



МИНОБРНАУКИ РОССИИ
федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Санкт-Петербургский политехнический
университет Петра Великого»
(ФГАОУ ВО «СПбПУ»)

ИНН 7804040077, ОГРН 1027802505279, ОКПО 02068574
ул. Политехническая, д. 29 литера Б,
вн. тер. г. муниципальный округ Академическое,
г. Санкт-Петербург, 195251
тел.: +7(812)552-60-80, office@spbstu.ru

13. 12. 2024 № НК-Д-798/1
на № _____ от _____

УТВЕРЖДАЮ

проректор по научной работе,
кандидат физико-математических наук

Ю. В. Фомин

«13» 12 2024 года



ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

федерального государственного автономного образовательного учреждения
высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет

Петра Великого» на диссертационную работу

Миронова Александра Александровича

по теме «**Теплообмен и гидродинамика при течении однофазного**

теплоносителя в щелевых каналах с поверхностными

вихрегенераторами различной формы», представленную на соискание

ученой степени кандидата технических наук

по специальности 2.4.6. Теоретическая и прикладная теплотехника

Актуальность темы диссертации

Для повышения эффективности теплоэнергетического оборудования используют различные методы интенсификации теплообмена. Среди этих методов выделяется поверхностная интенсификация, где воздействие на пограничный слой, не затрагивает основное течение теплоносителя. При этом пристенные слои турбулизируются, закручиваются и главное, постоянно обновляется пограничный слой, который оказывает основное влияние на теплообмен. Формы поверхностных интенсификаторов теплообмена многообразны. А. А. Миронов исследует поверхностные генераторы в виде выемок различной формы. При анализе системы сферических выемок он

показал, что наибольшая теплогидравлическая эффективность приходится на углубления малых размеров, где интенсификация слаба. В качестве альтернативных подобных интенсификаторов предлагаются, например, осесимметричные выемки с формированием моновихревых структур. Выбор новых форм происходит без научного обоснования, нет работ по выбору рациональных размеров и оценке тепловых и гидравлических характеристик. Экспериментальные и численное исследование течения и теплообмена в каналах с системами новых вихрегенераторов, выполненные в работе А. А. Миронова, являются *важными* и *востребованными*. Разработка на их основе рекомендаций для создания высокоэффективного теплоэнергетического оборудования представляет *актуальную* задачу.

Оценка структуры и содержания работы

Диссертационная работа состоит из введения, 5 глав, заключения, списка литературы и приложения. Общий объем диссертации – 179 страниц

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи работы. Указана научная новизна и практическая значимость работы. Сформулированы положения, выносимые на защиту.

В первой главе проведён анализ современных исследований, посвященным поверхностным интенсификаторам в виде выемок различной формы в теплообменниках, котлах утилизаторах, котлоагрегатах, системах охлаждения лопаток газовых турбин, элементах промышленных печей и т.д.

Диссертант описал механизмы интенсификации теплообмена, рассмотрел результаты исследования теплообмена и гидродинамики при обтекании сферических выемок: Г. И. Кикнадзе, А. И. Леонтьева, Я. П. Чудновского, В. И. Терехова, С. А. Исаева, В. Sundén, А. П. Козлова, А. А. Халатова, А. В. Щукина, Г. П. Нагоги, Ю. М. Анурова, Р. М. Ligrani, Ю. Ф. Гортышова, И. А. Попова, М. А. Готовского, Ю. И. Шанина, А. В. Воскобойника, С. З. Сапожникова, А. А. Цынаевой, Н. И. Михеева, А. В. Щелчкова, С. А. Бурцева, S. D. Hwang и др. Сопоставлены интенсификация теплообмена и повышение гидравлического сопротивления. Указано, что высокая

теплогидравлическая эффективность и интенсификация теплообмена достигаются при значительном повышении сопротивления каналов со сферическими выемками. Выполнен обзор новых форм выемок, включая овально-траншейные, включая собственные результаты автора. Среди современных исследований овально-траншейных выемок выделены работы В. И. Терехова, С. А. Исаева, А. В. Воскобойника, С. З. Сапожникова, С. В. Гувернюка, Н. И. Михеева, А. В. Щелчкова. Отмечено, что рекомендации по оценке тепловых и гидравлических характеристик в каналах с подобными формами интенсификаторов отсутствуют.

На основе обзора сформулирована основная цель работы и поставлены задачи исследования.

Во второй главе описана методика экспериментальных исследований и обработки полученных результатов.

При исследовании использовался комплекс установок.

Создан и использован экспериментальный водопроливной стенд для высокоскоростной визуализации течения в каналах с поверхностными интенсификаторами. Он представляет собой замкнутый контур с принудительной подачей воды к рабочему участку. Помимо визуализации течений, на стенде измерены гидравлические сопротивления каналов с поверхностными интенсификаторами.

Для визуализации полей температуры при обтекании вихрегенераторов разработан и создан экспериментальный стенд, представляющий собой воздушную магистраль, работающую на всасывание.

Основная часть экспериментальных исследований гидродинамики и теплообмена в каналах с вихрегенераторами выполнена на воздушном напорном стенде.

Для каждого стенда разработаны и созданы рабочие участки, позволяющие производить все измерения, достаточные для исследований обтекания систем выемок, а также их теплогидравлических характеристик.

Разработаны методики обработки данных. Дана оценка неопределенности измерений. Коэффициент гидравлического сопротивления определяется с относительной расширенной неопределенностью от 7,0 до 13,4 %, а число Нуссельта – от 9,0 до 14,9 % при доверительной вероятности $P=0.95$. Это позволяет считать результаты опытов достоверными.

Установки и методики обработки данных тестированы путем сравнения результатов с известными зависимостями. Выявлено, что максимальное отклонение коэффициента гидравлического сопротивления от известных зависимостей для ламинарного и турбулентного течений не превышает 10 %, а отклонение коэффициента теплоотдачи – 10...15 %, что подтверждает работоспособность оборудования и адекватность методик обработки.

В третьей главе представлены результаты экспериментального исследования гидравлического сопротивления и теплообмена в каналах с системами овально-траншейных выемок, оценены достигнутая интенсификации теплообмена и теплогидравлическая эффективность, обоснован выбор размеров вихрегенераторов и рассчитаны коэффициенты гидравлического сопротивления и теплоотдачи в щелевых каналах.

На основе анализа физических процессов в сферических и овальных выемках различного удлинения предложена перспективная форма интенсификаторов в виде овально-траншейных выемок, наклоненных к набегающему потоку. На конструкцию такого углубления получен патент РФ.

В качестве объекта исследования выбрана овально-траншейная выемка с соотношениями размеров: $l/b = 5,78$ или $l_d/b = 6,78$; $\varphi = 45^\circ$; $h/b = 0,25...0,33$; $r = 0,025b$. Размеры установлены как рациональные на основе исследований теплообмена и сопротивления подобных выемок, проведенных работах С. А. Исаева.

Визуализация обтекания овально-траншейных выемок показывает, что в области крайней по ходу течения кромки овально-траншейной выемки возникают области с пониженными скоростями, а значит, с малыми локальными коэффициентами теплоотдачи. Это подтвердили и результаты

тепловизионных исследований. Удлинение выемок – а значит, появление данных областей – неизбежно, но необходимо повышать скорость течения.

Рассмотрены гидродинамически длинные каналы и взаимодействие вихревой структуры с основным потоком, вызывающие вторичные вихревые потоки в щелевом канале.

Исследования проведены в каналах с однорядной и многорядной системой выемок. Показано, что коэффициенты теплоотдачи канала с односторонним расположением однорядной системы выемок при турбулентном режиме течения на 20...55 % выше, чем в плоском гладком канале. Коэффициенты теплоотдачи канала с односторонним расположением многорядной системы выемок при турбулентном режиме течения в 2,3...2,5 раза выше, чем в плоском гладком канале. Достаточно высокая теплогидравлическая эффективность достигнута за счет сопоставимого роста сопротивления и теплоотдачи.

В наиболее перспективном диапазоне определяющих параметров, получены уравнения подобия для теплообмена и гидравлического сопротивления. Для оценки теплообмена и гидравлического сопротивления использована нейросетевая методика.

Главу завершает разработка рекомендаций для оценки рациональных размеров интенсификатора в виде овально-траншейных выемок, параметров теплообмена и сопротивления, теплогидравлической эффективности.

Четвертая глава содержит обсуждение результатов экспериментального исследования гидравлического сопротивления и теплообмена в каналах с системами овально-дуговых выемок. В ней описана интенсификация теплообмена, оценена теплогидравлическая эффективность, даны рекомендации по рациональным размерам вихрегенераторов в щелевых каналах с ними.

Анализ визуализации ранее показал, что в области крайней по длине выемки и ходу течения кромки овально-траншейной выемки возникают области с пониженными скоростями и низкими локальными коэффициентами теплоотдачи. Это подтверждено как результатами тепловизионной

диагностики, так и результатами численных исследований С. А. Исаева. Необходимо повышать скорость течения и, как следствие, локальные коэффициенты теплоотдачи по всей длине выемки. Для этого предложена форма овально-дуговых выемок, расположенных периодически.

В качестве объекта исследования выбрана овально-дуговая выемка с соотношениями размеров: $l/b = 5,78$ или $l_d/b = 6,78$; $\varphi = 45^\circ$; $h/b = 0,25 \dots 0,33$; $r = 0,025b$. Проведены исследования одно- и многорядных систем овально-дуговых выемок.

Коэффициенты теплоотдачи канала с односторонним расположением однорядной системы таких выемок при турбулентном режиме течения на 20...71 % выше, чем в плоском гладком канале, что на 10% выше, чем сопротивление в канале с овально-траншейными выемками. Коэффициенты теплоотдачи канала с односторонним расположением многорядной системы выемок при турбулентном режиме течения в 2,5 раза выше, чем в плоском гладком канале.

Теплогидравлическая эффективность каналов с овально-дуговыми выемками на 23 и 14% выше, чем для овально-траншейных выемок при одно- и многорядном расположении, соответственно.

Основной механизм интенсификации в овально-дуговых выемках остается прежним: увеличение скорости вихревых структур в выемке и скорости основного потока на границе пограничного слоя в следе. Оба фактора зависят только от относительного удлинения выемки, и периодического разрушения пограничного слоя (с повышением теплоотдачи) в области присоединения потока по задней кромке выемки.

Автор предложил новую форму выемки, которая по всем характеристикам лучше, чем ранее рассмотренная овально-траншейная выемка. Он предложил еще одну форму выемок, позволяющую управлять процессом теплообмена в канале за счет изменения геометрии, которая рассмотрена далее.

В пятой главе представлены результаты численного исследования гидравлического сопротивления и теплообмена в каналах с системами выемок в

форме бумеранга, установлена интенсификация теплообмена, дана оценка теплогидравлической эффективности и рекомендации по рациональным размерам вихрегенераторов.

Предложена и запатентована конструкция поверхностного интенсификатора новой формы в виде периодически нанесенных выемок в виде бумерангов. Данная конструкция ликвидирует недостатки интенсификаторов в виде овально-траншейной выемки и имеет большую эффективность, чем для овально-дуговых.

Анализ проводился по результатам численного моделирования, выполненного с использованием многоблочных вычислительных технологий, реализованных в пакете VP2/3. Постановка задачи, математическая модель и технология решения идентичны ранее описанным в работах С. А. Исаева.

Результаты численных исследований показали, что темп возрастания тепловой эффективности значительно опережает рост гидравлических потерь. Тепловая эффективность поверхности с выемками в форме бумеранга максимальна при соотношении длин $l_1/l = 0,5$ и составляет $Nu/Nu_0 = 1,115$. Для поверхности с овально-траншейными выемками ($l_1/l=1,0$) тепловая эффективность ниже: $Nu/Nu_0 = 1,09$. Гидравлические потери на участке поверхности с выемками в форме бумеранга максимальны при соотношении длин $l_1/l = 0,5$ и составляют $\xi/\xi_0=1,17$. Для поверхности с овально-траншейными выемками ($l_1/l = 1,0$) прирост гидравлического сопротивления ниже: $\xi/\xi_0 = 1,127$. Максимальная теплогидравлическая эффективность $E = 1,06$ получена для выемки в форме бумеранга с относительным удлинением $l_k/b = (l_1+l_2+b)/b = 6,78$ при соотношении длин $l_1/l = 0,5 \dots 0,6$.

Выполненное сравнение с поверхностью с овально-траншейными выемками показало преимущество выемок в форме бумеранга при соблюдении соотношений размеров выемки: $l/b = 4,7 \dots 5,78$ или $l_k/b = 5,57 \dots 6,78$; $l_1/l = 0,5 \dots 0,6$; $\varphi = 45^\circ$; $h/b = 0,18 \dots 0,37$; $r = 0,025b$.

Даны новые рекомендации по форме, размерам и достигаемым значениям коэффициентов теплоотдачи, сопротивления и теплогидравлической эффективности.

В заключении сформулированы основные результаты диссертационной работы.

Приложения содержат акт внедрения результатов работы и основную информацию по патентам на изобретения, сделанные по теме диссертационной работы.

Можно констатировать, что А. А. Миронов, *достиг цели решил основную задачу исследования* – разработка рекомендаций для прогнозирования теплообмена и гидравлического сопротивления при вынужденной конвекции теплоносителя в щелевых каналах с поверхностными вихревыми интенсификаторами на основе комплексного экспериментального и численного исследования.

Научная новизна полученных результатов заключается в том, что автор предложил и запатентовал новые формы поверхностных интенсификаторов в виде овально-траншейных, овально-дуговых выемок и выемок в форме бумеранга, а также установлены рациональные размеры интенсификаторов для турбулентного режима течения; экспериментально исследовал картины течения, гидравлическое сопротивление и теплообмен в условиях вынужденной конвекции в щелевых каналах с поверхностными вихрегенераторами в виде различных компоновок систем овально-траншейных и овально-дуговых выемок; впервые установил зависимости коэффициентов теплоотдачи и гидравлического сопротивления от режимных и геометрических параметров для однорядных систем овально-траншейных выемок; на основе полученных экспериментальных данных выполнил верификацию результатов численных исследований С. А. Исаева по поверхностным вихревым интенсификаторам; численно исследовал теплообмен и гидравлическое сопротивление в каналах с поверхностным интенсификатором нового типа – в виде бумеранга; разработал рекомендации

для прогнозирования уровня интенсификации теплообмена и роста коэффициентов гидравлического сопротивления в условиях вынужденной конвекции в щелевых каналах на основе нейросетевого и регрессионного анализов теплообмена.

Теоретическая и практическая значимость результатов заключаются в новых сведениях о гидродинамике и теплообмене в каналах с системами выемок различных форм в условиях вынужденной конвекции; апробировании нового подхода к прогнозированию коэффициентов теплоотдачи и гидравлического сопротивления в зависимости от формы поверхности с использованием искусственной нейронной сети; а также в верификации численных исследований С. А. Исаева по гидродинамике и теплообмену в каналах с различными типами вихрегенераторов; в новых рекомендациях по выбору рациональных размеров интенсификаторов теплообмена, позволяющих рассчитывать и прогнозировать системы охлаждения энергетического оборудования и теплообменников.

Степень достоверности результатов исследования

Достоверность результатов диссертации подтверждается использованием в экспериментальных исследованиях лабораторных стендов с современными высокоточными контрольно-измерительными приборами и поверенными средствами измерений; использованием при теоретическом исследовании основных положений теории тепломассообмена; согласованностью расчетных данных с результатами экспериментов.

Работа прошла широкую *апробацию* – результаты докладывались и обсуждались на 19 международных и всероссийских конференциях. Основные результаты диссертации опубликованы в 32 работах, в том числе в 5 статьях в рецензируемых научных изданиях, входящих в перечень ВАК по специальности диссертации, 4 – в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в международной базе данных Scopus, 1 – в международном рецензируемом научном журнале. По результатам работы получены 3 патента РФ на изобретения.

2.4.6. Теоретическая и прикладная теплотехника по пунктам паспорта:

4 – «Процессы переноса массы, импульса и энергии при свободной и вынужденной конвекции в широком диапазоне свойств теплоносителей и характеристик теплопередающих поверхностей, в одно- и многофазных системах и при фазовых превращениях»;

5 – «Научные основы и методы интенсификации процессов тепло- и массообмена и тепловой защиты».

Основную часть работы А. А. Мироновым выполнил лично.

Автореферат полностью соответствует содержанию диссертации и отражает ее основные результаты, положения и выводы.

Замечания по работе:

1. Из текста работы не ясно, измерялся массовый расход воды или объемный.
2. Какова мощность ТЭНа в баке-нагревателе с водой?
3. В экспериментах «сила тока измерялась клещами токоизмерительными АТК-2012, а напряжение – многофункциональным мультиметром DEFORT DMM-1000». Фиксировались ли при этом другие параметры: установившееся отклонение напряжения, размах изменения напряжения, отклонение частоты и т.д.? Показатели качества электроэнергии, поступающей на ЛАТР из сети, влияют на джоуль-ленцев тепловой поток.
4. При расчете теплового потока Q , отводимого от нагреваемой поверхности, не указано, как определялись тепловые потери $Q_{\text{пот}}$. Кроме того, $Q_{\text{пот}}$ не учтены при расчете неопределенности коэффициента теплоотдачи (формула 2.29).
5. В разделе 5.2.7 при валидации и верификации расчета «в качестве интегральных параметров выбраны поперечная нагрузка Rz и среднее число Нуссельта в области выемки», однако, этот выбор не обоснован.

6. На разных экспериментальных установках при расчете чисел подобия (Re и Nu) меняется характерный размер, и возникают соответствующие индексы, однако в списке условных обозначений это не отображено.

7. Текст диссертации тяжеловесен. Автор использует термины «тепловая энергия», «прирост/рост теплоотдачи», «количества тепла» и т.д., что не соответствует сложившейся терминологии.

Заключение

Указанные замечания носят рекомендательный характер, не являются существенными и не снижают общей высокой оценки диссертационной работы.

Диссертационная работа Миронова Александра Александровича «Теплообмен и гидродинамика при течении однофазного теплоносителя в щелевых каналах с поверхностными вихрегенераторами различной формы», представленная на соискание учёной степени кандидата технических наук, является законченной научно-квалификационной работой на актуальную тему, выполненной на высоком научном уровне. В диссертации содержится решение задач, имеющих теоретическую и практическую ценность для теплового и гидравлического расчета и создания высокоэффективного теплообменного оборудования для энергетики, энергоемких отраслей промышленности, транспортных систем и т.д.

Диссертационная работа Миронова Александра Александровича по актуальности, научной новизне, научной и практической значимости соответствует требованиям пунктов 9-14, установленными Положением о порядке присуждения ученых степеней, утвержденным Постановлением Правительства Российской Федерации от 30 января 2002 г. № 74 (в редакции постановления Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. N 842); предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а её автор Миронов Александр Александрович заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.4.6. Теоретическая и прикладная теплотехника.

Отзыв на диссертацию подготовлен на основании обсуждения работы на заседании Высшей школы атомной и тепловой энергетики Института энергетики ФГАОУ ВО СПбПУ и принятого заключения (протокол № 8 от 12.12.2024, присутствовало – 20, поддержало текст отзыва – 20.).

Профессор высшей школы атомной
и тепловой энергетики, директор научно-
образовательного центра «Теплофизика в
энергетике»,
доктор технических наук по специальности
05.16.08 – «Металлургическая теплотехника»,
профессор,
e-mail: serg.sapozhnikov@mail.ru,
тел: +7 812 552 77 73

Сапожников
Сергей
Захарович

Доцент высшей школы атомной
и тепловой энергетики,
кандидат технических наук по специальности
01.04.14 – «Теплофизика и теоретическая
теплотехника»,
e-mail: serosht_vv@spbstu.ru
тел: +7 981 885 66 69

Сероштанов
Владимир
Викторович

Сведения о ведущей организации: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» (СПбПУ).

Адрес: 195251, г. Санкт-Петербург, вн. тер. г. муниципальный округ Академическое, ул. Политехническая, д. 29 литера Б

Сайт: <https://www.spbstu.ru>

E-mail: office@spbstu.ru

Телефон: +7 (812) 775-05-30, 8 (800) 707-18-99

