

**официального оппонента Муравьева Анатолия Викторовича 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 специальности**

**2.4.6. Теоретическая и прикладная теплотехника**

**Актуальность темы.**

В настоящее время в энергетической отрасли промышленности наблюдается особый интерес к разработке технических решений, направленных на автономное энергообеспечение объектов, находящихся на значительном расстоянии от центров развитой инфраструктуры. Существует большое количество автономных энергетических установок, отличных друг от друга по конструкции и принципу действия. Примером автономного источника электропитания для газодобывающих, газотранспортных и газоперерабатывающих объектов является термоэлектрическая генераторная установка, принцип действия которой основан на совместной реализации вихревого эффекта Ранка-Хилша и термоэлектрического эффекта Зеебека. Данная установка позволяет генерировать электрическую энергию без сжигания топлива, подходит к применению в районах с суровым климатом, не требует периодического технического обслуживания, но эффективность таких установок остается невысокой. Одной из причин этому является неоднородность распределения тепла вдоль поверхности термоэлектрических генераторных модулей. Поэтому научно-техническая задача, основанная на повышении эффективности термоэлектрических генераторных модулей за счет интенсификации теплопередачи между каналами прямоугольного сечения и реализации равномерного распределения тепла, является актуальной. Указанная задача решается в диссертационной работе Базыкина Дениса Александровича «Интенсификация теплопередачи для повышения эффективности термоэлектрических генераторных модулей».

Предложенный в диссертационной работе способ повышения эффективности термоэлектрических генераторных модулей за счет нивелирования температурной неоднородности стенок контактирующих с модулями каналов путем применения в них оребрения переменной высоты не требует особого усложнения технологии производства составных частей и оборудования, что, в свою очередь, благоприятствует реализации указанного способа в промышленности. Поставленные в диссертационной работе Базыкина Дениса Александровича задачи были решены с использованием экспериментальных методов исследования и численного моделирования процессов теплообмена.

## **Структура и содержание диссертационной работы**

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы, включающего 116 наименований, и 1 приложения, которым является акт внедрения результатов диссертационного исследования в производство. Объем диссертационной работы с приложением – 130 страниц.

**Во введении** обоснована актуальность диссертационной работы; поставлена цель, определены задачи исследования; приведены сведения о научной новизне, теоретической и практической значимости работы; представлены обоснованность и достоверность полученных результатов, апробация и общая структура работы.

**В первой главе** проведен анализ современных подходов к повышению производительности термоэлектрических генераторных установок; приводятся сведения об области исследования и актуальности применения систем на основе термоэлектрического эффекта Зеебека в составе автономных источников электропитания; представлены сведения об основных элементах конструкции и принципе работы термоэлектрических генераторных модулей, рассмотрены возможные методы интенсификации генерации ими электрической энергии; проанализированы перспективы и особенности применения вихревых труб в термоэлектрических генераторных установках; рассмотрены современные методы интенсификации теплообмена в каналах энергетических установок, в том числе, в каналах с прямоугольным поперечным сечением; представлены данные о перспективах применения способа выравнивания температурного поля стенок каналов за счет применения оребрения переменной высоты.

**Во второй главе** описаны проведенные экспериментальные исследования метода выравнивания температуры поверхности каналов прямоугольного сечения путем применения оребрения переменной высоты – показана принципиальная схема пилотной опытно-промышленной термоэлектрической генераторной установки, описаны ее основные конструктивные элементы и принцип работы; даны сведения об используемом источнике горячего и холодного потоков – противоточной вихревой трубе и ее основных технических характеристиках; в полной мере раскрыты оба этапа экспериментальных исследований, даны сведения о подготовительных работах к каждому этапу и основные полученные данные в ходе экспериментов; выполнена обработка полученных эмпирических данных, при этом с целью систематизации и анализа полученных величин были использованы безразмерные комплексы – критерии подобия (числа Рейнольдса, Нуссельта, Эйлера и др.), которые позволяют охарактеризовать теплообмен, режим течения теплоносителей, соотношения сил давления и сил инерции и т.д.; основные результаты экспериментальных исследований представлены в виде графических зависимостей с описанием к каждой из них.

При проведении экспериментальных исследований Базыкин Денис Александрович подтвердил целесообразность использования предложенного

способа повышения эффективности термоэлектрической генераторной установки путем интенсификации теплопередачи между каналами прямоугольного сечения. Доказано, что эффективность генерации электроэнергии термоэлектрическими генераторными модулями возрастает при конструкции каналов с выполненным в них оребрением переменной высоты.

**В третьей главе** описана методика расчета теплообмена через многослойную плоскую стенку, адаптированная для конструкции термоэлектрической генераторной установки с одновременным использованием зависимостей для расчета высоты оребрения переменной высоты; проанализированы полученные эмпирические данные и определено критериальное уравнение для расчета числа Нуссельта с учетом затенения проходного сечения каналов. Данная зависимость может быть использована при расчете числа Нуссельта для потока воздуха, протекающего в каналах прямоугольного сечения с внутренним продольным оребрением переменной высоты в диапазоне числа Рейнольдса от 6800 до 44000. С целью проверки адекватности полученного параметрического соотношения был выполнен расчет числа Нуссельта по известным зависимостям при  $k=1$ , которыми являются уравнение М.А. Михеева и уравнение Б.С. Петухова и В.В. Кириллова. Результаты сравнения показывают необходимую и достаточную сходимость с известными зависимостями, что позволяет сделать вывод об адекватности полученного уравнения.

**В четвертой главе** представлены основные сведения о проведенном вычислительном эксперименте и сравнительном анализе стационарных гидродинамических и тепловых полей с опытными данными в каналах прямоугольного сечения пилотной опытно-промышленной термоэлектрической генераторной установки. Представлен обзор теоретических основ моделирования турбулентного движения потока жидкости или газа применительно к  $k-\omega$  SST модели турбулентности; показаны исходные данные, граничные условия и допущения, заданные при моделировании в программном комплексе ANSYS; представлены изображения сеточных расчетных моделей и характеристики сетки; результаты моделирования проиллюстрированы в виде графических зависимостей и распределений полей температуры, скорости и давления потоков, температуры стенки каналов прямоугольного сечения; в заключительной части приводятся значения потерь давления потоков. Показано, что результаты имеют достаточно хорошую сходимость с эмпирическими данными.

**В заключении** сформулированы основные выводы по результатам проведенных исследований.

**Приложение** представлено в виде акта внедрения результатов диссертационного исследования в производственную деятельность предприятия по производству нефтегазового оборудования ООО ФПК «Космос-Нефть-Газ».

## **Обоснованность научных положений и достоверность полученных результатов**

Достоверность полученных результатов 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 качественной и количественной сходимостью результатов 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.

### **Значимость полученных автором диссертации результатов для науки и производства**

Разработан способ повышения эффективности термоэлектрических генераторных модулей путем интенсификации теплопередачи между каналами прямоугольного сечения посредством нивелирования неоднородности температурного поля стенок каналов с применением продольного оребрения переменной высоты, который может быть использован с целью повышения производительности установок, в состав которых входят термоэлектрические генераторные модули. Получена эмпирическая зависимость для числа Нуссельта с учетом затенения площади проходного сечения каналов при значениях числа Рейнольдса от 6800 до 44000, которая может быть использована при разработке и модернизации 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 выполненного диссертационного исследования рекомендованы при создании новых и для модернизации существующих автономных источников электропитания на базе термоэлектрических генераторных модулей и внедрены в производственную деятельность ООО ФПК «Космос-Нефть-Газ» (г. Воронеж).

## **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, ее научной новизной, теоретической и практической значимостью.

### **Общие замечания по содержанию и оформлению диссертации**

1. На принципиальной схеме, рис. 2.1, стр. 40, а также на рис. 2.3, стр. 43, видно, что в выходном патрубке горячего потока вихревой трубы имеется регулировочный винт, который на схеме не обозначен. В работе не представлены сведения о том, как осуществлялось регулирование количественного соотношения расходов потоков в вихревой трубе и каким образом выбиралось итоговое соотношение.

2. Также принципиальная схема, рис. 2.1, стр. 40, включает данные о длине оребрения переменной высоты, но в работе отсутствуют какие-либо сведения о причине выбора указанной длины.

3. На рис. 2.14, стр.57, представлен график зависимости числа Нуссельта от числа Рейнольдса, где при обоих вариантах конструкции каналов число  $Nu$  находится практически на одном уровне. При этом на рис. 2.15, стр. 57, изображен график зависимости коэффициента теплоотдачи от числа Рейнольдса, где наблюдается значительный рост коэффициента теплоотдачи при оребрении, по сравнению с вариантом без оребрения, в особенности – кривая 3. Необходимо дополнить, в связи с чем возникает такая особенность.

4. В формуле 3.3 на стр. 61 имеются такие параметры, как толщина и коэффициент теплопроводности материала пластины ТГМ, а также толщина и коэффициент теплопроводности материала термоэлементов ТГМ. При этом в работе отсутствуют данные о материалах и толщине ТГМ.

5. В главе 2 работы следовало указать материал оребрения и стенок, контактирующих с термоэлектрическими генераторными модулями.

## **Оценка языка и стиля диссертации и автореферата**

Автореферат отражает основные положения диссертационной работы, выдержан по форме и объему. Язык и стиль написания диссертации характеризуется ясностью и четкостью изложения материала.

## **Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации**

Обоснованность и достоверность научных положений и выводов, полученных в диссертации, подтверждается корректным использованием современных и эффективных методов исследования. Достоверность предложенного способа повышения производительности термоэлектрической генераторной установки эмпирически подтверждается ростом мощности генерируемого электрического тока при использовании предложенного способа повышения эффективности термоэлектрических генераторных модулей. Достоверность полученного критериального уравнения для расчета числа Нуссельта подтверждается необходимой и достаточной сходимостью результатов расчета с известными зависимостями М.А. Михеева, Б.С. Петухова и В.В. Кириллова. Результаты сравнительного анализа вычислительных и натурных экспериментов показаны показывают достаточное их совпадение.

## **Подтверждение опубликования основных результатов диссертации в научной печати**

По теме диссертации опубликовано 11 печатных работ (статей), в том числе 4 статьи в изданиях, рецензируемых ВАК РФ. Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на различных всероссийских и международных конференциях.

## **Заключение**

Указанные в отзыве замечания не снижают общей положительной оценки, а также теоретической и практической ценности диссертационной работы Базыкина Дениса Александровича на тему «Интенсификация теплопередачи для повышения эффективности термоэлектрических генераторных модулей». Диссертация Базыкина Д.А. является законченным самостоятельным научно-квалификационным исследованием, в котором предложено решение важной научно-практической задачи. Оформление диссертации и автореферата соответствует требованиям. Содержание автореферата соответствует основному содержанию и положениям диссертации. По актуальности, научной новизне, научной и практической значимости полученных результатов, уровню исполнения и личному вкладу автора диссертационная работа «Интенсификация теплопередачи для повышения эффективности термоэлектрических генераторных модулей» соответствует требованиям п. 9-14 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842, предъявляемых к кандидатским диссертациям,

а ее автор – Базыкин Денис Александрович заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.4.6. Теоретическая и прикладная теплотехника.

Официальный оппонент,  
кандидат технических наук (специальности  
01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника,  
05.14.04 – Промышленная теплоэнергетика), доцент,  
заведующий кафедрой «Теплоэнергетика на  
железнодорожном транспорте» ФГБОУ ВО «Ростовский  
государственный университет путей сообщения»

  
Муравьев А.В

Адрес организации: 344038, Ростовская область, городской округ город Ростов-на-Дону, город Ростов-на-Дону, площадь Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, зд. 2.

Телефон: 8 (863) 255-32-83

E-mail: up\_del@rgups.ru

Подпись Муравьева А.В.

УДОСТОВЕРЯЮ  
Начальник управления делами  
ФГБОУ ВО РГУПС  
«31» 03 2011



Т.М. Канина