

Отзыв

официального оппонента на диссертационную работу

Французова Максима Сергеевича

«Разработка метода оценки эффективности интенсификации конвективного теплообмена в каналах»,

представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности **1.3.14. – Теплофизика и теоретическая теплотехника**

Актуальность темы исследования. Диссертация М.С. Французова посвящена численному, экспериментальному и сравнительному исследованию различных способов интенсификации теплообмена конвективного теплообмена в каналах. Целью диссертационной работы является разработка метода оценки эффективности интенсификации теплообмена в каналах на основании обоснованного расчетно-экспериментального исследования различных видов интенсификаторов. Разработанная в диссертации методика, безусловно, имеет практическое приложение для расчета целого ряда теплонапряженных элементов конструкций, что делает данную работу актуальной для разработки современных высокоэффективных теплообменных устройств.

Научная новизна и практическая значимость исследований. В диссертационной работе М.С. Французова представлены следующие результаты, обладающие научной новизной:

1. С использованием численного моделирования получены новые тепловые и гидравлические характеристики для различных способов интенсификации теплообмена, включая сложные комбинированные и нестационарные способы интенсификации конвективного теплообмена.
2. Экспериментальные исследования позволили получить новые данные о гидродинамике и теплообмене для комбинированного способа интенсификации, установить характеристики нестационарного способа интенсификации с помощью самоподдерживающихся акустических колебаний.
3. Выполнено сравнение результатов расчетных и экспериментальных исследований для различных способов интенсификации на основании авторской методики оценки эффективности интенсификации конвективного теплообмена в каналах.
4. Разработан метод оценки эффективности интенсификации, который представляет собой обобщение и модификацию ранее предложенных другими исследователями подходов.

Представленные результаты имеют практическую значимость, которая заключается в следующем:

1. Алгоритм расчета, используемый при компьютерном моделировании гидродинамических и теплообменных процессов в каналах, может быть использован для расчетного исследования интенсификации конвективного теплообмена при изменении режимов течения, геометрических параметров, теплофизических свойств охладителей.

Отдел документационного
обеспечения МАИ

2. Метод оценки эффективности интенсификации позволяет в доступной форме сравнивать различные способы интенсификации конвективного теплообмена в каналах по интегральным критериям теплотехнического устройства.

3. Получена полезная для практического применения валидированная и верифицированная база данных тепловых и гидравлических характеристик различных способов интенсификации конвективного теплообмена в каналах.

4. Методика проведения экспериментального исследования, включая алгоритм обработки данных, позволяет непосредственно на одной экспериментальной установке исследовать в сопоставлении эффективность различных способов интенсификации теплообмена.

Обоснованность и достоверность научных положений и выводов.

Обоснованность и достоверность полученных расчетных данных обусловлена использованием современных аналитических и численных методов решения задач газовой динамики и теплообмена в диапазоне условий, которые прошли верификацию для рассматриваемых явлений. Достоверность экспериментальных результатов подтверждается применением аттестованных средств измерений и регистрации параметров в экспериментальном исследовании, а также использованием стандартизованных методик обработки результатов. Дополнительно автором в диссертационной работе уделяется внимание сравнению между расчетными и экспериментальными результатами и отмечается удовлетворительное соответствие.

Рекомендации по использованию результатов диссертации. Результаты данного диссертационного исследования могут быть использованы как теоретическая база для сравнения различных способов интенсификации конвективного теплообмена в каналах при моделировании, разработке, проектировании систем активного охлаждения теплонапряженных конструкций. Полученная информация о диапазонах эффективного применения различных способов интенсификации конвективного теплообмена в каналах представлена в доступной для дальнейшего исследования форме с использованием расчетных и экспериментальных исследований. Полученные в прямом сопоставлении данные о тепловых и гидравлических характеристиках позволяют конструкторам, разработчикам теплообменного оборудования оценить возможности эффективного применения того или иного способа интенсификации теплообмена.

Результаты диссертации можно рекомендовать для использования: в ЦИАМ им. П.И. Баранова, ООО «Газпром ВНИИГАЗ», ВНИИ холодильного машиностроения, предприятиях химической, нефтегазовой промышленности, криогенной промышленности и других предприятиях энергетического профиля (ОАО «НПО «ГЕЛИЙМАШ», ПАО «Криогенмаш», АО «Силовые машины» и др.), а также в ФГБОУ ВО «Московский политехнический университет», ФГБОУ ВО «МГТУ им. Н.Э. Баумана», Национальном исследовательском университете «Московский энергетический институт» (ФГБОУ ВО НИУ «МЭИ»), ФГБУН Институт теплофизики им. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук (ИТ СО РАН), ФГБУН Институт высоких температур РАН (ОИВТ РАН), ФГБУН Институт теплофизики Уральского отделения Российской академии наук (ИТФ УрО РАН), в компании РСК (разработчик и интегратор «полного цикла» инновационных энергоэффективных, высокоплотных, масштабируемых решений с жидкостным охлаждением для высокопроизводительных вычислений и систем для машинного/глубокого обучения, центров обработки данных, интеллектуальных систем хранения данных, г. Москва), профильных отраслевых НИИ (АО «Институт Гидропроект», Научно-исследовательском институте многопроцессорных вычислительных систем имени академика А.В. Каляева Южного федерального университета (НИИ МВС ЮФУ, г. Таганрог). Результаты проведенных исследований также целесообразно рекомендовать для студентов вузов и аспирантов в учебном

процессе, специализирующихся в области авиационной техники, энергетики, разработки систем охлаждения и тепловой стабилизации различного назначения в химической промышленности, в холодильной и криогенной технике.

Краткая характеристика основного содержания диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка использованной литературы. Работа содержит 207 страниц текста, включая 118 рисунков и 9 таблиц. Список используемой литературы содержит 123 наименования.

Во введении обосновывается актуальность диссертационного исследования; формулируется цель и основные задачи работы; описывается предлагаемый автором подход к решению поставленных задач; характеризуется степень новизны полученных результатов и их апробация. Кроме того, дается краткое изложение содержания диссертации.

В первой главе автор приводит обзор различных пассивных способов интенсификации конвективного теплообмена. Среди таких способов рассмотрены: искусственная шероховатость, ленточный спиральный завихритель, сферические лунки и т. д. Автором рассмотрены области практического применения этих способов, рассмотрены их преимущества и недостатки с точки зрения тепловых и гидравлических характеристик, особенности конструктивной реализации указанных методов. Среди способов со сложной геометрической конфигурацией автором рассмотрены компланарные каналы. Анализируя различные виды тепловой защиты теплонапряженных элементов конструкции, автором отмечено широкое распространение наружного проточного охлаждения. Большое внимание уделено вопросу оценки эффективности интенсификации теплообмена для рассмотренных методов, затронуты подходы, использующие факторы аналогии Рейнольдса, теплогидравлический критерий, энергетический коэффициент Кирпичева.

Во второй главе автором приведены результаты численного решения сопряженной тепловой задачи для одиночного канала активной системы охлаждения. Целью такого моделирования являлось определение влияния интенсификации теплообмена на необходимый («потребный») расход охладителя, при условии, что температура стенки не превышает допустимых значений. В основе решений уравнений газовой динамики лежит математическая модель, использующая уравнения Навье-Стокса, осредненные по Рейнольдсу (RANS), и уравнения энергии. Для замыкания модели использовалась двухпараметрическая модель турбулентности $k - \omega SST$. Результатом исследования стали конкретные оценочные характеристики по обоснованию вывода о том, что при одинаковых расходах температура огневой стенки может быть снижена за счет применения интенсификации теплообмена; при этом при одинаковой температуре стенки использование интенсификации позволяет использовать меньший расход охладителя. Опираясь на эти результаты автор предлагает конкретный способ оценки целесообразности использования интенсификации конвективного теплообмена в каналах активной системы охлаждения, основанный на располагаемом хладоресурсе охладителя.

С использованием математической модели и подходов к компьютерному моделированию тепловых и гидродинамических процессов, **в третьей главе диссертационной работы** автором представлено исследование интенсификации теплообмена в круглой трубе с различными видами интенсификаторов. Рассмотрены следующие виды интенсификаторов: спиральная проволока, скрученная лента, одновременно спиральная проволока и скрученная лента, система плоских профилей, установленных вдоль оси канала поперек потока. Для определяющего критерия подобия – числа Рейнольдса определены тепловые и гидравлические характеристики каждого способа интенсификации теплообмена и там, где это возможно, проведено сравнение с известными критериальными зависимостями других авторов. Особый интерес представляет авторское исследование нестационарного способа интенсификации

теплообмена при обтекании группы плоских профилей, установленных вдоль оси канала поперек потока.

Во второй части третьей главы автором представлен результат разработки метода оценки эффективности интенсификации конвективного теплообмена. При выводе аналитической зависимости для критерия эффективности интенсификации теплообмена представлена система уравнений, записанных относительно интегральных параметров теплообменного устройства. Используя в качестве опорного критерия максимального теплосъема, автор приводит результаты сравнения трех способов интенсификации теплообмена (искусственная шероховатость, сферические лунки и скрученная лента), для которых тепловые и гидравлические критерии взяты из известных литературных источников. Выполнено сравнение эффективности интенсификации теплообмена для орбренных и компланарных каналов, а также для каналов с межканальной транспирацией охладителя.

В заключительной части третьей главы приведено сравнение данных по эффективности рассмотренных автором способов интенсификации теплообмена по критерию «потребного» расхода охладителя непосредственно с результатами численного моделирования. Установлено, что разброс результатов между численным решением и расчетом по аналитической зависимости не превышает 5%.

Четвертая глава диссертационной работы посвящена экспериментальному исследованию тепловых и гидравлических характеристик различных способов интенсификации теплообмена в круглой трубе. Представлено детальное описание экспериментального стенда, средств измерений и методик измерений. На основании методики обработки результатов измерений перепада давления и температур автором получены зависимости безразмерного коэффициента теплоотдачи (числа Нуссельта) и коэффициента гидравлического сопротивления от числа Рейнольдса. Детально проанализированы нестационарные режимы/процессы для способа интенсификации теплообмена с помощью самоподдерживающихся акустических колебаний. Полученные частоты пульсаций давления в эксперименте сравнены с результатами компьютерного моделирования аналогичной конфигурации плоских профилей, представленных в третьей главе. Установлено, что наибольший разброс данных не превосходит 10%. Дополнительно к этому автором предприняты попытки трактовки различий между расчетными и экспериментальными данными по тепловым и гидравлическим характеристикам для каждого рассмотренного способа интенсификации. В завершение автор демонстрирует применение разработанного метода оценки эффективности интенсификации конвективного теплообмена в каналах: измеряемые в экспериментах расходы рабочего тела сравниваются для гладкого канала и для канала с интенсификаторами теплообмена с одной стороны, и затем с результатами расчета по разработанной аналитической зависимости. Разброс значений находится в пределах 5%.

В конце работы в разделе «Общие выводы и Заключение» приводятся четко сформулированные общие выводы, достаточно убедительно обоснованные в диссертационной работе.

Все представленные автором материалы диссертации прошли достаточную апробацию на ряде профильных отечественных и международных научных конференций, начиная с 2007 г. по настоящее время. Результаты опубликованы в 21 печатных изданиях, входящих в перечень ВАК, имеется патент на полезную модель. Опубликованные работы достаточно полно отражают основное содержание диссертации, детально характеризуют результаты проведенных исследований. Содержание автореферата в полной мере соответствует основным положениям и выводам представленной диссертационной работы.

Замечания по диссертационной работе:

1. В главе 2 при демонстрации эффекта, достигаемого при использовании интенсификаторов теплообмена для модельного канала, где решалась задача сопряженного теплообмена, детально не представлено влияние геометрических параметров канала, скорости течения и свойств рабочего тела.

2. Автору также целесообразно было бы более четко показать влияние теплопроводности материалов стенки и рассматриваемых интенсификаторов на тепловые и гидравлические характеристики.

3. В главе № 3 при использовании численных методов не представлено исследование точности использованных алгоритмов численного моделирования, в частности, не рассматривается вопрос сходимости по сетке.

4. В главе № 4 при описании методик экспериментального исследования не приводится описание процедуры осреднения температуры тепловыделяющей стенки при расчете тепловых характеристик.

5. По иллюстрациям с результатами компьютерного моделирования, на которых представлены распределения газодинамических параметров (давления, скорости, температуры) не всегда можно установить направление потока.

6. Желательно указать и прокомментировать возможную степень интенсификации теплообмена с помощью самоподдерживающихся акустических колебаний (рассмотренных в 3-й главе) во взаимосвязи с экспериментально установленными в 4-ой главе характеристиками/параметрами по пульсациям давления при интенсификации теплообмена с помощью самовозникающих акустических автоколебаний.

7. В тексте диссертационной работы имеется ряд грамматических ошибок (опечатки, отсутствие запятых, ошибки в окончаниях слов, отсутствие или наличие лишних пробелов между словами или перед запятыми: см.: стр. 4, 9, 12, 26, 30, 36, 38, 43, 44, 58, 135, 140, 144, 156, 160, 161, 165, 171; в автореферате: стр. 4, 7, 8, 10).

Указанные замечания ни в коей мере не снижают значимости полученных результатов и не влияют на общую положительную оценку диссертационной работы М.С. Французова.

Общее заключение.

Тема диссертации соответствует указанной научной специальности **1.3.14 – «Теплофизика и теоретическая теплотехника»** для технических наук и включает в себя моделирование и экспериментальные исследования процессов переноса тепла и массы в сплошных гомогенных средах, выявление механизмов переноса массы, импульса и энергии при конвекции, обоснование и проверку методов интенсификации тепломассообмена. Содержание работы соответствует паспорту специальности по **п. 5 «Экспериментальные и теоретические исследования однофазной, свободной и вынужденной конвекции в широком диапазоне свойств теплоносителей, режимных и геометрических параметров теплопередающих поверхностей»** и по **п. 9 «Разработка научных основ и создание методов интенсификации процессов тепло- и массообмена и тепловой защиты»**.

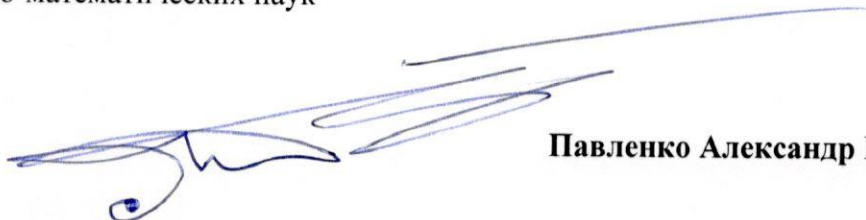
Таким образом, данная диссертация является **законченной научно-квалификационной работой**, в которой содержится решение задачи, имеющей важное значение для развития теплофизики и теоретической теплотехники в области тепломассообмена при вынужденной конвекции в каналах, изложены новые научно

обоснованные технические решения по разработке методов интенсификации процессов конвективного теплообмена, имеющие существенное значение для развития страны в области создания энергетического оборудования, авиационной техники и систем охлаждения различного назначения. Диссертация полностью соответствует всем критериям, установленным в пунктах (9-14) Положения о порядке присуждения ученых степеней № 842 от 23.09.2013 г., ред. 11.09.2021 г. Выявленные диссертантом новые закономерности, сформулированные выводы представляют собой в совокупности важное научное достижение в области развития научных основ по разработке высокоэффективных методов интенсификации теплообмена применительно к системам охлаждения в энергетике и аппаратам химической, холодильной и криогенной промышленности.

Считаю, что её автор **Французов Максим Сергеевич**, несомненно, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности **1.3.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника**.

Официальный оппонент,

заведующий научно-исследовательской лабораторией
низкотемпературной теплофизики
Федерального государственного бюджетного
учреждения науки Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе
Сибирского отделения Российской академии наук (ИТ СО РАН)
член-корреспондент РАН,
доктор физико-математических наук



Павленко Александр Николаевич.

630090, г. Новосибирск, просп. акад. Лаврентьева д.1. ИТ СО РАН.
Моб. тел.: +7 (913) 920-12-48, , раб.: 8(383) 328-43-87.
Электронная почта: pavl@itp.nsc.ru

“09” марта 2023 г.

Подпись А.Н. Павленко удостоверяю:

Земли секретарь ИТ СО РАН
к.фр.-м.н.



Печать.

Машаров М.С.

С отзвона
озвонившем

23.03.2023

Земли