

АННОТАЦИЯ
диссертационной работы Бузякова Рустама Равильевича
на тему «Исследование и разработка энергоэффективного
электротехнического нагревательного устройства как
альтернативного источника тепловой энергии» представленной
на соискание степени доктора философии (PhD)
по специальности 6D071800 – «Электроэнергетика»

Диссертационная работа посвящена исследованию и разработке энергоэффективного электротехнического нагревательного устройства на основе парового электрообогревателя низкого давления (ПЭНД) с электровакуумной тепловой трубкой гравитационного типа, предназначенного для локального автономного, децентрализованного и гибридного электротеплоснабжения потребителей.

Актуальность исследования обусловлена необходимостью повышения энергоэффективности конечного использования электрической энергии, развития управляемых электротепловых нагрузок и снижения зависимости локального теплоснабжения от твердого топлива. В условиях роста электрических нагрузок, износа энергетической инфраструктуры, расширения низкоуглеродной генерации и экологических ограничений возрастает потребность в автономных, децентрализованных и гибридных системах теплоснабжения. Перспективным направлением является применение электротехнических нагревательных устройств с внутренним двухфазным теплопереносом, обеспечивающих преобразование активной электрической мощности в тепловую энергию непосредственно в месте потребления. Вместе с тем для парового электрообогревателя низкого давления на основе электровакуумной тепловой трубки недостаточно разработаны физико-математическое, экспериментальное и электроэнергетическое обоснования его работы как энергоэффективного и управляемого электротехнического нагревательного устройства. Это определяет актуальность разработки и исследования ПЭНД как альтернативного источника тепловой энергии для локального автономного, децентрализованного и гибридного электротеплоснабжения.

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

Задачи исследования:

– 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.

Методы исследования:

В основе методологии исследования лежит комплекс научных методов, направленных на изучение электротеплового преобразования, фазового теплопереноса и формирования температурного поля в электровакуумной тепловой трубке ПЭНД. В частности, применены следующие методы:

- аналитические и теоретические методы: проведён анализ современного состояния электрического теплоснабжения, электротехнических нагревательных устройств, свойств тепловых труб и двухфазных термосифонов, а также ограничений известных электровакуумных нагревательных устройств отопительного назначения;

- методы физико-математического и численного моделирования: разработана модель, учитывающая 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 методы: проведены стендовые исследования опытных образцов ПЭНД с контролем электрической мощности, напряжения, тока, температуры, остаточного давления, времени и параметров окружающей среды;

- методы статистической обработки и верификации: выполнено определение средних значений, доверительных интервалов, регрессионных зависимостей, погрешностей и сопоставление расчетных и экспериментальных результатов.

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.

Научная новизна диссертации:

- 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;

- определены условия устойчивой работы двухфазного цикла при заданных значениях электрической мощности, объема рабочего тела и геометрии испарительной зоны;

- установлены новые зависимости температурных и энергетических характеристик электровакуумной тепловой трубки ПЭНД от электрической мощности, количества рабочего тела, начального остаточного давления и геометрических 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.

Практическая значимость полученных результатов:

- разработаны модель, экспериментальные зависимости и инженерная методика выбора параметров локального электротехнического нагревательного устройства на основе электровакуумной тепловой трубки;

- разработаны конструктивно-технологические решения ПЭНД как секционного электротехнического нагревательного устройства с системой мониторинга, автоматического управления и электрической защиты;

- определены параметры выбора мощности и числа секций, количества рабочего тела, вакуумирования, теплоотдачи и температурного контроля с учетом тепловой нагрузки помещения и доступной электрической мощности;

- обоснована область рационального применения ПЭНД для автономных и отдельно стоящих зданий без доступа к тепловым сетям, реконструируемых объектов, помещений с зонально-неравномерной тепловой нагрузкой, гибридных схем промышленных и общественных зданий, а также локального обогрева рабочих зон;

- предложены рекомендации по применению ПЭНД как управляемого локального электротехнического источника теплоты, дополняющего централизованное и водяное отопление при наличии достаточной электрической мощности, соответствующих тарифных условий и технической возможности подключения.

Степень достоверности результатов исследования:

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.

Результаты диссертационного исследования внедрены в учебный процесс НАО «Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова» при изучении дисциплины «Электромеханика и электротехническое оборудование» образовательной программы 6B07107 «Электроэнергетика». Практическая апробация результатов работы проведена в ТОО «Global light LLP», а результаты также представлены в ТОО «Silumin of Qazaqstan» («Силумин оф Казахстан»). Практическая значимость результатов подтверждена получением патента Республики Казахстан на полезную модель №10146 и свидетельства об авторском праве №63992.

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.

Апробация работы. 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».

Публикации и охранные документы. Основные научные результаты диссертационной работы отражены в 10 научных и научно-методических трудах, включая 2 статьи в международных рецензируемых научных журналах, индексируемых в базе Scopus, 4 статьи в изданиях, рекомендованных Комитетом по обеспечению качества в сфере науки и высшего образования МНВО РК, 2 публикации в материалах международных научно-практических конференций и 2 охранных документа на объекты интеллектуальной собственности.

Статьи в международных рецензируемых научных журналах Web of Science Core Collection, Scopus:

1. «Development of low-pressure electric steam heater» // Eastern–European Journal of Enterprise Technologies. – 2021. – Vol. 4/8 (112). – P. 34–44. DOI: 10.15587/1729–4061.2021.237873. Процентиль – 39 Scopus. Соавторы: Mekhtiyev A.D., Breido I.V., Neshina Ye.G., Alkina A.D.

2. «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. Процентиль – 25 Scopus. Соавторы: Mekhtiyev A.D., Neshina Ye.G., Alkina A.D., Bilichenko A.P.

Статьи, опубликованные в изданиях, рекомендованных Комитетом по обеспечению качества в сфере науки и высшего образования МНВО РК:

3. «Efficiency of the Building Heating System with the Use of Low–pressure Steam Electric Heaters» // Труды университета. – 2025. – № 4 (101). – С. 435–441. DOI: 10.52209/1609–1825_2025_4_435. Соавторы: Mekhtiyev A.D., Yurchenko A.V., Alpysbayeva N.A., Bilichenko A.P.

4. «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. Соавтор: Mekhtiyev A.D.

5. «Паровой электрообогреватель низкого давления» // Вестник Торайгыров университета. Энергетическая серия. – Павлодар, 2022. – № 3. – С. 123–134. DOI: 10.48081/SY0Y6805. Соавторы: Мехтиев А.Д., Шапенова З.Р.

6. «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. Соавторы: Мехтиев А.Д., Ким П.М., Алькина А.Д.

Публикации в сборниках международных научно-практических конференций:

7. «Перспективы применения электротехнологических систем для теплоснабжения промышленных предприятий» // Приоритетные направления инновационной деятельности в промышленности: сборник научных статей IV международной научной конференции, 29–30 апреля 2020 г. – Казань: ООО «Конверт», 2020. – Часть 1. – С. 42–47. Соавтор: Брейдо И.В.

8. «Применение инфракрасных электронагревателей для теплоснабжения производственных помещений» // Труды Международной научно–практической online конференции «Интеграция науки, образования и производства – основа реализации Плана нации» (Сагиновские чтения № 12), 18–19 июня 2020 г. – Караганда: Изд–во КарГТУ, 2020. – Часть 1. – С. 711–713. Соавтор: Брейдо И.В.

Патенты, свидетельства и объекты интеллектуальной собственности:

9. «Радиатор отопления с индукционным нагревателем» – патент на полезную модель Республики Казахстан № 10146; 31.01.2025, бюл. № 5. Соавторы: Мехтиев А.Д., Алькина А.Д., Мехтиев Р.А., Нешина Е.Г., Югай В.В.

10. «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 № 63992 от 07.11.2025. Соавторы: Алькина А.Д., Мехтиев А.Д.