

На правах рукописи



Французов Максим Сергеевич

**РАЗРАБОТКА МЕТОДА ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ  
ИНТЕНСИФИКАЦИИ КОНВЕКТИВНОГО ТЕПЛООБМЕНА В  
КАНАЛАХ**

Специальность 1.3.14. – Теплофизика и теоретическая теплотехника

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва – 2023

Работа выполнена в федеральном государственном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (МГТУ им. Н.Э. Баумана)

Научный руководитель: Гордин Михаил Валерьевич  
Кандидат технических наук, ректор,  
МГТУ им. Н.Э. Баумана

Официальные оппоненты: **Павленко Александр Николаевич**, Член-корреспондент РАН, доктор физико-математических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук (ИТ СО РАН), зав. лабораторией

**Здитовец Андрей Геннадьевич**, кандидат технических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова» (Научно-исследовательский институт механики Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова), и.о. зав. лабораторией

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Национальный исследовательский университет "МЭИ"

Защита состоится «10» апреля 2023 г. в 15:00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.327.06, созданного на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», по адресу: 125993, г. Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д. 4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»:

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2023 г.

Ученый секретарь диссертационного

Совета 24.2.327.06,

д.т.н. доцент



В.М. Краев

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Одной из самых развитых отраслей науки и промышленности в мире и, в частности, Российской Федерации (РФ) является энергетика. В этой сфере ежегодно находят применение идеи ученых, инженеров и политиков. В РФ принята энергетическая стратегия на период до 2030 год, основным вектором которой является обеспечение эффективного использования энергетического потенциала страны. Такое направление стратегии вызвано наблюдаемой тенденцией непрерывного роста объема потребляемой энергии. В следствие чего возникает потребность в развитии энергетической эффективности используемого теплообменного оборудования.

При рассмотрении энергетических стратегий РФ, можно выделить важнейшее направление, которое предусматривает увеличение экономичности тепловых электростанций, за счет освоения более высоких температур. В этом случае КПД тепловой машины увеличивается за счет усложнения термодинамического цикла. При этом предельно допустимая температура жаропрочных и жаростойких сплавов, при заданном запасе ресурса работы турбинных лопаток, может достигать 1300 К. Температура газа перед турбиной в современных парогазовых установках может достигать до 1900 К. Стоит отметить, что температура газа перед турбиной высокого давления ГТД непрерывно возрастает. Определяющим фактором в установках такого типа является то, что каждый килограмм сожженного топлива позволяет снимать с турбины большее количество полезной работы. Развитие материаловедения, к сожалению, не дает оптимистичных прогнозов повышения предельно допустимых температур жаропрочных и жаростойких сплавов лопаток турбин. Таким образом, увеличение рабочей температуры материала все более отстает от роста температуры рабочего тела. Решением данной проблемы является применение высокоэффективных систем охлаждения.

При разработке и создании высокоэффективных систем охлаждения теплонапряженных элементов энергетических и силовых установок одним из путей развития является использование различных способов интенсификации конвективного теплообмена.

**Целью диссертационной работы** разработка метода оценки эффективности интенсификации теплообмена в каналах на основании обоснованного расчетно-экспериментального исследования различных видов

интенсификаторов.

**Объектом исследований** являются модельные каналы с установленными в них различными видами интенсификаторов.

**Предметом исследований** являются тепловые и гидравлические характеристики различных способов интенсификации теплообмена в каналах.

Достижение поставленной в работе цели обеспечивается решением следующих **задач диссертационной работы**.

1. На основе расчетных методов определить тепловые и гидравлические характеристики различных методов интенсификации теплообмена в модельных каналах.

2. Разработать метод оценки эффективности интенсификации теплообмена, основанный на использовании параметров, характеризующих объект интенсификации в целом, и провести его верификацию и валидацию.

3. Разработать методику проведения экспериментального исследования для определения тепловых и гидравлических характеристик различных методов интенсификации теплообмена и провести апробацию разработанного метода оценки эффективности интенсификации теплообмена в каналах.

4. Дать обоснование области эффективного применения различных методов интенсификации теплообмена в каналах.

**Научная новизна диссертационной работы** заключается в следующем:

1. Определены тепловые и гидравлические характеристики различных способов интенсификации теплообмена в каналах на основании высокоуровневого численного моделирования для широкого диапазона изменения режимов течения и геометрических параметров.

2. Впервые с использованием численного моделирования получены тепловые и гидравлические характеристики нестационарного способа интенсификации теплообмена за счет самоподдерживающихся акустических колебаний.

3. Выполнена комплексная валидация и верификация тепловых и гидравлических характеристик различных способов интенсификации в каналах.

4. Впервые разработан и экспериментально апробирован интегральный метод оценки эффективности интенсификации теплообмена, на основании параметров, характеризующих объект в целом.

5. На основании разработанного метода оценки эффективности интенсификации конвективного теплообмена в каналах осуществлен анализ эффективности различных способов интенсификации теплообмена.

**Практическая ценность диссертационной работы** состоит в следующем.

1. Метод компьютерного моделирования и алгоритм расчета теплообмена в модельных каналах с учетом интенсификации теплообмена позволяет напрямую оценивать влияние параметров режимов течения и геометрических характеристик интенсификаторов на интегральные параметры.

2. Методика оценки эффективности интенсификации теплообмена позволяет оперативно определять эффективность способа интенсификации теплообмена в терминах интегральных характеристик канала и может быть использована в инженерной практике.

3. База данных тепловых и гидравлических характеристик различных способов интенсификации теплообмена в каналах, полученная на основании компьютерного моделирования, прошедшая валидацию и верификацию, может использоваться в научно-исследовательских, проектно-конструкторских организациях при проектировании и разработке теплообменных аппаратов.

4. Методика проведения экспериментального исследования и алгоритм обработки экспериментальных данных позволяет определять эффективность различных способов интенсификации теплообмена на основании интегральных характеристик.

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Результаты экспериментальных и расчетных исследований тепловых и гидравлических характеристик различных способов интенсификации теплообмена в модельных каналах.

2. Методика оценки эффективности интенсификации теплообмена, демонстрирующая преимущества способа интенсификации теплообмена с помощью самоподдерживающихся акустических колебаний.

3. Результаты валидации и верификации метода оценки эффективности интенсификации теплообмена в каналах.

**Достоверность и обоснованность полученных результатов** работы подтверждаются.

1. Использованием фундаментальных уравнений и законов газовой

динамики, термодинамики, теории тепломассообмена.

2. Удовлетворительным согласованием результатов расчета с проведенными экспериментами и данными исследований других авторов.

3. Удовлетворительным согласованием полученных результатов по разработанной методике оценки эффективности интенсификации теплообмена с результатами детального численного моделирования течения и теплообмена в каналах.

4. Применением аттестованных средств измерений и регистрации параметров в экспериментальном исследовании, а также использованием стандартизованных методик обработки результатов экспериментального и численного исследований.

5. Использованием современных аналитических и численных методов для решения задач математического моделирования.

**Апробация работы** проведена на Всероссийской школе-семинаре «Аэрофизика и физическая механика классических и квантовых систем», ИПМех РАН, 2007; Первой международной научно-технической конференцией, посвященной 70-летию основателя Рыбинской школы теплофизиков доктора технических наук, профессора Шоты Александровича Пиралишвили, «Энергетические установки: тепломассообмен и процессы горения», Рыбинск, 2009; 5-ой Международной конференции по авиационным и космическим наукам EUCASS, г. Мюнхен, Германия, 2013; 29-ом конгрессе Международного совета по авиационным наукам ICAS, г. Санкт-Петербург, 2014; на Всероссийской конференции «XXXVI Сибирский теплофизический семинар». – Новосибирск, 2020; V-ой Всероссийской научной конференции с элементами школы молодых ученых «Теплофизика и физическая гидродинамика», Ялта, Республика Крым, 2020; Всероссийской научно-технической конференции молодых ученых и специалистов «Новые решения и технологии в газотурбостроении», Москва, 2015; Всероссийской научно-технической конференции «Авиадвигатели XXI» Москва, 2015; XXXII International conference on interaction of intense energy fluxes with matter, Elbrus, 2017; XLII-х Академических чтениях по космонавтике «Королевские чтения», Москва, 2018; XXXIII International Conference on Equations of State for Matter, Elbrus, 2018; XLIII-х Академических чтениях по космонавтике «Королевские чтения», Москва, 2019; IV-ой Всероссийской конференции «Теплофизика и физическая гидродинамика» с элементами школы молодых ученых», Ялта, 2019; 2-ой Международной конференции «Проблемы термоядерной

энергетики и плазменные технологии», Москва, 2019; Всероссийской научно-технической конференции молодых ученых и специалистов «Авиационные двигатели и силовые установки», Москва, 2019; Всероссийской научно-технической конференции «Авиадвигатели XXI», Москва, 2015; Тринадцатой Международной школе-семинара «Модели и методы аэродинамики», Евпатория, 2013 года; Пятнадцатой Международной школе-семинаре «Модели и методы аэродинамики», Евпатория, 2015 года; XXXI International Conference on Equations of State for Matter (ELBRUS 2016) : Book of Abstracts devoted to the 70th anniversary of birth of Aleksey Vladimirovich Bushman, Elbrus, Russia, 2016 года; XLI-х Академических чтениях по космонавтике, посвященные памяти академика С.П. Королева и других выдающихся отечественных ученых – пионеров освоения космического пространства, Москва, 2017 года, Седьмой российской национальной конференции по теплообмену, Москва, 2018 года; а также на научно-технических семинарах, проводимых кафедрой Эб «Теплофизика» МГТУ им. Н.Э. Баумана и отделом «Аэрокосмические двигатели» ФАУ «ЦИАМ им. П.И. Баранова».

**Структура и объём работы.** Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, общих выводов и заключений, списка литературы и содержит 207 страниц основного машинописного текста, 9 таблиц, 118 рисунков. Список используемой литературы включает 123 наименования.

### **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность темы и сформулирована цель работы, отмечена научная новизна, практическая значимость полученных результатов и дана общая характеристика диссертационной работы.

**В первой главе** проведен обзор исследований и разработок в области различных методов интенсификации теплообмена показал, что развитие этих методов является устойчивой тенденцией на пути совершенствования теплотехнических устройств. Среди рассмотренных способов тепловой защиты элементов конструкции установлено, что перспективным представляется использование интенсификации в каналах, являющейся частью системы наружного проточного охлаждения.

Рассмотрение теоретических и экспериментальных наработок в области интенсификации конвективного теплообмена показало, что может быть достигнут существенный прирост теплоотдачи в каналах.

Обзор в том числе и современных способов интенсификации показал, что и на сегодняшний день задачи интенсификации остаются сложными и

перспективными.

Методы оценки эффективности интенсификации, как правило, базируются на использовании тепловых и гидравлических характеристик в абсолютном или относительном по сравнению с эталонным гладким каналом способом. Рассмотрение методов оценки эффективности интенсификации выявило необходимость разработки метода, характеризующего объект в целом и позволяющим напрямую определить потенциальное снижение потребного расхода охладителя для каждого конкретного способа интенсификации теплообмена. На основе анализа научно-технической информации сформулированы задачи диссертационной работы.

**Во второй главе** представлены результаты исследования влияния интенсификации теплообмена в модельном канале на величину потребного расхода охладителя. Представлены результаты решения сопряженной задачи теплообмена в плоской постановке, где совместно разрешаются область модельного канала и его огневой стенки с учетом переменных теплофизических свойств стенки и охладителя в канале охлаждения. Результаты численного моделирования позволили определить потребную величину массового расхода охладителя для обеспечения допустимого теплового состояния огневой стенки. В результате расчетного исследования показано влияние интенсификации теплообмена на величину потребного массового расхода охладителя.

В настоящем разделе рассмотрены результаты расчетных исследований влияния интенсификации теплообмена в каналах наружного проточного охлаждения. Для расчетного исследования было использовано численное моделирование высокого уровня, позволяющее решить задачу сопряженного теплообмена в каналах наружного проточного охлаждения при использовании метода интенсификации конвективного теплообмена в виде искусственной шероховатости. В качестве геометрической модели рассматривался плоский канал с нанесенной на поверхности стенки искусственной шероховатостью. Из расчета по известным зависимостям получены следующие значения высоты прямоугольного выступа и цилиндрической канавки  $h = 0,5$  мм, следовательно шаг  $S = 13h = 6,5$  мм. Задача решается в плоской постановке. На геометрическую модель была построена структурированная расчетная сетка с адаптацией к поверхности с искусственной шероховатостью. Адаптация к поверхностям обеспечивает значение величины  $y^+ \leq 1$ . Математическое моделирование в общем случае нестационарного пространственного турбулентного вязкого течения осуществляется на основе



численного решения системы уравнений сохранений массы, количества движения и энергии, дополненной уравнениями состояния и диффузии компонентов. Описание турбулентности при решении уравнений Навье-Стокса осуществляется методом RANS, основанным на использовании осредненных по времени параметров и замыкании системы уравнений моделью турбулентности. В диссертационной работе используется модель турбулентности  $k-\omega$  SST.

Серия расчетов проводилась до установления потребного расхода охладителя при условии, что температура стенки со стороны газа не превосходит значение в 1000 К.

Характерный фрагмент поля температур канала системы охлаждения с интенсификаторами представлено на Рисунке 1.

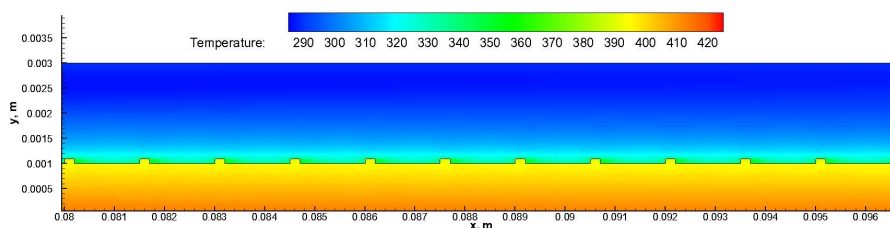


Рисунок 1. Фрагмент поля температур канала системы охлаждения камеры сгорания.

Проводимое моделирование отчетливо показывает, что вводимая интенсификация в модельных каналах при том же расходе охладителя позволяет существенно снизить температуру огневой стенки (Рисунок 2). Или при достижении той же максимальной температуры огневой стенки использовать меньший расход охладителя.

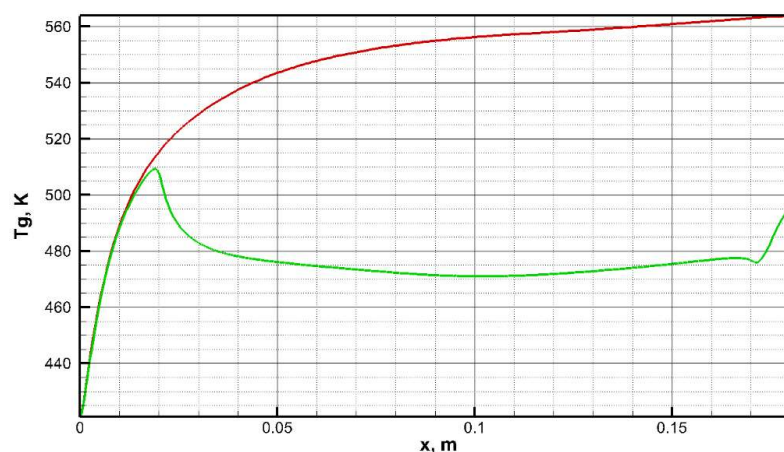


Рисунок 2. Температура огневой стенки при использовании интенсификации теплообмена

Одной из сложностей, ограничивающих поддержание допустимого теплового состояния, является недостаточный расход охладителя. В условиях

ограниченного расхода можно охлаждать только часть конструкции, используя при этом специальные высокотемпературные материалы там, где это возможно. Но даже при этом необходимо использовать максимально полным образом имеющийся хладоресурс охладителя. Для этого, целесообразно использовать методы интенсификации теплообмена. Их использование позволяет допустимое тепловое состояние конструкции при меньшем расходе рабочего тела.

Целесообразность применимости интенсификации теплообмена в каналах анализируется на основании выражения для подогрева охладителя.

Формула для суммарного подогрева охладителя будет иметь следующий вид:

$$\Delta T_{\text{охл}}^{\Sigma} = T_{\text{охл}}^{\text{вых}} - T_{\text{охл}}^{\text{вх}} = \frac{\sum_{i=1}^n (\overline{q_{wl}} \Delta S_i)}{G_{\text{охл}} c_p (\overline{p_{\text{охл}}}, \overline{T_{\text{охл}}})}, \quad (1)$$

где  $\Delta T_{\text{охл}}^{\Sigma}$  – суммарный подогрев охладителя на всей длине каналов;  $T_{\text{охл}}^{\text{вых}}$  – температура охладителя на выходе из системы охлаждения;  $T_{\text{охл}}^{\text{вх}}$  – температура охладителя на входе в систему охлаждения;  $\overline{q_{wl}}$  – средний тепловой поток на  $i$ -м участке канала охлаждения;  $\Delta S_i$  – площадь канала охлаждаемой поверхности на  $i$ -м участке;  $c_p (\overline{p_{\text{охл}}}, \overline{T_{\text{охл}}})$  – теплоемкость охладителя при средних значениях температуры и давления на  $i$ -м участке.

Очевидно, что для обеспечения допустимого теплового состояния необходимо, чтобы температура охладителя на выходе была меньше предельно допустимой температуры для используемого материала стенки  $[T_{\text{ст}}]$ . Введем коэффициент  $K_T < 1$ , т.е.  $T_{\text{охл}}^{\text{вых}} = K_T [T_{\text{ст}}]$ . Тогда выражение (1) можно записать в следующем виде:

$$K_T = \frac{\sum_{i=1}^n (\overline{q_{wl}} \Delta S_i)}{G_{\text{охл}} c_p (\overline{p_{\text{охл}}}, \overline{T_{\text{охл}}}) [T_{\text{ст}}]} + \frac{T_{\text{охл}}^{\text{вх}}}{[T_{\text{ст}}]}. \quad (2)$$

Отношение  $\frac{T_{\text{охл}}^{\text{вх}}}{[T_{\text{ст}}]}$  поддается оценке на основании общих соображений об использованных материалах конструкции и охладителях. Для криогенных охладителей таких как водород величина  $T_{\text{охл}}^{\text{вх}}$  может составлять 100К, при этом для традиционного углеводородного топлива  $T_{\text{охл}}^{\text{вх}} \approx 300$  К. Наибольшее распространение получил бронзовые сплавы (БрХ08), где значение  $[T_{\text{ст}}] \approx 850 \dots 900$  К, и коррозионно-стойкие стали такие, например, как 12Х18Н10Т со значением  $[T_{\text{ст}}] \approx 1000 \dots 1100$  К. Отсюда следует, что  $\frac{T_{\text{охл}}^{\text{вх}}}{[T_{\text{ст}}]} \approx 0,1 \dots 0,35$ . Исходя из определения коэффициента  $K_T$ , приходим к следующему выражению:

$$\frac{\sum_{i=1}^n (\overline{q_{wl}} \Delta S_i)}{G_{\text{охл}} c_p (\overline{p_{\text{охл}}}, \overline{T_{\text{охл}}}) [T_{\text{ст}}]} < 0,65 \dots 0,9. \quad (3)$$

Здесь выражение  $\sum_{i=1}^n (\overline{q_{wl}} \Delta S_i) = \int q_w dS = Q_w$  – можно трактовать как суммарное количество тепла, приходящееся в стенку. В знаменателе  $G_{\text{охл}} c_p (\overline{p_{\text{охл}}}, \overline{T_{\text{охл}}}) [T_{\text{ст}}] = G_{\text{охл}} \int_{T_{\text{охл}}^{\text{вх}}}^{[T_{\text{ст}}]} c_{p_{\text{охл}}} dT_{\text{охл}} = G_{\text{охл}} \Delta H_{\text{топл}}$  – изменение энтальпии охладителя при прогреве его до предельно допустимой температуры стенки. Таким образом, целесообразность применения интенсификации теплообмена в каналах обусловлена соотношением между изменением полной энтальпии охладителя при прогреве его до предельно допустимой температуры стенки и суммарным количеством тепла поступающим в стенку.

$$(0,9 \dots 0,65) (G_{\text{охл}} \Delta H_{\text{топл}}) > Q_w \quad (4)$$

Применение интенсификации теплообмена приводит к увеличению подогрева охладителя, приближая температуру на выходе к предельно допустимой температуре материала, или в данном случае будет увеличивать значение коэффициент  $K_T$ . Таким образом, на основании проведенного анализа можно сделать вывод о том, что интенсификацию теплообмена в каналах наружного проточного охлаждения целесообразно, когда хотя бы 80% от полного изменения энтальпии охладителя больше, чем суммарное количество тепла, приходящего в огневую стенку.

**В третьей главе** изложены результаты исследования тепловых и гидравлических характеристик различных методов интенсификации теплообмена, включая исследования в области низких значений чисел Рейнольдса. Рассматриваемые методы интенсификации теплообмена представляют собой стационарные методы, реализованные в трубе: закрученная лента; проволочная спираль; спираль и лента. Проведено детальное исследование метода интенсификации теплообмена, основанного на нестационарном эффекте обтекания группы профилей, располагающихся поперек потока, и возникновению пульсаций давления.

На Рисунке 3 представлено характерное распределение температуры для интенсификации теплообмена с помощью профилей. Отличительной особенностью данного способа интенсификации теплообмена является то, что интенсификация теплообмена происходит при возникновении самоподдерживающихся акустических колебаний

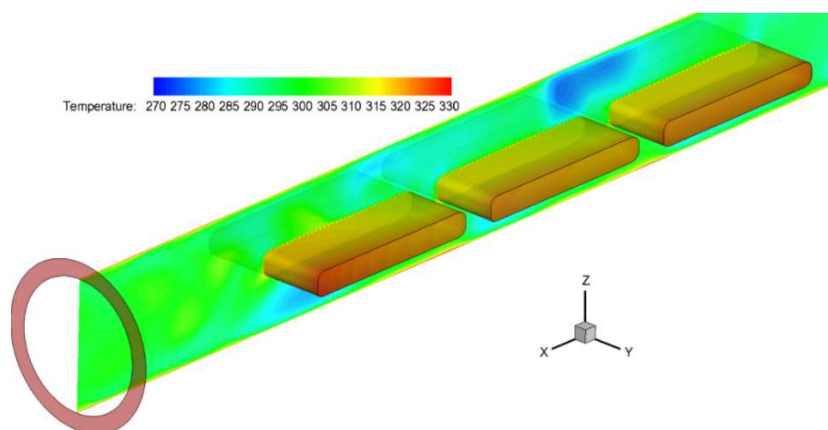


Рисунок 3. Поле температур для интенсификации теплообмена с помощью профилей.

На Рисунке 4 представлено изменение среднемассового статического давления, определенного за первым профилем. Амплитуда пульсаций давлений составляет менее 3,0% от среднего значения. Определенная расчетным образом частота пульсаций давлений в данном случае  $f = 30$  кГц.

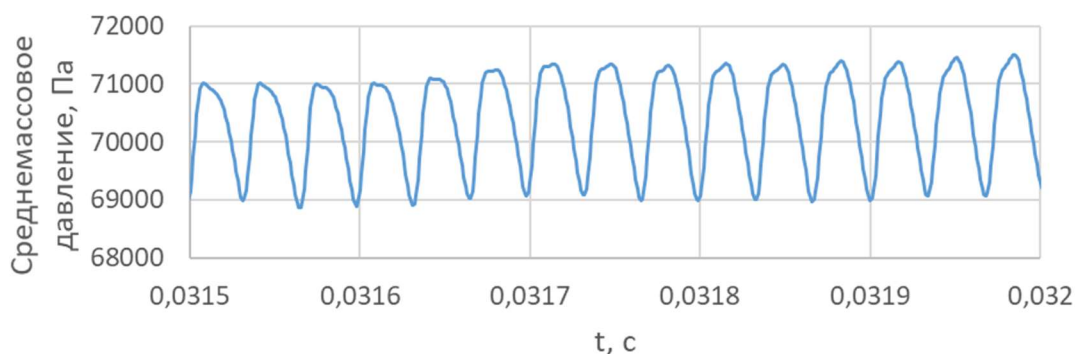


Рисунок 4. Пульсации давления за первым профилем.

Предложена модификация метода оценки эффективности интенсификации теплообмена Г. А. Дрейцера, позволяющая сравнивать способы интенсификации на основе параметров, характеризующих объект в целом. Этот метод применен к способам, представленным в данной главе и к известным методам интенсификации. Проведено обобщение данной зависимости. Выполнена верификация метода оценки эффективности интенсификации теплообмена на основании результатов численного моделирования с использованием математических моделей высокого уровня.

Наиболее показательным с точки зрения оценки эффективности интенсификации теплообмена в каналах регенеративной системы охлаждения представляется критерий снижения потребного расхода

$$K_G = \left( K_{\Delta p}^{-1} \eta_{Nu}^{-3} \eta_{\zeta} \right)^{\frac{1}{3n-m-2}}, \quad (3.14)$$

где  $K_G$  – критерий эффективности по потребному расходу охладителя;  $K_{\Delta p}$  –

параметр интенсификации, отражающий изменения потери полного давления;  $\eta_{Nu}$  – относительная тепловая характеристика способа интенсификации теплообмена;  $\eta_{\zeta}$  – относительная гидравлическая характеристика способа интенсификации теплообмена.

На Рисунке 5 представлено результаты верификации метода оценки эффективности интенсификации теплообмена по критерию снижения потребного расхода охладителя.

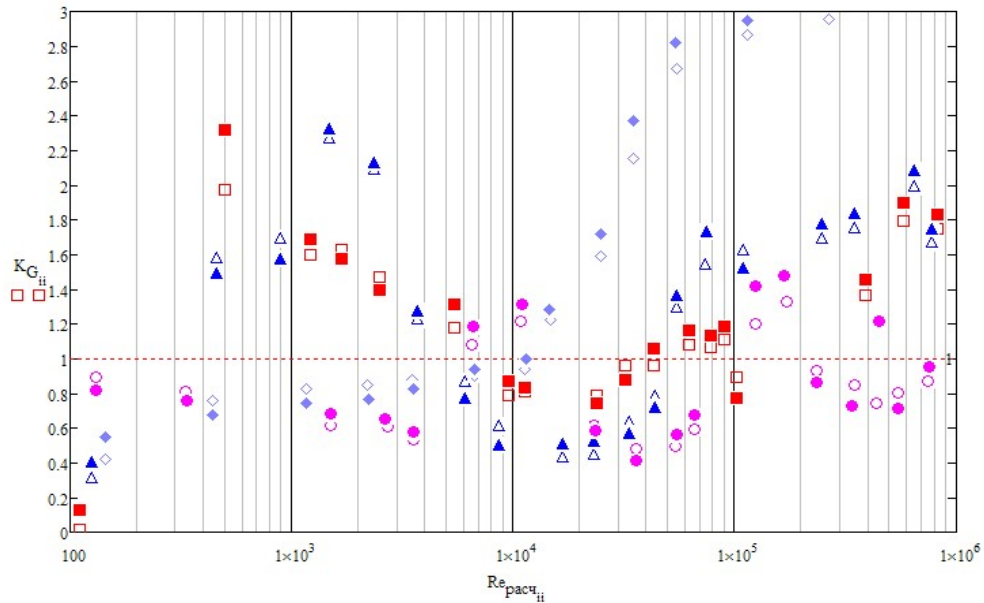


Рисунок 5. Результаты верификации метода оценки эффективности интенсификации теплообмена по критерию потребного расхода. Полными фигурами показаны результаты моделирования, пустыми показаны результаты расчета по формуле. «квадрат» - лента; «треугольник» - спираль; «ромб» - лента + спираль; «круг» - профили

Представленные результаты верификации метода оценки показывают, что для всех рассмотренных способов интенсификации расхождение с результатами численного моделирования в большинстве случаев не превосходит 3,5%. Таким образом, метод оценки дает удовлетворительные результаты. Для каждого метода оценки эффективности интенсификации выявлены области режимов течения, представляющие практический интерес с точки зрения снижения потребного расхода охладителя.

**В четвертой главе** представлены результаты экспериментального исследования различных способов интенсификации теплообмена в круглых трубах, проанализированы полученные тепловые гидравлические характеристики. Детальным образом исследованы пульсации давления, возникающие при интенсификации теплообмена с помощью самовозникающих акустических автоколебаний.

Проведено сравнение различных способов интенсификации теплообмена как по их тепловым и гидравлическим характеристикам, так и по методу оценки эффективности, предложенному в предыдущей главе. Сделаны выводы о диапазоне режимов течения, в области которого реализуется наибольшая эффективность каждого отдельного случая.

Схема экспериментальной установки представлена на Рисунке 6. Экспериментальная установка состоит из рабочего участка (1), спирали индукционного нагрева (2) внешней поверхности канала, системы измерений (3), расходомерного участка (4), баллона (5), заполненного воздухом, и запорной арматуры (6).

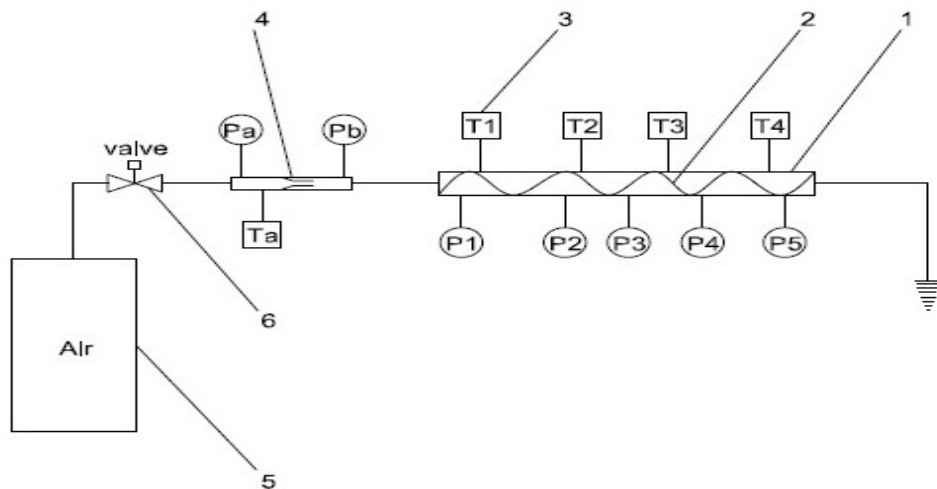


Рисунок 6. Схема экспериментальной установки

Рабочий участок представляет собой трубку  $10 \times 1$  мм, выполненную из стали 12X18H10T. В экспериментах использовались 4 одинаковые трубки, в которых были установлены различные виды интенсификаторов теплообмена: проволочная спираль (ИПС), ленточный завихритель (ИЛВ), комбинированный (ИК) и продольные плоские профили (ИП) вдоль оси канала. В качестве эталонной использовалась гладкая трубка.

На внешнюю стенку рабочего участка трубок равномерно наматывалась спираль индукционного нагрева из нихрома, позволяющая регулировать тепловую мощность. Сверху участок модельного канала охлаждения теплоизолирован. Система измерений состоит из отборников статического давления, термопар и волноводов, позволяющих производить измерение пульсаций давления. На Рисунке 7 приведено схематичное изображение интенсификаторов в модельном канале охлаждения.

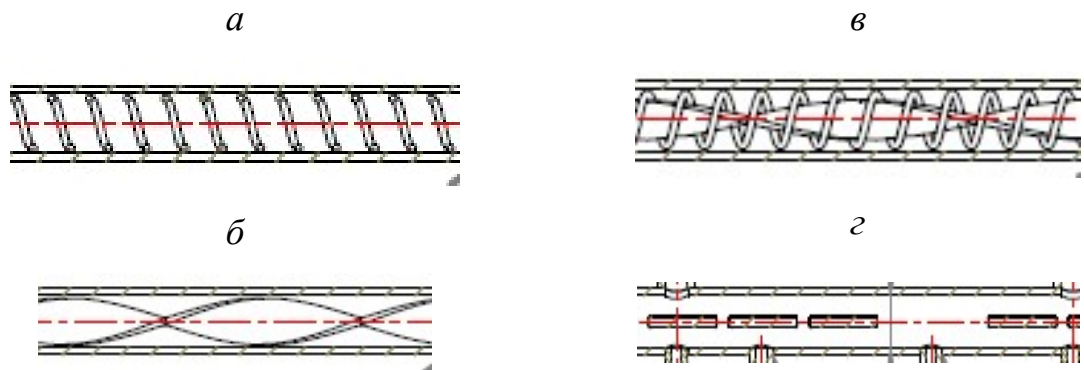


Рисунок 7. Виды интенсификаторов: а) ИПС, б) ИЛВ, в) ИК, г) ИП.

*Интенсификатор проволочная спираль (ИПС)* представляет собой проволоку диаметром 1 мм, навитую на диаметр 6,5 мм. С двух концов спирали оставлены прямые участки длиной 5 мм, которые приварены к корпусу основной трубки. Шаг навивки составлял 5 мм, суммарная длина проволочной спирали 270 мм (рисунок 7а).

*Интенсификатор ленточный завихритель (ИЛВ)* представляет собой ленту, выполненную из плоской пластины толщиной 0,5 мм и шириной 8 мм, длина свободных концов 15 мм, шаг закрутки 30 мм, длина ленты в деформированном состоянии 240 мм (рисунок 7б).

*Интенсификатор комбинированный (ИК = ИПС + ИЛВ)* представляет собой комбинацию двух интенсификаторов: проволочная спираль и ленточный завихритель. Для проволочной спирали была использована проволока диаметром 1 мм, навитая поверх скрученной ленты вплотную к стенке корпуса трубки. В качестве скрученной ленты использовалась аналогичная вышеприведенному интенсификатору 2 пластина, но меньшей ширины. Установленные в данном случае интенсификаторы – лента и спираль - имеют противоположное друг другу направление закрутки. Это сделано с целью более интенсивной диссипации тепловой энергии, подводимой от внешней стенки к воздушному потоку (рисунок 7в).

*Интенсификатор профильный (ИП)* самоподдерживающихся акустических автоколебаний представляет собой 4 группы профилей. Группа профилей состоит из трех пластин толщиной 1 мм и длиной 13 мм каждая, со скругленными углами, расстояние между профилями 2 мм, между группами профилей 10 мм (рисунок 7г).

На основании проведенных измерений осуществлялось сравнение различных способов интенсификации теплообмена. На Рисунке 8 представлено изменение относительных пульсаций давлений.

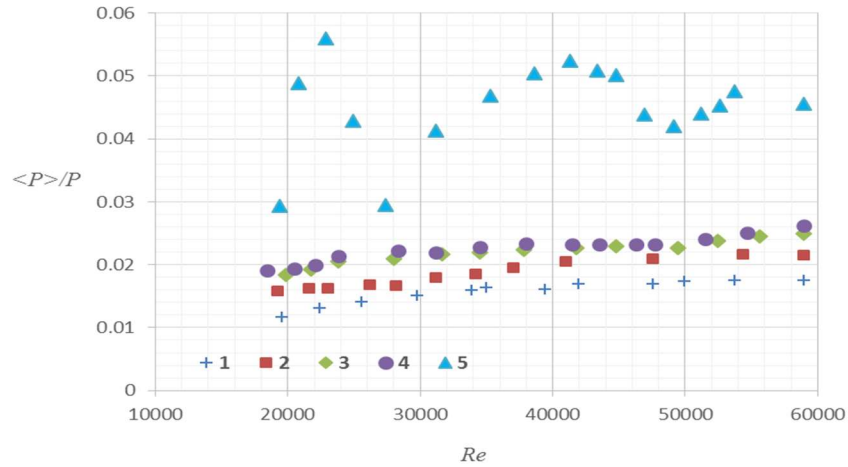


Рисунок 8. Изменение относительной амплитуды пульсаций давления: 1 – гладкая труба, 2 – ИЛВ, 3 – ИПС, 4 – ИК, 5 – ИП

Тепловые и гидравлические характеристики представлены на Рисунке 9. Установленная метрологическая погрешность измерения тепловых характеристик не превосходит 7%, а гидравлических 4%.

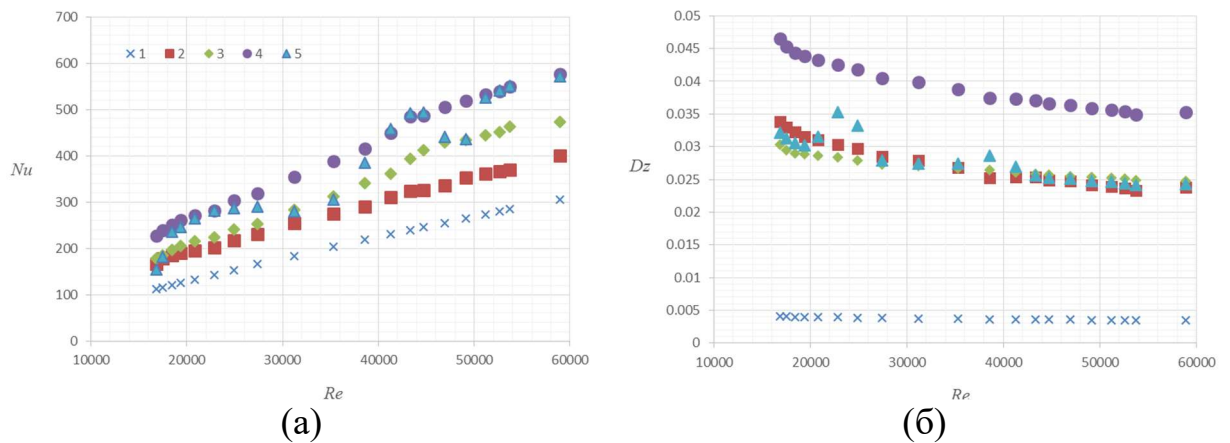


Рисунок 9. Изменение числа Нуссельта (а) и коэффициента гидравлического сопротивления (б) от числа Рейнольдса для течения при интенсификации теплообмена и без неё: 1 – гладкая труба, 2 – ИЛВ, 3 – ИПС, 4 – ИК, 5 - ИП

По критерию эффективности интенсификации теплообмена, разработанному в предыдущей главе, произведено сравнение предложенных способов интенсификации на основании экспериментальных исследований. Результаты представлены на Рисунке 10.



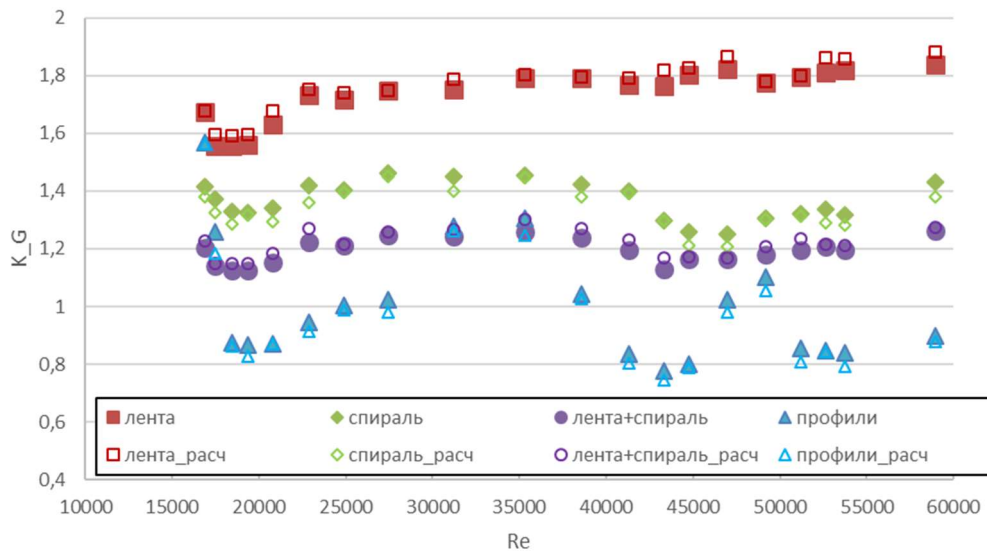


Рисунок 10. Критерий эффективности интенсификации теплообмена: 1 – ИПС, 2 – ИЛВ, 3 – ИК, 4 – ИП.

Валидация результатов экспериментального определения эффективности интенсификации теплообмена по критерию, характеризующему снижение потребного расхода охладителя установлено, что отличие от значений, определенных в ходе компьютерного моделирования, не превосходят 6%.

### ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Впервые дано количественное обоснование необходимости использования интенсификации теплообмена в каналах системы охлаждения. Показана возможность снижения потребного расхода охладителя до 42% при максимально допустимой температуре стенки 1000 К.

2. На основании компьютерного моделирования определены тепловые и гидравлические характеристики для 4-х способов интенсификации теплообмена: скрученная лента, спиральная проволока, совмещенный метод интенсификации «лента+спираль», профили. Сравнение полученных тепловых и гидравлических характеристик с имеющимися в открытых источниках экспериментальными данными показало соответствие в пределах 10%. Верификация метода оценки эффективности интенсификации теплообмена показала, что разница между упрощенной формулой и результатами компьютерного моделирования не превышает 3,5%.

3. Впервые предложен метод оценки эффективности интенсификации теплообмена на основании модификации метода Г.А. Дрейцера, характеризующий снижение потребного расхода охладителя в каналах системы охлаждения.

4. Проведено экспериментальное сравнение различных способов интенсификации теплообмена, получены тепловые и гидравлические

характеристики. На основании проводимой валидации установлено соответствие экспериментальных и расчетных значений для тепловых характеристик в пределах – 10%, для гидравлических – 6%.

5. Валидация разработанного метода оценки эффективности интенсификации теплообмена имеет погрешность не более 6%.

**Основное содержание диссертации отражено в следующих публикациях:**

**Статьи в изданиях рекомендованных ВАК по специальности (1.3.14.) и приравненных к ним**

1. Проектирование основного теплообменного оборудования ORC-системы для двигателей внутреннего сгорания судовых установок / Антаненкова И. С., Королева А. П., Французов М. С., Сухих А. А., Сычев В. В. // Теплоэнергетика. - 2021. - № 1. - С. 30-42.

2. Исследование особенностей теплообмена и гидродинамики в пористой среде на примере кубической упаковки шаров / Антаненкова И. С., Королева А. П., Французов М. С. // Тепловые процессы в технике 2019. - Т. 11, № 9. - С. 395 – 403

**Материалы конференций, индексируемых базой данных Scopus**

3. Application of machine learning methods for investigating the heat transfer enhancement performance in a circular tube with artificial roughness. / A. P. Koroleva, N. V. Kuzmenkov and M. S. Frantsuzov // Journal of Physics: Conference Series, Volume 1675.

4. Experimental comparative research of convective heat transfer enhancement in channels. M. S. Frantsuzov, M. A. Ilchenko and A P Koroleva. Journal of Physics: Conference Series, Volume 1675.

5. Investigation of unsteady heat transfer in a porous medium of a discontinuous heater. A P Koroleva and M S Frantsuzov. Journal of Physics: Conference Series, Volume 1370.

6. Investigation on heat transfer enhancement in a circular pipe with artificial roughness / A. P. Koroleva, N. V. Kuzmenkov and M. S. Frantczov // Journal of Physics: Conference Series, Volume 1675.

7. Investigation of unsteady heat transfer in a porous medium of a discontinuous heater / A. P. Koroleva, M. S. Frantsuzov // Journal of Physics: Conference Series. – 2019. - Volume 1370, Number 1.

8. Performance of CFD and ANN modeling of heat transfer enhancement in a

circular tube with artificial roughness / A. P. Koroleva, N. V. Kuzmenkov and M. S. Frantcuzov // Journal of Physics: Conference Series 1891(1):01263, 2021

9. Computational study of the efficiency of various methods of intensification of convective heat transfer / M.S. Frantsuzov // Journal of Physics: Conference Series, 2021, 2057(1), 012010

### **Статьи в изданиях рекомендованных ВАК по другим специальностям**

10. Цифровые двойники – платформа для управления жизненным циклом авиационных двигателей / Сальников А.В., Гордин М.В., Шмотин Ю.Н., Никулин А.С., Макаров П.В., Французов М.С. // Известия ВУЗов. Сер. "Машиностроение". - 2022. - № 4. - С. 60-72.

11. Результаты численного моделирования двухфазного течения жидкость/газ при постоянных и реальных теплофизических свойствах жидкости в ударно-струйной форсунке / Хлопов А. Д., Французов М. С. // Известия ВУЗов. Сер. "Машиностроение". - 2019. - № 3. - С. 51-60.

12. Исследование влияния рода граничных условий на интегральные характеристики стендового змеевикового теплообменного аппарата / Французов М. С., Лопухов С. А., Королева А. П. // Известия ВУЗов. Сер. "Машиностроение". - 2019. - № 5. - С. 50-57.

13. Валидация методов расчета горения водорода в сверхзвуковом потоке модельного воздуха по экспериментальным данным Бича - Эванса - Шекснайдера / Кукшинов Н. В., Батура С. Н., Французов М. С. // Известия ВУЗов. Сер. "Машиностроение". - 2019. - № 11. - С. 36-45.

14. Математическая модель расчета процесса нестационарного прогрева стенок теплообменного аппарата / Александров В. Ю., Королева А. П., Кукшинов Н. В., Сафонова Д. Б., Французов М. С. // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. Машиностроение. - 2018. - № 5. - С. 4-14.

15. Результаты численного моделирования двухфазного течения жидкости/газа при постоянных и реальных теплофизических свойствах жидкости / Хлопов А. Д., Французов М. С., Челмодеев Р. И. // Известия ВУЗов. Сер. "Машиностроение". - 2018. - № 10. - С. 63-71.

16. Исследование модели змеевикового теплообменного аппарата с изменяемой геометрией в широком диапазоне чисел Рейнольдса / Французов М. С., Лопухов С. А., Королева А. П. // Известия ВУЗов. Сер. "Машиностроение". - 2018. - № 11. - С. 78-83.

17. Численное моделирование теплообмена и определение тепловых и гидравлических характеристик в стендовом теплообменном аппарате змеевикового типа / Александров В. Ю., Королева А. П., Кукшинов Н. В.,

Французов М. С. // Известия ВУЗов. Сер. "Машиностроение". - 2017. - № 11. - С. 79-88.

18. Верификация и валидация компьютерных моделей. / Сальников А.В., Французов М.С., Виноградов К.А., Пятунин К.Р., Никулин А.С. // Известия ВУЗов. Сер. "Машиностроение". - 2022. - № 9. - С. 100-115

#### **Публикации в других изданиях**

19. Численное исследование теплообмена в плоском тракте с вихревыми каналами / Н. В. Кукшинов, М. С. Французов // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. – 2014. – № 1. – С. 325-338. – DOI 10.7463/0114.0696278.

20. Охлаждаемый демпфер для подавления колебаний давления в камере сгорания генератора высокоэнтальпийных воздушных потоков высотного стенда / Александров В.Ю., Ильченко М.А., Прохоров А.Н., Серебряков Д.И., Французов М.С. // Патент на полезную модель (RU 166717 U1) – 10.12.2016.

21. Heat flux level determination in model combustion chamber of high-speed ramjet engine / M. Danilov, M. Frantsuzov, N. Kukshinov // 29th Congress of the international Council of Aeronautic Sciences, ICAS 2014, 2014.