

На правах рукописи



Слесарева Екатерина Юрьевна

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА
ПРИ ВЫНУЖДЕННОМ ТЕЧЕНИИ ГАЗОВ
В КАНАЛАХ СЛОЖНОЙ ФОРМЫ**

01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Новосибирск – 2017

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки «Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук»

- Научный руководитель: доктор технических наук
Елистратов Сергей Львович
- Официальные оппоненты: **Кулагин Владимир Алексеевич**,
доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский федеральный университет», заведующий кафедрой «Теплотехника и гидрогазодинамика»
- Ерманюк Евгений Валерьевич**,
доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева Сибирского отделения Российской академии наук», заместитель директора по научной работе, заведующий лабораторией «Экспериментальной прикладной гидродинамики»
- Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский государственный энергетический университет», г. Казань

Защита состоится « 22 » сентября 2017 года в 13³⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 212.173.02 в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Новосибирский государственный технический университет» (630073, г. Новосибирск, проспект К. Маркса, 20).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Новосибирский государственный технический университет» и на сайте www.nstu.ru

Автореферат разослан « » августа 2017 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.173.02
доктор технических наук, профессор



А.В. Чичиндаев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. Разработка компактных рекуперативных газовых теплообменных аппаратов, химических реакторов и стержневых тепловыделяющих сборок с интенсификацией теплообмена является одним из актуальных направлений современной теплофизики и теплотехники.

Сложная внутренняя структура теплообменной поверхности в таких аппаратах, где газ движется в коротких каналах сложной формы (треугольные, квазотреугольные и др.) в условиях неустановившегося гидродинамического режима течения, создает значительные сложности для расчета их теплогидравлических характеристик даже в условиях стационарной работы [Петухов Б.С., Сукомел А.С., Кутателадзе С.С.]. Переходные режимы работы, высокие градиенты температур между стенками каналов сложной формы и газом, частичное смешение канальных потоков внутри аппарата, а также дефекты проходных сечений каналов в процессе заводского изготовления реальных аппаратов вносят дополнительные неопределенности в оценку достоверности теоретических расчетов таких течений. При разработке эффективных бытовых, промышленных и транспортных систем кондиционирования воздуха дополнительно требуется определение температурных условий образования капель влаги в объеме паровоздушных потоков. Возможность использования в качестве рабочих тел в перспективных энергетических установках с плотной упаковкой тепловыделяющих стержней смесей газов, имеющих низкие значения чисел Прандтля ($Pr = 0,1 \div 0,2$) [Кейс, Тэйлор], требует применения специальных расчетных кодов, достоверность которых подлежит дополнительной экспериментальной верификации.

На основе достоверных данных о температурных профилях и средних температурах газовых потоков на выходе из каждого канала при известных режимных параметрах на входе этих каналов представляется возможным оценить эффективность теплообмена в таких технических устройствах при различных условиях их работы. Локальные измерения температуры газа на выходе каждого из многочисленных каналов с применением сканирующих микротермопар по поперечному сечению потока являются крайне сложными. Бесконтактные тепловизионные малоинерционные методы [DeWitt, Жилкин Б.П.] значительно упрощают и ускоряют процесс определения температурного поля газового потока в теплообменных аппаратах, реакторах и канальных сборках.

Диссертационная работа посвящена экспериментальному исследованию особенностей гидродинамики течения и теплообмена газов в каналах различной формы при различных граничных условиях тепловыделения на стенке с использованием тепловизионного метода модифицированного под поставленные задачи исследования.

Целью диссертационной работы является экспериментальное исследование теплообмена газов в коротких каналах сложной формы поперечного сечения при различных граничных условиях тепловыделения на стенке и гидро-

динамически неустановившемся течении с использованием разработанного панорамного тепловизионного метода.

Ход исследования и структуру диссертационной работы определили **поставленные задачи**:

1. Разработка и апробация панорамного тепловизионного метода для определения температурных характеристик газового потока на выходе из каналов различных форм, а также стержневых тепловыделяющих сборок.
2. Разработка схем, изготовление и отладка экспериментальных стендов для исследования особенностей теплообмена при вынужденном течении газов в одиночных каналах круглой и квазитреугольной формы, а также в стержневой тепловыделяющей сборке с применением разработанного панорамного тепловизионного метода.
3. Экспериментальное исследование теплообмена и трения при вынужденном течении газов в коротких каналах сложной формы и сборке тепловыделяющих элементов.
4. Определение особенностей процессов теплообмена газовых смесей с малыми значениями чисел Прандтля в каналах круглой и треугольной форм.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Модифицирован и апробирован панорамный тепловизионный метод определения температуры газовых и парокапельных потоков непосредственно на выходе из одиночных каналов сложной формы поперечного сечения и канальной сборки, позволяющий проводить исследование эффективности теплообмена в рекуперативных аппаратах, газовых реакторах, стержневых тепловыделяющих сборках и других перспективных теплообменных аппаратах.
2. Впервые получены опытные данные по теплообмену и гидравлическому сопротивлению для воздуха в одиночном коротком канале квазитреугольного поперечного сечения при постоянной температуре стенки с использованием разработанного метода.
3. Получена обобщающая зависимость для теплообмена газовых смесей со значением чисел $Pr = 0,2 \div 0,7$ для каналов круглой и треугольной формы.

На защиту выносятся

1. Результаты экспериментального исследования теплообмена воздуха в коротком канале квазитреугольного поперечного сечения при постоянной температуре стенки канала.
2. Результаты экспериментального исследования теплообмена воздуха в каналах квазитреугольного поперечного сечения сборки тепловыделяющих элементов при нестационарных режимах.
3. Результаты обобщения экспериментальных данных по теплообмену газовых смесей с $Pr = 0,7 \div 0,2$ в коротких одиночных каналах круглой и треугольной форм.

Практическая значимость работы. Практическая значимость работы заключается в возможности использования полученных результатов при разработке высокоэффективных миниканальных газовых теплообменных аппаратов

и сборок со сложной внутренней структурой теплообменных поверхностей.

В работе представлен разработанный и усовершенствованный панорамный тепловизионный метод определения температурных характеристик газовых потоков на выходе из одиночных каналов и сборок (патент № 2597956 от 25.08.2016г., Приложение А) для экспериментального исследования процессов теплообмена в стационарных и нестационарных режимах работы миниканальных рекуперативных теплообменных аппаратов, тепловыделяющих стержневых сборок со сложной пространственной структурой теплообменных поверхностей. Метод модифицирован и адаптирован к задачам данного исследования. Предложена методика обработки термограмм для поперечных профилей температуры газового потока на выходе из каналов сложной формы, характерных для современных канальных теплообменных аппаратов. Апробация панорамного метода проведена при экспериментальной оценке эффективности процессов теплообмена в каналах круглого, квазитреугольного поперечного сечения, а также стержневых сборках, в том числе для определения в парогазовых потоках капель влаги. Результаты диссертационной работы внедрены в учебный процесс (Приложение Б).

Методы исследования включали в себя пространственно-временные измерения температур воздуха на выходе из одиночных каналов круглого и квазитреугольного поперечного сечения, сборки тепловыделяющих элементов при вариации режимных параметров. Получены экспериментальные данные по гидродинамике и теплообмену в зависимости от массового расхода, плотности теплового потока, температуры стенки. Использован разработанный и запатентованный автором панорамный тепловизионный метод определения температурных полей газовых потоков.

Достоверность результатов подтверждается применением современного высокоточного измерительного оборудования, проведением специальной серии поверочных опытов по верификации методики исследования, выполненным анализом точности измерений, сопоставлением полученных результатов с результатами аналитических и численных исследований других авторов, хорошим соответствием результатов, полученных прямыми контактными и дистанционными методами измерения локальных температур газовых потоков.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы лично доложены соискателем и обсуждались на V Всероссийской научно-практической конференции "Теплофизические основы энергетических технологий" (Томск, 2014), на III Российской молодежной научной школе-конференции "Энергетика, электромеханика и энергоэффективные технологии глазами молодежи" (Томск, 2015), на Всероссийской конференции "СТС ХХХII" (Новосибирск, 2015), на научно-практической конференции "Энергетика – Экология – Энергосбережение" (Калуга, 2016), на 11-м Международном форуме по стратегическим технологиям "IFOST-2016" (Новосибирск, 2016), на Международной молодежной научной конференции "Тепломассоперенос в системах обеспечения тепловых режимов энергонасыщенного технического и

технологического оборудования" (Томск, 2016), на Всероссийской научной конференции "Теплофизика и физическая гидродинамика" (Ялта, 2016), на VII Всероссийской научно-практической конференции "Теплофизические основы энергетических технологий" (Томск, 2016), на XIV Всероссийской школьно-конференции молодых ученых "Актуальные вопросы теплофизики и физической гидрогазодинамики" (Новосибирск, 2016).

Личный вклад автора заключается в разработке панорамного тепловизионного метода определения температуры газовых потоков на основе термограмм сетки-термоприемника, в постановке задач исследования совместно с научным руководителем, в разработке и создании экспериментальных стендов, обосновании методик экспериментальных исследований, постановке, планировании и проведении экспериментов, анализе и обобщении результатов экспериментальных исследований, обработке полученных данных, подготовке статей и докладов о научных результатах исследований.

Связь с планами основных научно-исследовательских работ. Работа выполнена в Институте теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН в рамках молодежного гранта РФФИ № 16-38-00502 "Экспериментальное исследование режимов течения и теплообмена газовых сред в миниканальных теплообменниках с использованием тепловизионной методики".

Тема диссертационного исследования соответствует приоритетному направлению развития науки, технологий и техники в Российской Федерации "Энергоэффективность, энергосбережение, ядерная энергетика" и перечню критических технологий "Технологии создания энергосберегающих систем транспортировки, распределения и использования энергии", "Технологии создания ракетно-космической и транспортной техники нового поколения".

Публикации. Основные положения и результаты диссертационной работы опубликованы в 16 печатных работах, в том числе, 4 научные статьи в журналах, входящих в перечень ведущих научных журналов ВАК, 5 научных статей в рецензируемых журналах; 6 публикаций в материалах конференций. Получен 1 патент.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка условных обозначений, списка использованных источников и приложения. Общий объем диссертационной работы составляет 154 страницы, включая 91 рисунок, 15 таблиц, 2 приложения. Список используемых источников включает 119 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснованы актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследования, научная новизна и практическая значимость полученных результатов, представлена структура и объем диссертационного исследования.

В первой главе выполнен анализ теоретических и экспериментальных работ по гидродинамике и теплообмену газовых потоков в каналах различной

формы и сборках. **Показано, что** разработка компактных теплообменных аппаратов требует детального изучения закономерностей течения и теплообмена в каналах сложной геометрической формы, длина которых меньше длины гидравлической и тепловой стабилизации рабочих участков. Теоретические исследования проведены для установившихся течений в протяженных каналах канонических форм (круглая, кольцевая, призматическая и т.д.), но результаты таких исследований мало применимы для каналов и сборок малых размеров со сложной теплообменной поверхностью и неустановившимся характером течения. В углах каналов треугольного и квазитрехугольного поперечного сечения образуются застойные зоны, оказывающие существенное влияние на профили скоростей в условиях установившегося течения по сравнению с круглой трубой. Современные методы изучения течений и теплообмена в каналах сложной геометрической формы ограничиваются численными методами, поэтому необходима разработка новых экспериментальных методов. Малоизученным является теплообмен в коротких каналах при неустановившемся режиме течения, а также течение и теплообмен в каналах для смесей газов с низкими значениями чисел Прандтля ($Pr = 0,7-0,2$) несмотря на возросший интерес к их практическому применению.

По результатам анализа литературных данных и выше перечисленных проблем сформулированы задачи настоящего исследования.

Во второй главе описываются экспериментальные установки для исследования теплообмена при граничном условии $q_{ст} = \text{const}$ и $T_{ст} = \text{const}$ при вынужденном течении газа в каналах различного поперечного сечения; экспериментальный стенд и методика измерений для изучения теплогидравлических характеристик смеси гелия с тяжелым газом при тчении в каналах различного поперечного сечения. Представлен запатентованный панорамный тепловизионный метод исследования газовых потоков, обеспечивающий локальное опрделение температур газового потока в отдельных каналах, сборках каналов. Представлена методика обработки экспериментальных данных, полученных с помощью тепловизионной аппаратуры. Приводится оценка погрешности измерений и тарировка тепловых потерь.

Принципиальная схема экспериментальной установки, разработанной для изучения теплообмена при вынужденном течении газа в каналах различного поперечного сечения и длины, при различных граничных условиях с использованием панорамного тепловизионного метода диагностики, изображена на рисунке 1.

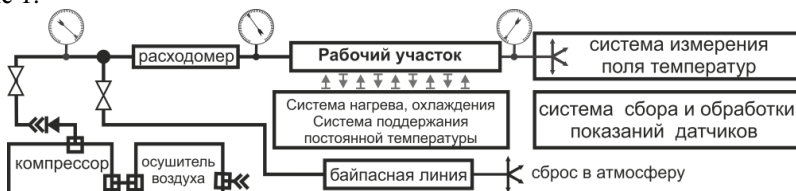


Рисунок 1 - Принципиальная схема экспериментальной установки

Исследования проводились на различных рабочих участках:

- цилиндрической трубе при условии $q_{ст} = \text{const}$;
- сборке тепловыделяющих элементов при условии $q_{ст} = \text{const}$;
- канале квазитреугольного поперечного сечения при условии $T_{ст} = \text{const}$.

На рисунке 2 представлена схема цилиндрического канала внутренним диаметром 19 мм, длиной 0,5 м и толщиной стенки 1,5 мм. Нагрев газа в круглом канале 1, выполненном из кварцевой трубки, производился на участке длиной 0,46 м с помощью равномерно намотанной нихромовой проволоки на внешнюю поверхность трубки. В качестве теплоизоляции 6 использовали каолиновую вату 5 толщиной 12 мм с обмоткой из стеклоткани.

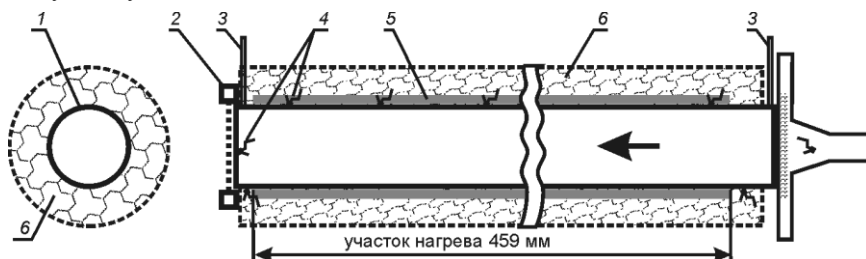


Рисунок 2 - Схема цилиндрического канала. 1 - кварцевая труба, 2 - кассета с сеткой - термодатчиком, 3 - капилляры для отбора давления, 4 - термомпары, 5 - электронагреватель, 6 - теплоизоляция

Схема рабочего участка для исследования теплообмена в сборке из цилиндрических нагревателей представлена на рисунке 3.

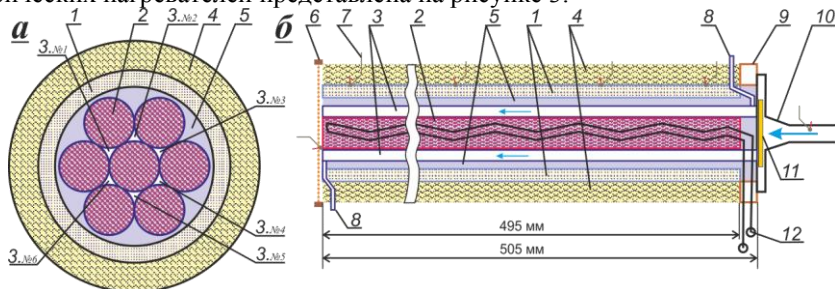


Рисунок 3 – Сечение канала и распределение цилиндрических нагревателей:

а - поперечное сечение: 1 - кварцевая трубка, 2 - нагреватель, 3 - канал для потока воздуха, 4 - теплоизоляция, 5 - воздушная прослойка;

б - продольное сечение: 6 - кассета с сеткой термодатчиком, 7 - медь-константановая термомпара, 8 - капилляры отбора давления, 9 - колодка вывода проводов, 10 - входной патрубок, 11 - пористая вставка, 12 - нихромовая проволока

В кварцевую трубку общей длиной 0,5 м и внутренним диаметром 19 мм помещалась сборка из семи цилиндрических нагревателей, между которыми формировалось шесть каналов квазитреугольного поперечного сечения (№1 ÷ №6). Нагреватели изготовлены из кварцевой трубки диаметром 5,9 мм. Трубки заполнялись порошком оксида алюминия (Al_2O_3). Нагрев осуществлял-

ся нихромовой проволокой. Эквивалентный гидравлический диаметр каналов проходного сечения сборки 0,72 мм, теплообменная поверхность каналов 0,027 м².

Исследование теплообмена в каналах сложной геометрии проводилось на примере канала квазитреугольного поперечного сечения, представленном на рисунке 4. Стенки канала 1 были выполнены из трех полос медной фольги толщиной 50 мкм, длина канала составляла 250 мм. Длина теплообменного участка X изменялась от 10 до 230 мм. Гидравлический диаметр канала D_r составлял 1,31 мм.

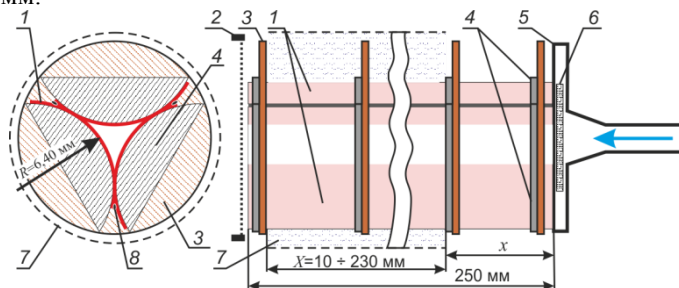


Рисунок 4 – Схема канала квазитреугольного поперечного сечения: 1- стенка канала, 2 - кассета с сеткой-термоприемником, 3 - монтажный диск, 4 - формообразующие вставки, 5 - переходной патрубок, 6 - пористая вставка, 7 - термостабилизирующая засыпка, 8 - пайка по соединительному шву

Теплогидравлические характеристики при течении смеси гелия с тяжелым газом по замкнутому контуру в каналах различного поперечного сечения изучались на экспериментальном стенде с замкнутым контуром и на рабочих участках круглого и треугольного поперечного сечения. Канал круглого и треугольного сечения был изготовлен из нихромовой тонкостенной гладкой трубы внешним диаметром $d = 6$ мм, толщиной стенки $\delta = 0,2$ мм, длиной 0,4м.

Для исследования течений газов в каналах сложной формы, а также в сборках, был разработан и запатентован усовершенствованный панорамный тепловизионный метод. На выходе из канала размещалась сетка с известной температуропроводностью. Сетка исполняла роль индикатора неизотермичности газового потока (рисунок 5). Термографические изображения сетки-термоприемника, полученные с помощью тепловизора марки NEC TH7100 (длина регистрируемого теплового излучения $\lambda = 8 \div 12$ мкм, размер матрицы 320×240 ячеек, локальная разрешающая способность 0,1 мм при использовании штатного макрообъектива с фокусным расстоянием 60 мм), позволили определить с помощью бесконтактного метода температуру газового потока в выходном сечении, как отдельных каналов, так и многоканальных сборок. Параметры сетки подбирались таким образом, чтобы минимизировать влияние сетки термоприемника на структуру и температуру потока газа. Исследовались два типа мелкоячеистых сеток-термоприемников из металла и синтетического материала (термопластик).

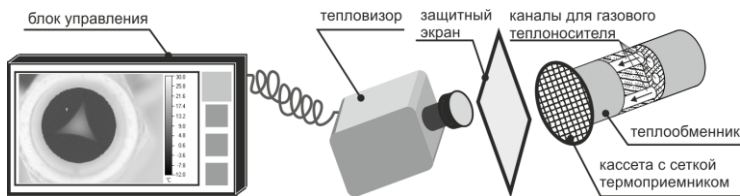


Рисунок 5 – Принципиальная схема измерения поля температур

Экспериментально определялись характеристики сеток: степень черноты поверхности сетки, термическая инерционность сетки-термоприемника. Для проведения экспериментов с использованием панорамного тепловизионного метода была выбрана латунная сетка с размером ячейки 309×309 мкм, средней толщиной нити 81 мкм и степенью черноты 0,54, удовлетворяющая требованиям эксперимента. Разработанный метод обработки термограмм позволил оценить температуру точек, расположенных между узлами матрицы тепловизора.

При численном расчете средней температуры произвольной области погрешность составляла менее 0,5%. Сравнение расчетных полей температур тепловизионных измерений с термометрическими измерениями в точке показало хорошее соответствие в пределах точности измерений тепловизора $\pm 0,4^\circ\text{C}$ при чувствительности метода измерений $\pm 0,1^\circ\text{C}$. Погрешность измерений поля температур с помощью разработанного панорамного тепловизионного метода с использованием тепловизора NEC TH7100 составляла 3%.

Систематическая погрешность основных измеряемых величин составила не более 3%, систематическая погрешность рассчитываемых размерных величин составила не более 7%. Тепловые потери не превышали 12 % от подаваемой мощности.

Определение капель влаги в парогазовых потоках. При работе систем кондиционирования, аппаратов и реакторов авиационной, фармацевтической и других промышленности возможно появление конденсированной жидкой фазы примесей в газовом потоке, наличие которой в большинстве случаев нежелательно. Проведена серия экспериментов и выполнено сравнение термограмм и видеокадров сетки-термоприемника на выходе канала, полученных для различных значений навесок этилового спирта, распыляемых в поток воздуха. Было отмечено, что на видеокадрах проявление действия дисперсного потока визуально трудно различимо, тогда как на термограммах ярко выражено проявление взаимодействия дисперсного потока с сеткой-термоприемником по изменению поля температур, фиксируемого тепловизором. Таким образом, панорамный тепловизионный метод позволяет обнаружить наличие капель влаги в парогазовых потоках и, вследствие этого, необходима предварительная осушка воздуха при проведении исследований.

В третьей главе представлены результаты экспериментального исследования теплообмена в каналах различной формы поперечного сечения при граничных условиях $q_{\text{ст}} = \text{const}$ и $T_{\text{ст}} = \text{const}$, а также результаты экспериментального исследования нестационарных режимов теплообмена в стержневой теп-

ловыделяющей сборке. Проведено сравнение полученных экспериментальных данных по теплообмену в каналах с известными теоретическими зависимостями и опытными данными других авторов.

Теплообмен при неизотермическом течении воздуха в горизонтальном цилиндрическом канале длиной 0,5 м с внутренним диаметром 19 мм (рисунок 2) при условии $q_{ст} = \text{const}$, проводившихся в ламинарном и переходном режимах течения. Расход воздуха изменялся в диапазоне от 0,25 г/с до 0,90 г/с, а числа Рейнольдса Re от 200 до 5000. Плотность теплового потока на внутренней стенке трубки $q_{ст} = 39 \div 351 \text{ Вт/м}^2$. Длина термического начального участка составила $l_{н.т} = 0,21 \div 4,37 \text{ м}$. Погрешность измерения локальных температур контактным и бесконтактным методами в одинаковых точках составила не более $\pm 0,4^\circ\text{C}$. Обработка первичных экспериментальных данных (рисунок 6) позволила получить зависимость числа Нуссельта Nu от Re для стационарных режимов течения газа в канале, которая согласуется с расчетами по формуле [Михеева, 1951] с точностью до $\pm 10\%$. В диапазоне значений чисел Рейнольдса от 2000 до 5000 и тепловых потоках от 200 до 350 Вт/м^2 отмечено проявление влияния свободной конвекции на вынужденное течение в горизонтальном цилиндрическом канале при $Gr/Re > 100$.

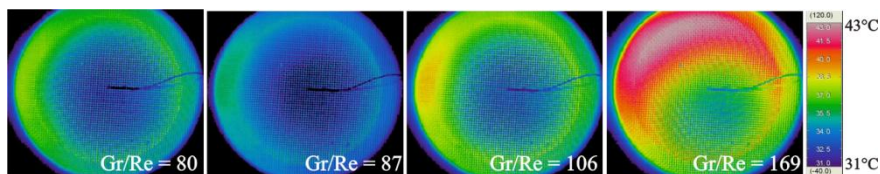


Рисунок 6 – Термограммы с распределением полей температур потока воздуха на выходе из цилиндрического канала при тепловом потоке $q_{ст} = 351 \text{ Вт/м}^2$

Полученные экспериментальные данные по влиянию гидродинамики на теплообмен в канале сравнивались с известной картой режимов течения в горизонтальном канале [Mills, 1998]. Отмечено, что граница перехода от вынужденной конвекции к смешанной конвекции значительно смещена влево по оси абсцисс. Это может быть связано с использованием различных методик получения экспериментальных данных. Тепловизионная техника позволила моментально и наглядно определить всё поле температур канала в реальном масштабе времени в заданном сечении канала в отличие от контактного метода измерения температур в отдельно взятой точке того же сечения в канале. Хорошее совпадение полученных экспериментальных данных с известными теоретическими зависимостями для круглого канала [Петухов], [Михеев] для стационарного режима течения потока газа позволило использовать тепловизионную методику и для исследования нестационарных режимов течения.

Теплообмен при течении воздуха в канале квазиреугольного поперечного сечения. Эксперименты проводились на рабочем участке, представленном на рисунке 4, при давлениях газа P на входе в рабочий участок от 103 до 150 кПа, массовом расходе G от 0,06 до 0,6 г/с и постоянной температуре

стенки 0°C. Температура на входе составляла $20 \div 27^\circ\text{C}$. Число Рейнольдса Re варьировалось от 700 до 5000. Температура стенки $T_{\text{ст}} = 0^\circ\text{C}$ поддерживалась с помощью термостабилизирующей засыпки (смесь мелких частиц льда с водой).

Измеренные коэффициенты сопротивления трения ζ при течении воздуха в канале квазитреугольного поперечного сечения в зависимости от числа Рейнольдса Re соответствовали известным зависимостям для коэффициента сопротивления трения в гладких трубах. Построенная зависимость Nu от Re и безразмерного критерия Ψ $\Psi = 1/Re \cdot H/D_r$ в диапазоне чисел Рейнольдса $Re_{\text{вх}}$ от 700 до 5000, чисел Пекле Pe от 500 до 3500 (для $Pr = 0,7$) представлена на рисунке 7.

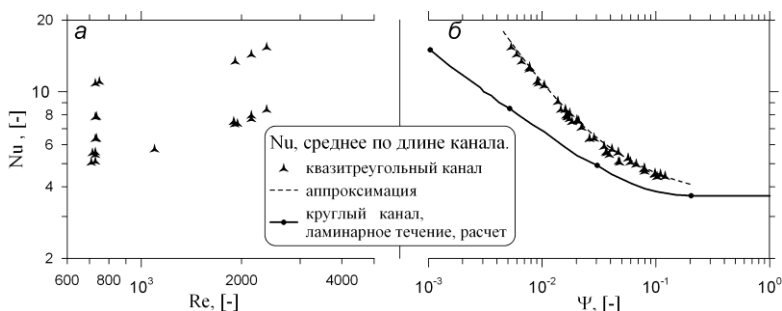


Рисунок 7 – Зависимость среднего числа Nu от Re для канала квазитреугольного поперечного сечения (а) и зависимость среднего по длине канала Nu от безразмерного критерия Ψ для канала квазитреугольного и круглого поперечного сечения (б)

Из рисунка видно, что полученные экспериментальные данные для среднего числа Nu в квазитреугольном канале лежат выше зависимости [Петухова, 1968], которая соответствует ламинарному режиму течения в круглом канале. Проведенное исследование показало монотонную зависимость среднего по длине канала числа Нуссельта Nu от безразмерного критерия Ψ . Данные можно описать эмпирической зависимостью: $Nu = 3,51 + 0,15 \cdot \Psi + 0,0001 \cdot \Psi^{-0,85}$.

Нестационарные режимы теплообмена при обтекании воздухом сборки цилиндрических тепловыделяющих элементов. Исследовались тепловые режимы для потока воздуха в каналах сложной формы (рисунок 3), образованных из нескольких цилиндрических продольных нагревателей. В работе проведена серия экспериментов при ступенчатом изменении тепловых нагрузок на нагреватели и резком изменении расхода воздуха прокачиваемого через каналы. На термограммах зафиксировано изменение температурного поля при таких нестационарных режимах течения и теплообмена.

Эксперименты проводились при следующих режимных параметрах: массовый расход газа – в диапазоне от 0,2 до 0,5 г/с, мощность на нагревателе варьировалась от 0 до 5,5 Вт. Для моделирования аварийных ситуаций перегрева сборки каналов проведено несколько серий опытов. При неизменной те-

пловой нагрузке на семи нагревателях (суммарная мощность нагревателей – 33,6 Вт) осуществлялось резкое снижение общего расхода воздуха прокачиваемого через каналы с 0,45 г/с до 0,25 г/с. На рисунке 8 в качестве примера представлены отдельные термограммы опыта № 3 из серии для различных моментов времени. Из рисунка видно, что с уменьшением расхода воздуха происходит увеличение температуры газового потока в выходном сечении с 51°C до 63°C.

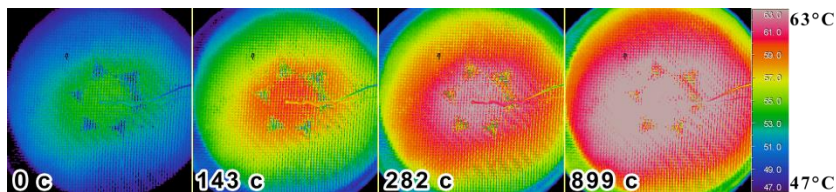


Рисунок 8 – Термограммы выходного сечения сборки для опыта №3 из серии

Отмечался существенный перегрев, как потока газа на выходе из каналов, так и нагревателей относительно начальных условий. Наблюдалось различие средних температур потока газа в каждом из шести каналов от 0,5 до 1,5°C в выходном сечении, которое сохранялось во всех сериях опытов. Неоднородность теплогидравлических характеристик потока на выходе сборки (теплогидравлическая разверка) определялась отклонением размеров и положением поверхности нагревателей по длине сборки. На основе теплового расчета средней температуры потока воздуха по длине канала по методике Михеева проведена оценка перераспределения расхода газа по каналам сборки. Анализ данных показал, что максимальный расход приходится на канал с максимальной площадью, а минимальный расход газа, соответственно, на канал минимальной площади поперечного сечения.

В четвертой главе представлены результаты анализа данных по теплообмену и трению в каналах круглого и треугольного поперечного сечения при течении смесей газов с малыми числами Прандтля. Проведена "экспресс"-оценка эффективности теплоносителя в каналах в зависимости от состава газовой смеси и формы канала.

Для интенсификации теплообмена в качестве теплоносителя можно использовать смеси газов с регулируемыми теплофизическими свойствами. Особенно перспективно смешение легкого и тяжелого газа со значением числа $Pr \sim 0,2$. Предложенные зависимости коэффициента сопротивления трения ζ для круглой и треугольной трубы от числа Re при использовании смеси газов совпадают с известными зависимостями для гладких труб. Экспериментальные данные по теплообмену [Vitovskii et al., 2015] для каналов круглой и треугольной формы для теплоносителя с низким числом Pr в диапазоне чисел Re от 2000 до 100000 сравнивались с расчетной зависимостью [Тетельбаума, 1974]. В результате – зависимость числа Nu от Re неоднозначна для каналов круглого и треугольного сечения, имеющих одинаковую длину нагревателя и одинаковый смоченный периметр поперечного сечения, для различных чисел Pr .

Анализ показал, что данные по теплообмену при граничных условиях $q = \text{const}$ для каналов круглого и треугольного сечения и различных газовых смесей обобщаются в безразмерных координатах Nu от безразмерного критерия $\Psi = 1/Re \cdot x/D_f$ (рисунок 9).

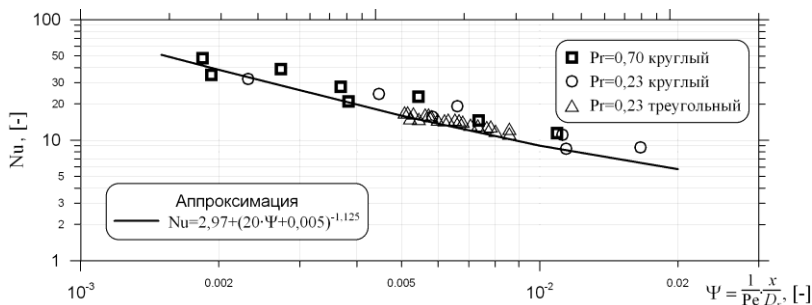


Рисунок 9 – Зависимость числа Nu от безразмерного критерия Ψ в круглом и треугольном канале для различных газовых смесей

Таким образом, на основе полученных зависимостей возможно проведение "экспресс"- оценки эффективности теплоносителя с изменением состава газовой смеси и формы канала.

В заключении диссертационной работы сформулированы основные выводы и обобщения:

1. Модифицирован и адаптирован к задачам исследования панорамный тепловизионный метод определения температурных характеристик потока на выходе из каналов круглой, призматической форм и стержневых тепловыделяющих сборок. Установлено, что термограммы мелкоячейстой сетки-термоприемника дают адекватную физике процесса картину локального прогрева газового потока. Разработан алгоритм определения средней температуры газового потока. На способ измерения и устройство получен патент.

2. Разработаны и изготовлены экспериментальные стенды для исследования особенностей теплообмена при вынужденном течении газов в одиночных каналах круглой, треугольной и квазиреугольной формы, а также в квазиреугольных каналах сборки из тепловыделяющих элементов.

3. Получена обобщающая зависимость для среднего числа Nu от $1/Re \cdot x/D_f$ в канале квазиреугольного поперечного сечения при граничных условиях первого рода в диапазоне чисел Re от 700 до 5000.

4. Предложена обобщающая зависимость для теплообмена в каналах круглой и треугольной формы для смесей газов, имеющих низкие значения чисел Прандтля ($Pr = 0,2 \div 0,7$) при постоянной плотности теплового потока на стенке канала. Обнаружено, что свойства смеси не оказывают заметного влияния на интенсификацию теплообмена в каналах.

5. Получены зависимости средней температуры воздуха на выходе из каналов, образованных тепловыделяющими элементами модельной сборки, при нестационарных режимах теплообмена. На основе анализа термограмм

газовых потоков на выходе, полученных с помощью тепловизионного метода, обнаружены дефекты геометрии проходных каналов тепловыделяющей сборки. Показана возможность своевременного обнаружения гидравлических и тепловых разверок при создании современных теплообменных аппаратов.

6. На основании анализа результатов исследования предложено использовать модифицированные варианты разработанной методики тепловизионной диагностики газовых потоков для: исследования влияния свободноконвективных течений на вынужденный конвективный теплообмен, обнаружения влаги в паровоздушных потоках систем кондиционирования воздуха, выявления на ранних стадиях разработки дефектов (гидравлических и тепловых разверок каналов) и определения качества сборки рекуперативных газовых теплообменных аппаратов, химических реакторов и стержневых тепловыделяющих сборок со сложной внутренней структурой теплообменной поверхности. Предложено применить метод для изучения переходных и аварийных режимов работы теплообменных аппаратов и т.д.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, входящих в перечень рецензируемых научных журналов, в которых должны быть опубликованы научные результаты на соискание ученой степени кандидата наук:

1. **Slesareva, E.Yu.** Investigation of heat transfer at flow of a gas in the quasitriangular channel with a constant temperature wall / E.Yu. Slesareva, S.L. Elistratov, M.Z. Harisov // MATEC Web of Conferences. - 2017. - Vol. 92. - No 01018. - P. 1–5.
2. **Slesareva, E.Yu.** The 2D method for determining the temperatures field of the gas flow at the outlet of a multi-channel heat exchanger / E.Yu. Slesareva, S.L. Elistratov, V.V. Ovchinnikov // Journal of Physics: Conference Series. - 2016. Vol. 754. - No 072004. - P. 1–4.
3. **Slesareva, E.Yu.** Method experimental definition of efficiency fuelburn in a gas reactors with mini channels / E.Yu. Slesareva, S.L. Elistratov, V.V. Ovchinnikov // MATEC Web of Conferences. - 2016. - Vol. 72. - No 01103. - P. 1–4.
4. **Slesareva, E.Yu.** Experimental investigation of heat transfer in helium-xenon mixtures in triangle channels / V.E. Nakoryakov, S.L. Elistratov, O.V. Vitovskii, E.Yu. Slesareva // Journal of Engineering Thermophysics. - 2015. - Vol. 24. No. 2. - P. 139–142.
5. **Slesareva, E.Yu.** Heat transfer of helium–xenon mixture on the initial pipe section / V.E. Nakoryakov, O.V. Vitovskii, E.Yu. Slesareva // Journal of Engineering Thermophysics. - 2015. Vol. 24. No. 4. - P. 338–341.
6. **Slesareva, E.Yu.** Experimental investigation of heat transfer of helium-xenon mixtures in cylindrical channels / S.L. Elistratov, O.V. Vitovskii, E.Yu. Slesareva // Journal of Engineering Thermophysics. - 2015. - Vol. 24. No. 1. - P. 33–35.
7. **Slesareva, E.Yu.** Experimental Investigation of Nonisothermal Gas Flows in Short Channels / S.L. Elistratov, E.Yu. Slesareva, V.V. Ovchinnikov // Journal of Engineering Thermophysics. - 2015. - Vol. 24. No. 4. - P. 346–347.
8. **Слесарева, Е.Ю.** Термографическое исследование теплообмена на тепло-

- вых элементах газовых анализаторов / С.Л. Елистратов, В.В. Овчинников, Е.Ю. Слесарева // Вопросы оборонной техники. Серия 14. - 2015. - Т. 2. - С. 164–170.
9. **Slesareva, E.Yu.** Thermographic study of gas flows / E.Yu. Slesareva, S.L. Elistratov // EPJ Web of Conferences. - 2015. - Vol. 82. - No 01060. - P. 1–4.
10. **Слесарева, Е.Ю.** Патент РФ № 2597956. «Сетчатый комбинированный термоприемник и способ измерения температурного поля газового потока в каналах» / Елистратов С.Л., Слесарева Е.Ю. // Зарегистрирован в Государственном реестре изобретений РФ 25.08.2016 г. Патентообладатель ИТ СО РАН
Публикации в прочих изданиях:
11. **Слесарева, Е.Ю.** Панорамный метод определения термической структуры потока газа на выходе многоканального теплообменника / С.Л. Елистратов, В.В. Овчинников, Е.Ю. Слесарева // Тезисы докладов Всероссийской научной конференции с элементами школы молодых ученых "Теплофизика и физическая гидродинамика". Ялта: ИТ СО РАН. - 2016. - С. 110–110.
12. **Слесарева, Е.Ю.** Тепловизионная диагностика теплообмена в минициканальных газовых реакторах / А.В. Васильев, Е.Ю. Слесарева, М.З. Харисов // Тезисы докладов научно-практической конференции «Энергетика, экология, энергосбережение». Калуга: Изд-во «Манускрипт». - 2016. - С. 41–43.
13. **Слесарева, Е.Ю.** Верификация тепловизионного панорамного метода при исследовании теплообмена в канале с постоянной температурой стенки/ С.Л. Елистратов, А.В. Васильев, Е.Ю. Слесарева // Тезисы докладов XIV всероссийской школы-конференции «Актуальные вопросы теплофизики и физической гидрогазодинамики». Новосибирск: ИТ СО РАН. - 2016. - С. 50–51.
14. **Слесарева, Е.Ю.** Исследование теплообмена при нестационарном режиме течения газа в каналах сложной формы / С.Л. Елистратов, В.В. Овчинников, Е.Ю. Слесарева // Материалы III российской школы-конференции «Энергетика, электромеханика и энергоэффективные технологии глазами молодежи». Томск: Изд-во ООО «СКАН». - 2015. - С. 142–145.
15. **Слесарева, Е.Ю.** Тепловизионный метод диагностики стационарных и нестационарных полей температуры в газовом потоке / С.Л. Елистратов, В.В. Овчинников, Е.Ю. Слесарева // Материалы всероссийской конференции «СТС XXXII». Новосибирск. - 2015. - С. 221–222.
16. **Слесарева, Е.Ю.** Обобщение данных по теплообмену при турбулентном течении газовой смеси с малыми значениями числа Прандтля в каналах различной формы / С.Л. Елистратов, Е.Ю. Слесарева // Журнал «Инновационная наука» ISSN 2410-6070. - 2017. - Т. 3. - № 1. - С. 24–26.

Подписано к печати 22 июня 2017 г. Заказ № 4.
Формат 60x84/16. Объем 1 уч.-изд. лист. Тираж 120 экз.

Отпечатано в типографии ИП Малыгин А.М
630090, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 6/1 оф. 104.
тел.: 8 (383) 217-43-46