

На правах рукописи



БАЗЫКИН Денис Александрович

ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ ДЛЯ
ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ
ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ГЕНЕРАТОРНЫХ МОДУЛЕЙ

2.4.6. Теоретическая и прикладная теплотехника

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Воронеж – 2025

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Воронежский государственный технический университет»

Научный руководитель: **Дахин Сергей Викторович**,
кандидат технических наук, доцент

Официальные оппоненты: **Слюсарев Михаил Иванович**,
доктор технических наук, доцент,
ФГКВОУ ВО «Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», профессор кафедры криогенных машин, установок и электрогазовой техники, г. Воронеж
Муравьев Анатолий Викторович,
кандидат технических наук, доцент,
ФГБОУ ВО «Ростовский государственный университет путей сообщения», заведующий кафедрой «Теплоэнергетика на железнодорожном транспорте», г. Ростов-на-Дону

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Липецкий государственный технический университет», г. Липецк

Защита состоится «24» апреля 2025 г. в 14:00 на заседании диссертационного совета 24.2.286.07, созданного на базе ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», по адресу: г. Воронеж, Московский проспект, 14, ауд. 216.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке ФГБОУ ВО «ВГТУ» и на сайте <https://cchgeu.ru/>

Автореферат разослан 03 марта 2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
24.2.286.07,
к.ф.-м.н., доц.



Рязских Александр Викторович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Применение систем автономного энергообеспечения на объектах добычи, подготовки, транспортировки и переработки газовых сред определяет энергетический уровень развития нефтегазовой отрасли РФ. Инновационным решением использования автономных энергетических установок, основанных на генерации электроэнергии без сжигания топлива, которое вредит экологии, является перспективным направлением развития малой энергетики.

В связи с этим, использование термоэлектрических генераторных установок, базирующихся на эффекте Зеебека в сопряжении с вихревым эффектом Ранка-Хилша является актуальным. Однако, КПД такого рода систем пока остается невысоким, в том числе, из-за недостаточной площади контакта разнородных полупроводников при постоянной величине термо-ЭДС, а также проблем, связанных с реализацией продольного распределения тепла по поверхности термоэлектрических генераторных модулей. Решение указанных проблем позволит повысить эффективность генерации электроэнергии за счет минимизации температурного градиента стенок каналов, контактирующих с генераторными модулями.

Диссертационная работа посвящена анализу теплоэнергетических аспектов использования автономных источников электроснабжения с термоэлектрическими генераторными установками и повышение их эффективности на основе оптимизации режимов функционирования.

Работа выполнена в рамках НИР кафедры «Теоретическая и промышленная теплоэнергетика» ВГТУ по теме ГБ 2022.12 «Интенсификация теплообмена в элементах теплоэнергетических установок».

Объект исследований – теплопередающие каналы прямоугольного сечения термоэлектрической генераторной установки.

Предмет исследований – обеспечение однородности температурного поля теплопередающих каналов в сечении с прямоугольной топологией за счет применения продольного ребрения переменной высоты.

Цель работы – повышение производительности термоэлектрической генераторной установки за счет интенсификации теплопередачи в контактирующих каналах с использованием продольного оребрения переменной высоты.

Для достижения поставленной цели в работе были поставлены и решены следующие **задачи**:

1. Создание пилотной опытно-промышленной термоэлектрической генераторной установки с реализацией в каналах продольного оребрения переменной высоты.

2. Экспериментальное определение гидротермических характеристик теплоносителя, температурных полей стенок каналов и мощности генерируемого электрического тока на сконструированной опытной установке.

3. Идентификация по экспериментальным данным критерияльного соотношения числа Нуссельта для оценки производительности термоэлектрической генераторной установки.

4. Вычислительный эксперимент для проведения сравнительного анализа стационарных гидродинамических и тепловых полей с опытными данными в каналах термоэлектрической генераторной установки.

Научная новизна:

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.

Теоретическая и практическая значимость:

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 повышения эффективности существующих автономных источников электропитания на основе термоэлектрического эффекта Зеебека с применением вихревого эффекта Ранка-Хилша. Результаты диссертационного исследования внедрены в практику ООО ФПК «Космос-Нефть-Газ» (г. Воронеж).

Методология и методы исследования. В работе использованы теоретические основы тепломассообмена, базирующиеся на фундаментальных законах явлений переноса, современных методах проведения эксперимента с их обработкой статистическими методиками.

Область исследований в соответствии с паспортом специальности 2.4.6. Теоретическая и прикладная теплотехника.

Научная новизна работы соответствует пункту 6 «Научные основы повышения эффективности использования энергетических ресурсов в теплотехническом оборудовании и использующих теплоту системах и установках» паспорта специальности «Теоретическая и прикладная теплотехника» и пункту 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» паспорта специальности «Теоретическая и прикладная теплотехника».

Положения, выносимые на защиту:

1. Способ повышения эффективности термоэлектрической генераторной установки.
2. Эмпирическая зависимость для оценки числа Нуссельта.
3. Результаты сравнительного анализа численного моделирования и экспериментов на пилотной установке.

Обоснованность и 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.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы доложены и обсуждены на: VI Всероссийской научно-практической конференции «Энергетика и энергосбережение: теория и практика» (г. Кемерово, 2021); VII Международной научно-практической конференции «Комплексные проблемы техносферной безопасности» (г. Воронеж, 2022); 24, 25 и 26-й Научно-технических конференциях «Физико-технические проблемы энергетики, экологии и энергоресурсосбережения» (г. Воронеж, 2022-2024); VII и VIII Международных конференциях «Энергетические системы» (г. Белгород, 2022-2023); VI Всероссийской научно-практической конференции памяти доктора технических наук, профессора В.Г. Каширских, в рамках проведения Года науки и технологий в Российской Федерации и празднования 300-летия Кузбасса (г. Кемерово, 2022); X и XI Всероссийских (с международным участием) научно-технических конференциях молодых исследователей (г. Волгоград, 2023-2024); Международной научно-технической конференции «Технологический суверенитет и цифровая трансформация» (г. Казань, 2024), Всероссийской научно-технической конференции «Прикладные задачи энергетики, электротехники и автоматики» (г. Воронеж, 2024).

Публикации результатов исследований. По теме диссертации опубликовано 11 научных работ, в том числе 4 – в изданиях, рекомендованных ВАК РФ.

Объем и структура диссертации. Диссертационная работа изложена на 130 страницах машинописного текста, состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 116 наименований и 1 приложения, содержит 72 рисунка и 7 таблиц.

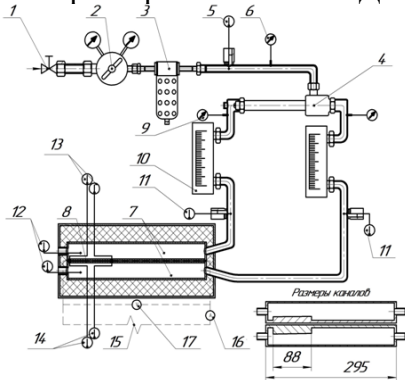
ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность выбранной темы диссертации, сформулированы цель и задачи исследования, представлены научная новизна и практическая значимость исследования, основные положения, выносимые на защиту, приведены результаты апробации диссертационной работы.

В первой главе приведен анализ современных подходов к повышению эффективности энергетических установок на основе термоэлектрического эффекта Зеебека. Отмечается, что одним из подходов решения данной проблемы для термоэлектрических генераторных модулей является реализация равномерного распределения тепла вдоль их поверхности за счет применения оребрения переменной высоты.

Во второй главе представлены результаты экспериментальных исследований метода выравнивания температуры поверхности каналов путем применения оребрения переменной высоты.

В разработанной пилотной опытно-промышленной установке (рис. 1) рабочем телом являлся сухой сжатый воздух от компрессора ВК25-15-500Д.



1 – запорная арматура;
2 – регулятор давления;
3 – фильтр с автоматическим сливом, сетка 5 мкм, расход потока – 1218 л/мин; 4 – вихревая трубка Nex Flow 50040H, 1133 л/мин при 6,9 бар; 5 – датчик температуры входного потока ДТПК105-0100.60; 6 – манометр (датчик давления) 0..10 кгс/см²;

Рис. 1. Принципиальная схема установки

7 – каналы прямоугольного сечения; 8 – термоэлектрические генераторные модули ТГМ-199-1,4-0,8; 9 – датчики температуры холодного и горячего потоков на выходе из вихревой трубы ДТПК105-0100.60; 10 – ротаметры, 20-100 м³/ч для холодного потока и 2,5-25 м³/ч для горячего потока; 11 – датчики темпе-

ратуры холодного и горячего потоков за ротаметрами ДТПК334-06.60/2,5К.1; 12 – датчики температуры холодного и горячего потоков на выходе из каналов прямоугольного сечения ДТПК334-06.60/2,5К.1; 13 – датчики температуры ДТПЛ454-05.60/1,0К стенки канала горячего воздуха; 14 – датчики температуры ДТПЛ454-05.60/1,0К стенки канала холодного воздуха; 15 – электрическая нагрузка (лампа накаливания); 16 – амперметр; 17 – вольтметр.

Экспериментальные исследования позволили получить гидротермические характеристики потоков воздуха, температурные поля каналов (с прямоугольным поперечным сечением), значения напряжения и силы тока без оребрения и с продольным оребрением переменной высоты. Геометрия оребрения: высота ребра стенки канала холодного потока изменялась от 18,5 мм до 20 мм при числе ребер, равном 7 шт., а высота ребра стенки канала горячего потока – от 14,5 мм до 13,5 мм при числе ребер, равном 3 шт.

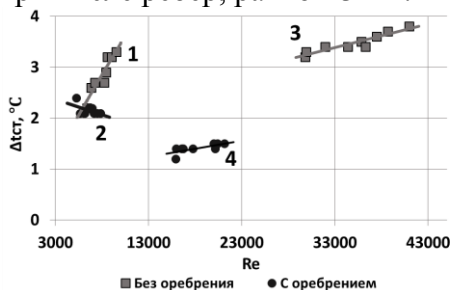


Рис. 2. Зависимость разности температуры стенки каналов от Re : канал горячего потока без оребрения (1) и с оребрением переменной высоты (2); канал холодного потока без оребрения (3) и с оребрением переменной высоты (4)

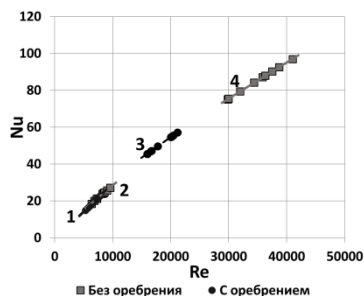


Рис. 3. График зависимости числа Nu от Re : горячий поток при оребрении переменной высоты (1) и без оребрения (2); холодный поток при оребрении переменной высоты (3) и без оребрения (4)

Результаты экспериментальных исследований, представленные на рис. 2 и рис. 3, показывают, что установка в каналах указанного оребрения способствует однородности температурного поля стенки в продольном направлении, причем наибольшее снижение неоднородности для канала горячего потока составило от 3,3 $^\circ C$ до 2,1 $^\circ C$, то же для канала холод-

ного потока составило от 3,8 °С до 1,5 °С. Замечено, что для горячего потока при обоих вариантах число Nu практически не изменяется, а для холодного потока число Nu ниже, чем при отсутствии оребрения.

При реализации процесса в каналах с оребрением переменной высоты наблюдается существенное увеличение коэффициента теплоотдачи при одинаковых числах Re (рис. 4), что подтверждает интенсификацию теплообмена.

Изменение мощности тока для вариантов с оребрением и без от давления воздуха на входе в вихревую трубу показано на рис. 5.

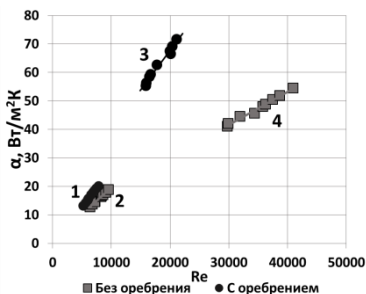


Рис. 4. Зависимость коэффициента теплоотдачи от Re: горячий поток при оребрении переменной высоты (1) и без оребрения (2); холодный поток при оребрении переменной высоты (3) и без оребрения (4)

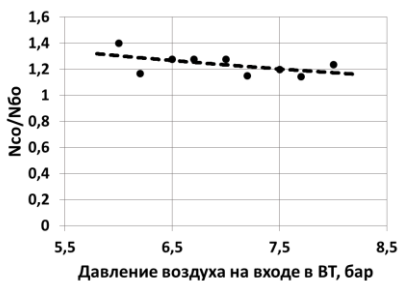


Рис. 5. График зависимости отношения мощностей генерируемого электрического тока с оребрением и без оребрения от давления воздуха на входе в вихревую трубу

Графики, показанные на рис. 2 и рис. 5, подтверждают, что оснащение каналов оребрением переменной высоты приводит к однородности температурного поля в продольном направлении поверхности каналов и тем самым способствует увеличению мощности генерируемого электрического тока. При этом производительность установки повышается в достаточно широком диапазоне давления входного потока, в среднем увеличение составляет 23,7 %, наибольший прирост равен 40 %.

В третьей главе приведена методика расчета геометрических характеристик оребрения, выполнена обработка опытных данных и получена критериальная зависимость оценки числа Nu с применением оребрения переменной высоты стенок каналов прямоугольного сечения. Проведен сравнительный расчет-

ный анализ с классическими соотношениями М.А. Михеева, Б.С. Петухова и В.В. Кириллова.

Расчет геометрических характеристик оребрения выполнен по стандартной инженерной методике многослойной плоской стенки, адаптированной для конструкции термоэлектрической генераторной установки.

Конечные формулы для вычисления высоты рёбер h_x и h_r , m по длине x имеют следующий вид:

$$h_x = \frac{P_x}{n_x \lambda_{px} m_x^2 \delta_{px}} \cdot \left[\frac{q}{(t_{cx} - t'_x) - \frac{q P_x x}{G_x C_{px}}} - \alpha_x \right], \quad m_x = \sqrt{\frac{2\alpha_x}{\lambda_x \delta}}, \quad (1)$$

$$h_r = \frac{P_r}{n_r \lambda_{pr} m_r^2 \delta_{pr}} \cdot \left[\alpha_r - \frac{q}{(t'_r - t_{cr}) - \frac{q P_r x}{G_r C_{pr}}} \right], \quad m_r = \sqrt{\frac{2\alpha_r}{\lambda_r \delta}}, \quad (2)$$

где h_x и h_r – высота ребра, м; P_x и P_r – полный периметр теплообменной поверхности, м; n_x и n_r – число рёбер в каналах; λ_{px} и λ_{pr} – коэффициенты теплопроводности рёбер, Вт/(м·К); δ_{px} и δ_{pr} – толщина ребра; q – плотность теплового потока, Вт/м²; t_{cx} и t_{cr} – средняя температура стенки канала, °С; t'_x и t'_r – температура потоков воздуха на входе в канал, °С; G_x и G_r – массовый расход потоков, кг/с; C_{px} и C_{pr} – теплоемкость потоков, Дж/(кг·К); α_x и α_r – коэффициенты теплоотдачи, Вт/(м²·К).

Введен коэффициент затенения, который равен отношению внутреннего объема канала с оребрением к объему канала без оребрения:

$$\kappa = \frac{V_p}{V_n}. \quad (3)$$

В результате обработки результатов экспериментальных данных получено критериальное уравнение, справедливое для чисел Рейнольдса от 6800 до 44000:

$$Nu = 0,0072 \cdot (Re \cdot \kappa)^{0,9012}. \quad (4)$$

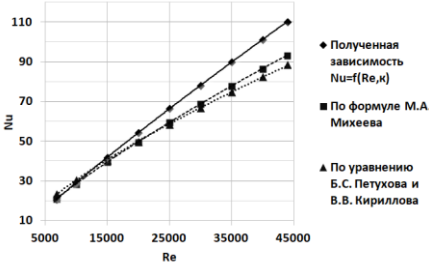


Рис. 6. График зависимостей $Nu = f(Re)$

Результаты расчетов, проведенных по формуле (4), а также по соотношениям Михеева, Петухова-Кириллова приведены на рис. 6. Среднее отклонение значения Nu , рассчитанного по (4), от Nu , вычисленного по формуле М.А. Михеева, составляет 9,2 %, то же от Nu по уравнению

Б.С. Петухова и В.В. Кириллова, составляет 12,3 %.

В четвертой главе представлены результаты вычислительных экспериментов, базирующихся на модельных представлениях теплообмена при турбулентном движении в проточных каналах в рамках программной платформы ANSYS.

Вычисления осуществлены по уравнению Навье-Стокса, осредненного по Рейнольдсу (RANS), которое дополнено моделью турбулентности $k-\omega$ SST, позволяющей смоделировать условия в пристеночной области, максимально приближенные к реальным, а также оценить параметры турбулентности в удаленной от стенки области потока. Кинетическая энергия турбулентности k и удельная скорость диссипации ω определяются из уравнений:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k - Y_k + S_k, \quad (5)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \omega) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \omega u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) + G_\omega - Y_\omega + S_\omega, \quad (6)$$

где G_k – генерация k в условиях градиентов средней скорости; G_ω – генерация ω ; ρ – плотность, кг/м³; Γ_k и Γ_ω – эффективные коэффициенты диффузии; Y_k и Y_ω – диссипация k и ω в условиях турбулентности; S_k и S_ω – источники, определяемые пользователем;

А турбулентная вязкость μ_t соотношениями

$$\mu_i = \frac{\rho k}{\omega} \frac{1}{\max\left[\frac{1}{\alpha^*}, \frac{SF_2}{\alpha_2 \omega}\right]}, \quad F_2 = \tanh(\Phi_2^2), \quad (7)$$

$$\Phi_2 = \max\left[2 \frac{\sqrt{k}}{0,09\omega y}, \frac{500\mu}{\rho y^2 \omega}\right], \quad (8)$$

где a и a^* – поправочные коэффициенты; y – расстояние до следующей поверхности; S – величина скорости деформации; F_2 – функция смешивания;

Значение ω в пристеночной области

$$\omega_w = \frac{\rho(u^*)^2}{\mu} \omega^+, \quad (9)$$

а для ламинарного подслоя и логарифмической области, соответственно

$$\omega^+ = \frac{6}{\beta_i (y^+)^2}, \quad \omega^+ = \frac{1}{\sqrt{\beta_\infty^*}} \frac{du_{urb}^+}{dy^+}, \quad (10)$$

где u – компонента вектора скорости; β_i и β_∞^* – поправочные коэффициенты.

Исходные данные для вычислительных экспериментов приведены в нижеследующей таблице.

| Параметр | Вид канала | Режим | | | | |
|--|------------|----------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| | | 1 | 3 | 5 | 6 | 9 |
| Рабочее тело | X | Воздух | | | | |
| | Г | | | | | |
| Модель турбулентности | X | SST $k-\omega$ | | | | |
| | Г | | | | | |
| Температура потока, вход, °С | X | 1,6 | 8,0 | 3,9 | 5,9 | 8,9 |
| | Г | 75,1 | 76,1 | 73,3 | 74,6 | 77,6 |
| Расход потока, кг/с | X | 0,0241 | 0,0262 | 0,0290 8 | 0,0295 9 | 0,029 68 |
| | Г | 0,0061 | 0,0069 5 | 0,0078 2 | 0,0074 6 | 0,007 92 |
| Т стенки на входе участка над ТГМ, °С | X | 12,8 | 13,6 | 13,5 | 13,5 | 13,1 |
| | Г | 17,4 | 20,3 | 19,6 | 20,7 | 21,1 |
| Т стенки на выходе участка над ТГМ, °С | X | 16,0 | 17,0 | 17,0 | 16,9 | 16,9 |
| | Г | 15,2 | 17,6 | 16,9 | 17,8 | 17,8 |
| Давление на выходе, атм | X | 1 | | | | |
| | Г | | | | | |

Сеточная модель канала холодного потока с оребрением переменной высоты, представленная на рис. 7, состояла из 2506091 ячеек в форме тетраэдров и призм, 832591 узлов, 260248 поверхностей с принятыми допущениями:

- использованы домены для жидкости и твердого тела;
- отсутствуют фазовые переходы;
- теплофизические свойства постоянны;
- формат стационарного течения 3-D;
- гидродинамическая и тепловая подзадачи являются полностью сопряженными;
- взаимное влияние холодного и горячего тракта не учитывалось;
- теплообмен с внешней средой отсутствует;
- на «смоченных» поверхностях приняты классические условия «прилипания».

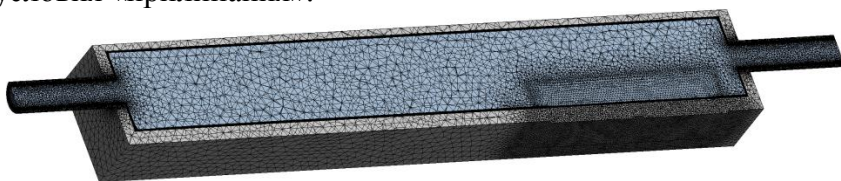


Рис. 7. Сеточная модель канала с оребрением

Результаты сравнительного анализа вычислительных и натуральных экспериментов показаны на рис. 8, что свидетельствует об удовлетворительном их совпадении.

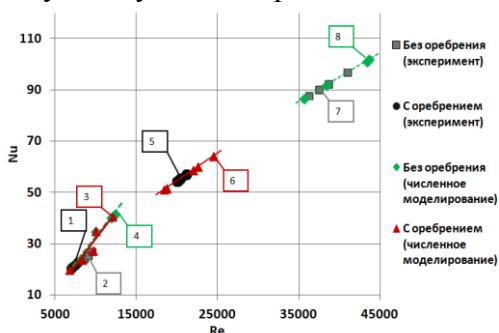


Рис. 8. График зависимостей $Nu = f(Re)$

Горячий поток при оребрении (1) и без оребрения (2), натуральный эксперимент; горячий поток при оребрении (3) и без оребрения (4), вычислительный эксперимент; холодный поток при оребрении (5) и без оребрения (7), натуральный эксперимент; холодный поток при оребрении (6) и без оребрения (8), вычислительный эксперимент.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Предложен способ повышения эффективности термоэлектрической генераторной установки, отличающийся использованием продольного оребрения переменной высоты на стенках каналов.

2. Создана пилотная опытно-промышленная термоэлектрическая генераторная установка с реализацией в каналах продольного оребрения переменной высоты.

3. Выполнено экспериментальное определение гидротермических характеристик теплоносителя, температурных полей стенок каналов и мощности генерируемого электрического тока на сконструированной опытной установке.

4. Получена эмпирическая зависимость для оценки числа Нуссельта, отличающаяся учетом коэффициента затенения проходного сечения канала.

5. Проведен вычислительный эксперимент для проведения сравнительного анализа стационарных гидродинамических и тепловых полей с опытными данными в каналах термоэлектрической генераторной установки.

6. Показано, что увеличение мощности генерируемого тока при применении оребрения переменной высоты, по сравнению с полыми каналами, в среднем составляет 23,7 %, наибольший прирост равен 40 %.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ

1. Базыкин, Д.А. Экспериментальное исследование параметров оребрения при термостатировании поверхности каналов термоэлектрической генераторной установки / Д.А. Базыкин, С.В. Дахин, А.В. Бараков // Энергетик. – 2024. – № 6. – С. 15-20.

2. Базыкин, Д.А. Экспериментальное исследование методов повышения эффективности термоэлектрической генераторной установки / Д.А. Базыкин, С.В. Дахин, А.В. Бараков // Промышленная энергетика. – 2024. – № 3. – С. 24-30. – DOI 10.34831/EP.2024.28.76.004.

3. Базыкин, Д.А. Численное моделирование теплообмена и вариантов его интенсификации в профилированных каналах термоэлектрической генераторной установки / Д.А. Базыкин, С.В. Дахин, А.В. Бараков // Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки. – 2024. – № 1. – С. 82-92. – DOI 10.5281/zenodo.10974658.

4. Базыкин, Д.А. Результаты численного моделирования теплообмена при термостатировании поверхности каналов термоэлектрической генераторной установки / Д.А. Базыкин, Е.А. Орехов, С.В. Дахин // Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки. – 2024. – № 3. – С. 144-154. – DOI 10.5281/zenodo.14018670.

Статьи и материалы конференций

5. Создание экспериментальной электрогенерирующей установки с применением вихревого эффекта Ранка-Хилша / Д.А. Базыкин, В.А. Ильичев, В.В. Курасов, А.В. Бараков // Физико-технические проблемы энергетики, экологии и энергоресурсосбережения: труды 24-й научно-технической конференции – Воронеж: Воронежский государственный технический университет, 2022. – С. 3-10.

6. Численное моделирование интенсификации теплообмена в каналах термоэлектрической генераторной установки / Д.А. Базыкин, В.А. Ильичев, Е.А. Орехов, А.В. Бараков // Энергетические системы. – 2022. – № 3. – С. 8-16. – DOI 10.34031/ES.2022.3.001.

7. Базыкин, Д.А. Разработка автономного источника электропитания с применением вихревого эффекта Ранка-Хилша / Д.А. Базыкин, В.А. Ильичев // Энергетические системы. – 2023. – № 2. – С. 35-43.

8. Базыкин, Д.А. Обработка результатов экспериментальных исследований термостатирования стенок плоских каналов за счет оребрения переменной высоты / Д.А. Базыкин, С.В. Дахин // Прикладные задачи энергетики, электротехники и автоматики: Труды Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых – Воронеж: ВГТУ, 2024. – С. 163-167.

9. Базыкин, Д.А. Результаты экспериментальных исследований термического разделения потоков в противоточной вих-

вихревой трубе / Д.А. Базыкин, В.А. Ильичев, А.В. Бараков // Технологический суверенитет и цифровая трансформация: Международная научно-техническая конференция– Казань: Казанский государственный энергетический университет, 2024. – С. 36-39.

10. Базыкин, Д.А. Воздействие термостатирования стенок каналов на эффективность выработки электроэнергии термоэлектрической генераторной установкой / Д.А. Базыкин, С.В. Дахин, А.В. Бараков // Актуальные проблемы строительства, ЖКХ и техносферной безопасности: Материалы XI Всероссийской (с международным участием) научно-технической конференции молодых исследователей – Волгоград: Волгоградский государственный технический университет, 2024. – С. 303-305.

11. Базыкин, Д.А. Моделирование и анализ распределения температуры стенки канала при ее оребрении продольными ребрами фиксированной и переменной высоты / Д.А. Базыкин, С.В. Дахин // Энергетические системы. – 2024. – № 2. – С. 35-43.

Подписано в печать 21.02.2025 г. Формат 60×84/16.
Усл. печ. л. 0,93. Тираж 80 экз. Заказ 28.

Отпечатано в типографии ООО ИПЦ «Научная книга»
394026, г. Воронеж, Московский пр-т, 11/5
Тел. +7 (473) 229-32-87
<http://www.n-kniga.ru>. E-mail: nautyp@yandex.ru