

### Отзыв официального оппонента

на диссертацию 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 Французова М.С. посвящена численному и экспериментальному исследованию нескольких способов интенсификации теплообмена. Эффективность того или иного способа интенсификации теплообмена определяется соотношением между приростом теплоотдачи и гидравлического сопротивления, возникающего вследствие его применения. Высокоэффективные способы интенсификации теплообмена позволяют существенно снизить металлоемкость и теплонапряженность критических узлов энергетических установок, что является актуальной задачей современной энергетики.

Диссертационная работа состоит из введения, где сформулированы актуальность, задачи и цели работы, четырех глав, заключения и списка использованной литературы. Работа изложена на 207 страницах текста, содержит 118 рисунков и 9 таблиц. Библиографический список содержит 123 наименования цитируемой литературы.

В первой главе приведен обзор пассивных способов интенсификации теплообмена, включающих в себя как способы воздействия на весь поток с помощью шнековых, ленточных и пластинчатых завихрителей, так и способы воздействия на пограничный слой за счет создания искусственной шероховатости (накатка, проточки, выступы, лунки и т.п.). Рассмотрены их преимущества и недостатки. Также диссертант привел данные по интенсификации теплообмена в каналах со сложной конфигурацией проходного сечения – тракты с компланарными каналами и тракты, заполненные проницаемым пористым материалом. Большое внимание уделено сравнительному анализу различных способов теплозащиты таких как: наружное проточное (конвективное), пленочное и транспирационное охлаждение, а также теплозащитным покрытиям и жаропрочным материалам. Рассмотрены наиболее распространенные методы оценки эффективности интенсификации теплообмена (по фактору аналогии Рейнольдса, энергетическому коэффициенту Киршичева, критерию теплогидравлической эффективности).

Вторая глава посвящена численному исследованию теплообмена в плоском канале наружного проточного охлаждения камеры сгорания с интенсификаторами теплообмена в виде прямоугольных выступов. Математическая модель сопряженного теплообмена базируется на системе осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса (RANS) и уравнения энергии. В качестве замыкающей модели при расчетах использовалась двухпараметрическая модель турбулентности  $k - \omega SST$ . В результате показано, что применение интенсификаторов теплообмена позволяет снизить относительный расход охладителя при заданной допустимой температуре стенки. Предложен способ оценки целесообразности применения интенсификации теплообмена в каналах наружного проточного охлаждения камеры сгорания, опирающийся на располагаемый хладоресурс топлива.

Отдел документационного  
обеспечения МАИ

10. 03 2023

В третьей главе приведены результаты численного исследования теплообмена в круглой трубе при наличии различных способов интенсификации теплообмена: спиральная проволока, скрученная лента, одновременно спиральная проволока и скрученная лента, система профилей. Также проведены численные исследования плоского тракта с компланарными каналами, цилиндрических трактов с компланарными и оребренными каналами. Использовалась та же математическая модель, что и в главе 2. В широком диапазоне чисел Рейнольдса получены теплогидравлические характеристики указанных способов интенсификации. Проведено сравнение результатов с критериальными зависимостями других авторов для подобных способов интенсификации. Особое внимание уделено нестационарным эффектам, возникающим при обтекании интенсификаторов в виде системы профилей.

Приведена система уравнений, которые лежат в основе метода оценки эффективности интенсификации теплообмена по критериям тепловой мощности, расхода охладителя, потребного перепада давления. Далее метод использован для сравнения трех способов интенсификации теплообмена (выступы, лунки, скрученная лента) по критерию тепловой мощности. Приведен вывод выражений для оценки эффективности по критерию тепловой мощности для оребренных и компланарных каналов, а также каналов с транспирацией охладителя. В заключение главы приведено сравнение эффективности интенсификации теплообмена по критерию потребного расхода для численно исследованных автором способов интенсификации теплообмена непосредственно с данными по изменению расхода, полученными из численного расчета. Разброс не превышал 5%.

В четвертой главе приведено описание экспериментального стенда для исследования теплогидравлических характеристик в трубе круглого сечения с интенсификаторами теплообмена. Дано достаточно подробное описание стенда, исследуемых моделей и системы измерения. Результаты исследований оформлены в виде графиков: осредненный критерий Нуссельта – число Рейнольдса, коэффициент гидравлического сопротивления – число Рейнольдса. Более тщательно анализируется нестационарные пульсации давления, вызванные отрывами потока при обтекании системы профилей. Проведено сравнение полученных экспериментальных данных с результатами численных расчетов, полученных в третьей главе, для сходной геометрии интенсификаторов. Наибольший разброс данных составляет не более 10%. Для каждого способа интенсификации диссертант приводит анализ причин наблюдающихся расхождений между численными и экспериментальными результатами. В итоге диссертант демонстрирует применение разработанного метода оценки эффективности интенсификации теплообмена – регистрируемое в ходе проведения эксперимента изменение расхода теплоносителя при применении интенсификаторов теплообмена сравнивается с расчетной величиной, разброс результатов находится в пределах 5%.

В заключении формулируются основные результаты, полученные автором по теме диссертационной работы.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Получены новые данные экспериментального исследования интенсификации теплообмена в круглой трубе при помощи спирали, скрученной ленты, совместного использования спирали и скрученной ленты, а также системы профилей в диапазоне чисел Рейнольдса 15000-60000.
2. Результаты численного моделирования способов интенсификации теплообмена, указанных в п.1
3. Предложена модификация метода оценки эффективности интенсификации теплообмена, с помощью которой проведена сравнительная оценка исследованных способов интенсификации.
4. Экспериментально и численно показано, что более высокая эффективность по критерию снижения необходимого расхода охладителя достигается при использовании интенсификации с помощью системы профилей.

Достоверность полученных экспериментальных результатов подтверждается использованием современных измерительных приборов, отлаженной системой тарировки, оценкой неопределенностей, выполнении тестовых опытов, а также сопоставлением с результатами других авторов. Достоверность результатов численного исследования обусловлена приведенным в диссертации обоснованием применимости использованных и разработанных автором математических моделей для условий, при которых исследуются процессы интенсификации теплообмена.

Практическая значимость диссертационной работы заключается в том, что полученные автором данные и разработанный метод могут использоваться при проектировании проточных систем охлаждения и иного теплообменного оборудования.

Материалы диссертации прошли апробацию на ряде научных конференций с 2007 г. по настоящее время, и опубликованы в 21 печатном издании, входящих в список ВАК. Содержание автореферата соответствует основным положениям и выводам из представленной диссертационной работы.

По диссертации можно сделать следующие замечания:

1. В главе 2 не представлены данные расчетов тепловой и динамической характеристики течения в модельном гладком канале, относительно которого производится сравнение расчетных данных, полученных в канале с интенсификаторами теплообмена в виде прямоугольных выступов.
2. На стр. 89 диссертант утверждает, что «в случае высокочастотных колебаний, когда толщина колеблющегося пограничного слоя много меньше, чем толщина вязкого стационарного подслоя, в первом приближении можно считать, что влияние колеблющегося потока сказывается только в вязком подслое, тогда как в турбулентном ядре профиль скорости квазистационарный». Не понятно, на каких данных основано это утверждение.
3. Результаты численного исследования интенсификации в компланарных каналах – характеристики  $Nu(Re)$  и  $\zeta(Re)$  сравниваются со значениями в модельном гладком канале, а температура стенки - почему то с данными в орбренном канале, а в гладком.

4. В диссертации не указано, как осуществлялось численное решение системы уравнений RANS. При помощи коммерческого пакета или самостоятельно разработанным кодом?
5. Измерение давления и температуры в экспериментальном исследовании описано не достаточно подробно. Не понятно, производится измерения профиля величины и последующее осреднение данных или только локальные измерения в точке.
6. Не приведены оценки неопределенности косвенного измерения тепловой (критерия Нуссельта) и гидродинамической характеристики течения. На графиках не нанесены пределы неопределенности измерений этих величин.

В целом, с учетом замечаний, считаю, что диссертация представляет собой законченную научно-квалификационную работу, которая соответствует всем критериям, установленным в п.9-14 Положения о порядке присуждения ученых степеней № 842 от 23.09.2013 г., ред. 11.09.2021 г., а ее автор Французов Максим Сергеевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.3.14 – теплофизика и теоретическая теплотехника.

Официальный оппонент,

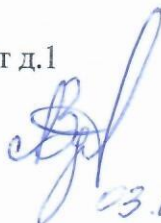
к.т.н., доцент

старший научный сотрудник

НИИ механики МГУ

119192 Москва, Мичуринский пр-кт д.1

(495)939-2401, zditovets@mail.ru



Здитовец Андрей Геннадьевич

03.03.2023



С отзывом ознакомлен

10.03.2023

