

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу Панкратова Евгения Владимировича на тему «Повышение эффективности рекуперативных устройств с закрученным течением теплоносителя», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности
05.14.04 — Промышленная теплоэнергетика.

Актуальность темы исследования

Одним из направлений повышения эффективности теплотехнологического и теплоэнергетического оборудования является глубокая утилизация отходящей в окружающую среду тепловой энергии и использование ее как вторичного энергоресурса. Однако зачастую высокотемпературные установки эксплуатируются без утилизации теплоты уходящих газов, в результате чего потери теплоты могут составлять более 60%. Поэтому использование современных тепловых утилизационных устройств, обоснованное научными проработками и технико-экономическими расчетами, создает возможности получения значительной экономии тепловой энергии и топлива.

Работа согласуется с основными тезисами «Энергетической стратегии России на период до 2035 года», разработанной Министерством Энергетики Российской Федерации, основной стратегической задачей которой является развитие энергосбережения и повышение энергоэффективности технологического оборудования.

Оценка содержания диссертации

Структура диссертации построена по общепринятой схеме.

В первой главе выполнен достаточно подробный обзор существа проблемы, теоретических и практических работ в исследуемой области. Особое внимание уделено современному состоянию исследований аэродинамики закрученных потоков и конвективного теплообмена в кольцевых каналах рекуперативных устройств. Показано, что применение закрученного потока способствует интенсификации теплообмена и повышению эффективности работы рекуперативных устройств. Однако в существующих рекуперативных теплообменных аппаратах теплообмен интенсифицируется, за счет развития теплообменных поверхностей при осевом течении потока, что приводит к неравномерному распределению плотности теплового потока по теплообменной поверхности. Это требует дополнительного исследования аэродинамические характеристики закрученных потоков в сужающихся кольцевых каналах, а также коэффициентов теплоотдачи на внутренних и внешних поверхностях таких каналов. Также установлено, что недостаточно изучено влияние вторичных течений, возникающих при закрутке потока на теплоотдачу с поверхностями сужающихся кольцевых каналов, образованных неподвижными поверхностями. Существующие уравнения, основанные на экспериментальных и теоретических данных, не позволяют создать инженерную методику расчета рекуператоров с сужающимися кольцевыми каналами.

Таким образом, на основе анализа литературных научных источников сформулированы цели и основные задачи исследований.

Во второй главе описаны экспериментальные стенды, разработаны методики проведения и обработки экспериментальных данных, а также определены погрешности прямых и косвенных измерений.

Подробно описан предмет исследования - сужающийся кольцевой канал с генерацией закрутки потока в предустановленной циклонной камере.

Для исследования аэродинамики и конвективного теплообмена были разработаны два экспериментальных стенда. Первый стенд позволял определять осредненные характеристики закрученного потока в кольцевых каналах и генераторе закрутки при помощи лазерной доплеровской измерительной системы (ЛДИС). Второй стенд позволял исследовать конвективный теплообмен в кольцевом канале. Для измерения теплового потока и определения далее коэффициентов теплоотдачи использовались градиентные датчики теплового потока.

Стенды позволяли измерять плотность теплового потока с погрешностью не более 1 %, скорость - 0,4 %, давление - 1%, объемный расход - 2,8%.

В третьей главе исследуется влияние режимных и конструктивных параметров на распределение тангенциальной и осевой составляющих скорости в кольцевом канале. Результаты включают опытные и расчетные данные по тангенциальной и осевой составляющих скорости. Расчетные данные получены по численной модели рабочего процесса в кольцевом канале с закрученным течением теплоносителя. Для проведения численного расчета была построена структурированная гексаэдрическая сеточная модель, на основе которой было получено сеточно-независимое решение по определению основных исследуемых характеристик в программном пакете ANSYS Fluent. В ходе исследования определена приемлемая модель турбулентности для данного вида течений - двухпараметрическая модель сдвиговых напряжений Ментера $k-\omega$ с поправкой на кривизну линий тока.

Четвертая глава посвящена исследованию аэродинамики закрученного течения в кольцевых каналах рекуперативных устройств. Установлено, что односторонний ввод газа в генератор закрутки определяет значительную азимутальную неравномерность распределения в нем и в канале полной скорости и всех ее составляющих. Выполнение внутреннего цилиндра кольцевого канала в виде усеченного сужающегося конуса, для исследованных значений геометрических характеристик, не приводит к изменению аэродинамики генератора закрутки и условий истечения из него потока. Уменьшение относительной площади выходного сечения канала приводит к возрастанию полной скорости потока за счет роста осевой ее составляющей. Крутка потока по длине понижается за счет уменьшения тангенциальной скорости, и одновременного увеличения осевой. Крутка потока снижается также с уменьшением числа Рейнольдса. Показано, что на входе в кольцевой канал, от кромки генератора закрутки образуются крупномасштабные нестационарные поперечные вихри. Это в свою очередь приводит к формированию вторичных вихрей с чередующимся левым и правым вращением наподобие вихрей Тейлора-Гёртлера, постепенно занимающих все пространство кольцевого зазора, с осями, совпадающими с направлением движения основного закрученного потока. Выявлено, что уменьшение площади поперечного сечения канала приводит к возрастанию сопротивления всего устройства. Сужение канала приводит к увеличению общего сопротивления устройства и не оказывает влияния на

сопротивление генератора закрутки. Даны рекомендации для оценки коэффициентов сопротивления в рассматриваемом устройстве.

В пятой главе приведены результаты исследования конвективного теплообмена в кольцевых каналах рекуперативных устройств с закрученным течением нагреваемого в них воздуха. Установлено, что с уменьшением отношения площади выхода к площади входного сечения канала более интенсивно снижается по длине канала уровень центростремительного ускорения, что приводит к снижению как активного, так и консервативного воздействия инерционных массовых сил на течение потока и теплоотдачу поверхностей кольцевого канала. Снижение консервативного влияния центробежных сил на поток и увеличение осевой скорости приводят к интенсификации теплоотдачи на внутренней поверхности кольцевого канала. Выявлено, что вторичные вихри оказывают существенное влияние на турбулентность потока в кольцевом канале. Согласно полученным данным следует, что сужение канала приводит к увеличению среднего значения полной скорости у внешней поверхности на 24...27%, а у внутренней – на 57...60%. По результатам исследований проведено обобщение экспериментальных данных по местной теплоотдаче на внутренней поверхности кольцевого канала в зависимости от текущих соотношений скоростей и текущей относительной площади поперечного сечения

В шестой главе приведена инженерная методика теплового и аэродинамического расчета рекуперативно-горелочного блока. Проведен анализ энергетической и теплогидравлической эффективности предлагаемых устройств. Установлены рациональные размеры устройства, позволяющие достичь максимальных значений энергетической и теплогидравлической эффективности за счет интенсификации теплообмена на внутренней поверхности кольцевого канала.

В работе имеется 4 **приложения**, включающие блок-схема алгоритма теплового и аэродинамического расчета рекуператора, листинг программы консольного приложения теплового и аэродинамического расчета инженерной методики, патенты на изобретения рекуперативно-горелочных блоков, полученные по результатам настоящего исследования, акты о внедрении.

Основная научная новизна диссертационного исследования и полученных результатов заключается в следующем:

1. На основе экспериментальных данных предложены обобщающие зависимости для расчета: аэродинамических характеристик, сопротивления и конвективного теплообмена в сужающихся кольцевых каналах циклонного рекуператора в закрученном потоке теплоносителя, теплогидравлической эффективности;

2. Установлены основные закономерности влияния вторичных вихрей на конвективный теплообмен в закрученном потоке при различных степенях сужения кольцевых каналов, образованных неподвижными поверхностями.

Практическая значимость работы

Результаты работы показали, что использование в теплоутилизационных установках сужающихся кольцевых каналов с закрученным потоком теплоносителя приводит к росту коэффициента теплоотдачи за счет увеличения скорости потока и интенсифицирующего влияния вторичных течений. Для расчета и создания теплоутилизационных установок разработана инженерная методика теплового и

аэродинамического расчета рекуперативного устройства с закрученным течением теплоносителя. Разработаны и защищены патентами рекуперативная горелка и два варианта конструкции рекуперативно-горелочных блоков.

Необходимо подчеркнуть, что основные результаты получены экспериментально, на основе использования современных методов исследования. Это несомненно преимущество работы.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций

Степень достоверности полученных результатов подтверждается использованием современного высокоточного оборудования, проходящего регулярную поверку в соответствии с техническими требованиями, а также оценкой погрешности измерений. Для подтверждения полученных данных численными методами был выполнен поиск сеточно-независимого решения и проведена верификация полученных данных с экспериментальными значениями величин.

Цель и основные задачи исследований

Целью работы является повышение энергетической и теплогидравлической эффективности рекуперативных устройств за счет интенсификации конвективного теплообмена в кольцевых каналах, разработка практических рекомендаций по их проектированию.

Задачи, которые необходимо было решить для достижения поставленной цели:

1. Проанализировать современное состояние вопроса исследований аэродинамических характеристик закрученного потока и его влияния на теплоотдачу поверхностей кольцевых каналов, в том числе и для сужающихся каналов;
2. Разработать и создать экспериментальные стенды для исследования аэродинамики и конвективного теплообмена в кольцевом канале рекуператора с закрученным течением потока, оценить погрешности прямых и косвенных измерений;
3. Получить сеточно-независимое решение и провести верификацию численного расчета с экспериментальными данными. Исследовать аэродинамику и конвективный теплообмен в кольцевом канале с закрученным течением потока на основе численного расчета;
4. Установить и обобщить закономерности распределения аэродинамических характеристик и конвективного теплообмена в предложенных конструкциях кольцевого канала циклонного рекуператора при варьировании основных геометрических и режимных характеристик;
5. На основе полученных результатов разработать инженерную методику расчета рекуперативного устройства, дать практические рекомендации по проектированию, предложить и оформить патенты на изобретения конструкций рекуперативного устройства.

Апробация работы:

Полнота изложения материалов диссертации достаточно высокая, по теме исследования опубликовано большое количество печатных работ - 16, в том числе 8 статей в рекомендованных ВАК журналах, из них 3 статьи в журналах, цитируемых в системах в Scopus и WoS, а также 3 патента на изобретения. Апробация работы проведена на 12 международных и всероссийских конференциях и форумах.

Соответствие диссертации паспорту специальности 05.14.04 – «Промышленная теплоэнергетика» по формуле специальности: «разработка и создание нового и наиболее совершенного теплотехнического и теплового технологического оборудования ... уменьшение энергетических затрат на единицу продукции ...»; по областям исследований: пункту 3 «Теоретические и экспериментальные исследования процессов тепло- и массопереноса в тепловых системах и установках, использующих тепло. Совершенствование методов расчета тепловых сетей и установок с целью улучшения их технико-экономических характеристик, экономии энергетических ресурсов»; пункту 4 «Разработка новых конструкций теплопередающих и теплоиспользующих установок, обладающих улучшенными эксплуатационными и технико-экономическими характеристиками»; пункту 6 «Разработка и совершенствование аппаратов, использующих тепло, и создание оптимальных тепловых систем для защиты окружающей среды».

Замечания по диссертации

1. Задачи исследования слишком «мелки»: проанализировать литературу, разработать стенд, получить сеточно-независимое решение и провести верификацию результатов численных исследований. Это все констатация необходимых и само-само подразумевающихся разделов методологии научного исследования. Необходимо было использовать выражения со словами выявить, установить, Ю определить, получить ... какие то новые факты, закономерности, рекомендации.
2. Рабочий участок на рис.2.1 имеет 2 тангенциальных входа (поз.1). Как обеспечивалось равенство расходов через них и равенство давлений. Было ли это принципиально?
3. Сегодня принято использовать термин неопределенность, установленный ГОСТ 34100.1-2017, а не погрешность. По тексту упоминается о точности определения числа Нуссельта (безразмерного коэффициента теплоотдачи, но нет конкретных количественных данных. С какой неопределенностью косвенных измерений определялся коэффициент теплоотдачи?
4. Все базовые уравнения численной модели записаны для нестационарной задачи. В чем проявляется нестационарность процессов, рассмотренных в диссертации, разве есть пульсации потока? Но про них в диссертации не упоминается. Вихревое движение можно считать и в стационарной постановке.
5. Сгущение сетки в пристенной области, в области отрыва потока, в области соударений потоков не производилось (рис.3.1)? Указано, что выбрано значение пристеночной функции $y^+=0.9$. Вязкий подслоя используемый в работе RANS-подход может разрешить при $y^+=1...5$.
6. Использована модель RANS. Но если хотели более точно определить тонкую структуру вихреобразования, то надо было использовать подход LES или

использовать прямое численное моделирование (DNS). Это конечно бы увеличило бы трудозатраты и машинное время счета, но получили бы надежные сведения о мгновенном распределении скоростей, а не осредненных во времени.

7. По тексту диссертации предложены зависимости для расчета относительной тангенциальной скорости, коэффициентов сопротивления и теплоотдачи. Но под зависимостями нет информации об их точности при установленной доверительной вероятности, диапазоне применимости по геометрическим и режимным параметрам.

Все изложенные замечания носят рекомендательный характер и снижают научной значимости полученных научных результатов работы.

Заключение

В целом, диссертационная работа Панкратова Евгения Владимировича представляет собой законченное научное исследование, выполненное автором самостоятельно и на высоком уровне. В диссертационной работе разработаны положения научных основ повышения энергетической и теплогидравлической эффективности рекуперативных устройств за счет интенсификации конвективного теплообмена в кольцевых каналах, внедрения которых вносит значительный вклад в создание высокоэффективных систем утилизации теплоты энергетического и теплотехнологического оборудования.

Считаю, что диссертационная работа «Повышение эффективности рекуперативных устройств с закрученным течением теплоносителя» соответствует требованиям п. 9 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. №842, а ее автор, Панкратов Евгений Владимирович, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.14.04 — Промышленная теплоэнергетика.

Попов Игорь Александрович
доктор технических наук по специальности
01.04.14, профессор,
член-корреспондент АН РТ,
профессор кафедры теплотехники и
энергетического машиностроения
ФГБОУ ВО «Казанский национальный
исследовательский технический университет
им.А.Н.Туполева - КАИ»,
popov-igor-alex@yandex.ru,
420111, г. Казань, ул.К.Маркса, д.10.

16.11.2021

Я, Попов Игорь Александрович, даю согласие на включение моих персональных данных в документы, связанные с защитой диссертации Панкратова Евгения Владимировича, и их дальнейшую обработку.

Подпись Попов И. А.
заведующий, начальник управления
делами КИФТУ-КАИ

