

В диссертационный совет Д 212.079.02 при
ФГБОУ ВО «Казанский национальный
исследовательский технический университет
им. А.Н. Туполева-КАИ»

420111, г. Казань, ул.К.Маркса, д.10

ОТЗЫВ

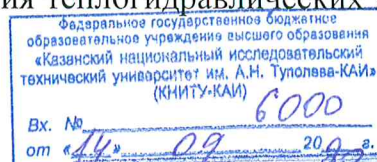
официального оппонента на диссертационную работу

Скрыпника Артёма Николаевича «Гидравлическое сопротивление и теплоотдача труб с внутренним спиральным оребрением при однофазном течении теплоносителя», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника

Актуальность работы.

Повышение энергоэффективности технологического оборудования является в настоящее время одним из приоритетных направлений развития науки и техники в нашей стране. Особенно остро эта задача стоит при разработке теплообменного и энергетического оборудования. Интенсификация теплообменных процессов позволяет значительно снизить объемы оборудования, затраты на их изготовление, транспортировку и монтаж. Одним из перспективных направлений интенсификации теплообменных процессов является использование различных поверхностных интенсификаторов теплоотдачи. Большое количество конструкций таких интенсификаторов описано в литературе, однако до сих пор создание эффективных методов прогнозирования гидродинамики и теплообмена для течений в трубах с поверхностными интенсификаторами далеко от своего завершения. С широким развитием в настоящее время компьютерных методов расчета сложных течений сред, переноса в них тепла появилась возможность решения указанной проблемы на высоком научном уровне. В связи с этим, актуальность представленной работы не вызывает сомнений.

Целью диссертационной работы Скрыпника А.Н. является экспериментальное и теоретическое исследование гидравлического сопротивления и теплоотдачи при течении жидкости в трубах с внутренним спиральным оребрением с последующей разработкой рекомендаций для прогнозирования теплогидравлических характеристик таких устройств.



Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка используемых литературных источников, включающего 259 наименований и приложений. Текст диссертации напечатан на 196 страницах и содержит 70 рисунков и 24 таблицы.

Во введении сформулированы цель и задачи исследования, показаны актуальность и степень разработанности темы, научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, положения, выносимые на защиту, отмечена достоверность научных результатов, а также приведены сведения о методологии и методах исследования и апробации работы.

В первой главе представлен литературный обзор по состоянию научных исследований и промышленного применения интенсификаторов теплообмена в виде внутреннего спирального оребрения труб. Рассмотрены различные типы геометрии труб с внутренним спиральным оребрением и структура течения в них. Проведен анализ теплогидравлических характеристик труб в внутреннем спиральным оребрением в ламинарной и турбулентной областях течения.

Приведено описание имеющихся в литературе зависимостей, обобщающих экспериментальные данные по коэффициенту гидравлического сопротивления и теплоотдаче в течениях внутри труб со спиральным оребрением. Отмечено, что подавляющее большинство обобщающих зависимостей получена для определенных специфических типов геометрии спирального оребрения. Кроме того, в разных работах используются различные геометрические симплексы, что приводит к необходимости дополнительного комплексного анализа имеющихся данных, а также проведения дополнительных исследований. В главе поставлены цель и задачи исследования.

Во второй главе приведено описание объекта исследования, схема и геометрические характеристики труб с внутренним спиральным оребрением, полученным методом деформирующего резания. Представлено описание двух созданных экспериментальных стендов (водного и воздушного) для исследования теплогидравлических характеристик труб с внутренним спиральным оребрением. Для двух описанных стендов описаны методики проведения экспериментальных исследований и методики обработки экспериментальных данных. Принципиальное отличие рабочих участков стендов заключается в том, что в водном стенде тепло подводилось с помощью жидкого теплоносителя, протекающего в кольцевом зазоре между исследуемой и дополнительной внешней трубами, а в воздушном стенде

– от нагревающей спиральной проволочной навивки. Отличие рабочих участков обусловило отличие методик обработки полученных данных.

Выполнена оценка неопределенности проведенных измерений, которая показала, что величина коэффициента гидравлического сопротивления определялась с относительной неопределенностью от 7 до 24,1%, а значения числа Нуссельта – от 13,2 до 19,1%. Проведены тестовые опыты по определению гидравлического сопротивления и среднего коэффициента теплоотдачи в гладкостенной трубе, устанавливаемой на рабочих участках водного и воздушного стендов. Сопоставление полученных результатов с расчетами по формулам Хагена-Пуазейля и Филоненко для коэффициентов гидравлического сопротивления в ламинарном и турбулентном режимах течения и формулами Михеева М.А. для числа Нуссельта при аналогичных режимах показало их хорошее совпадение в пределах расхождения не более 15%.

В третьей главе приведены результаты экспериментального исследования и численного моделирования гидравлического сопротивления и теплообмена при течении жидкости в трубах с внутренним спиральным оребрением. Экспериментальное исследование выполнено в широком диапазоне чисел Рейнольдса (500 – 200000). Отмечено влияние геометрических параметров оребрения на прирост гидравлического сопротивления и числа Нуссельта.

Численное моделирование течения проводилось с использованием пакета Ansys Fluent и позволило произвести визуализацию течения и оценить интегральные и локальные параметры потока в трубах с геометрическими параметрами, соответствующими трубам, испытанным на опытных стендах. Расхождение опытных и расчетных данных по коэффициенту гидравлического сопротивления не превышает 15% для малых углов наклона оребрения и 5 % - для больших углов. Получены линии тока и распределение температур в трубах. Отмечено принципиальное различие картин течения в трубах с малыми углами наклона оребрения, где наблюдается преобладание закрутки потока, и трубах с большими углами наклона оребрения, где преобладает отрывной характер обтекания выступов. Для труб с внутренним оребрением рассчитаны также величины касательных напряжений и распределение прироста среднего коэффициента теплоотдачи по сравнению с гладкой трубой.

Определены безразмерные геометрические факторы оребрения, влияющие на процессы течения жидкости и теплообмена в трубах с внутренним спиральным оребрением и выполнен поиск зависимостей, обобщающих как данные, получен-

ные диссертантом, так и широкий круг опытных данных, имеющихся в литературе. В качестве определяющих геометрических симплексов подобия приняты относительные осевой шаг выступов, высота выступа и угол наклона оребрения. Обобщающие зависимости получены в виде степенных критериальных уравнений как для всего диапазона изменения влияющих критериев и симплексов подобия, так и с разбивкой диапазона изменения шага выступов, углов наклона оребрения на интервалы. В первом случае точность зависимостей составляла $\pm 50\%$ для гидравлического сопротивления и $\pm 41\%$ - для числа Нуссельта. Во втором случае при разбивке диапазонов параметров на интервалы точность обобщающих зависимостей удалось повысить до $\pm(12-34)\%$.

На основе метода искусственных нейронных сетей автором получена математическая модель для расчета гидравлического сопротивления и числа Нуссельта в трубах со спиральным оребрением. Сопоставление результатов, полученных с помощью модели искусственной нейронной сети с полученными в настоящей работе обобщающими зависимостями показало их удовлетворительное согласие (не более 17% для коэффициента гидравлического сопротивления и не более 25,5% для коэффициента теплоотдачи).

Четвертая глава посвящена оценке теплогидравлической эффективности теплообменных аппаратов с применением труб с внутренним спиральным оребрением. Определена теплогидравлическая эффективность труб на основе подходов Уэбба и Эккерта с введением ограничений о постоянстве расхода, длины труб и тепловой мощности, а также методом генерации энтропии. Кроме этого были проведены натурные испытания теплообменного аппарата с применением пучка труб со спиральным оребрением. Наибольшие тепловая мощность и потери напора зафиксированы для труб с наибольшим углом наклона оребрения (86°). Проведено сравнение внутреннего спирального оребрения с другими интенсификаторами теплообмена, такими как поперечная накатка, сферические выступы, которое выявило несомненное преимущество первых при малых углах оребрения.

Оптимальные геометрические параметры труб определялись с применением генетического алгоритма многокритериальной оптимизации. В результате получены оптимальные геометрические параметры труб с внутренним спиральным оребрением, обеспечивающие максимальный прирост числа Нуссельта относительно гладкой трубы при минимальном увеличении коэффициента гидравлического сопротивления. На основании проведенных исследований сформированы рекоменда-

ции по прогнозированию и выбору рациональных параметров труб с внутренним спиральным оребрением.

Заключение диссертации является обоснованным и в основном отражает результаты, полученные соискателем.

В приложении приведены список работ, содержащих опытные данные по гидравлическому сопротивлению и теплоотдаче в трубах с внутренним спиральным оребрением с указанием диапазонов значений геометрических и режимных параметров, имеющиеся в литературе обобщающие зависимости, расчет неопределенности измерений, метрики обобщающих зависимостей, сведения о сходимости решений задачи оптимизации, значения весовых коэффициентов моделей нейронных сетей, копии актов о внедрении результатов исследования.

Автореферат и список публикаций по работе соответствуют диссертации.

Научная новизна диссертационной работы заключается в том, в результате комплексных экспериментальных исследований на созданных опытных стендах получены новые данные по гидравлическому сопротивлению и теплоотдаче в трубах с внутренними поверхностными интенсификаторами в виде спирального оребрения. Полученные результаты, наряду с известными ранее литературными данными включены в расширенную базу данных по коэффициентам гидравлического сопротивления и теплоотдаче, для которой получены обобщающие зависимости. Проведены расчетные исследования течения и теплообмена в трубах с интенсификаторами с применением пакета Fluent и с помощью созданной автором модели на основе метода искусственных нейронных сетей.

На основе метода минимизации генерации энтропии и генетического алгоритма определены оптимальные значения геометрических параметров спирального оребрения, обеспечивающие максимальный прирост тепловой эффективности при минимальных гидравлических потерях, подтвержденные в процессе испытаний лабораторного образца теплообменного аппарата.

Достоверность полученных результатов подтверждается использованием современных сертифицированных приборов и методик экспериментального исследования, современных компьютерных средств и программного обеспечения, применением фундаментальных законов механики жидкости и газа, теплообмена и удовлетворительным согласованием результатов расчетов по разработанным математическим моделям с экспериментальными результатами, полученными в настоящей работе и данными других авторов.

Теоретическая и практическая значимость работы заключается в том, что предложен новый подход к прогнозированию теплогидравлических характеристик теплообменных труб на основе применения искусственных нейронных сетей, опробованный на трубах со спиральным внутренним оребрением, а также изучены механизмы интенсификации теплоотдачи в таких трубах в результате комплексного экспериментального исследования и математического моделирования. Получены обобщающие зависимости для коэффициентов гидравлического сопротивления и теплоотдачи в широком диапазоне значений числа Рейнольдса и геометрических симплексов подобия.

На основании проведенных исследований разработаны рекомендации по выбору рациональных параметров теплообменных труб с внутренним спиральным оребрением, созданы и испытаны лабораторные стенды со сменными трубными пучками для исследований гидродинамики и теплообмена при течении в трубах с интенсификаторами теплоотдачи. Основные результаты работы внедрены в ООО «Газпром трансгаз Казань», АО «Казанское ОКБ «Союз», ООО «Инженерный центр «Энергопрогресс».

Рекомендации по использованию результатов диссертации.

Представляет большой интерес дальнейшее проведение исследований и систематизации результатов в области экспериментальных и численных исследований гидродинамики и переноса тепла в устройствах для интенсификации теплообмена и создание методов прогнозирования их теплогидравлической эффективности. Интересным является создание прикладного пакета программ для определения эффективности и оптимизации параметров теплообменных труб с интенсификаторами теплоотдачи

Полученные в диссертации результаты могут оказаться полезными для инженеров и научных работников, занимающихся разработкой и проектированием теплообменного оборудования. Материалы диссертации могут быть переданы в следующие организации: Московский государственный технический университет им. Н.Э.Баумана; Санкт-Петербургский политехнический университет им. Петра Великого, Московский энергетический институт (Технический университет), АО «Татэнерго» (г. Казань), ПАО «Мосэнерго», НПП ОПЕКС Энергосистемы (г. Белгород) и другие организации и университеты.

По теме диссертации опубликовано 34 печатных работах, в том числе 6 статьях в журналах, рекомендованных ВАК, 4 статьях в периодических изданиях,

входящих в базу Web of Science, 3 статьях в изданиях, входящих в базу Scopus и 21 публикация в сборниках Всероссийских и международных научных конференций.

Основные результаты работы докладывались и обсуждались на Международной научно-технической конференции «Проблемы и перспективы развития авиации, наземного транспорта и энергетики «АНТЭ-2015» (Казань, 2015 г.), 5, 6 и 7 Всероссийской конференции с международным участием «Тепломассообмен и гидродинамика в закрученных потоках» (Казань, 2015 г.; Новосибирск, 2017 г.; Рыбинск, 2019 г.), XXII и XXIV международной молодёжной научной конференции «Туполевские чтения» (Казань, 2015 г., 2019 г.), 8 и 12 Всероссийской конференции молодых ученых и специалистов (с международным участием) «Будущее машиностроения России» (Москва, 2015, 2019 гг.), XV Минском международном форуме по тепло- и массообмену (Минск, 2016 г.), X школе-семинаре молодых ученых и специалистов академика РАН В.Е.Алемасова «Проблемы теплообмена и гидродинамики в энергомашиностроении» (Казань, 2016 г.), 9 Международной теплофизической школе «Теплофизические исследования и измерения при контроле качества веществ, материалов и изделий» (Душамбе, 2016 г.), XXI и XXII Школе-семинаре молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А.И. Леонтьева «Проблемы газодинамики и теплообмена в энергетических установках» (Санкт-Петербург, 2017 г.; Москва, 2019 г.), XXXIII и XXXV Всероссийской конференции с элементами научной школы для молодых учёных «Сибирский теплофизический семинар» (Новосибирск, 2017 г., 2019 г.), 7-ой Российской национальной конференции по теплообмену (Москва, 2018 г.), Международной конференции «Информационно-сенсорные системы в теплофизических исследованиях» (Тамбов, 2018 г.), Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Новые технологии, материалы и оборудование российской авиакосмической отрасли» (Казань, 2018 г.), 5th International Workshop on Heat-Mass Transfer Advances for Energy Conservation and Pollution Control (Новосибирск, 2019 г.).

Замечания по работе:

- 1) Графики на рисунке 3.1 (стр.78) представляют основные экспериментальные результаты, полученные автором. Тем не менее, рисунки мелкие, плохо читаемые, все экспериментальные точки сливаются. В автореферате эти рисунки отсутствуют совсем, а приведен лишь их анализ.

- 2) Рисунок 3.4 на стр.86 также получился плохо читаемым. По нему сложно получить представление о распределении температур в потоке.
- 3) Определение адекватности математической модели, созданной в среде Fluent, проводилось сравнением расчетных результатов с экспериментом только по коэффициентам гидравлического сопротивления (рис. 3.3), но результаты расчета содержат также данные по теплоотдаче (рис. 3.10), адекватность которых не подтверждена.
- 4) Генетический алгоритм оптимизации выбран автором из многочисленных методов параметрической оптимизации без должного обоснования.
- 5) В заключении по работе не содержатся выводы по результатам математического моделирования течения и теплообмена в трубах со спиральным оребрением.
- 6) В диссертации встречаются опечатки. На рисунке 4.11 не нанесены точки для образца №3.

Указанные замечания не влияют на общую положительную оценку работы.

Заключение.

В диссертационной работе проведено комплексное экспериментальное и теоретическое исследование гидравлического сопротивления и теплообмена при течении жидкости в трубах с интенсификаторами теплоотдачи в виде внутреннего спирального оребрения.

В целом, по объему и научному уровню, актуальности и научной новизне полученных результатов, их практической ценности диссертационная работа Скрыпника Артема Николаевича «Гидравлическое сопротивление и теплоотдача труб с внутренним спиральным оребрением при однофазном течении теплоносителя» полностью соответствует требованиям п.9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 года № 842 Высшей аттестационной комиссии Российской Федерации, предъявляемым к кандидатским диссертациям, являясь научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором исследований изложены новые научно обоснованные технические решения и разработки в области гидродинамики и теплоотдачи в теплообменных устройствах с повышенными теплоэнергетическими характеристиками, имеющие существенное значение для проектирования современного теплообменного оборудования для ряда отрас-

лей промышленности, таких как энергетика, машиностроение, химическая промышленность.

Автор диссертации Скрыпник Артем Николаевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника.

Официальный оппонент,
заведующий кафедрой

Николаев Андрей Николаевич

«Оборудование пищевых
производств» ФГБОУ ВО
«Казанский национальный
исследовательский
технологический университет»,
доктор технических наук,
профессор

420015, РФ, Республика Татарстан,
г. Казань, ул. К.Маркса, 68
тел.сл. : (843)231-43-61,
e-mail: andr_nik_nik@rambler.ru

Подпись Николаева АН

удостоверяется.

Начальник ОКД ФГБОУ ВО «Казанский



10.09.2020 г.

СВЕДЕНИЯ ОБ ОФИЦИАЛЬНОМ ОППОНЕНТЕ

по диссертационной работе **Скрыпника Артема Николаевича** на тему: «**Гидравлическое сопротивление и теплоотдача труб с внутренним спиральным оребрением при однофазном течении теплоносителя**» на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.04.14 - «Теплофизика и теоретическая теплотехника»

№	Фамилия, Имя, Отчество	Учёная степень, учёное звание	Сведения о работе		Список основных публикаций по теме диссертации в рецензируемых научных изданиях за последние 5 лет (но не более 15 публикаций)
			Полное наименование организации, почтовый адрес (индекс, город, улица, дом), телефон, адрес электронной почты	Должность с указанием структурного подразделения	
1	2	3	4	5	6
1	Николаев Андрей Николаевич	Доктор технических наук (11.00.11 – Охрана окружающей среды и рациональное использование природных ресурсов), профессор	Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский национальный исследовательский университет», 420015, Российская федерация, Республика Татарстан, г. Казань, ул. К.Маркса, дом 68 Тел.: +7(843) 238-56-94; Email: andr_nik_nik@rambler.ru адрес официального сайта в сети «Интернет» http://www.kstu.ru	Заведующий кафедрой «Оборудование пищевых производств»	<p>1. Галимуллина, А.Р. Охлаждение высокотемпературных промышленных газовых выбросов в полых вихревых аппаратах / А.Р. Галимуллина, В.В. Харьков, А.Н. Николаев // Вестник Казанского технологического университета, 2017. Т. 20. № 7. С. 128 - 130.</p> <p>2. Dmitrieva, O.S. Determination of Heat Transfer Coefficient of Falling Film to the Gas Flow in the Jet-Film Contact Device / O.S. Dmitrieva, A.V. Dmitriev, A.N. Nikolaev // International Conference on Industrial Engineering, ICIE 2017, pp. 1195-1200.</p> <p>3. Madychev, I.N. Study of fluid dynamics of mass-transfer apparatuses having stream-bubble contact devices / I.N. Madychev, O.S. Dmitrieva, A.V. Dmitriev, A.N. Nikolaev // Chemical and Petroleum Engineering, 2016. Vol.52. Issue 5–6. - p. 299–304.</p> <p>4. Dmitrieva, O.S. Flow dynamics of mass exchangers with jet-bubbling contact devices / O.S. Dmitrieva, A.V. Dmitriev, I.N. Madychev, A.N. Nikolaev // Chemical and petroleum engineering, 2017. Vol.53. Issue.1-2. С. 130 - 134.</p> <p>5. Вахитов, М.Р. Динамика прямого течения газа и пленки жидкости в цилиндрических каналах /М.Р. Вахитов, И.А. Дубков, Н.З. Дубкова, А.Н. Николаев // Вестник технологического университета, 2018. Т. 21. № 10. С. 50 - 54.</p> <p>6. Dmitriev, A.V. Efficiency of the contact stage of a jet-film device during rectification of ethylbenzene–styrene mixture / A.V. Dmitriev, O.S. Dmitrieva, I.N. Madychev, A.N. Nikolaev // Chemical and petroleum engineering, 2017. Vol.53. Issue.7-8. С. 430 – 434.</p> <p>7. Дубкова, Н.З. Оптимизация рабочих параметров в вибрационных смесителях непрерывного действия (часть 1) / Н.З. Дубкова, И.А. Дубков, М.Р. Вахитов, А.Н. Николаев // Вестник технологического университета, 2019. Т. 22. № 11. С. 118 - 121.</p> <p>8. Дубкова, Н.З. Оптимизация рабочих параметров в вибрационных смесителях непрерывного действия (часть 2) / Н.З. Дубкова, И.А. Дубков, М.Р. Вахитов, А.Н. Николаев</p>

				<p>лаев // Вестник технологического университета, 2019. Т. 22. № 11. С. 128 - 131.</p> <p>9. Сагадеев, В.В. Исследование толщины закрученного пристенного слоя жидкости в аппаратах вихревого типа /В.В. Сагадеев, А.В. Дмитриев, А.Н. Николаев // Вестник технологического университета, 2017. Т. 20. № 23. С. 36 - 38.</p> <p>10. Мадышев, И.Н. Теплоперенос в аппаратах со струйно-барботажными устройствами / И.Н. Мадышев, О.С. Дмитриева, А.Н. Николаев. – Beau Bassin: LAMBERT Academic Publishing, 2017, 195 с. ISBN 978-620-2-06605-1.</p>
--	--	--	--	---

Официальный оппонент
д. т. н., профессор

 А.Н. Николаев

Подпись Николаев АН

удостоверяется.

Начальник ОКИД ФГБОУ ВО «КНИТУ»



О.А. Перельгина

« 10 » 03

