



УТВЕРЖДАЮ

Директор по научной работе

Картель А.Ю.

«26» 03 2025 г

ОТЗЫВ ведущей организации

Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Липецкий государственный технический университет» на диссертационную работу Базыкина Дениса Александровича на тему «Интенсификация теплопередачи для повышения эффективности термоэлектрических генераторных модулей», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по научной специальности 2.4.6. Теоретическая и прикладная теплотехника.

Актуальность темы.

Одним из несомненно востребованных направлений промышленности в настоящее время является создание и модернизация технических решений, ориентированных на энергосбережение, снижение потребления энергетических ресурсов, повышение энергетической эффективности и экологичности промышленных объектов. Данные решения особенно актуальны для нефте- и газодобывающей отраслей, в которых большинство объектов расположены на значительно удаленном расстоянии от инфраструктуры, обеспечивающей их бесперебойную работу. В частности, для электроснабжения таких объектов применяются автономные источники энергообеспечения, к которым предъявляются достаточно жесткие требования к возможным условиям их эксплуатации, пожаро- и взрывобезопасности, экологичности и т.д. К таким источникам относится и термоэлектрическая генераторная установка, принцип действия которой основан на совместной реализации эффекта Зеебека и вихревого эффекта Ранка-Хилша. Положительными особенностями данной установки являются отсутствие в рабочем процессе продуктов сгорания топлива, наносящих вред экологии местности, простота конструкции, возможность ее использования с целью выработки электроэнергии за счет низкопотенциального тепла, исключение необходимости в проведении периодического технического обслуживания. Эффективность установок и систем на базе термоэлектрического эффекта Зеебека в настоящее время невысока. Одной из причин этому является неоднородность распределения температурного поля вдоль поверхности термоэлектрических генераторных модулей.

В связи с вышеизложенным, диссертационная работа Базыкина Дениса Александровича на тему «Интенсификация теплопередачи для повышения эффективности термоэлектрических генераторных модулей», в которой решается важная научно-техническая задача, заключающаяся в повышении производительности термоэлектрической генераторной установки за счет интенсификации теплопередачи и нивелирования неоднородности температурного поля стенок каналов, контактирующих с термоэлектрическими генераторными модулями, является актуальной и практически значимой.

Метод повышения производительности термоэлектрической генераторной установки за счет такого технического решения, как использование на стенках каналов прямоугольного сечения продольного оребрения переменной высоты, не влечет за собой особого усложнения технологии изготовления оборудования, что, в свою очередь, способствует обеспечению доступности указанного метода для его реализации на производстве. Базыкин Денис Александрович в диссертационной работе применил системный подход к решению поставленных задач и использовал комбинацию экспериментальных и вычислительных методов исследования.

Структура и содержание диссертационной работы.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 116 наименований и 1 приложения. Объем диссертации с приложениями – 130 страниц.

Во введении обоснована актуальность работы, поставлены цель и задачи исследования, описаны научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, основные положения, выносимые на защиту, показаны обоснованность и достоверность полученных результатов, апробация работы.

В первой главе рассмотрены основные требования и закономерности при использовании термоэлектрических генераторных модулей, вихревых труб на основе эффекта Ранка-Хилша; методы интенсификации теплообмена в каналах, в том числе, с прямоугольным сечением; проведен анализ современных подходов к повышению производительности установок на основе термоэлектрического эффекта Зеебека, одним из которых является организация равномерного распределения тепла по поверхности модулей за счет применения оребрения переменной высоты.

Во второй главе представлены результаты экспериментальных исследований метода реализации равномерного распределения температуры поверхности каналов прямоугольного сечения, контактирующих с термоэлектрическими генераторными модулями, путем применения оребрения переменной высоты. Представлена конструкция разработанной пилотной опытно-промышленной термоэлектрической генераторной установки, описан принцип ее работы. Указано, что источником низкопотенциального тепла и, одновременно, генератором холодного и горячего газообразных потоков служит противоточная вихревая труба. Приведена методика изготовления и сборки каналов прямоугольного сечения для упомянутой пилотной опытно-промышленной установки. Экспериментальные исследования проводились в

два этапа, в результате которых были получены характеристики потоков, температуры стенок каналов, значения напряжения и силы тока при базовой конструкции каналов и с оребрением переменной высоты. Основные результаты проведенных экспериментальных исследований представлены в виде графических зависимостей числа Эйлера от числа Рейнольдса, числа Нуссельта от числа Рейнольдса, коэффициента теплоотдачи от числа Рейнольдса, разности температуры стенки каналов между входным и выходным участками над термоэлектрическими генераторными модулями от числа Рейнольдса, а также отношения мощностей генерируемого электрического тока для обоих случаев от давления воздуха на входе в вихревую трубу.

Соискателем Базыкиным Денисом Александровичем предложен способ повышения эффективности термоэлектрической генераторной установки, отличающийся использованием продольного оребрения переменной высоты на стенках каналов. Показано, что производительность установки при конструкции каналов с выполненным в них оребрением переменной высоты в среднем увеличилась на 23,7%, при этом наибольший прирост составляет 40%.

В третьей главе приведена методика расчета геометрических характеристик оребрения при выравнивании температуры поверхности каналов термоэлектрической генераторной установки; выполнен анализ полученных экспериментальных и расчетных данных; определена параметрическая зависимость для расчета числа Нуссельта для потока воздуха, протекающего в каналах термоэлектрической генераторной установки с внутренним продольным оребрением, имеющим переменную высоту по длине, которое учитывает режим течения теплоносителя, а также конструктивные особенности упомянутого оребрения в диапазоне чисел Рейнольдса от 6800 до 44000; проведен сравнительный расчетный анализ с классическими критериальными уравнениями М.А. Михеева, Б.С. Петухова и В.В. Кириллова.

Соискателем получена эмпирическая зависимость для оценки числа Нуссельта, отличающаяся учетом коэффициента затенения проходного сечения канала. Установлено, что среднее отклонение значения числа Нуссельта, рассчитанного по полученной в ходе проведенных исследований параметрической зависимости от числа Нуссельта, вычисленного по известному соотношению М.А. Михеева, составляет 9,2%, то же от числа Нуссельта, рассчитанного по известному соотношению Б.С. Петухова и В.В. Кириллова, составляет 12,3%. Результаты показывают необходимую и достаточную сходимость с известными зависимостями.

В четвертой главе соискателем Базыкиным Денисом Александровичем представлен краткий обзор теоретических основ моделирования турбулентного движения потока жидкости или газа; выполнен вычислительный эксперимент для проведения сравнительного анализа стационарных гидродинамических и тепловых полей с опытными данными в каналах термоэлектрической генераторной установки с учетом влияния геометрии оребрения; показана сеточная модель каналов, используемая при моделировании; заданы граничные условия и допущения; приведены результаты вычислительного эксперимента; выполнено их сравнение с данными, полученными при натурном эксперименте.

Результаты вычислительных и натурных экспериментов имеют хорошую сходимость, что позволяет сделать вывод о верности полученных полей температуры, скорости и давления.

В заключении приведены основные результаты диссертационного исследования соискателя. В приложении представлен акт внедрения результатов диссертационного исследования в производственную деятельность ООО ФПК «Космос-Нефть-Газ».

Диссертационная работа прошла апробацию на всероссийских и международных конференциях, по её результатам опубликовано 11 печатных работ, в том числе 4 статьи в изданиях, рецензируемых ВАК РФ.

Автореферат соответствует содержанию диссертационной работы и полностью отражает ее результаты.

Достоверность полученных результатов.

Достоверность результатов исследований обеспечена обоснованным применением теоретических зависимостей, допущений и ограничений, корректностью методологии ведения исследований, использованием современных надежных, эффективных методов и технологий проведения теоретических и экспериментальных исследований и подтверждается качественным и количественным согласованием результатов расчета с эмпирическими данными в ходе апробации расчетных моделей.

Научной новизной обладают следующие результаты работы.

1. Способ повышения эффективности термоэлектрической генераторной установки, отличающийся использованием продольного оребрения переменной высоты на стенках каналов.
2. Эмпирическая зависимость для оценки числа Нуссельта, отличающаяся учетом коэффициента затенения проходного сечения канала.
3. Результаты сравнительного анализа численного моделирования и экспериментов на пилотной установке, отличающиеся учетом влияния геометрии оребрения каналов.

Практическая значимость полученных автором диссертации результатов.

Получен способ повышения производительности термоэлектрической генераторной установки эффектом нивелирования неоднородности температурного поля стенок каналов с применением продольного оребрения переменной высоты. Синтезированная эмпирическая зависимость для числа Нуссельта с учетом затенения площади проходного сечения каналов может быть использована при разработке термоэлектрических генераторных установок в различных предметно-ориентированных областях. Предложенная численная модель позволяет идентифицировать поля давления, скорости и температуры потоков теплоносителей и температуру смоченных поверхностей канала для выбора рациональных режимов функционирования термоэлектрических генераторных установок.

Результаты диссертационного исследования рекомендованы при создании новых и для модернизации существующих автономных источников электропитания на основе термоэлектрического эффекта Зеебека. Результаты диссертационного исследования внедрены в практику ООО ФПК «Космос-Нефть-Газ» (г. Воронеж).

Замечания по диссертации:

1. В разделе 2.1, стр. 39, при описании конструкции, не представлены данные о размерах используемых термоэлектрических генераторных модулей, что не позволяет сделать вывод об обоснованности выбора геометрических размеров каналов.

2. На рис. 2.1, стр. 40, представлена принципиальная схема пилотной опытно-промышленной термоэлектрической генераторной установки, в которой выноской 4 обозначена противоточная вихревая труба. В тексте работы следовало бы указать, из каких соображений было выбрано количественное соотношение холодного и горячего потоков в вихревой трубе при проведении эксперимента.

3. В разделе 2.4, стр. 52, отсутствуют сведения о том, какая температура бралась в качестве определяющей для вычисления теплофизических свойств воздуха для каждого режима при обработке полученных экспериментальных данных.

4. В главе 3, стр. 65, при расчете высоты ребер не указывается, каким образом выбирается их количество и толщина.

5. На рис. 4.1, стр. 80, показана трехмерная модель канала с обозначением граничных условий, принятых при проведении вычислительного эксперимента. Возникает вопрос о том, для чего при указании граничных условий вводился параметр « $\sigma_{\text{ср}}\tau$ ».

Соответствие диссертации и автореферата паспорту научной специальности.

Диссертационная работа и автореферат соответствуют паспорту специальности 2.4.6. Теоретическая и прикладная теплотехника, а именно пунктам:

п. 6 – научные основы повышения эффективности использования энергетических ресурсов в теплотехническом оборудовании и использующих теплоту системах и установках;

п. 8 – новые конструкции теплопередающих и теплоиспользующих установок и оборудования, обладающих улучшенными эксплуатационными и технико-экономическими характеристиками. Совершенствование методов расчета и оптимизации параметров, использующих теплоту технологических процессов, оборудования и систем.

Соответствие содержания диссертационной работы специальности 2.4.6. Теоретическая и прикладная теплотехника, по которой она представляется к защите, подтверждается апробацией работы, её научной новизной и практической значимостью.

Заключение.

Диссертационная работа «Интенсификация теплопередачи для повышения эффективности термоэлектрических генераторных модулей», в которой решена важная научно-практическая задача, заключающаяся в повышении эффективности генерации электроэнергии термоэлектрическими генераторными модулями, по своей актуальности, научной новизне, уровню выполнения, научной и практической значимости полученных результатов и личному вкладу автора полностью соответствует критериям, установленным в п. 9-14 «Положение о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842 (ред. от 16.10.2024), а её автор, Базыкин Денис Александрович, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.4.6. Теоретическая и прикладная теплотехника.

Диссертация, автореферат и отзыв обсуждены и одобрены на заседании кафедры промышленной теплоэнергетики, протокол № 9 от 21 марта 2025 г.

Зав. кафедрой
промышленной
теплоэнергетики ЛГТУ
к.т.н., доцент



Губарев Василий Яковлевич.

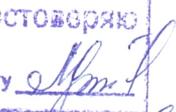
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Липецкий государственный технический университет».

Адрес: 398055, Россия, г. Липецк, ул. Московская, д. 30.

Телефон: +7 (4742) 328-000

E-mail: mailbox@stu.lipetsk.ru



Подпись удостоверяю
Специалист ОК ЛГТУ 
Н.В. Мозукова