЕГОС)». – Астана, 2025. – URL: <https://ar2024.kegos.kz/ru/electricity-balance.html>.

6 В 2025 году генерация ВИЭ в Казахстане превысила 8,6 млрд кВт·ч [Электронный ресурс] // QazaqGreen. – 20.01.2026. – URL: <https://qazaqgreen.com/news/kazakhstan/3311/>.

7 Казахстан и Россия начинают работы по строительству АЭС большой мощности [Электронный ресурс]: пресс-релиз от 8 августа 2025 г. // Агентство Республики Казахстан по атомной энергии. – URL: <https://www.gov.kz/memleket/entities/atom-energiyasy/press/news/details/1047792?lang=ru>.

8 О строительстве и районе строительства ядерной установки «Вторая атомная электрическая станция»: Постановление Правительства Республики Казахстан от 26 января 2026 года № 40 // Информационно-правовая система нормативных правовых актов Республики Казахстан «Әділет». – URL: <https://adilet.zan.kz/rus/docs/P2600000040>.

9 Bloess A., Schill W.-P., Zerrahn A. Power-to-heat for renewable energy integration: A review of technologies, modeling approaches, and flexibility

potentials // *Applied Energy*. – 2018. – Vol. 212. – P. 1611–1626. – DOI: 10.1016/j.apenergy.2017.12.073.

10 О теплоэнергетике: Закон Республики Казахстан от 8 июля 2024 года № 120-VIII ЗРК, с изменениями и дополнениями // Информационно-правовая система нормативных правовых актов Республики Казахстан «Әділет». – URL: <https://adilet.zan.kz/rus/docs/Z2400000120>.

11 International Energy Agency. Clean Household Energy Consumption in Kazakhstan: A Roadmap. – Paris: IEA, 2020. – 152 p. – URL: <https://www.iea.org/reports/clean-household-energy-consumption-in-kazakhstan-a-roadmap>.

12 Lund H., Werner S., Wiltshire R., Svendsen S., Thorsen J.E., Hvelplund F., Mathiesen B.V. 4th Generation District Heating (4GDH): Integrating smart thermal grids into future sustainable energy systems // *Energy*. – 2014. – Vol. 68. – P. 1–11. – DOI: 10.1016/j.energy.2014.02.089.

13 Mukhtarov R., Ibragimova O.P., Omarova A., Tursumbayeva M., Tursun K., Muratuly A., Karaca F., Baimatova N. An episode-based assessment for the adverse effects of air mass trajectories on PM2.5 levels in Astana and Almaty, Kazakhstan // *Urban Climate*. – 2023. – Vol. 49. – Art. 101541. – DOI: 10.1016/j.uclim.2023.101541.

14 Karaganda Records Consistently “High” and “Very High” Levels of Air Pollution for Over a Decade [Электронный ресурс] // Central Asia Climate Foundation. – 7 October 2025. – URL: <https://caclimate.fund/en/novosti/karaganda-records-consistently-high-and-very-high-levels-of-air-pollution-for-over-a-decade>.

15 Zlatev V., Cofala J., Peszko G., Wang Q. Clean Air and Cool Planet: Cost-Effective Air Quality Management in Kazakhstan and Its Impact on Greenhouse Gas Emissions. – Washington, DC: The World Bank, 2021. – Report No. AUS0002588. – 116 p. – URL: <https://documents.worldbank.org/en/publication/documents-reports/documentdetail/099345012232191779>.

16 Jouhara H., Chauhan A., Nannou T., Almahmoud S., Delpech B., Wrobel L.C. Heat pipe based systems – Advances and applications // *Energy*. – 2017. – Vol. 128. – P. 729–754. – DOI: 10.1016/j.energy.2017.04.028.

17 Дан П.Д., Рей Д.А. Тепловые трубы / пер. с англ. – М.: Энергия, 1979. – 272 с.

18 Чи С. Тепловые трубы. Теория и практика / пер. с англ. – М.: Машиностроение, 1981. – 207 с.

19 Безродный М.К., Пиоро И.Л., Костюк Т.О. Процессы переноса в двухфазных термосифонных системах. Теория и практика. – 2-е изд., доп. и перераб. – Киев: Факт, 2005. – 704 с.

20 Faghri A. Heat Pipe Science and Technology. – Washington, DC: Taylor & Francis, 1995. – 874 p.

21 Вафин Д. Б. Теплоснабжение и тепловые сети : учебное пособие. – Нижнекамск : Нижнекамский химико-технологический институт, 2014. – 228 с.

- 22 Соколов Е. Я. Теплофикация и тепловые сети : учебник для вузов. – 7-е изд., стер. – М. : Издательство МЭИ, 2001. – 472 с.
- 23 Сканава А. Н., Махов Л. М. Отопление : учебник для вузов. – М. : Издательство АСВ, 2008. – 576 с.
- 24 Maruf M. N. I., Morales-España G., Sijm J., Helistö N., Kiviluoma J. Classification, potential role, and modeling of power-to-heat and thermal energy storage in energy systems: A review // Sustainable Energy Technologies and Assessments. – 2022. – Vol. 53. – 102553.
- 25 СП РК 4.02-106-2013*. Автономные источники теплоснабжения. – Астана, 2019.
- 26 Калинин А. А. Параметрическая оптимизация электротехнологического комплекса для автономного теплоснабжения : дис.. доктора философии PhD по специальности 6D071800 – Электроэнергетика. – Караганда : Карагандинский государственный технический университет, 2018.
- 27 СП РК 2.04-01-2017. Строительная климатология. – Астана, 2017.
- 28 Сериков Э. А. Теплоэнергетические системы и энергоиспользование в теплотехнологическом производстве : учебное пособие для вузов. – 2-е изд., доп. – Алматы : Издательство АУЭС, 2017. – 329 с.
- 29 Официальный информационный ресурс Премьер-министра Республики Казахстан. В 2025 году охват газификацией в Казахстане достигнет 12,8 млн человек. – 23 апреля 2025 г. – URL: <https://primeminister.kz/ru/news/v-2025-godu-okhvat-gazifikatsiey-v-kazakhstanedostignet-128-mln-chelovek-29962>.
- 30 Алимгазин А. Ш. Разработка схем и технологий использования нетрадиционных возобновляемых источников энергии для теплоснабжения изолированных объектов : автореферат дис.. доктора технических наук. – Алматы, 2010.
- 31 International Energy Agency. Kazakhstan – Countries & Regions. Electricity [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.iea.org/countries/kazakhstan/electricity>.
- 32 Fuel and energy balance of the Republic of Kazakhstan (2024) [Электронный ресурс] / Bureau of National Statistics of the Agency for Strategic Planning and Reforms of the Republic of Kazakhstan. – Date of publication: 01.08.2025. – URL: <https://stat.gov.kz/en/industries/business-statistics/stat-energy/publications/411630/>.
- 33 Об утверждении Концепции развития электроэнергетической отрасли Республики Казахстан на 2023–2029 годы: Постановление Правительства Республики Казахстан от 28 марта 2023 года № 263 // Информационно-правовая система нормативных правовых актов Республики Казахстан «Әділет». – URL: <https://adilet.zan.kz/rus/docs/P2300000263>.
- 34 ENTSO-E. Study on Power and Heat Sectors: Interactions and Synergies. – February 2023.
- 35 International Renewable Energy Agency (IRENA). Power to heat and cooling: Status [Электронный ресурс] // Innovation Landscape for Smart

Electrification. – URL: <https://www.irena.org/Innovation-landscape-for-smart-electrification/Power-to-heat-and-cooling/Status>.

36 Ma Z., Knotzer A., Billanes J. D., Jørgensen B. N. A literature review of energy flexibility in district heating with a survey of the stakeholders' participation // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2020. – Vol. 123. – 109750.

37 Luo Z., Peng J., Cao J., Yin R., Zou B., Tan Y., Yan J. Demand Flexibility of Residential Buildings: Definitions, Flexible Loads, and Quantification Methods // *Engineering*. – 2022. – Vol. 16. – P. 123–140.

38 Goetzler W., Young J., Butrico M., Murphy R. Guidance Document on Space Heating Electrification for Large Commercial Buildings with Boilers. – U.S. Department of Energy, 2024.

39 Hewitt N. J. Electrification of Heating – Requirements for Successful Wide-Scale Deployment // *Wiley Interdisciplinary Reviews: Energy and Environment*. – 2024. – Vol. 13. – e542.

40 U.S. Department of Energy, National Renewable Energy Laboratory. Saving Energy with Electric Resistance Heating. – DOE/GO-10097-381. – October 1997.

41 Kılıkış B., Çağlar M., Şengül M. Energy Benefits of Heat Pipe Technology for Achieving 100% Renewable Heating and Cooling for Fifth-Generation, Low-Temperature District Heating Systems // *Energies*. – 2021. – Vol. 14, No. 17. – Article 5398. – DOI: 10.3390/en14175398.

42 Kerrigan K., Jouhara H., O'Donnell G. E., Robinson A. J. Heat pipe-based radiator for low grade geothermal energy conversion in domestic space heating // *Simulation Modelling Practice and Theory*. – 2011. – Vol. 19, No. 4. – P. 1154–1163. – DOI: 10.1016/j.simpat.2010.05.020.

43 Шарапов В. И., Ротов П. В. Регулирование нагрузки систем теплоснабжения: монография. – М. : Новости теплоснабжения, 2007. – 164 с.

44 Finck C., Li R., Kramer R., Zeiler W. Quantifying demand flexibility of power-to-heat and thermal energy storage in the control of building heating systems // *Applied Energy*. – 2018. – Vol. 209. – P. 409–425.

45 СП РК 4.02-101-2012*. Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха. – Астана, 2024.

46 ГОСТ ИЕС 60335-2-30–2013. Безопасность бытовых и аналогичных электрических приборов. Часть 2-30. Частные требования к комнатным обогревателям. – Действует в Республике Казахстан с 01.05.2015. – 24 с. – URL: <https://new-shop.ksm.kz/catalog/document/57145/>.

47 ГОСТ ИЕС 60335-1–2015. Бытовые и аналогичные электрические приборы. Безопасность. Часть 1. Общие требования. – М. : Стандартинформ, 2016.

48 Усадский Д. Г., Карпенко А. Н. Автономные системы отопления с энергоэффективными теплопередающими устройствами : монография. – Волгоград : ВолгГАСУ, 2014.

- 49 Сокунов Б. А., Грובהва Л. С. Электротермические установки (электрические печи сопротивления): учебное пособие. – Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2004. – 122 с.
- 50 Торопов А. Л. Классификация электрических котлов резистивного нагрева автономных водяных систем теплоснабжения // Вестник МГСУ. – 2023. – Т. 18. Вып. 10. – С. 1608–1616.
- 51 Торопов А. Л., Саргсян С. В. Энергетическая эффективность электрических котлов автономных индивидуальных систем теплоснабжения // Вестник МГСУ. – 2025. – Т. 20. Вып. 7. – С. 1104–1112.
- 52 Коновалов Н. П., Шелехов И. Ю. Конструкция электроотопительного прибора для помещений малых форм // Вестник ИрГТУ. – 2012. – № 4(63). – С. 85–90.
- 53 Zhao Z., Hu R., Zhang Y., Dong H., Du Q. Current Research Status and Prospects of Electrode Boilers Under the Background of the “Dual Carbon” Goals // Energies. – 2025. – Vol. 18. – Article 769. – DOI: 10.3390/en18040769.
- 54 Shi L., Han Z., Feng Y., Zhang C., Zhang Q., Zhu H., Zhu S. Joule Heating of Ionic Conductors Using Zero-Phase Frequency Alternating Current to Suppress Electrochemical Reactions // Engineering. – 2023. – Vol. 25. – P. 138–143. – DOI: 10.1016/j.eng.2022.03.004.
- 55 Korepanov A., Lekomtsev P., Niyazov A. Energy characteristics of induction water heater // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2020. – Vol. 433. – Article 012035. – DOI: 10.1088/1755-1315/433/1/012035.
- 56 Brown K. J., Farrelly R., O’Shaughnessy S. M., Robinson A. J. Energy efficiency of electrical infrared heating elements // Applied Energy. – 2016. – Vol. 162. – P. 581–588. – DOI: 10.1016/j.apenergy.2015.10.064.
- 57 Пыжов В. К., Смирнов Н. Н. Системы кондиционирования, вентиляции и отопления. – М.; Вологда : Инфра-Инженерия, 2019.
- 58 Пырков В. В. Электрические кабельные системы отопления. Энергетическое сопоставление. – Киев : Медиа/Макс, 2004.
- 59 ГОСТ ИЕС 60335-2-96–2012. Безопасность бытовых и аналогичных электрических приборов. Часть 2-96. Частные требования к гибким листовым нагревательным элементам для обогрева помещений.
- 60 Савицький С. М. Удосконалення енергоефективності електричних мереж за рахунок управління електроспоживанням для опалення в адміністративних будівлях : автореф. дис.. канд. техн. наук. – Харків, 2016.
- 61 International Energy Agency. The Future of Heat Pumps. World Energy Outlook Special Report. – 2022.
- 62 Akmal M., Fox B., Morrow J. D., Littler T. Impact of heat pump load on distribution networks // IET Generation, Transmission & Distribution. – 2014. – Vol. 8. Iss. 12. – P. 2065–2073.
- 63 Love J. et al. The addition of heat pump electricity load profiles to GB electricity demand: Evidence from a heat pump field trial // Applied Energy. – 2017. – Vol. 204. – P. 332–342.

64 Omron. Technical Guide for Solid State Relays. – CSM_SSR_TG_E_4_1 [Электронный ресурс]. – URL: https://files.omron.eu/downloads/latest/manual/en/csn_ssr_tg_technical_manual_en.pdf.

65 Gefran. Solid State Relays, Contactors, and Power Controllers. Selection Guide [Электронный ресурс]. – 2011. – URL: https://www.dtc.no/files/Produktkataloger%20andre/Brosjyre%20Gefran%20SSR%202011_11.pdf.

66 ГОСТ 32144–2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения.

67 ГОСТ 30804.4.7–2013. Совместимость технических средств электромагнитная. Общее руководство по средствам измерений и измерениям гармоник и интергармоник для систем электроснабжения и подключаемых к ним технических средств.

68 IEC 60800:2009. Heating cables with a rated voltage of 300/500 V for comfort heating and prevention of ice formation. – International Electrotechnical Commission.

69 ГОСТ IEC 60335-2-61–2013. Безопасность бытовых и аналогичных электрических приборов. Часть 2-61. Частные требования к аккумуляционным комнатным обогревателям. – Действует в Республике Казахстан с 01.08.2015; заменяет ГОСТ IEC 60335-2-61–2011. – 20 с. – URL: <https://new-shop.ksm.kz/catalog/document/57154/>.

70 Caruana R., Guilizzoni M. Modeling of Conventional Heat Pipes with Capillary Wicks: A Review // *Energies*. – 2025. – Vol. 18, No. 9. – Article 2213. – DOI: 10.3390/en18092213.

71 Нурпейис А. Е. Экспериментальное исследование и математическое моделирование процессов теплопереноса в замкнутых двухфазных термосифонах: дис.. канд. техн. наук: 05.14.04. – Томск, 2019. – 157 с.

72 Abdullahi B., Al-dadah R.K., Mahmoud S. Thermosyphon Heat Pipe Technology // *Recent Advances in Heat Pipes*. – IntechOpen, 2019. – DOI: 10.5772/intechopen.85410.

73 Maghrabie H. M., Olabi A. G., Alami A. H., Al Radi M., Zwayyed F., Salamah T., Wilberforce T., Abdelkareem M. A. Numerical simulation of heat pipes in different applications // *International Journal of Thermofluids*. – 2022. – Vol. 16. – Article 100199. – DOI: 10.1016/j.ijft.2022.100199.

74 Dong S., Chen J., Lv C., Yuan T., Liu Y., Huang X., Liu Z. A Review of the Building Heating System Integrated with the Heat Pipe // *Processes*. – 2024. – Vol. 12. – Article 2218. – DOI: 10.3390/pr12102218.

75 Усадский Д. Г. Совершенствование схем автономных источников теплоты в системах отопления и горячего водоснабжения: дис.. канд. техн. наук: 05.23.03. – Волгоград, 2011. – 197 с.

76 Koito Y., Yamaguchi R., Tomimura T. Simple Evaluation Method for Effective Thermal Conductivity of a Wick Structure Filled with a Working Fluid // *Frontiers in Heat Pipes*. – 2016. – Vol. 7. – Article 3. – DOI: 10.5098/fhp.7.3.

77 Kirubadurai B., Kanagaraja K., Jegadeeswari G., Kumaran T. Design and analysis of grooved heat pipe // *International Review of Applied Sciences and Engineering*. – 2023. – Vol. 14, No. 1. – P. 13–24. – DOI: 10.1556/1848.2022.00380.

78 Lu X., Liu J., Tong X., Dai R., Xiao Y., Deng J. Experimental investigation on thermal performance of gravity heat pipe with different pipe configurations // *Case Studies in Thermal Engineering*. – 2025. – Vol. 65. – Article 105695. – DOI: 10.1016/j.csite.2024.105695.

79 Ritthong N., Thongkom S., Sawisit A., Duangsa B., Ritthong W. Optimization Design of Closed-Loop Thermosyphons: Experimentation and Computational Fluid Dynamics Modeling // *Energies*. – 2024. – Vol. 17, No. 2. – Article 527. – DOI: 10.3390/en17020527.

80 Gao Y., Niu T., Ning Y., Liaw K. L., Mujumdar A. S., Sasmito A. P. Investigation of flow and thermal performance of water-based nanofluid in gravity heat pipe // *Thermal Science and Engineering Progress*. – 2025. – Vol. 67. – Article 104131. – DOI: 10.1016/j.tsep.2025.104131.

81 Mekhtiyev A.D., Kim P.M., Yugay V.V., Alkina A.D. Electrovacuum heating elements // *Вестник Карагандинского университета. Серия «Физика»*. – 2019. – № 3(95). – С. 27–33. – DOI: 10.31489/2019Ph3/27-33.

82 Шульц А. Н. Новые подходы к проектированию тепловых труб // *Лесной вестник / Forestry Bulletin*. – 2017. – Т. 21, № 6. – С. 80–85. – DOI: 10.18698/2542-1468-2017-6-80-85.

83 Wang Z., Zhang H., Huang S. Theoretical and experimental study on heat transfer characteristics of water heat pipe // *International Journal of Advanced Nuclear Reactor Design and Technology*. – 2026. – Vol. 8. – P. 137–147. – DOI: 10.1016/j.jandt.2026.03.009.

84 Патент РК на полезную модель № 4218. Радиатор отопления с индукционным нагревателем / Алькина А. Д., Мехтиев А. Д., Мехтиев Р. А., Югай В. В., Ким П. М. ; патентообладатель Мехтиев Р. А. ; заявка № 2019/0286.2 ; заявл. 29.03.2019 ; опубл. 09.08.2019, бюл. № 32.

85 Патент РК на полезную модель № 4219. Радиатор отопления с электровакуумными тепловыми трубками / Мехтиев А. Д., Алькина А. Д., Мехтиев Р. А., Ким П. М., Югай В. В. ; патентообладатель Мехтиев Р. А. ; заявка № 2019/0288.2 ; заявл. 29.03.2019 ; опубл. 09.08.2019, бюл. № 32.

86 Патент РК на полезную модель № 2816. Радиатор отопления / Мехтиев А. Д., Югай В. В., Ким П. М., Мехтиев Р. А., Алькина А. Д., Булатбаев Ф. Н., Коккоз М. М., Нешина Е. Г. ; патентообладатели Мехтиев А. Д., Ким П. М. ; заявка № 2017/0365.2 ; заявл. 08.06.2017 ; опубл. 28.05.2018, бюл. № 19.

87 Мехтиев А. Д., Эйрих В. И., Югай В. В., Ким П. М., Белик Г. А. Системы теплоснабжения с энергосберегающими радиаторами и эффективными теплоносителями // *Вестник Карагандинского университета*.

Серия «Физика». – 2011. – № 4(64). – С. 40–43. – URL: <https://rmebrk.kz/journals/1718/99591.pdf>.

88 Мехтиев А. Д., Краснюк А. И. Использование в качестве альтернативного источника энергии вакуумного электрического радиатора // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2015. – № 5-2. – С. 190–194. – URL: <https://s.applied-research.ru/pdf/2015/5-2/6708.pdf>.

89 Карпенко А. Н., Щукин А. Б. Электрический нагреватель парокапельного типа: патент Российской Федерации на полезную модель RU 186444 U1; заявка № 2018119569; заявл. 28.05.2018; опубл. 21.01.2019, бюл. № 3.

90 Кацнельсон Б. В., Калугин А. М., Ларионов А. С. Электровакуумные электронные и газоразрядные приборы: справочник. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Радио и связь, 1985. – 864 с.

91 IAPWS. Revised Release on the IAPWS Industrial Formulation 1997 for the Thermodynamic Properties of Water and Steam. IAPWS R7-97(2012). – Lucerne: International Association for the Properties of Water and Steam, 2007; revised 2012. – 49 p.

92 COMSOL AB. Heat Transfer Module User's Guide. Version 6.4. – Stockholm: COMSOL AB, 2025. – 1068 p.

93 COMSOL AB. CFD Module User's Guide. Version 6.4. – Stockholm: COMSOL AB, 2025. – 1164 p.

94 COMSOL AB. Porous Media Flow Module User's Guide. Version 6.4. – Stockholm: COMSOL AB, 2025. – 414 p.

95 Mekhtiyev A., Breido I., Buzyakov R., Neshina Y., Alkina A. Development of low-pressure electric steam heater // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2021. – Vol. 4, No. 8(112). – P. 34–44. – DOI: 10.15587/1729-4061.2021.237873.

96 Мехтиев А. Д., Бузяков Р. Р., Ким П. М., Алькина А. Д. Исследование параметров индукционного электровакуумного нагревателя парового электрообогревателя низкого давления // Труды университета. – 2021. – № 3(84). – С. 262–267. – DOI: 10.52209/1609-1825_2021_3_262.

97 Мехтиев А. Д., Бузяков Р. Р., Шапенова З. Р. Паровой электрообогреватель низкого давления // Вестник Торайгыров университета. Энергетическая серия. – 2022. – № 3. – С. 123–134. – DOI: 10.48081/SYOY6805.

98 Mekhtiyev A. D., Buzyakov R. R. A low-pressure steam electric heater as the basis of a new generation autonomous heating system // The Bulletin of KazATC. – 2023. – № 5(128). – P. 474–481. – DOI: 10.52167/1609-1817-2023-128-5-474-481.

99 Buzyakov R. R., Mekhtiyev A. D., Neshina Ye. G., Alkina A. D., Bilichenko A. P. Studying characteristics of the heat pipe of a low-pressure steam electric heater with different types of heaters // Eurasian Physical Technical Journal. – 2025. – Vol. 22, No. 4(54). – P. 46–52. – DOI: 10.31489/2025N4/46-52.

100 Buzyakov R., Mekhtiyev A., Yurchenko A., Alpysbayeva N., Bilichenko A. Efficiency of the Building Heating System with the Use of Low-pressure Steam Electric Heaters // Труды университета (НАО «Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова»). – 2025. – № 4 (101). – С. 435–441. – DOI: 10.52209/1609-1825_2025_4_435.

101 Дульнев Г. Н. Теория тепло- и массообмена : учебное пособие. – СПб. : НИУ ИТМО, 2012. – 195 с.

102 Фокин В. М., Бойков Г. П., Видин Ю. В. Основы энергосбережения в вопросах теплообмена. – М. : Издательство Машиностроение-1, 2005. – 192 с.

103 Об утверждении Правил устройства электроустановок: приказ Министра энергетики Республики Казахстан от 20 марта 2015 года № 230 // Информационно-правовая система нормативных правовых актов Республики Казахстан «Әділет». – URL: <https://adilet.zan.kz/rus/docs/V1500010851>.

104 Об утверждении Правил технической эксплуатации электроустановок потребителей: приказ Министра энергетики Республики Казахстан от 30 марта 2015 года № 246 // Информационно-правовая система нормативных правовых актов Республики Казахстан «Әділет». – URL: <https://adilet.zan.kz/rus/docs/V1500010949>.

105 ГОСТ Р 8.585–2001. Государственная система обеспечения единства измерений. Термопары. Номинальные статические характеристики преобразования. – М. : ИПК Издательство стандартов, 2002.

106 ГОСТ 34100.3–2017/ISO/IEC Guide 98-3:2008. Неопределенность измерения. Часть 3. Руководство по выражению неопределенности измерения. – М. : Стандартиформ, 2017.

107 Обогреватель масляный МИНИ-5, 500 Вт, 5 секций, термостат, TDM, арт. SQ2501-0907 [Электронный ресурс] // TDM ELECTRIC : официальный сайт. – URL: <https://tdme.ru/product/SQ2501-0907>.

108 № 10146. Радиатор отопления с индукционным нагревателем: патент Республики Казахстан на полезную модель / Мехтиев А.Д., Алькина А.Д., Мехтиев Р.А., Нешина Е.Г., Югай В.В., Бузяков Р.Р.; патентообладатель Алькина К.Ю. – Заявка № 2024/1530.2 от 25.11.2024; опубл. 31.01.2025, бюл. № 5.

109 № 63992. Компьютерная 3D-модель энергоэффективного парового электровакуумного нагревателя (ПЭН) для бытового и промышленного отопления: свидетельство о внесении сведений в Государственный реестр прав на объекты, охраняемые авторским правом, Республики Казахстан / Бузяков Р.Р., Мехтиев А.Д., Алькина А.Д. – Дата создания объекта 05.11.2025; дата регистрации 07.11.2025.

110 Тариф ТОО «Қарағанды Жарық» по передаче электрической энергии на период с 1 июля 2025 г. по 30 июня 2026 г.: 11,42 тенге без учета НДС за 1 кВт·ч [Электронный ресурс]. – URL: <https://k-zharyk.kz/ru/node/178>.

111 ТОО «Теплотранзит Караганда». Тариф на услуги реализации тепловой энергии [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.teplotranzit.kz/ru/dlya-potrebitelya/tarif>.

112 Analog Devices / Maxim Integrated. DS18B20 Programmable Resolution 1-Wire Digital Thermometer: Datasheet [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/datasheets/ds18b20.pdf>.

113 ГОСТ 8.417–2024. Государственная система обеспечения единства измерений. Единицы величин. – Действует в Республике Казахстан с 01.06.2025. – URL: <https://new-shop.ksm.kz/catalog/document/75468/>.

114 ГОСТ 29322–2014 (IEC 60038:2009). Напряжения стандартные. – Действует в Республике Казахстан с 01.01.2016. – URL: <https://new-shop.ksm.kz/catalog/document/60169/>.

115 Об утверждении Правил техники безопасности при эксплуатации электроустановок потребителей: приказ Министра энергетики Республики Казахстан от 19 марта 2015 года № 222 // Информационно-правовая система нормативных правовых актов Республики Казахстан «Әділет». – URL: <https://adilet.zan.kz/rus/docs/V1500010889>.

116 Ibrayeva G., Bulatbayeva Y., Sarsikeyev Y. Building an adaptive hybrid model for short-term prediction of power consumption using a neural network // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2022. – Vol. 2, No. 8(116). – P. 6–12. – DOI: 10.15587/1729-4061.2022.254477.

117 Konyrova M., Kumyzbayeva S., Kadylbekkyzy E., Stoyak V. Analysis of Direct Load Control in Smart Grids by using Teletraffic Theory // The 7th International Conference on Engineering & MIS 2021 (ICEMIS 2021). – ACM International Conference Proceeding Series. – 2021. – Article No. 6. – P. 1–3. – DOI: 10.1145/3492547.3492571.

118 Akimzhanov T., Sarsikeyev Y., Zhantlessova A., Zhumazhanov S., Baydulla Zh., Issabekova B., Issabekov Zh., Mekhtiyev A., Neshina Y. Identifying the influence of the system and mode characteristics on the power loss mode based in 110 kV power grids // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2023. – Vol. 6, No. 8(126). – P. 6–14. – DOI: 10.15587/1729-4061.2023.292253.

119 Исабеков Ж. Б., Исабекова Б. Б., Жантлесова А. Б., Акимжанов Т. Б., Нурмаганбетова Г. С. Разработка программного обеспечения для расчета потерь электроэнергии для сетевых компаний // Труды университета. – 2025. – № 3(100). – С. 407–413. – DOI: 10.52209/1609-1825_2025_3_407.

120 СН РК 4.02-01-2011. Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха. Строительные нормы Республики Казахстан. – URL: https://prg.kz/document/?doc_id=35664024.

121 СН РК 2.04-07-2022. Тепловая защита зданий. Строительные нормы Республики Казахстан. – URL: https://prg.kz/document/?doc_id=31741316.

122 СП РК 2.04-107-2022. Тепловая защита зданий. Свод правил Республики Казахстан. – URL: https://prg.kz/document/?doc_id=39838250.

123 Об утверждении Гигиенических нормативов к физическим факторам, оказывающим воздействие на человека: приказ Министра здравоохранения Республики Казахстан от 16 февраля 2022 года № ҚР ДСМ-15, с изменениями и дополнениями // Информационно-правовая система нормативных правовых актов Республики Казахстан «Әділет». – URL: <https://adilet.zan.kz/rus/docs/V2200026831>.

124 ГОСТ 12.1.005–88. Система стандартов безопасности труда. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны. – Применяется на территории Республики Казахстан. – URL: <https://newshop.ksm.kz/catalog/document/16876/>.

125 ГОСТ 147–2013 (ISO 1928:2009). Топливо твердое минеральное. Определение высшей теплоты сгорания и расчет низшей теплоты сгорания. – Действует в Республике Казахстан с 01.05.2015. – URL: https://newshop.ksm.kz/catalog/GOST_147-2013_%28ISO_1928%3A2009%29/.

126 ТОО «Қарағанды Жарық». Действующие цены по энергоснабжению для потребителей г. Караганды [Электронный ресурс]. – URL: <https://k-zharyk.kz/ru/node/329>.

127 Шарипов Р. Ж., Ержанов С. Е. Проблемы энергоэффективного строительства в Республике Казахстан и разработка методики определения энергоэффективности зданий и сооружений // ҚазБСҚА Хабаршысы. – 2020. – № 3(77). – С. 189–198. – DOI: 10.51488/1680-080X/2020.3-26.

128 Shevyakova A., Petrenko Y., Koshebayeva G., Ulybyshev D. Peculiarities of Housing and Communal Services and the Difficulties of Implementing Energy-Saving Technologies: The Case of Kazakhstan // Energies. – 2022. – Vol. 15, No. 20. – Article 7576. – DOI: 10.3390/en15207576.

129 Балтин А. Т., Бердалиев А. Д., Исенов С. С., Шерьязов С. К., Обухов С. Г. Повышение энергоэффективности распределительных сетей 20 кВ с использованием средств компенсации реактивной мощности с управлением на базе искусственного интеллекта // Труды университета. – 2025. – № 3(100). – С. 393–399. – DOI: 10.52209/1609-1825_2025_3_393.

130 Материалы обследования производственного цеха площадью 840 м² в г. Караганде: обмерная схема 56×15 м, фотофиксация, параметры ворот, окон, кровли, вентиляции, офисно-бытового блока, расход угля и эксплуатационные данные объекта. – Караганда, 2025.

131 Котел КВр-0.3 твердотопливный угольный: технические характеристики [Электронный ресурс] // КВЗР. – URL: <https://www.kvzr.ru/boiler-kvr-03.html>.

132 Вентилятор осевой ВО 06-300 №4: технические характеристики [Электронный ресурс] // VEM.KZ. – URL: <https://vem.kz/ventilyacionnoe-oborudovanie/ventilyatory-osevye/ventilyator-osevoy-vo-06-300-4/>.

**Сравнительная оценка основных групп электротехнических нагревательных устройств по
электроэнергетическим, эксплуатационным, нормативным и конструктивно-теплотехническим признакам**

Таблица А.1 – Электроэнергетические, эксплуатационные и нормативные признаки электротехнических нагревательных устройств

Тип устройства	Характер электрической нагрузки	Регулирование и автоматизация	Влияние на питающую сеть	Электробезопасность, нормативная оценка и область применения
ТЭНовые водяные котлы и водонагреватели	Преимущественно активная нагрузка; потребляемая мощность определяется сопротивлением нагревательного элемента и напряжением питания.	Термостаты, секционное включение, контакторы, твердотельные реле и силовые контроллеры [50; 64–65].	Формируют ступенчатые изменения активной мощности; при частой коммутации требуется оценка колебаний напряжения и режима аппаратов защиты.	Требуют водяного контура и гидравлической обвязки. Системы центрального отопления не относятся к области ГОСТ ИЕС 60335-2-30; общие требования безопасности оцениваются по ГОСТ ИЕС 60335-1 в пределах применимости [46–47].
Электроконвекторы	Преимущественно активная нагрузка с периодическим включением и отключением по термостату.	Термостатное зональное управление, электронные регуляторы, возможна работа через контроллеры [40; 64–65].	Обычно создают ступенчатые изменения активной мощности; влияние на сеть определяется суммарной установленной мощностью и режимом одновременного включения.	Входят в область ГОСТ ИЕС 60335-2-30; нормируются доступные поверхности и защитные элементы. Применяются для локального и дополнительного отопления помещений [46].
Тепловентиляторы	Активная нагревательная нагрузка с дополнительной нагрузкой	Ступенчатое или термостатное управление; требуется учет режима	Возможны кратковременные пусковые эффекты электродвигателя и	Входят в область ГОСТ ИЕС 60335-2-30; для тепловентиляторов установлены дополнительные требования к

	электродвигателя вентилятора.	вентилятора, шума и защит от перегрева.	ступенчатые изменения активной мощности.	нагреву, устойчивости и огнестойкости. Рациональны для кратковременного быстрого обогрева [46].
Масляные радиаторы и жидкостные комнатные обогреватели	Преимущественно активная нагрузка; тепловая инерция прибора сглаживает температуру поверхности, но не устраняет электрические циклы включения.	Термостатное управление; динамичность регулирования ограничена теплоемкостью внутреннего теплоносителя и корпуса.	Воздействие на сеть обычно связано со ступенчатым включением активной мощности; способность к быстрому изменению нагрузки ограничена.	Входят в область ГОСТ ИЕС 60335-2-30 как радиаторы с жидким теплоносителем. Используются для дополнительного отопления жилых и служебных помещений [46].
Электрические панельные обогреватели	Преимущественно активная нагрузка, распределенная по площади панели.	Совместимы с термостатами, твердотельными реле и программным управлением [64–65].	При релейном управлении формируют ступени активной мощности; при силовом регулировании требуется оценка формы тока и электромагнитной совместимости.	Входят в область ГОСТ ИЕС 60335-2-30; температура поверхности оценивается по допустимым превышениям. Применяются для локального настенного и потолочного отопления [46].
Электродные устройства (ионные котлы)	Характер нагрузки зависит от электропроводности, температуры и состава теплоносителя; рабочая жидкость является частью электрической цепи.	Требуются контроль электропроводности, водоподготовка, защита от токов утечки, заземление и контроль коррозии [53–54].	Параметры нагрузки могут изменяться с температурой и составом теплоносителя; требуется надежная защита и контроль режима питания.	Требуют водяного контура и контролируемого состава теплоносителя. Общие требования электробезопасности оцениваются по ГОСТ ИЕС 60335-1 в пределах применимости [47].
Индукционные водонагреватели	Нагрузка имеет активную и реактивную составляющие; требуется	Регулирование мощности выполняется через силовой	Могут влиять на питающую сеть через реактивную мощность,	Отсутствие ТЭНа в воде не отменяет требований к изоляции, доступным частям и защите.

	учет коэффициента мощности, параметров силового преобразователя и магнитной системы [55].	преобразователь, коммутацию или изменение режима работы; возможна компенсация реактивной мощности.	гармонические составляющие и режим силового преобразователя; требуется оценка качества электрической энергии.	Применяются преимущественно в водонагреве и отоплении с гидравлической инфраструктурой [47; 55].
Инфракрасные излучатели	Преимущественно активная нагрузка; для ламповых излучателей возможны повышенные пусковые токи.	Совместимы с термостатами, силовыми контроллерами, плавным пуском и ограничением тока [64–65].	При фазоимпульсном регулировании возможно искажение формы тока; при групповой работе требуется оценка суммарной мощности и качества электроэнергии.	Радиационные обогреватели входят в область ГОСТ ИЕС 60335-2-30; нормируются доступные поверхности и защитные решетки. Рациональны для рабочих зон и помещений периодического использования [46; 56].
Кабельные системы отопления	Распределенная активная нагрузка, установленная в строительной конструкции.	Терморегуляторы, датчики температуры пола или воздуха, защита от перегрева и повреждения.	Влияние на сеть определяется суммарной установленной мощностью и цикличностью включения; при больших площадях требуется учет выделенной мощности объекта.	ГОСТ ИЕС 60335-2-30 не распространяется на обогревательные кабели; применяются специализированные требования, включая ИЕС 60800. Используются для комфортного подогрева пола и распределенного отопления [46; 68].
Пленочные и гибкие листовые нагреватели	Распределенная активная нагрузка тонкого нагревательного элемента.	Электронные регуляторы, температурные датчики, защита от локального перегрева и нарушения теплового контакта.	Возможны локальные перегрузки при неправильном монтаже; при большом числе секций требуется учет	ГОСТ ИЕС 60335-2-30 не распространяется на гибкие листовые нагревательные элементы; применяются требования ГОСТ ИЕС 60335-2-96. Используются для локального

			суммарной мощности и режима коммутации.	обогрева поверхностей и зон [46; 59].
Аккумуляционные электрические системы	Преимущественно активная нагрузка, пригодная для переноса потребления во времени.	Таймеры, программные регуляторы, управление по тарифу, температуре и графику потребления [24; 44; 60].	Могут сглаживать график потребления при правильном управлении, но создают интервалы повышенной нагрузки при зарядке накопителя.	Для аккумуляционных комнатных обогревателей применяются требования ГОСТ IEC 60335-2-61. Рациональны при наличии тарифных или режимных условий для переноса нагрузки [69].
Парокапельные / теплотрубные электрические отопительные приборы	Преимущественно активная нагрузка при ТЭНовом теплоподводе; при индукционном варианте возможны активная и реактивная составляющие, зависящие от силового преобразователя и магнитной системы [55; 84–85].	Термостатное, ступенчатое или секционное управление; расширенная наблюдаемость температурных и электрических параметров зависит от конкретного исполнения и системы управления [81; 84–85; 89].	При ТЭНовом исполнении воздействие связано преимущественно со ступенчатым включением активной мощности; при индукционном теплоподводе требуется оценка коэффициента мощности, гармоник и режима силового преобразователя [55; 64–67].	Рассматриваются как локальные электрические отопительные приборы; безопасность определяется защитой от доступа к токоведущим частям, допустимым нагревом доступных поверхностей, герметичностью полости и корректной работой цепей управления [46–47; 84–85].
Тепловые насосы	Компрессорная электрическая нагрузка; возможны пусковые токи, реактивная составляющая и изменение профиля потребления [61–63].	Релейное или инверторное управление компрессором, автоматика хладагента, насосов и вентиляторов.	Могут влиять на распределительную сеть через пусковые токи, коэффициент мощности и гармоники инверторных приводов; требуется проверка условий подключения.	Оцениваются по стандартам соответствующего оборудования; не относятся к комнатным обогревателям прямого действия и являются смежной категорией электротеплоснабжения [61–63].

Примечание – Составлено автором по источникам [24; 40; 44–69; 72; 81; 84–90]

Таблица А.2 – Конструктивно-теплотехнические признаки электротехнических нагревательных устройств

Тип устройства	Способ электротеплового преобразования	Рабочая среда	Инерционность	Равномерность температурного поля
ТЭНовые водяные котлы и водонагреватели	Нагрев сопротивлением проводникового или полупроводникового элемента; косвенный нагрев жидкого теплоносителя через оболочку ТЭНа или теплообменную поверхность [50–51]	Жидкость	Средняя; зависит от объема теплоносителя, типа камеры нагрева, циркуляции и состояния нагревательной поверхности	Определяется циркуляцией теплоносителя, конструкцией теплообменника и системой распределения теплоты; требуется водяной контур
Электроконвекторы	Нагрев воздуха от элемента сопротивления при естественной конвекции [40; 46; 52]	Воздух	Низкая–средняя	Зависит от циркуляции воздуха, расположения прибора, теплопотерь и конфигурации помещения
Тепловентиляторы	Нагрев воздуха элементом сопротивления с принудительным обдувом [40; 46]	Воздух	Низкая	Обеспечивают быстрый прогрев воздушного объема, но температурное поле зависит от направления струи и режима работы вентилятора
Масляные радиаторы и жидкостные комнатные обогреватели	Нагрев внутреннего жидкого теплоносителя элементом сопротивления с последующей теплоотдачей через корпус [46; 52]	Жидкость внутри корпуса / воздух	Повышенная из-за теплоемкости корпуса и внутреннего теплоносителя	Температура поверхности сглаживается теплоемкостью жидкости, однако выход на режим замедлен

Электрические панельные обогреватели	Нагрев панели элементом сопротивления с лучисто-конвективной теплоотдачей [40; 46; 57]	Твердое тело / воздух	Низкая–средняя	Зависит от площади панели, расположения, температуры поверхности и условий теплообмена в помещении.
Электродные устройства (ионные котлы)	Нагрев электропроводной жидкости за счет ее электрического сопротивления; рабочая жидкость входит в электрическую цепь [24; 53–54].	Жидкость.	Низкая–средняя	Определяется водяным контуром, циркуляцией теплоносителя и стабильностью его состава
Индукционные водонагреватели	Электромагнитная индукция и вихревые токи в металлическом теплообменнике [55]	Жидкость через металлический теплообменник	Средняя	Зависит от конструкции каналов, площади теплообмена и организации циркуляции теплоносителя
Инфракрасные излучатели	Передача теплоты объектам преимущественно инфракрасным излучением [56]	Твердое тело / воздух	Низкая.	Имеют выраженную локальность действия; распределение теплового потока зависит от геометрии, расстояния, ориентации и свойств облучаемой поверхности.
Кабельные системы отопления	Распределенный нагрев сопротивлением в конструкции пола, стены или потолка [58; 68]	Твердое тело	Средняя–высокая при массивной строительной конструкции.	При корректной укладке обеспечивают равномерную теплоотдачу по площади, но скорость реакции ограничена тепловой инерцией конструкции.
Пленочные и гибкие листовые нагреватели	Распределенный нагрев сопротивлением гибкого или тонкопленочного элемента [59]	Твердое тело.	Низкая–средняя.	Зависит от площади нагревателя, способа монтажа, теплового контакта и условий теплоотдачи.
Аккумуляционные электрические системы	Нагрев теплоаккумулирующей массы или бака с последующей отдачей накопленной теплоты [24; 44; 60]	Твердое тело или жидкость	Высокая	Зависит от конструкции накопителя и способа отдачи теплоты; оперативная регулируемость ограничена.

Парокапельные / теплотрубные электрические отопительные приборы	Электрический теплоподвод к зоне испарения с последующим переносом теплоты за счет испарения, движения пара, конденсации и возврата конденсата в герметичной двухфазной полости [72; 81; 84–85; 89].	Рабочее тело в герметичной полости / воздух помещения	Низкая–средняя; зависит от количества рабочего тела, начального остаточного давления, геометрии секции и внешней теплоотдачи	Двухфазный элемент повышает равномерность распределения теплоты по корпусу; фактическая температура поверхности зависит от конструкции, оребрения, кожуха, мощности и системы управления.
Тепловые насосы	Термодинамический цикл с хладагентом и компрессором; не являются устройствами прямого электротеплового преобразования [24; 61–63].	Хладагент + воздух или вода	Зависит от цикла, системы распределения теплоты и режима управления	Определяется воздушной или водяной системой отопления; рассматриваются как смежная категория электротеплоснабжения.

Примечание – Составлено автором по источникам [24; 40; 44–69; 72; 81; 84–90]

Таблица А.3 – Оценочная матрица соответствия групп устройств требованиям таблицы 1.1

Тип устройства	Т1 регулирование мощности	Т2 ограниченная инерционность	Т3 равномерная теплоотдача и поверхность	Т4 без внешнего водяного контура	Т5 наблюдаемость и автоматика	Т6 электробезопасность и качество потребления
ТЭНовые водяные котлы и водонагреватели	+	+/-	+/-	-	+	+
Электроконвекторы	+/-	+	+/-	+	+/-	+
Тепловентиляторы	+/-	+	-	+	+/-	+/-
Масляные радиаторы и жидкостные комнатные обогреватели	+/-	-	+	+	+/-	+

Тип устройства	T1 регулирование мощности	T2 ограниченная инерционность	T3 равномерная теплоотдача и поверхность	T4 без внешнего водяного контура	T5 наблюдаемость и автоматика	T6 электробезопас ность и качество потребления
Электрические панельные обогреватели	+ -	+ -	+ -	+	+ -	+
Электродные устройства (ионные котлы)	+ -	+ -	+ -	-	+	+ -
Индукционные водонагреватели	+ -	+ -	+ -	-	+	+ -
Инфракрасные излучатели	+ -	+	-	+	+ -	+ -
Кабельные системы отопления	+ -	-	+	+	+	+ -
Пленочные и гибкие листовые нагреватели	+ -	+ -	+ -	+	+ -	+ -
Аккумуляционные электрические системы	+ -	-	+ -	+ -	+	+
Парокапельные / теплотрубные электрические отопительные приборы	+ -	+	+ -	+	+ -	+ -
Тепловые насосы	+ -	+ -	+ -	+ -	+	+ -

Примечание – Обозначения в таблице А.3:

«+» – требование обеспечивается;

«+ -» – обеспечивается частично или при дополнительных условиях;

«-» – требование обычно нехарактерно для группы.

T1 – секционное или ступенчатое регулирование мощности;

T2 – ограниченная тепловая инерционность;

T3 – равномерная теплоотдача и ограничение температуры доступной поверхности;

T4 – работа без внешнего водяного контура;

T5 – наблюдаемость и совместимость с автоматическим контролем;

Т6 – электробезопасность и качество потребления.

При выставлении оценок приняты следующие правила. Оценка «+» присваивается, если соответствующее свойство характерно для типового исполнения группы без специальных мер; «+-» – если свойство достигается лишь частью исполнений либо при дополнительных условиях (выбор модели, внешние регуляторы, особые схемы включения); «-» – если свойство нехарактерно для группы в целом. По Т5 оценка «+» присваивается группам, типовое применение которых предполагает штатный регулятор с датчиками и интеграцию в систему автоматического управления; встроенный термостат без внешнего контроля параметров соответствует оценке «+-». По Т6 оценка «+» означает, что группа охвачена профильным стандартом безопасности и типовые схемы включения не требуют специальных мер по качеству электрической энергии; «+-» – что необходимы дополнительные мероприятия (оценка пусковых токов, гармоник, токов утечки, водоподготовка, оценка герметичности и режима силового преобразователя и т.п.). Для категорий, объединяющих разные исполнения (например, воздушные и водяные тепловые насосы, твердотельные и водяные аккумуляционные системы, парокапельные и теплотрубные приборы с ТЭНовым или индукционным теплоподводом), оценка отражает категорию в целом, поэтому отдельные исполнения могут соответствовать требованиям полнее, чем указано. Оценка носит обобщающий характер и не заменяет расчет конкретного исполнения. Строка «Парокапельные/теплотрубные электрические отопительные приборы» отражает обобщенное направление, к которому относится ПЭНД; ПЭНД не выделяется в таблице как самостоятельная группа, а рассматривается в диссертации как конкретное секционное исполнение, проверяемое расчетно и экспериментально в последующих главах.

Составлено автором по источникам [24; 40; 44–69; 72; 81; 84–90].

Детализация теплофизической и численной постановки ЭВТТ

Приложение Б содержит вспомогательные уравнения и проверки, которые подтверждают физическую состоятельность модели ЭВТТ, но не являются центральной частью электроэнергетической постановки главы.

Б.1 Балансы теплопереноса и фазового взаимодействия

Для движущейся сжимаемой среды исходной является энтальпийная форма баланса энергии:

$$\rho \frac{\partial h}{\partial t} + \rho \mathbf{v} \cdot \nabla h = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + q_v + \frac{Dp}{Dt} \quad (\text{Б.1})$$

где ρ – плотность среды, кг/м³; h – удельная энтальпия, Дж/кг; \mathbf{v} – вектор скорости, м/с; λ – теплопроводность, Вт/(м·К); T – температура, К; q_v – объемная плотность источника теплоты, Вт/м³; p – давление, Па; Dp/Dt – субстанциональная производная давления, Па/с.

В твердом корпусе скорость среды равна нулю, а тепловой поток определяется законом Фурье:

$$\mathbf{q} = -\lambda \nabla T \quad (\text{Б.2})$$

При $h \approx c_p T$ уравнение теплопроводности для корпуса и нагревательной вставки записывается как:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + q_v \quad (\text{Б.3})$$

Для жидкой и паровой фаз с конвективным переносом используется уравнение:

$$\rho c_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla T \right) = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + S \quad (\text{Б.4})$$

где S – источник или сток энергии, связанный с межфазным взаимодействием, Вт/м³.

Массовый расход пара связан с латентной частью теплового потока выражением:

$$\dot{m}_v = \frac{Q_{\text{lat}}}{h_{\text{fg}}} \quad (\text{Б.5})$$

где \dot{m}_v – массовый расход пара, кг/с; Q_{lat} – мощность, переносимая скрытой теплотой, Вт; h_{fg} – удельная теплота парообразования, Дж/кг.

На межфазной границе выполняется баланс массы и энергии:

$$\dot{m}''_{\text{ev}} + \dot{m}''_{\text{cond}} = 0 \quad (\text{Б.6})$$

$$q''_{\text{lat}} = \dot{m}'' h_{\text{fg}} \quad (\text{Б.7})$$

где \dot{m}'' – плотность межфазного массового потока, кг/(м²·с); q''_{lat} – плотность потока скрытой теплоты, Вт/м².

Распределение скрытой теплоты на рисунке Б.1 показано как балансово согласованная иллюстрация: интеграл по зоне испарения по модулю соответствует интегралу по зоне конденсации.

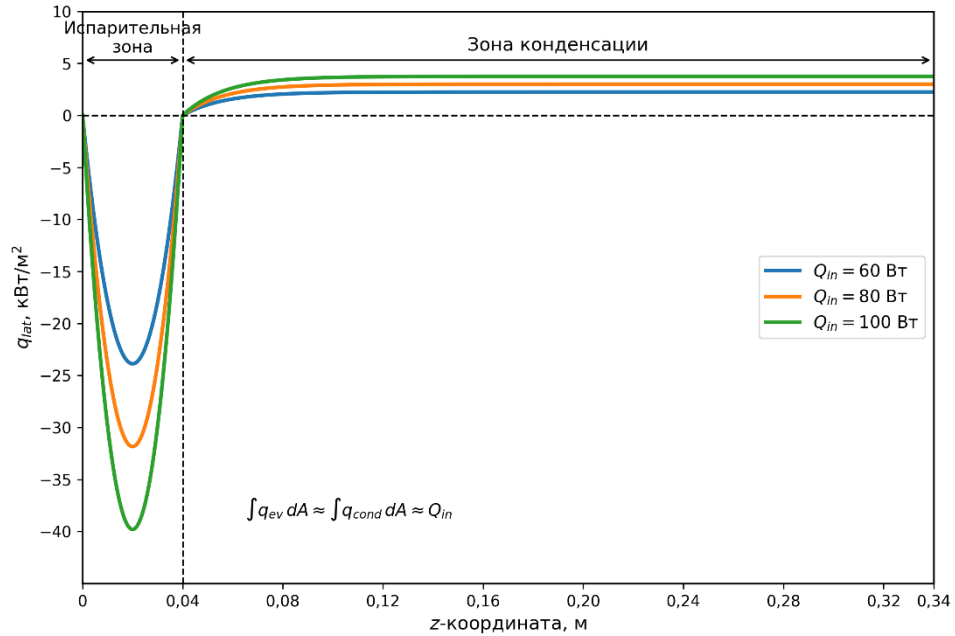


Рисунок Б.1 – Балансово согласованное распределение плотности потока скрытой теплоты фазового перехода вдоль оси ЭВТТ

Б.2 Гидродинамическая аппроксимация пара и возврата конденсата

Для оценки движения пара в круглом канале используется форма уравнения Хагена–Пуазейля:

$$\Delta p = 32 \frac{\mu_v L}{D_v^2} w_{v,avg} \quad (\text{Б.8})$$

$$Re_v = \frac{\rho_v w_{v,avg} D_v}{\mu_v} \quad (\text{Б.9})$$

где Δp – перепад давления, Па; μ_v – динамическая вязкость пара, Па·с; D_v – гидравлический диаметр парового канала, м; $w_{v,avg}$ – средняя скорость пара, м/с; Re_v – число Рейнольдса паровой фазы.

Возврат жидкой фазы в реальной ЭВТТ происходит по внутренней поверхности. В осесимметричной численной модели этот процесс заменен эквивалентным слоем, описываемым уравнением Бринкмана:

$$-\nabla p_l + \mu_l \nabla^2 \mathbf{u}_l - \frac{\mu_l}{K} \mathbf{u}_l + \rho_l \mathbf{g} = 0 \quad (\text{Б.10})$$

где p_l – давление жидкости, Па; μ_l – динамическая вязкость жидкости, Па·с; \mathbf{u}_l – скорость жидкой фазы, м/с; K – эквивалентная проницаемость слоя, м²; ρ_l – плотность жидкости, кг/м³; \mathbf{g} – ускорение свободного падения, м/с².

Параметры K и ε_{por} не являются геометрическими параметрами реального фитиля. Они задают сопротивление эквивалентного слоя и проверяются по устойчивости температурного поля, отсутствию сухих зон и слабой чувствительности интегральной теплоотдачи.

Б.3 Устойчивость результата при измельчении сетки и чувствительность к эквивалентной проницаемости

Проверка трактуется как проверка устойчивости результата, а не как строгая процедура доказательства сеточной независимости по GCI. Тип решателя, критерии сходимости и число элементов сетки зафиксированы в расчетном протоколе численной модели; в тексте главы приведены только интегральные результаты, необходимые для подтверждения балансовой согласованности расчета. Слабая чувствительность результата к диапазону $K = 10^{-12} - 10^{-10} \text{ м}^2$ объясняется тем, что в рассматриваемом режиме 80 Вт возврат конденсата не является лимитирующим процессом.

Таблица Б.1 – Проверка устойчивости результата при измельчении сетки при $Q_{in}^{test} = 80 \text{ Вт}$

Уровень разбиения сетки	$T_{max}, \text{ }^\circ\text{C}$	$T_{s,avg}, \text{ }^\circ\text{C}$	$Q_{out}, \text{ Вт}$	Изменение $T_{max}, \text{ }^\circ\text{C}$	Невязка $\delta_E, \%$
Грубая	188,3	187,5	82,4	–	3,0
Базовая	185,2	184,6	80,5	3,1	0,6
Уточненная	184,8	184,3	80,1	0,4	0,1

Таблица Б.2 – Чувствительность расчета к эквивалентной проницаемости слоя возврата

$K, \text{ м}^2$	$T_{max}, \text{ }^\circ\text{C}$	$Q_{out}, \text{ Вт}$	Сухие зоны	Комментарий
10^{-12}	186,5	80,0	нет	повышенное гидравлическое сопротивление возврату конденсата; незначительный локальный рост температуры в испарителе
10^{-11}	184,8	80,1	нет	базовый случай; стабильный температурный профиль, интегральные потоки сбалансированы
10^{-10}	184,5	80,1	нет	пониженное сопротивление; разница с базовым расчетом минимальна, возврат жидкости свободный

В основной электроэнергетической логике главы главным остается не значение K , а вывод о необходимости согласования активной мощности, площади теплоотдачи и допустимой температуры поверхности.

Б.4 Предварительная прочностная оценка корпуса

Для тонкостенного цилиндра ориентировочное окружное напряжение может быть оценено по выражению:

$$\sigma_\theta = \frac{pr}{\delta} \quad (\text{Б.11})$$

где σ_θ – окружное напряжение, Па; p – внутреннее давление, Па; r – расчетный радиус, м; δ – толщина стенки, м.

Для контрольной точки $p_{\text{sat}} = 1,14$ МПа, $r = 15,5$ мм и $\delta = 1$ мм получается:

$$\sigma_\theta = \frac{1,14 \cdot 10^6 \cdot 0,0155}{0,001} = 17,7 \cdot 10^6 \text{ Па} \approx 17,7 \text{ МПа} \quad (\text{Б.12})$$

Для рабочего диапазона $T_s \leq 90$ °С давление $p_{\text{sat}} \leq 0,070$ МПа, поэтому по той же формуле окружное напряжение не превышает примерно 1,1 МПа. При начальном вакуумировании наружное атмосферное давление около 0,1 МПа существенно ниже ориентировочного критического уровня потери устойчивости стенки для данной геометрии (порядка 8–9 МПа). Полная конструктивная проверка корпуса выполняется отдельно и должна учитывать материал, сварные швы, технологические допуски, испытательные режимы и требования к оборудованию, работающему под давлением.

Визуализация результатов численного моделирования ЭВТТ в COMSOL

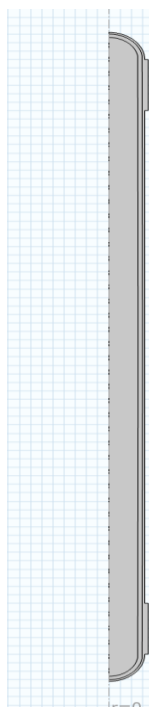


Рисунок В.1 – Расчетная область ЭВТТ в осесимметричной постановке COMSOL

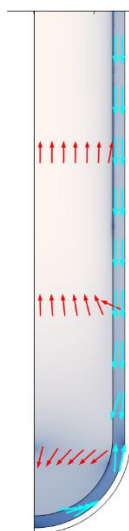


Рисунок В.2 – Локальное векторное поле в зоне теплоподвода



Рисунок В.3 – Локальное векторное поле в зоне теплоотвода

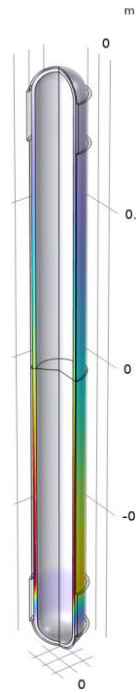


Рисунок В.4 – Распределение скорости жидкой фазы в эквивалентном слое возврата конденсата

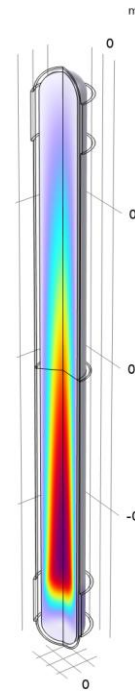


Рисунок В.5 – Распределение скорости паровой фазы в центральной полости ЭВТТ

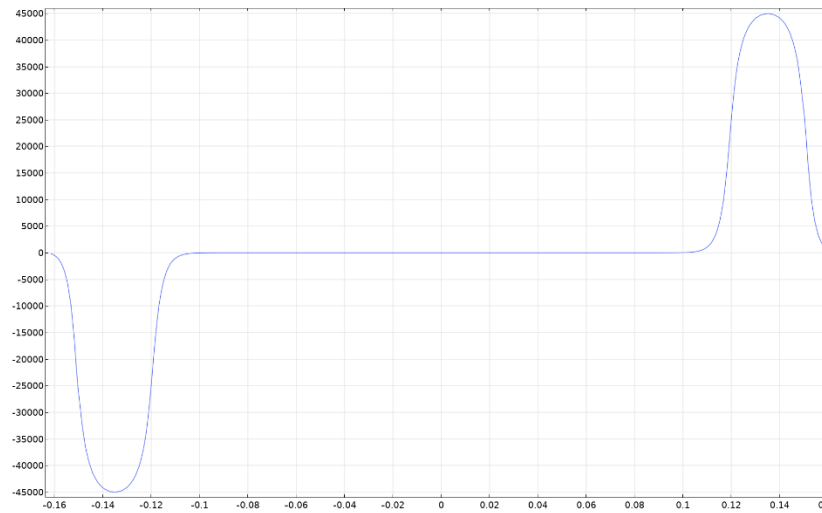


Рисунок В.6 – Распределение плотности потока скрытой теплоты фазового перехода вдоль оси ЭВТТ



Рисунок В.7 – Качественная визуализация квазиизотермического насыщенного режима

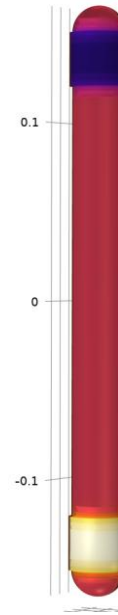


Рисунок В.8 – Трехмерная визуализация температурного поля насыщенного режима

для выполнения измерений и обработки данных предусматривается использование секции парового электрообогревателя низкого давления.

В рамках выполнения лабораторной работы предусматривается изучение студентами устройства локального электротехнического нагревательного устройства с двухфазным теплопереносом, измерение напряжения, тока, активной мощности и температуры поверхности, построение температурно-временных зависимостей, определение удельной электротепловой нагрузки $q = P/(\pi DL)$, а также анализ влияния мощности, геометрических параметров, массы секции и количества рабочего тела на температурный режим.

Результаты диссертационного исследования предусматриваются для использования при подготовке методических указаний, протокола измерений, контрольных вопросов и заданий для обработки опытных данных.

Освоение лабораторной работы направлено на формирование у студентов практических навыков экспериментального исследования электротехнических нагревательных устройств, оценки энергетических характеристик, построения температурных графиков, интерпретации электротепловых режимов и соблюдения требований безопасной работы с электротехническим оборудованием.

2. Лабораторная работа «Расчет параметров локального электротехнического нагревательного устройства как управляемой электротепловой нагрузки».

Указанная лабораторная работа внедряется в лабораторный практикум дисциплины «Электромеханика и электротехническое оборудование» в рамках раздела, связанного с электронагревательными установками.

Лабораторная работа направлена на закрепление результатов диссертационной работы, связанных с инженерной методикой выбора параметров локального электротехнического нагревательного устройства, оценкой теплового баланса, электротехническим обоснованием такой установки как управляемой электротепловой нагрузки и определением области ее рационального применения. Для закрепления методики предусматривается использование частного примера секционного парового электрообогревателя низкого давления.

В ходе лабораторной работы предусматривается выполнение студентами расчета тепловой нагрузки помещения, определение требуемой активной электрической мощности, числа секций или модулей, удельной электротепловой нагрузки и необходимой площади теплоотдающей поверхности, проверка допустимого температурного режима, составление упрощенного энергетического баланса, а также выбор элементов температурного мониторинга, коммутации, автоматического управления и электрической защиты.

Дополнительно предусматривается рассмотрение вариантов трубчатого и индукционного электрического теплопровода как способов организации электротермического нагрева, а также условий применения локальных электротехнических источников теплоты в автономных, реконструируемых, зональных и гибридных схемах электротеплоснабжения.

Выполнение лабораторной работы направлено на формирование у студентов навыков расчета и выбора параметров локальных электротехнических источников теплоты, оценки режимов потребления активной мощности, анализа влияния конструктивных параметров на температурный режим и принятия инженерных решений при проектировании и эксплуатации электротехнического нагревательного оборудования.

Внедрение указанных материалов направлено на обеспечение связи учебного процесса с результатами современного научного исследования, расширение содержания разделов дисциплины, посвященных электротермическим установкам, индукционному нагреву и электронагревательному оборудованию, а также на формирование у обучающихся компетенций в области анализа, расчета, экспериментального исследования и эксплуатации энергоэффективных электротехнических нагревательных устройств.

Настоящий акт не является основанием для предъявления финансовых претензий к НАО «Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова».

Председатель учебно-методического совета, декан факультета энергетики, автоматике и телекоммуникаций, к.т.н., асс. проф.



Ф.Н. Булатбаев

Зав. кафедрой автоматизации производственных процессов, PhD



В.В. Югаев

Председатель комитета по обеспечению качества факультета энергетики, автоматике и телекоммуникаций



О.В. Алдошина

Научный консультант, к.т.н., профессор



А.Д. Мехтиев

Акт внедрения на предприятии

Товарищество с ограниченной ответственностью «GLOBAL LIGHT LTD»

**АКТ
о внедрении результатов диссертационной работы**

Настоящий акт составлен о том, что в ТОО «GLOBAL LIGHT LTD» успешно проведена апробация прототипа парового электрообогревателя низкого давления (ПЭНД), разработанного в рамках диссертационной работы Бузякова Рустама Равильевича на тему: «Исследование и разработка энергоэффективного электротехнического нагревательного устройства в качестве альтернативного источника тепловой энергии».

В ходе апробации рассмотрены работоспособность прототипа ПЭНД в демонстрационном режиме, конструктивное решение на основе электровакуумной тепловой трубки, возможность локального и зонального догрева, а также подходы к мониторингу, автоматическому управлению и электрической защите.

По результатам апробации прототип ПЭНД показал положительные результаты: подтверждена работоспособность конструктивно-технологического решения и практическая перспективность применения устройства как локального управляемого электротехнического источника тепловой энергии.

ТОО «GLOBAL LIGHT LTD» положительно оценивает результаты диссертационной работы и считает целесообразным продолжить проработку вопроса о потенциальном применении ПЭНД на объектах предприятия после выбора конкретного объекта, уточнения технических условий подключения и отдельной инженерной оценки.

Положительная апробация и дальнейшее рассмотрение ПЭНД на данном этапе не предусматривают финансовых обязательств для ТОО «GLOBAL LIGHT LTD» и иных сторон, а также не являются договором, заказом, обязательством по закупке, производству, серийному выпуску или монтажу ПЭНД. Дальнейшие работы могут выполняться только на основании отдельных договоренностей.

Настоящий акт подтверждает успешную апробацию прототипа ПЭНД и положительное рассмотрение результатов диссертационной работы для возможного практического применения.

Директор ТОО «GLOBAL LIGHT LTD»



Ж. Әріпұлы

Письмо о намерениях по выпуску ПЭНД

ЖШС «SILUMIN OF QAZAQSTAN (СИЛУМИН ОФ КАЗАХСТАН)»

БИН 210 940 022 224

Казахстан, Караганда облысы, Бұхар жырау ауданы, Доскей ауылдық округі, Есеттік квартал 028, 1662 ғимараты, 1 блок

ИИК KZ14 9652 7F00 0927 9208

АО «Forte Bank»

БИК IRTYKZKA



SILUMIN OF QAZAQSTAN

ТОО «SILUMIN OF QAZAQSTAN (СИЛУМИН ОФ КАЗАХСТАН)»

БИН 210 940 022 224

Карагандинская область, Бұхар-Жырауский район, с. Доскей, учетный квартал 028, здание 1662, корпус 1

ИИК KZ14 9652 7F00 0927 9208

АО «Forte Bank»

БИК IRTYKZKA

**Докторанту НАО «Карагандинский
технический университет
имени Абылкаса Сагинова»
Бузякову Р.Р.**

Исх письмо № 86 от 01 июня 2026 года

Товарищество с ограниченной ответственностью «Silumin of Qazaqstan (Силумин оф Казахстан)» (далее – Silumin of Qazaqstan), специализирующееся на производстве радиаторов отопления, подтверждает, что представителями предприятия были рассмотрены результаты научно-исследовательской работы, посвященной разработке энергоэффективного электротехнического нагревательного устройства на основе электровакуумной тепловой трубки. В ходе ознакомления рассмотрены конструктивно-технологические решения разработанного радиатора, принцип его работы, возможность применения электровакуумной тепловой трубки в качестве теплопередающего узла, а также перспективы адаптации изделия к условиям промышленного изготовления отопительных приборов.

По результатам предварительного рассмотрения Silumin of Qazaqstan» выражает заинтересованность в дальнейшем изучении возможности изготовления опытных образцов и последующего выпуска радиатора отопления на основе электровакуумной тепловой трубки при условии положительных результатов технической, технологической, эксплуатационной и экономической оценки.

В дальнейшем предприятие считает возможным рассмотреть вопросы конструкторской и технологической документации, оценки производственной применимости решения, изготовления опытного образца или опытной партии, а также перспектив последующего промышленного выпуска изделия.

Настоящее письмо носит предварительный характер и не создает для Silumin of Qazaqstan финансовых, инвестиционных, имущественных, производственных или иных обязательств. Все вопросы, связанные с финансированием, изготовлением опытных образцов, передачей документации, использованием результатов интеллектуальной деятельности, распределением затрат и последующим выпуском продукции, подлежат отдельному согласованию и оформлению самостоятельными письменными договорами.

Silumin of Qazaqstan подтверждает, что рассмотрение указанной разработки представляет интерес с точки зрения возможного расширения номенклатуры отопительных приборов и применения новых теплопередающих решений в радиаторах отопления.

**Генеральный Директор
ТОО «Silumin of Qazaqstan
(Силумин оф Казахстан)»**



Н.А. Жұмабек

Свидетельство о внесении сведений в Государственный реестр прав на объекты, охраняемые авторским правом


 ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ РЕСПУБЛИКА КАЗАХСТАН

СВИДЕТЕЛЬСТВО

О ВНЕСЕНИИ СВЕДЕНИЙ В ГОСУДАРСТВЕННЫЙ РЕЕСТР ПРАВ НА ОБЪЕКТЫ, ОХРАНЯЕМЫЕ АВТОРСКИМ ПРАВОМ

№ 63992 от «7» ноября 2025 года

Фамилия, имя, отчество, (если оно указано в документе, удостоверяющем личность) автора (ов):
БУЗЯКОВ РУСТАМ РАВИЛЬЕВИЧ, Мехтаев Али Джаванширович,
Альпина Алия Даулетхановна

Вид объекта авторского права: произведение литературы

Название объекта: Компьютерная 3D-модель энергоэффективного парового электровакуумного нагревателя (ПЭН) для бытового и промышленного отопления

Дата создания объекта: 05.11.2025





Квест-тестирование: <http://www.kazpatent.kz/ru>
 Авторские права Бюро в сфере интеллектуальной собственности: <https://copyright.kazpatent.kz>
 Подлинность документа возможно проверить на сайте kazpatent.kz
 в разделе «Авторское право» <https://copyright.kazpatent.kz>

Подписано ЭЦП
С. Ахметов