

На правах рукописи

Гурьянов Александр Игоревич

**НАУЧНОЕ ОПИСАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ГОРЕНИЯ В ОГРАНИЧЕННЫХ
ЗАКРУЧЕННЫХ ПРОТИВОТОЧНЫХ ТЕЧЕНИЯХ И ВОЗМОЖНОСТЬ
ИХ ПРИМЕНЕНИЯ К СОЗДАНИЮ ЭФФЕКТИВНЫХ УСТРОЙСТВ
СЖИГАНИЯ ТОПЛИВА**

Специальность 01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
доктора технических наук

Рыбинск – 2013

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П.А. Соловьева»

Научный консультант:

Пиралишвили Шота Александрович, заслуженный деятель науки и техники РФ, доктор технических наук, профессор.

Официальные оппоненты:

Китанин Эдуард Леонтьевич, доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет», профессор кафедры «Теоретические основы теплотехники», г. Санкт-Петербург;

Исаев Сергей Александрович, доктор физико-математических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации», профессор кафедры механики, г. Санкт-Петербург;

Свердлов Евгений Давыдович, доктор технических наук, государственный научный центр Федеральное государственное унитарное предприятие «Центральный институт авиационного моторостроения имени П.И. Баранова», начальник отделением, г. Москва;

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва.

Защита состоится **15 октября** 2013 года в **16:00** часов на заседании диссертационного совета Д 212.229.06 в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет» по адресу: 195251, г. Санкт-Петербург, улица Политехническая, 29, аудитория **118** главного здания.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет».

Автореферат разослан « _____ » _____ 2013 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета
к.т.н., доцент

Талалов Виктор Алексеевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Процессы горения топлив составляют основу энергетики, транспорта, нефтегазовой отрасли, авиации, высокотемпературных технологических процессов в области машиностроения, сельского хозяйства, быта. Проблема их интенсификации с учётом энергоэффективности и энергосбережения является одной из наиболее важных приоритетных направлений развития науки и техники.

Отмеченное объясняет непрерывный научный и практический поиск методов повышения эффективности процессов горения, среди которых, на протяжении всех этапов развития технических устройств сжигания топлива, одним из наиболее распространённых является закрутка течения. Интенсификация тепло- и массообменных процессов вращательным движением рабочей среды используется при создании горелочных устройств (ГУ) и камер сгорания (КС).

Общими проблемами создания горелочных устройств и камер сгорания являются: обеспечение высокой полноты сгорания топлива (не менее 99,99%); сокращение выбросов загрязняющих атмосферу веществ при минимальных размерах зоны горения; снижение вероятности срыва пламени и расширение концентрационного диапазона устойчивого горения; тепловая защита элементов конструкции. Ужесточение норм на эмиссию NO_x и CO газотурбинными двигателями, энергоустановками крупной и малой энергетики определяют актуальность изучения альтернативных принципов и аэродинамических схем организации горения и, соответственно, конструкций устройств сжигания топлива, реализующих эти принципы.

Степень разработанности темы исследования. Закрутка радикальным образом влияет на газодинамику течения, микро- и макроструктуру турбулентного потока. Пространственное распределение термогазодинамических параметров, геометрия фронта пламени и механизм горения в реагирующих течениях зависят от степени закрутки, сообщённой потоку. Принцип организации движения потоков рабочего тела с различной степенью закрутки является основой многих топливосжигающих устройств. Однако, конструкции практически всех из них не используют такие особенности закрученных течений как энергоразделение потока по полной энтальпии (температуре) и противоток двух вихрей в ограниченном пространстве осесимметричного канала – периферийного квазипотенциального и приосевого вынужденного, термогазодинамическая «сшивка» которых происходит на радиусе разделения вихрей, определяющем поверхность нулевой осевой компоненты скорости.

Горение в условиях аэродинамического противотока представляет интерес для науки и практики с точки зрения возможностей интенсификации, но в виду сложности наименее изучено. Доступные результаты исследований различных авторов показали, что организация горения в условиях закрутки и противотока течения позволяет обеспечить выполнение большинства из перечисленных требований. Однако, создание единой методологии его научного описания и особенностей практического применения требует обобщения известных и вновь полученных теоретических и экспериментальных данных в рамках математических моделей и методик расчёта горения в закрученном течении с противотоком, поиска новых областей применения горелочных устройств противоточного типа в авиации, энергетике, технологиях двойного назначения.

Наиболее рациональным методом решения проблемы является проведение исследований, направленных на: выявление определяющих факторов и механизмов их совместного влияния на интегральные параметры рабочего процесса устройств сжи-

гания топлива противоточного типа; изучение термогазодинамики и массообмена ограниченных закрученных течений с аэродинамическим противотоком; экспериментальное и теоретическое уточнение методов расчёта противоточных вихревых горелочных устройств (ПВГУ); уточнение теплофизических особенностей горения углеводородо-воздушных и водород-кислородных смесей в потоках с закруткой, в том числе в инертных средах; расширение областей применения устройств сжигания топлива противоточной схемы в авиации и технологиях двойного назначения с использованием полученных результатов и обобщений.

Это определяет актуальность темы работы и позволяет сформулировать цель и ряд задач, решение которых обеспечит её достижение.

Цель и задачи работы.

Разработка научных основ проектирования и создания горелочных устройств с использованием термогазодинамических особенностей ограниченных закрученных противоточных течений, обеспечивающих повышение эффективности сжигания топлива и стабилизации горения.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи.

1. Выполнить анализ областей использования, проблем, особенностей и методов организации горения ископаемого и водородного топлива в течениях с закруткой и аэродинамическим противотоком.

2. Изучить термогазодинамику ограниченного закрученного противоточного течения на основе численных и экспериментальных исследований влияния его геометрии на распределение газодинамических параметров, качество распыла топлива и смесеподготовку с учётом энергоразделения.

3. Разработать физико-математическую модель смесеобразования в вихревых горелочных устройствах противоточной схемы, обеспечивающую возможность расчёта тепло и массообмена ансамбля капель в потоке рабочего тела и определения интегральных характеристик распыла.

4. Обосновать и подтвердить условия самовоспламенения в потоке с закруткой и противотоком на основе эффекта энергоразделения, выявить способы его реализации и разработать рекомендации по практическому применению.

5. Обосновать принципы организации горения в закрученных противоточных течениях при низкоперепадной схеме подачи рабочего тела (относительном перепаде давления меньше 3%), обеспечивающие расширение концентрационного диапазона устойчивого горения и высокую эффективность сжигания топлива по полноте сгорания.

6. Провести комплексные теоретические и экспериментальные исследования совместного влияния геометрических и режимных параметров на интегральные характеристики низкоперепадных противоточных горелок. Обобщить полученные результаты в виде уравнений подобия и оценить возможность повышения устойчивости горения и полноты сгорания при сохранении величин гидравлических потерь и эмиссии загрязняющих атмосферу веществ (NO_x и CO) на уровне лучших существующих аналогов.

7. Экспериментально обосновать условия устойчивого горения водородного топлива в закрученном противоточном течении инертной среды и разработать схемы смешения компонентов горючей смеси, обеспечивающие надёжное охлаждение теплонагруженных элементов проточной части и полноту сгорания не ниже 0,999.

8. Изучить аэродинамические особенности и получить критерии стабилизации пламени в потоке с использованием системы закрученных струй, провести исследование стабилизации с определением режимных и геометрических параметров вихре-

вых воспламенителей – генераторов струй.

9. Создать методики проектирования и расчёта интегральных параметров вихревых горелочных устройств противоточного типа для эффективного сжигания ископаемых и водородного видов топлива. Разработать научно обоснованные рекомендации по их практическому применению.

10. Создать варианты конструкций вихревых противоточных горелок энергетического, авиационного и технологического назначений. Обосновать новые области практической реализации созданных горелочных устройств.

11. Исследовать и подтвердить повышение эффективности сжигания топлива с использованием разработанных научных положений и практических аспектов применения созданных устройств на примерах вихревых воспламенителей, низкочастотной и эжекционной горелок, водород-кислородных камер сгорания.

Научная новизна.

1. Выявлен характер влияния геометрии проточной части и степени расширения газа в закрученном течении с противотоком на формирование и расположение максимумов температуры, обусловленных эффектом энергоразделения. Подтверждена возможность применения энергоразделения для организации самовоспламенения топливовоздушной смеси в условиях аэродинамического противотока. На основе обобщения полученных и известных зависимостей эффекта подогрева от степени расширения газа предложен критерий воспламенения.

2. Установлены закономерности изменения диаметра капель и степени испарённости жидкого топлива от давления и температуры газа на входе в противоточное течение, позволяющие прогнозировать интегральные характеристики смесеобразования.

3. Разработанная модель расчёта полей газодинамических параметров позволила улучшить мелкость распыла и установить закономерности тепломассообмена ансамбля капель с учётом температурной стратификации в локальных областях противоточного течения.

4. Поставлена научно-практическая задача организации горения в закрученном противоточном течении при относительном перепаде давления не более 3 %. Её решение позволило выявить эффект совместного влияния геометрии проточной части, входных параметров и коэффициента избытка воздуха на пределы горения, гидравлику течения и образование загрязняющих веществ. Результаты обобщены в виде уравнений подобия и метода расчёта горелочных устройств.

5. Полученные новые данные и установленные закономерности влияния степени расширения на концентрационные пределы срыва пламени и полноту сгорания позволили разработать научно-обоснованный метод организации горения «бедной» смеси ($1,8 < \alpha < 2,3$) в низкочастотном противоточном течении, обеспечивающий достижение полноты сгорания 0,999 и выше.

6. Экспериментальными исследованиями доказана возможность устойчивого горения в противоточном течении в диапазоне коэффициента избытка воздуха от 0,4 до 18 при степенях расширения от 1,025 до 1,2, открывающая новые области их практического применения в технике.

7. Обоснованы особенности применения известных теоретических положений по оценке механизма горения применительно к условиям противотока. Обобщённые зависимости позволяют прогнозировать диапазон значений числа Дамкёлера в сравнении с его значениями для модели гомогенного реактора идеального смешения. Экспериментально установлен характер зависимости чисел Дамкёлера и Карловитца от коэффициента избытка воздуха для закрученных противоточных течений.

8. Поставлена задача организации горения водород-кислородной смеси в среде водяного пара при противоточной схеме течения. Её решение позволило теоретически и экспериментально обосновать условия надёжного воспламенения, устойчивого горения, эффективного охлаждения теплонагруженных элементов, полного сгорания топлива.

9. Экспериментально подтверждён метод предварительного смешения кислорода с низкотемпературным водяным паром, позволивший реализовать возможность управления температурой горения стехиометрической водород-кислородной смеси в противоточном течении в диапазоне значений от 2000 К до 3000 К. Результаты представлены полуэмпирической зависимостью адиабатной температуры горения от относительного расхода пара, подмешиваемого к кислороду.

10. Теоретическими и экспериментальными исследованиями установлены особенности стабилизации пламени в потоке с использованием системы закрученных противоточных струй. Полученные закономерности позволили выявить условия, в которых газодинамическая стабилизация обладает преимуществами по величине гидрорезистивности и устойчивости горения, в сравнении с распространёнными принципами стабилизации пламени на затеняющих поток элементах.

11. Полученные новые знания о горении в противоточных течениях обеспечивают повышение эффективности сжигания топлива по полноте сгорания и концентрационному диапазону устойчивого горения, расширяют известные и открывают новые области их практического применения при создании технических устройств.

Теоретическая и практическая значимость работы. Предложенные методики расчёта параметров горелочных устройств противоточного типа позволяют проектировать их эффективные конструкции для авиации, энергетики, технологий двойного назначения. Разработанные в диссертации принципы организации горения в закрученных противоточных течениях позволяют найти новые конструктивные решения при разработке устройств сжигания топлива, обладающих высокой полнотой сгорания и экологической целесообразностью применения. Созданные и исследованные противоточные горелки, а также методики и подходы к их проектированию, внедрены на практике в ОАО «НПО «Сатурн», ООО «Полимерпласт», ООО «Энергосбережение», ООО «Инженерные технологии», РГАТУ имени П.А. Соловьева. Получены документы о внедрении результатов работы. Акт «Вихревое горелочное устройство с многоступенчатой системой эжекции» подтверждает, что горелочное устройство внедрено и применяется в составе комплекса термической утилизации бытовых, медицинских и промышленных отходов с целью организации высокотемпературных зон пиролиза и газификации. Отмечено, что горелка отличается надёжностью, высокой полнотой сгорания (не менее 0,999), обладает эффективной системой стабилизации пламени, широким диапазоном работы и низкой эмиссией загрязняющих веществ. Предприятие подтверждает, что характеристики созданного горелочного устройства превосходят характеристики аналогов и определяют экологическую целесообразность его применения в высокотемпературных теплофизических процессах термического воздействия. Акт о внедрении результатов работы «Методика проектирования и исследование характеристик низкоперепадного вихревого горелочного устройства» подтверждает, что горелка внедрена и применяется в процессах термической переработки низкокалорийных углеводородсодержащих топлив. Выделено, что полученные в диссертационной работе методики позволяют существенно ускорить процесс расчёта противоточных горелок и их доводки до оптимальных параметров в широком диапазоне условий и режимов работы. Акты внедрения в производственный процесс ОАО «НПО «Сатурн» подтверждают высокую эффективность применения результа-

тов работы при проектировании современных энергетических установок и авиационных двигателей.

Полученные новые знания о горении в противоточных течениях сокращают объём исследований, сроки и затраты материальных ресурсов на создание технических устройств эффективного сжигания топлива для различных областей народного хозяйства. Разработанные основы создания противоточных схем сжигания топлива открывают ряд новых направлений их практического применения в эффективных технологиях и устройствах преобразования тепловой энергии, в том числе для создания противоточных горелочных модулей камер сгорания ГТД и ГТУ, водородных камер сгорания высокотемпературных ПГУ.

Новизна научно-технических решений, составляющих материалы диссертации, подтверждается патентами на изобретения № 2262040 от 10.10.05, № 2310794 от 20.11.07, № 2361146 от 10.07.09, № 2413131 от 27.02.11, № 2431777 от 20.10.11, № 2454605 от 27.06.12.

Методология и методы исследования. В работе использованы эмпирические и теоретические методы исследования. Решения поставленных задач базируются на экспериментальных данных, полученных с использованием методов постановки теплофизического эксперимента, а также на теоретических положениях и основополагающих закономерностях термогазодинамики, физики процессов горения, теплообмена, численных методах с их верификацией.

Положения, выносимые на защиту:

- результаты исследования термогазодинамики ограниченного закрученного потока, влияния геометрии вихревой камеры на качество распыла, смесеподготовку, тепло- и массообмен ансамбля капель топлива в закрученном потоке с учётом распределения полей газодинамических характеристик и температуры;
- модель процесса смесеобразования в вихревых горелках противоточной схемы;
- критериальная основа и система уравнений подобия, позволяющие оценить влияние геометрических и входных термогазодинамических параметров на интегральные характеристики горения и рабочего процесса противоточных горелочных устройств;
- результаты расчётных и экспериментальных исследований совместного влияния определяющих факторов на характеристики рабочего процесса противоточных горелок;
- методики расчёта вихревых противоточных форсуночно-горелочных устройств, воспламенителей и высокотемпературных водород-кислородных камер сгорания перегрева водяного пара;
- результаты исследования аэродинамики течения в вихревых противоточных течениях и воспламенителях, особенностей взаимодействия закрученных струй со сходящим потоком, стабилизации пламени закрученными струями;
- результаты изучения взаимодействия реагирующей водород-кислородной смеси с закрученным потоком перегретого водяного пара противоточной схемы течения;
- конструкции противоточных воспламенителей камер дожигания кислорода выхлопных струй ГТУ, форсажных камер сгорания ГТД, фронтальных форсуночно-горелочных модулей основных камер сгорания ГТД и энергетических установок, вихревых горелочных устройств для малой энергетики и технологических процессов, нагревателей, эжекционных и инфракрасных горелок, водород-кислородных камер сгорания перегрева пара.

Степень достоверности результатов обеспечивается:

- корректным применением фундаментальных законов и уравнений теплофизики, технической и химической термодинамики, физики горения;

- постановкой экспериментальных исследований с применением метрологически поверенного оборудования, обработкой опытных данных с использованием статистических методов.

Подтверждается адекватным согласованием расчётов с опытными данными и результатами исследований других авторов. Достоверность новизны технических решений подтверждается патентами на изобретения.

Апробация результатов.

Основные результаты выполненных исследований докладывались и обсуждались на следующих конференциях: VI Всероссийской научно-технической конференции «Теплофизика процессов горения и охрана окружающей среды» (г. Рыбинск, 2004 г.); IV Школе-семинаре молодых учёных и специалистов под руководством академика РАН В.Е. Алемасова «Проблемы теплообмена и гидродинамики в энергомашиностроении» (г. Казань, 2004 г.); Всероссийской научно-технической конференции «Теплофизика технологических процессов» (г. Рыбинск, 2005 г.); Международной школе конференции имени В.Н. Кондратьева «Авиационная и ракетно-космическая техника с использованием новых технических решений» (г. Рыбинск, 2006 г.); XV и XVI, XVII, XVIII Школах-семинарах молодых учёных и специалистов под руководством академика РАН А.И. Леонтьева «Проблемы газодинамики и теплообмена в новых энергетических технологиях» (г. Калуга, 2005 г., г. Санкт-Петербург, 2007 г., г. Жуковский, 2009 г., г. Звенигород, 2011 г., г. Орехово-Зуево, 2013 г.); Научно-практической конференции «Вузовская наука: проблемы и перспективы» в рамках МАКС – 2007 (г. Москва, 2007 г.); Всероссийской школе-семинаре молодых учёных «Физика неравновесных процессов в энергетике и нанотехнологиях» (г. Новосибирск, 2007 г.); Первой Международной научно-технической конференцией «Энергетические установки: теплообмен и процессы горения» (г. Рыбинск, 2009 г.); Научно-технической конференции с международным участием «Молодёжь. Наука. Инновации – 2009» (г. Ярославль, 2009 г.); Межрегиональном молодёжном инновационном форуме (г. Москва, 2009 г.); Пятой Российской национальной конференции по теплообмену (г. Москва, 2010 г.); VII Всероссийской научно-технической конференции «Процессы горения, теплообмена и экология тепловых двигателей» (г. Самара, 2010, 2012 г.г.); Шестой и восьмой научных международных конференциях «Актуальные вопросы теплофизики и физической гидрогазодинамики» (г. Алушта, 2008, 2010 г.г.); III Международной научно-технической конференции «Авиадвигатели XXI века» (г. Москва, 2010 г.); Международном молодёжном форуме «Селигер-2011»; Международной научно-технической конференции «Проблемы и перспективы развития двигателестроения» (г. Самара, 2006, 2011 г.г.); Международной молодёжной научной конференции XIX Туполевские чтения (г. Казань, 2011 г.); Национальной научно-технической конференции (г. Иркутск, г. Москва 2011); Международном салоне изобретений «Concours Lepine» (Strasbourg, 2011, 2012 г.г.); Международном салоне научных исследований, инноваций и новых технологий «Мединова-2011» (Casablanca, 2011 г.); Международном салоне изобретений и новых технологий «Новое время» (г. Севастополь, 2011 г.); Второй Российской, третьей и четвертой международных конференциях «Теплообмен и гидродинамика в закрученных потоках» (г. Москва, 2005, 2008, 2011 г.г.); IV Межведомственной научно-технической конференции «Проблемы разработки низкоэмиссионных камер сгорания ГТУ» (г. Москва, 2012 г.); По результатам получен ряд наград, дипломов и медалей.

Публикации. По материалам диссертации опубликованы 17 статей в изданиях утверждённых ВАК, 6 патентов на изобретения, общее количество публикаций включает 75 наименований (в соавторстве).

Структура и объём диссертации. Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, списка литературы. Работа изложена на 300 страницах машинописного текста, имеет 3 таблицы, 184 рисунка. Список литературы включает 350 наименований. Значительная часть проведённых исследований выполнялась в рамках государственных контрактов № 02.444.11.7154, № 02.516.12.0009, №1.120.08, № 02.740.11.0414, № 02.517.11.9079, № 02.516.11.602, №7.3956.2011, грантов Президента № 02.120.11.4477-МК, № 02.120.11.6371-МК.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность проблемы повышения эффективности сжигания топливных ресурсов. Определены цели и задачи работы, методы решения поставленных задач. Отмечены основные результаты исследований, выносимые на защиту, определена их научная новизна и практическая значимость. Приведены сведения об апробации и внедрении результатов работы. Обоснована выбранная методология проведённого исследования.

В первой главе даётся анализ особенностей газодинамики закрученных течений, способствующих повышению эффективности процессов сжигания топлива. Обширный теоретический и эмпирический материал по проблемам аэродинамики и горения в закрученных потоках накоплен в работах А.И. Леонтьева, Ю.В. Полежаева, Э.П. Волчкова, А.А. Халатова, Д.М. Марковича, С.В. Алексеенко, В.М. Чепкина, А.А. Иноземцева, Ю.И. Цибизова, Е.Д. Свердлова, Г.К. Ведешкина, А.М. Старика, В.Е. Дорошенко, В.В. Третьякова, В.И. Терехова, Б.В. Раушенбаха, А.В. Талантова, Б.Г. Мингазова, В.А. Сыченкова, С.А. Исаева, М.В. Кирпичёва, И.И. Палеева, Г.Ф. Кнорре, К.М. Арефьева, Л.А. Вулиса, А.Ю. Снегирёва, И.А. Богова, В.А. Талалова, В.В. Померанцева, К.А. Щенникова, В.В. Бирюка, С.В. Лукачёва, А.А. Диденко, А.Н. Штыма, Ф.Г. Тухбатуллина, А.В. Сударева, А.Г. Тумановского, В.Р. Кузнецова, Я.Б. Зельдовича, Д.А. Ягодникова, Р.З. Кавтарадзе, Ш.А. Пиралишвили, Н.Н. Новикова, В.В. Михайлова, А.Н. Мухина, О.В. Василюк, В.И. Мартынова, К.И. Щёлкина, Е.С. Щетинкова, И.А. Гольдштика, Д.В. Скибы, Б.П. Устименко, A.K Gupta, A. Lefebvre, D.B. Spalding, Ю.А. Кныша, К.Э. Кала, Б. Карловитца, D. Lilley, N. Syred, P.J. Strykowski, D.J. Forliti, R.D. Gillgrist, E. Koc-Alkisar, S. Lonnes, D. Hofeldt и многих др.

Общей проблемой создания горелочных устройств и камер сгорания, в том числе энергетического, авиационного и технологического применения, является обеспечение высокой полноты сгорания топлива (не менее 0,999) и снижение выбросов загрязняющих атмосферу веществ при минимальных размерах зоны горения.

Работы по исследованию термогазодинамики закрученного потока в горелочных устройствах и фронтных модулях КС ГТД позволяют отметить влияние закрутки на микро- и макроструктуру турбулентного реагирующего потока, распределение параметров, геометрию фронта пламени и механизм горения. Закрутка потока позволяет создать необходимые газодинамические и тепломассообменные условия для осуществления высокого качества подготовки топливовоздушной смеси и стабилизации фронта пламени за счёт приосевых рециркуляционных течений и распада закрученных струй, широко используемых на практике.

Анализ литературных данных позволил выявить ключевые проблемы интенсификации горения закруткой. Они связаны с тем что, в случае горения в потоках с закруткой традиционная оценка рабочего процесса в ряде случаев противоречит опытными данным не только количественно, но и качественно. Улучшение экологических

характеристик горения и ужесточение норм на эмиссию NO_x , CO устройствами сжигания топлива, и в первую очередь газовыми турбинами авиационного и энергетического назначения, требуют разработки принципиально новых подходов к организации горения и реализующих их конструкций горелочных устройств и камер сгорания.

Обсуждаются работы, посвящённые исследованию горения в закрученных потоках в условиях типичных для рабочего процесса форсуночно-горелочных устройств (ФГУ) КС газотурбинных двигателей, показывающие, что эффект закрутки оказывает неоднозначное влияние на интегральные характеристики потока с горением. Эффект закрутки положительно сказывается на суммарной эффективности устройств сжигания топлива при отрицательном влиянии на некоторые характеристики в отдельности. Основными требованиями по эффективности сжигания топлива, предъявляемыми к различным горелочным устройствам и камерам сгорания, являются: высокая полнота сгорания топлива и теплонапряжённость; устойчивая работа во всем диапазоне режимных параметров; малый уровень гидравлических потерь полного давления; равномерность поля температуры по объёму зоны горения; высокая надёжность воспламенения; низкий уровень эмиссии загрязняющих веществ, ресурс работы, технико-экономические показатели. Организация закрутки потока в зоне горения позволяет удовлетворить большинству из перечисленных требований, но приводит к увеличению уровня гидравлических потерь и в ряде случаев к развитию неустойчивости горения. Решение отмеченных проблем является одной из наиболее актуальных практических и теоретических задач.

Существуют подходы, основанные на отказе от закрутки. В ряде случаев они позволяют исключить её негативные проявления, обеспечить процесс практического проектирования устройства сжигания топлива и добиться устойчивого горения с низким уровнем эмиссии загрязняющих веществ. При этом неизменно уменьшается теплонапряжённость конструкции, увеличивается объём зоны горения, необходимый для полного сгорания топлива, возрастают масса и габариты. При проектировании высокофорсированных ФГУ КС для авиации и энергетики, где массогабаритные характеристики, высокая полнота сгорания, низкий уровень эмиссии загрязняющих веществ играют определяющую роль, предпочтение неизменно отдаётся схемам организации горения с закруткой потока.

Опыт поиска возможных схем горения с минимальным выбросом загрязняющих веществ показал, что наиболее оправданным является принцип нестехиометрического горения топливовоздушной смеси «бедного» состава. Анализ развития направлений совершенствования процессов горения требует новых научно-технических решений, в основе которых лежат оригинальные физические явления и реализующие их устройства. К числу таких физических явлений относится эффект Ранка, и соответствующая ему термогазодинамическая структура закрученного противоточного течения.

Анализ доступных в литературе исследований показал, что термогазодинамика течения в камере сгорания противоточной вихревой схемы характеризуется практически полным перечнем эффектов, способствующих гомогенизации компонентов и их интенсивному реагированию: интенсивным массообменом в радиальном направлении, генерацией зон повышенной энтальпии, формированием противоположно перемещающихся в осевом направлении потоков. Известные модели расчёта процесса горения, полученные для гладких и закрученных потоков, не применимы для противоточных течений и требуют постановки расчётных и экспериментальных исследований, позволяющих внести необходимые уточнения. Показано, что встречающиеся в литературе результаты исследований горения в условиях противотока течения в большинстве не обобщены, что требует постановки многофакторного эксперимента с

обоснованием критериальной основы обобщения опытных данных и их представления в виде уравнений подобия. Выявление особенностей горения в условиях аэродинамического противотока требует изучения термогазодинамики закрученного течения в ПВГУ, а расширение областей их практического применения – поиска условий, обеспечивающих оптимальное соотношение многочисленных противоречивых параметров, определяющих интегральные характеристики.

Обосновано, что развитие областей практической реализации горения в противоточных течениях может дать положительный результат для задач стабилизации пламени в потоке (им посвящена глава 4). Совокупная оценка эффективности стабилизатора, включающая диапазон устойчивой работы по скорости и составу смеси, надёжность, сложность конструктивного исполнения, степень влияния стабилизатора на характеристики камеры сгорания, показала целесообразность применения газодинамической стабилизации пламени. Использование для стабилизации струй газа, вдуваемых со стенки КС, освобождает проточную часть от подверженных износу вспомогательных конструкций, создающих дополнительное гидравлическое сопротивление на рабочих режимах. В связи с этим теоретическое и экспериментальное исследование взаимодействия закрученных струй в сносящем потоке является актуальной задачей. Подтверждение преимуществ закрученных струй в сравнении с распространёнными системами стабилизации пламени на элементах неудобообтекаемой формы требует проведения расчётных и экспериментальных исследований рабочего процесса противоточного вихревого воспламенителя (ВПВ), углублённого изучения поперечного вдува закрученных струй в сносящий поток и стабилизации пламени в поточной КС.

Проанализированные закономерности повышения эффективности сжигания топлива в энергетической отрасли обуславливают развитие высокоэффективных технологий производства тепловой и электроэнергии с электрическим КПД более 60 %, представляющих крупную народнохозяйственную проблему. Анализ современного состояния газотурбинного, парового и комбинированного привода энергетических машин и возможных путей их совершенствования показал, что для паровых турбин (ПТ) перспективных парогазовых энергоустановок (ПГУ) целесообразен переход на технологию, использующую водород-кислородный перегрев пара. Основной вклад в развитие проблемы приведён в работах отечественных и зарубежных исследователей: О.Н. Фаворского, А.И. Леонтьева, Ю.В. Полежаева, Г.Г. Ольховского, В.А. Фёдорова, О.О. Мильмана, С.П. Малышенко, Б. Люиса, Г. Эльбе, Р. Calvin и ряда других учёных. Проработка известного литературного материала позволила предложить для этих целей организацию горения водород-кислородной смеси (ВКС) в среде водяного пара при противоточной схеме течения (подробное изучение отмеченной проблематики выполнено в главе 5). Это определило необходимость обоснования условий устойчивого горения водородного топлива в закрученном противоточном течении инертной среды и разработку схемы смешения компонентов ВКС, обеспечивающих надёжное охлаждение теплонагруженных элементов проточной части и требуемую полноту сгорания. Проанализированные ключевые задачи интенсификации горения в различных областях народного хозяйства обобщают проблему повышения эффективности сжигания топлива с использованием особенностей закрученных противоточных течений, решаемую в диссертационной работе.

Во второй главе даны результаты изучения термогазодинамики ограниченного закрученного противоточного течения на основе исследования влияния его геометрии и степени расширения газа π^* на распределение газодинамических параметров, качество распыла и смесеподготовку с учётом энергоразделения и анализа адекватности

применения моделей турбулентности. Разработана физико-математическая модель смесеобразования в вихревых горелочных устройствах противоточной схемы, позволяющая рассчитать тепло- и массообмен ансамбля капель в потоке рабочего тела и определить интегральные характеристики распыла. Выполнено обоснование и подтверждена возможность самовоспламенения в потоке с закруткой и противотоком на основе эффекта энергоразделения, выявлены условия его организации и разработаны рекомендации к практическому применению.

В качестве геометрических параметров, определяющих термогазодинамику ограниченного осесимметричного противоточного течения, согласно принятым в литературе обобщениям, выбраны \bar{F}_c , \bar{R}_d , \bar{l}_κ – относительная площадь каналов соплового ввода, относительный радиус выходного отверстия сопла-диафрагмы и относительная длина вихревой камеры (величины отнесены к площади поперечного сечения, радиусу вихревой камеры и ее диаметру, соответственно). Конструкция и геометрическая модель ГУ противоточной схемы показаны на рисунках 1 – 2. В расчётах использовались двухпараметрические и анизотропные модели турбулентности. Сетка выполнена структурированной с разрешением пограничного слоя. Изучено влияние различных моделей турбулентности на интегральные характеристики противоточного закрученного течения и на распределение параметров в нём. Система уравнений Навье-Стокса, осреднённых по Рейнольдсу, замыкалась одной из следующих моделей турбулентности SST, k-ε, k-ε RNG, k-ε EARSM, RSM BSL. Выбор моделей для исследования продиктован следующими соображениями. SST, k-ε и k-ε RNG основаны на предположении изотропности турбулентной вязкости и широко применяются в инженерной практике для решения задач с учётом горения. Предположение об изотропности турбулентных параметров для закрученных течений не всегда справедливо, а для противоточных практически не исследовано. В модели k-ε EARSM учёт анизотропности турбулентной вязкости достигается решением дополнительного алгебраического уравнения переноса для тензора анизотропии. Модель RSM BSL рекомендуется для расчёта интенсивно закрученных течений.

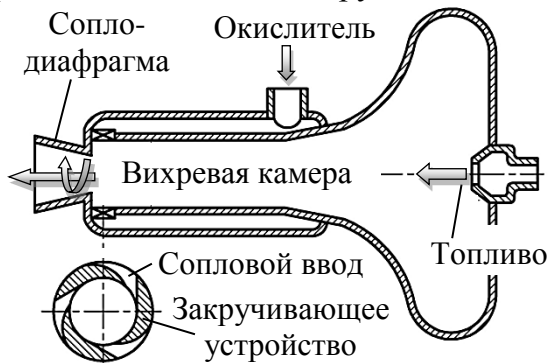


Рисунок 1 – Схема противоточного вихревого горелочного устройства (ПВГУ)

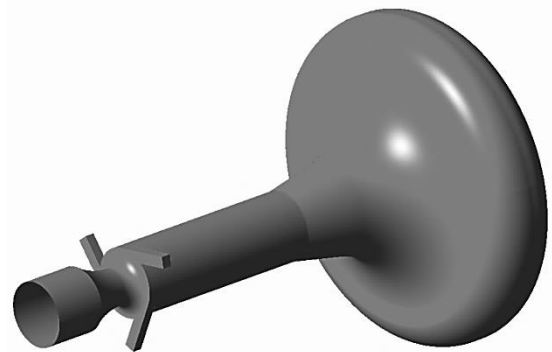


Рисунок 2 – Геометрическая модель (ПВГУ):
 $\bar{F}_c = 0,089$; $\bar{R}_d = 0,533$; $\bar{l}_\kappa = 5,75$

В этой модели уравнение переноса решается для каждой из шести компонент тензора рейнольдсовых напряжений, что позволяет учитывать большинство эффектов, присущих турбулентному течению. Для всех моделей турбулентности расчёты проводились в стационарной постановке при одинаковых граничных условиях: степени расширения газа $\pi^* = 1,03; 1,05; 1,1; 1,2$ и температуре газа на входе $T_{\text{вх}}^* = 300 \text{ К}$. Параметры турбулентности на входе соответствовали 5% интенсивности турбулентных пульсаций.

Результаты показали (рисунок 3), что интегральные расходные характеристики ГУ слабо зависят от выбранной модели турбулентности – наибольшее отклонение массового расхода от средней величины отмечено для модели EARSM (+12%) и k-ε (–7%). Для остальных моделей отклонение не превышает 4,5%. Анализ структуры

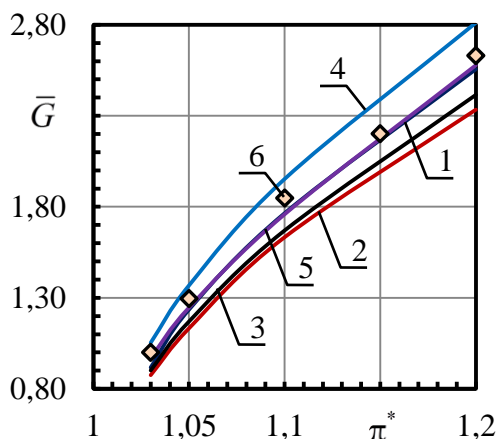


Рисунок 3 – Расходные характеристики ВГМ (расчёты отнесены к экспериментальному значению при $\pi^* = 1,03$): 1 – SST; 2 – k-ε; 3 – RNG k-ε; 4 – EARSM k-ε; 5 – RSM BSL; 6 – эксперимент

течения показал: для моделей SST, k-ε, k-ε RNG, k-ε EARSM картина течения практически совпадает – закрученный периферийный поток отрывается от стенок в расширяющейся части вихревой камеры с образованием системы из двух тороидальных вихрей. Один из них является замкнутым, а во втором закрученный периферийный поток разворачивается на 180° и формирует возвратное приосевое течение. Структура потока, полученная с помощью модели RSM BSL (рисунок 4), отличается от других рассмотренных вариантов. При движении периферийного потока в цилиндрической части ПВГУ образуется винтообразный тороидальный вихрь – 1, а в торцевой части канала система сопряжённых тороидальных вихрей – 2, наблюдаемых в поставленных экспериментах при $\pi^* \geq 1,025$, но кото-

рые не показали другие модели при $\pi^* < 1,2$. Модель, учитывающая анизотропию турбулентных пульсаций, показала формирование крупномасштабных вторичных вихревых структур. Когерентные вихревые структуры в цилиндрической части ГУ, представляющие чередующиеся области положительной и отрицательной величины радиальной компоненты скорости V_R , обуславливают интенсификацию конвективно-охлаждающих стенок периферийным закрученным потоком (результаты исследования и практического использования отмеченного явления приведены в главах 5, 6).

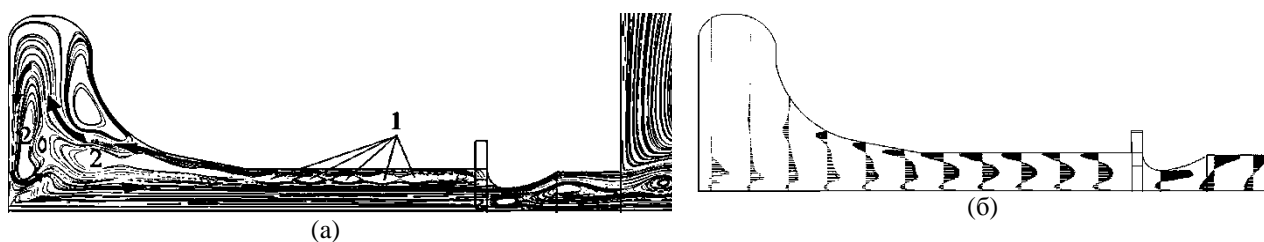


Рисунок 4 – Структура течения (а) и векторы осевой скорости в ограниченном противоточном течении (б): модель RSM BSL; 1 – система когерентных вихревых структур; 2 – система сопряжённых тороидальных вихрей

Полученные данные позволили поставить научно-практическую задачу организации горения в закрученном противоточном течении при низкорепадной схеме подачи рабочего тела (относительном перепаде давления меньше 3 %, $\pi^* \leq 1,03$), решению которой посвящена глава 3. Исследование термогазодинамики противоточных течений при значениях степени расширения $\pi^* \geq 2,0$ позволило выявить особенности влияния геометрических параметров соплового ввода газа, проточной части и выходной диафрагмы на формирование и расположение максимумов температуры, обу-

словленных эффектом энергоразделения. Расчёты показали, что окружная компонента скорости в сечении соплового ввода заметно превосходит осевую. Причём, если осевая составляющая скорости периферийного вихря по мере удаления вдоль камеры энергоразделения от соплового ввода к торцевой стенке изменяется незначительно, то затухание вращательного движения более существенно, что приводит к росту шага винтовых линий тока. Этот факт также использован в гипотезе взаимодействия вихрей, предложенной А.П. Меркуловым для объяснения механизма энергоразделения и температурной стратификации, дополненной в работах Ш.А. Пиралишвили. Радиальный градиент давления уменьшается от соплового сечения к торцевой стенке, а статическое давление на оси растёт, вызывая появление осевого градиента давления, направленного от стенки к оси диафрагмы. В то же время закрутка приосевых масс газа, покидающих вихревую камеру энергоразделения через отверстие диафрагмы, заметно меньше, что может быть объяснено возрастанием осевой компоненты скорости вынужденного приосевого вихря в сопловом сечении вихревой камеры на выходе из отверстия диафрагмы. Расчётным путём получены крупномасштабные вихревые структуры сдвигового характера, предсказанные на основе косвенных опытов в работах С.В. Лукачёва и экспериментально обнаруженные Ш.А. Пиралишвили, Н.Н. Новиковым при двухфазной визуализации течения керосино-воздушной смеси. Эпюры распределения осевой и тангенциальной составляющих скоростей по характеру совпадают с полученными в эксперименте (рисунок 5).

Расчёт газодинамики противоточного течения в вихревом горелочном устройстве с перфокамерой выявил, что область максимальной температуры меняет своё местоположение от середины камеры энергоразделения до конца перфорированной камеры в зависимости от давления и температуры на входе. Причём с повышением

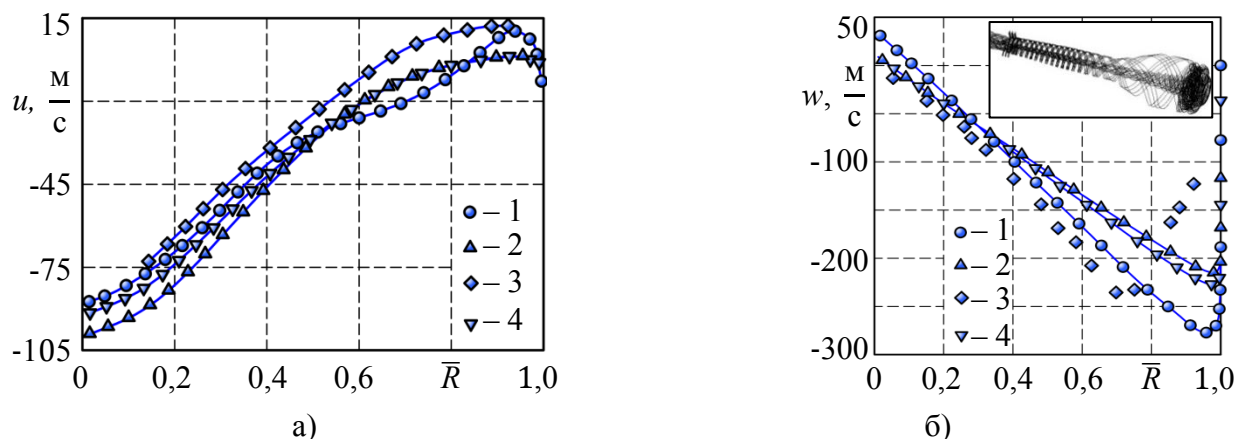


Рисунок 5 – Профили скорости в сопловом сечении: а) – осевая скорость; б) – тангенциальная скорость; 1,2,4 – расчет; 3 – эксперимент; 1 – $\bar{F}_c = 0,2$; 2 – $\bar{F}_c = 0,04$;

$$3 - \bar{F}_c = 0,09, \bar{R}_d = 0,51, \mu = 0,67, \bar{l}_x = 9, \pi^* = 3,8; 4 - \bar{F}_c = 0,09$$

давления на входе повышается максимальная температура (при $P_g^* = 0,2$ МПа, $\theta_2^* = 1,1$; $P_g^* = 0,3$ МПа, $\theta_2^* = 1,11$; $P_g^* = 0,4$ МПа, $\theta_2^* = 1,15$; $P_g^* = 0,5$ МПа, $\theta_2^* = 1,18$; $P_g^* = 0,6$ МПа, $\theta_2^* = 1,3$). Влияние перфорированной камеры на эффекты подогрева показало, что при уменьшении площади проходных отверстий в перфорированной камере эффекты подогрева увеличиваются (при $P_g^* = 0,6$ МПа, $\theta_2^* = 1,33$ с перфокамерой без отверстий и $\theta_2^* = 1,28$ с отверстиями). Отсутствие перфокамеры уменьшает эффекты подогрева ($\theta_2^* = 1,3$), но они остаются всё же выше, чем с ней при наличии

отверстий. Зона пониженной температуры находится на оси у сопла диафрагмы, причём эффекты охлаждения возрастают с увеличением давления на входе (при $P_g^* = 0,2 \text{ МПа}$, $\theta_x^* = 0,92$; $P_g^* = 0,3 \text{ МПа}$, $\theta_x^* = 0,87$; $P_g^* = 0,4 \text{ МПа}$, $\theta_x^* = 0,85$; $P_g^* = 0,5 \text{ МПа}$, $\theta_x^* = 0,83$; $P_g^* = 0,6 \text{ МПа}$, $\theta_x^* = 0,81$). Подача топливоздушнoй смеси в

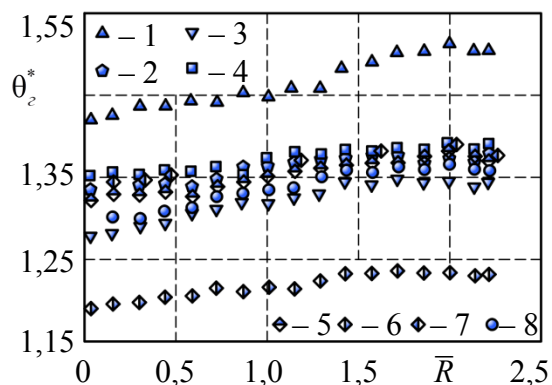


Рисунок 6 – Зависимость эффектов подогрева от относительного радиуса камеры энергоразделения: 1 – 8 – эксперимент; 1 – $\bar{F}_c = 0,22$; 2 – $\bar{F}_c = 0,174$; 3 – $\bar{F}_c = 0,1$; 4 – $\bar{F}_c = 0,146$; 5 – $\bar{F}_c = 0,2$; 6 – $\bar{F}_c = 0,05$; 7 – $\bar{F}_c = 0,14$; 8 – $\bar{F}_c = 0,11$; 1 – 8 – $\bar{R}_d = 0,86$, $T_g^* = 300 \text{ К}$, $\bar{l} = 6,7$, $\pi^* = 7$

в которых на 40 – 60 % превышает температуру воздуха на входе. Температура движущихся закрученных масс воздуха измерялась в 5 сечениях $\bar{l} = 1,8; 3,6; 5,3; 6,7; 8,9$

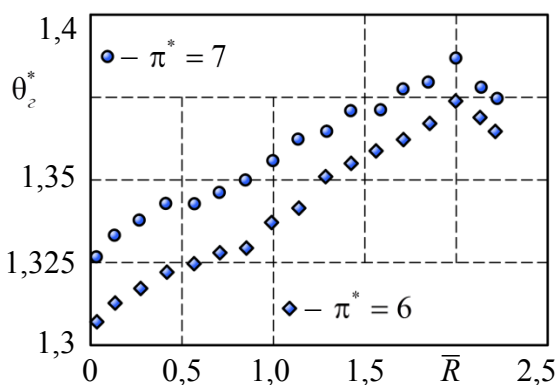


Рисунок 7 – Зависимость эффектов подогрева от относительного радиуса: $\bar{F}_c = 0,2$, $\bar{R}_d = 0,86$, $T_g^* = 300 \text{ К}$, $\bar{l} = 6,7$

отмеченную зону максимальной температуры позволяет осуществить процесс самовоспламенения и интенсифицировать испарение жидкой фазы распыленного топлива. Проведённый эксперимент по исследованию дисперсности распыла топлива методом малоуглового рассеяния света показал, что качество распыла в ПВГУ улучшается (дисперсность распыла по сравнению с незакрученным потоком увеличилась с 80 до 20 мкм, что объясняется более лучшим дроблением и испарением капель топлива).

С целью исследования возможности теплового воспламенения в тракте ПВГУ и опытного подтверждения расчётных данных поставлен эксперимент по изучению распределения температуры внутри вихревой камеры в зависимости от геометрических и режимных параметров ($\theta_z^* = \theta_z^*(z, r)$). На режиме без горения создаются зоны, температура которых на 40 – 60 % превышает температуру воздуха на входе. Температура движущихся закрученных масс воздуха измерялась в 5 сечениях $\bar{l} = 1,8; 3,6; 5,3; 6,7; 8,9$ от стенки до оси камеры энергетического разделения. Как и в серии численных расчётов, максимальные эффекты подогрева ($\theta_z^* = 1,51$) наблюдались при $\bar{R}_d = 0,86$; $\bar{F}_c = 0,22$ в плоскости выше среза сопла перфорированной камеры ($\bar{l} = 6,7$). Полученные результаты с использованием предложенного критерия $T_g^* = T_{cв}^* / \theta_z^*$ дали возможность рассчитать требуемую температуру воздуха на входе в ГУ для реализации в нём самовоспламенения топливоздушнoй смеси, значения которой подтверждены эмпирически.

Обобщение расчётно-экспериментальных исследований энергоразделения и условий самовоспламенения в противоточном течении позволило выбрать степень расширения, геометрические параметры соплового ввода газа, проточной части, выходной диафрагмы для получения и определения величин максимальных эффектов подогрева с целью организации самовоспламенения (рисунки 6, 7). Более высокое значение температуры воздуха на входе для теплового самовоспламенения по сравнению с расчётным прогнозом (рисунок 8) обусловлено тем,

что часть энергии расходуется на испарение жидкой фазы топлива.

Применение эффекта энергоразделения в противоточном течении для организации самовоспламенения ТВС позволило снизить температуру воздуха на входе в ГУ на $150 \div 250$ °С относительно минимальных её значений, полученных в работах других авторов. Результаты позволили рассмотреть возможность практического применения ПВГУ для создания воспламенителей камер сгорания безыскрового розжига и систем стабилизации пламени на закрученных струях в поточных КС (подробные исследования приведены в главе 4).

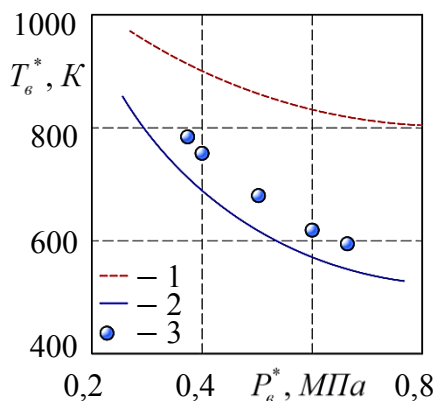


Рисунок 8 – Граница самовоспламенения: 1 – в потоке (данные Пиралишвили Ш.А., Михайлова В.В.); 2 – в неподвижной среде (данные Папока, К.К.); 3 – эксперимент

Задача создания методики расчёта противоточных воспламенителей и ГУ энергетического, авиационного и технологического назначения, работающих на жидком топливе, обусловила необходимость разработки физико-математической модели смесеобразования в ПВГУ, позволяющей рассчитать характеристики распыла с учётом тепло- и массообмена ансамбля капель в потоке рабочего тела.

Рассмотрен процесс распыливания и испарения топлива в ПВГУ с центробежной форсункой, построена кривая распыла с учётом вторичного дробления (рисунок 9). Испарение факела распыла изучено на примере испарения одиночной капли, движущейся в противоточном течении. Ограничившись учётом сил аэродинамического сопротивления, уравнение динамики капли с учётом её прогрева и испарения запишется в следующем виде:

$$\frac{d\bar{v}}{d\tau} = \frac{3c\rho_g}{4\rho_k} \cdot \frac{|\bar{v}_g - \bar{v}|(\bar{v}_g - \bar{v})}{d_k} - \frac{3\bar{v}d(d_k)}{d_k d\tau}.$$

Оно замыкается известными уравнениями тепло и массообмена для сферической капли и условиями кинематики, представленными в литературе. Расчёт прогрева и испарения

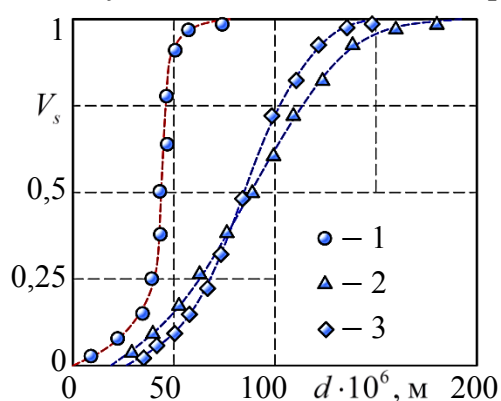


Рисунок 9 – Кривая распыла: 1 – с учётом вторичного дробления; 2 – прямоструйная форсунка; 3 – центробежная форсунка

капель топлива с учётом проведённых исследований локальных эффектов подогрева и условий самовоспламенения показал, что капли (с диаметром $d > 20$ мкм) подвергаются вторичному дроблению, капли с диаметром $5 < d < 15$ мкм вылетают из горелки и являются стабилизаторами пламени, а большинство капель (с диаметром $d > 15$ мкм) отбрасывается на стенку, испаряясь с неё, образуя спиральные жгуты, обеспечивающие плёночное охлаждение ограничивающих закрученный поток стенок при высокой теплонапряжённости.

Разработанная физико-математическая модель расчёта полей газодинамических параметров в противоточном течении с учётом энергоразделения позволила улучшить характеристики распыла, установить закономерности для оценки характеристик процесса смесеобразования и теплообмена ансамбля капель, получить выражения для выбора режимных и геометрических параметров потока с учётом величины

температурной стратификации в локальных областях течения. Результаты расчёта соответствуют полученным экспериментальным данным.

В третьей главе поставлена и решена проблемная научно-практическая задача организации горения в закрученных противоточных течениях при относительном перепаде давления не более 3 % ($\pi^* \leq 1,03$) с сохранением высокой полноты сгорания топлива на уровне существующих аэродинамических схем горения и расширением диапазона устойчивой работы по коэффициенту избытка воздуха (преимущественно в области «бедных» смесей). Полученные в главе 2 новые данные о влиянии геометрии проточной части и режимных входных параметров на термогазодинамику противоточного течения, а также разработанная физико-математическая модель смесеобразования позволили рассчитать параметры \bar{F}_c , \bar{R}_d , \bar{l}_k , обеспечивающие наиболее равномерное распределение жидкой и газообразной фаз топлива по объёму зоны воспламенения в противоточном течении. Однако, получение расчётных зависимостей для оценки совместного влияния геометрических и режимных параметров на интегральные характеристики горения (гидравлические и энергетические потери, полноту сгорания, концентрационные диапазоны воспламенения и устойчивого горения, эмиссионные характеристики) потребовало проведения комплексных теоретических и экспериментальных исследований в рамках многофакторного подхода и представления результатов в виде уравнений подобия, рекомендованных для практического применения при проектировании эффективных устройств сжигания топлива.

На основе анализа известных критериев аэротермохимического подобия выполнено обоснование критериальной основы рабочего процесса ПВГУ, в том числе низкочастотного типа. Анализ исходного списка чисел подобия, получаемого путём приведения системы уравнений Навье-Стокса к безразмерному виду, позволил выделить группу критериев наиболее существенных для рассматриваемой задачи в рамках сформулированной проблематики. Ими являются числа Рейнольдса Re и Эйлера Eu , остальные исключены из рассмотрения с обоснованием причин. Влияние распыла жидкого топлива в зоне горения на условия срыва пламени учтено введением в систему числа Вебера We .

Показано, что для проведения экспериментов, обобщение которых позволило получить расчётные зависимости определения отмеченных интегральных характеристик горения, дающие возможность создания методики проектирования низкочастотных ПВГУ, необходимо добавить ряд критериев, учитывающих влияние горения. Выполнен анализ закономерностей горения в вихревой камере ПВГУ и основные, лимитирующие процесс, факторы.

Оценку механизма горения целесообразно вести по соотношению линейных и временных масштабов турбулентности и ламинарного пламени, лежащих в основе многих моделей турбулентного горения, нашедших отражение в литературе.

Для описания локальной структуры закрученного потока в зоне горения противоточной вихревой горелки использовано турбулентное число Рейнольдса

$$Re_t = v'l_0/\nu,$$

где v' – пульсационная составляющая скорости турбулентного потока;

l_0 – интегральный линейный масштаб турбулентности; ν – кинематическая вязкость.

Для оценки соотношения характерного времени фронта ламинарного пламени и интегрального временного масштаба турбулентности используется одно из выражений турбулентного числа Дамкёлера

$$Da_t = t_n/t_0 = b_n v'/U_n l_0,$$

где t_n , b_n – временной и линейный масштабы ламинарного фронта пламени соответственно; t_0 – интегральный временной масштаб турбулентности; U_n – масштаб скорости ламинарного пламени (нормальная скорость горения).

Оценка взаимодействия микроструктуры турбулентного закрученного потока с фронтом пламени выполнена с использованием турбулентного критерия Карловитца, характеризующего отношение временного масштаба ламинарного пламени и масштаба, ограничивающего область диссипации энергии в турбулентном потоке, определённого через интегральный масштаб турбулентности на основе гипотезы Колмогорова

$$Ka_t = t_n/t_{kol} = (v'/U_n)^2 (l_0/b_n)^{-1/2},$$

где t_{kol} – временной масштаб Колмогорова.

Такое представление позволило связать масштаб области диссипации энергии с геометрическими характеристиками ГУ, что удобно для практического использования. Оценку механизма горения в камере сгорания ПВГУ с целью сравнения с условиями гомогенного реактора предложено выполнять с использованием трёх последних критериев. Приведена группа безразмерных комплексов, учитывающих подобие режимных и геометрических параметров. В общем случае связь между рассмотренными критериями имеет вид

$$f(Re, Eu, We, \alpha, \pi^*, \bar{F}_c, \bar{R}_d, Re_t, Da_t, Ka_t) = 0,$$

где α – коэффициент избытка воздуха. На основе полученного уравнения составлены критериальные зависимости и разработана методика постановки опытов и экспериментальная установка. Выполнена оценка неопределённостей измерений. В опытах в качестве топлива использовался керосин, окислитель – воздух. Максимальные относительные неопределённости измерений, составляют: расхода воздуха – 2,7 %; расхода топлива – 2,2 %; концентрации NO_x – 2 %; концентрации CO – 2,5 %; температуры – 1,9 %. Приведена методика обработки опытных данных с обобщением результатов в виде уравнений подобия.

Представлены результаты исследований влияния геометрических и режимных параметров на устойчивость горения, срывные расходные, гидравлические и эмиссионные характеристики горения в противоточном течении при низкоперепадной схеме подачи рабочего тела. Система уравнений подобия позволяет определять границы «бедного» и «богатого» срыва пламени

$$\alpha_{\max} = 0,19 \bar{F}_c^{a_1} (28 - 6\pi^*) e^{a_2 \bar{R}_d}, \quad \text{при } 1,025 \leq \pi^* \leq 2;$$

$$\alpha_{\max} = (59 - 19\pi^*) (38 - 158 \bar{F}_c) \bar{R}_d^{a_3} (35 - 142 \bar{F}_c)^{a_4}, \quad \text{при } 2 \leq \pi^* \leq 3;$$

$$\alpha_{\min} = 72 \pi^{*a_5} \bar{F}_c^{a_6} \bar{R}_d^{a_7} (18 \bar{F}_c^2 - 6,3 \bar{F}_c + 0,6), \quad \text{при } 0,12 \leq \bar{F}_c \leq 0,18;$$

$$\alpha_{\min} = 0,05 \pi^{*a_8} \bar{R}_d^{a_9} \bar{F}_c^{a_{10}} (18 \bar{F}_c^2 - 6,3 \bar{F}_c + 0,6), \quad \text{при } 0,18 \leq \bar{F}_c \leq 0,22.$$

Срывные характеристики показаны на рисунках 10, 11. Эксперимент подтвердил правильность исходных предположений относительно условий организации стабилизации пламени в зоне воспламенения при низкоперепадной схеме подачи окислителя. Максимальный диапазон устойчивой работы находится в области значений степени расширения $1,025 < \pi^* < 1,2$.

Опыты показали, что характер изменения термогазодинамических процессов и интегральный механизм горения в противоточном течении существенно зависят от

суммарного коэффициента избытка воздуха. При уменьшении α от околосрывных значений вблизи границы «бедного» срыва процесс диффузионного горения постепенно сменяется механизмом объёмного горения по тракту ГУ ($16,0 \leq \alpha \leq 6,0$).

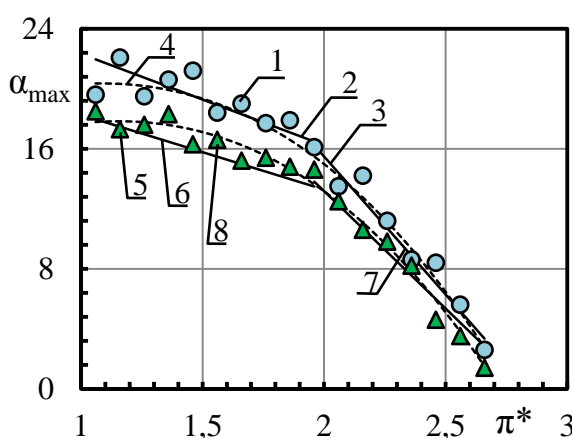


Рисунок 10 – Концентрационные границы срыва пламени в области «бедных» смесей: 1,5 – эксперимент; 2,3,6,7 – расчёт по полученным уравнениям подобия; 4,8 – расчёт по полученному регрессионному уравнению;

$$1-4 - \bar{F}_c = 0,18, \bar{R}_d = 0,8;$$

$$5-8 - \bar{F}_c = 0,22, \bar{R}_d = 0,8$$

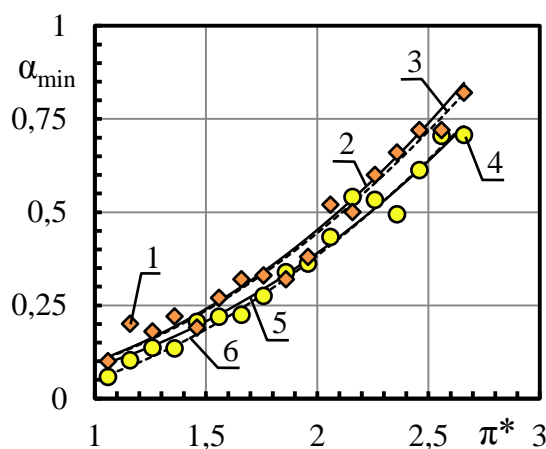


Рисунок 11 – Концентрационные границы срыва пламени в области «богатых» смесей: 1,4 – эксперимент; 2,5 – расчёт по полученным уравнениям подобия; 3,6 – расчёт по полученному регрессионному уравнению;

$$1-3 \bar{F}_c = 0,18, \bar{R}_d = 0,8;$$

$$4-6 \bar{F}_c = 0,22, \bar{R}_d = 0,8$$

При $10 \leq \alpha \leq 8,0$ горение происходит в объёме вихревой камеры, фронт пламени «размазывается» в пространстве в результате турбулентных пульсаций скорости и молярного массообмена вынужденного и потенциального вихрей. При дальнейшем уменьшении α до значений $8,0 \leq \alpha \leq 4,0$ постепенно исчезает внутренний факел, и область горения перемещается вниз по потоку от топливной форсунки к выходному соплу-диафрагме. На таких режимах горение происходит в объёме вихревой камеры, а за соплом появляется небольшой видимый факел продуктов сгорания.

При $\alpha \leq 4,0$ механизм объёмного горения постепенно сменяется механизмом сгорания (подготовленной в объёме камеры смеси) в квазистационарном турбулентном фронте пламени и последующим догоранием по длине факела за срезом сопла диафрагмы с эжекцией дополнительных масс воздуха из атмосферы. На режимах с $0,4 \leq \alpha \leq 0,1$ процесс горения происходит в стабилизированном, на выходе из вихревой горелки, пламенном диффузионном факеле, в котором сгорают капли частично-испарённого в камере ПВГУ топлива.

Представление результатов опыта в виде уравнений подобия позволило сократить количество используемых управляющих факторов. Для этого найдена зависимость числа Рейнольдса от комплекса параметров $Re = f(\bar{F}_c, \bar{R}_d, \pi^*)$ (рисунки 12, 13). Установлено, что при всех значениях числа Рейнольдса в области режимов работы ПВГУ процессы срыва пламени определяются тангенсом угла наклона кривых $We = f(Re)$, зависящего только от относительной площади соплового ввода.

Подтверждено предположение о том, что определяющую роль на процесс срыва пламени при противоточном закрученном течении в поле вторичных вихревых структур оказывают газодинамические эффекты динамики рециркуляционных течений в зоне стабилизации (модули векторов осевой компоненты скорости на границах сопряжённых тороидальных вихрей в торцевой части ПВГУ), а не условия теплообмена

зоны горения с окружающей средой, влияние которых является преобладающим в случае распространения пламени в потоках без крупномасштабных вторичных течений и закрутки (характеризующихся низкой теплонапряжённостью).

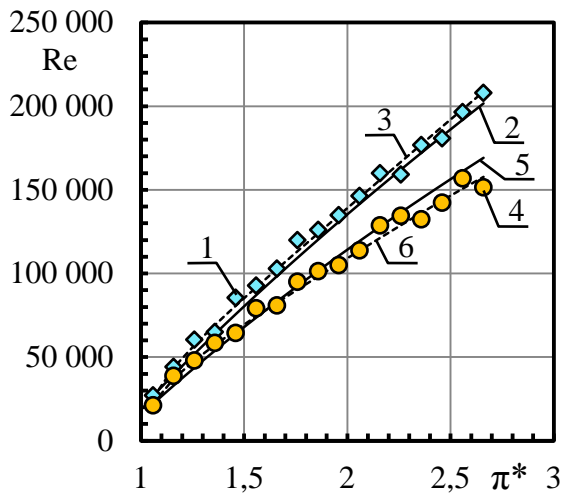


Рисунок 12 – Зависимость числа Рейнольдса от степени расширения: 1,4 – эксперимент; 2,5 – расчёт по уравнению подобия; 3,6 – расчёт по регрессионному уравнению;
 $1-3 - \bar{F}_c = 0,12, \bar{R}_d = 0,8;$

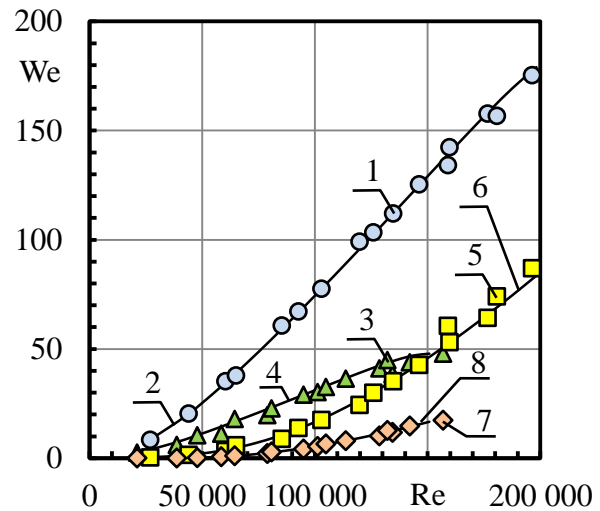


Рисунок 13 – Зависимость числа Вебера рассчитанного по «богатому» и «бедному» концентрационному пределу устойчивого горения от числа Рейнольдса: 1,3,5,7 – эксперимент; 2,4,6,8 – расчёт с использованием уравнений подобия; 1 – 4 – «бедная» граница; 5 – 8 – «богатая» граница;
 $1, 2, 5, 6 - \bar{F}_c = 0,12, \bar{R}_d = 0,8;$
 $3, 4, 7, 8 - \bar{F}_c = 0,22, \bar{R}_d = 0,8$

Получены уравнения подобия для определения степени повышения температуры, безразмерного коэффициента потерь давления, коэффициента расхода, эмиссионных характеристик. Организация рабочего процесса низкоперепадной вихревой противоточной горелки с минимальным выбросом загрязняющих веществ реализована в диапазоне $1,8 \leq \alpha \leq 2,2$.

$$\theta = \pi^{*a_{12}} (1,9 + 6,4\alpha + 2,5\alpha^2), \text{ при } \alpha = 0,3 \div 1,8; \quad \theta = 7,5\pi^{*a_{13}} e^{a_{14}\alpha}, \text{ при } 1,8 \leq \alpha \leq 10;$$

$$Eu = 1,3 \cdot 10^{-4} Re^{a_{15}} e^{a_{16}\bar{F}_c}, \text{ при } 2 \cdot 10^4 \leq Re \leq 6 \cdot 10^4;$$

$$Eu = 19,5 \cdot 10^{-2} Re^{a_{17}} e^{a_{18}\bar{F}_c}, \text{ при } 6 \cdot 10^4 \leq Re \leq 2,1 \cdot 10^5; \quad \mu_g = 75 \cdot 10^{-3} e^{a_{19} Re} \bar{F}_c^{a_{20}};$$

$$c_{NO_x} = 5,5 e^{a_{26}\alpha} e^{a_{27}\pi^*}, \text{ при } 0,4 \leq \alpha \leq 1,1; \quad c_{NO_x} = 86 e^{a_{28}\alpha} e^{a_{29}\pi^*}, \text{ при } 1,1 \leq \alpha \leq 3,3;$$

$$c_{CO} = 1080 e^{a_{30}\alpha} \pi^{*a_{31}}, \text{ при } 0,5 \leq \alpha \leq 2; \quad c_{CO} = 8 \cdot 10^{-5} e^{a_{32}\alpha} \pi^{*a_{33}}, \text{ при } 2 \leq \alpha \leq 2,5;$$

$$c_{CO} = 140\alpha^{a_{34}} \pi^{*a_{35}}, \text{ при } 2,5 \leq \alpha \leq 5.$$

Результаты обработки опытных данных с использованием выбранных критериев подобия позволили оценить условия горения в ПВГУ относительно условий в гомогенном реакторе идеального перемешивания и сравнить их с принципами организации рабочего процесса известных конструкций топливосжигающих устройств без использования противотока течения (рисунки 14, 15). Анализ механизма взаимодействия турбулентного закрученного потока с фронтом пламени показал, что одновременное приближение к модели гомогенной зоны горения с точки зрения локального и интегрального механизмов невозможно.

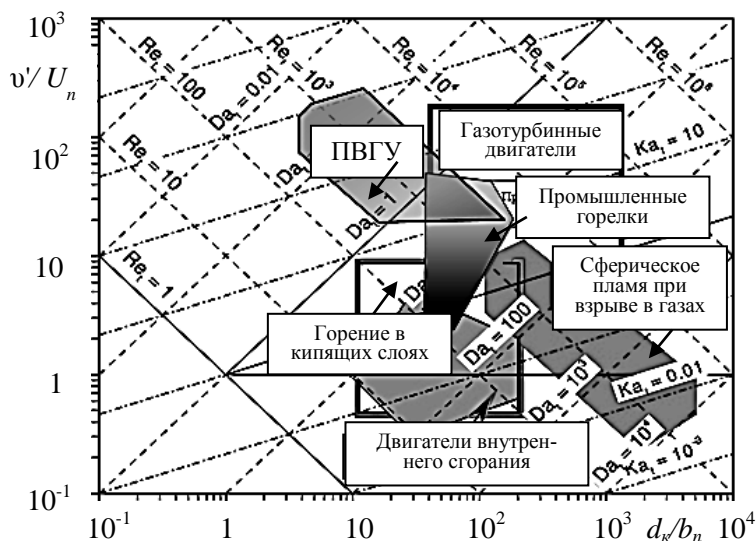


Рисунок 14 – Сравнительная оценка механизмов горения в ПВГУ и известных технических устройствах авиационного и технологического назначения (по данным Hoffman Arne B., Warnatz J.): $d_k \sim l_0$

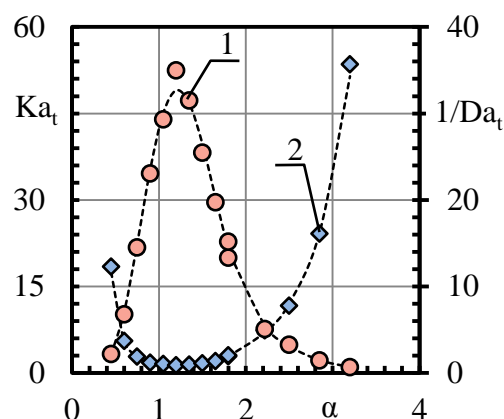


Рисунок 15 – Зависимость чисел Карловитца и Дамкёлера от коэффициента избытка воздуха:
1 – $1/Da_t$; 2 – Ka_t

Из литературных данных известно, что в гомогенном реакторе число Дамкёлера (интегральный параметр) принимает значения $Da_t \sim 10^{-3}$, а число Карловитца (локальный параметр) – $Ka_t \sim 10^4$. В реальных устройствах сжигания топлива, в том числе противоточного типа, при уменьшении Da_t значения Ka_t также уменьшаются (режим соответствует окостехиометрическому горению), поскольку значительно увеличивается скорость нормального горения U_n и на пространственных масштабах порядка длины Колмогорова турбулентный фронт пламени ламинируется (что приводит к удалению от условий идеального перемешивания на диаграмме рисунок 14). При отклонении в область нестехиометрического горения («богатую» либо «бедную») происходит обратный эффект, условия качественного перемешивания на микромасштабах компенсируются низкой скоростью реакций и увеличением вероятности уноса из зоны горения непрореагировавших молей смеси крупномасштабными турбулентными пульсациями закрученного потока. Целесообразное соотношение отмеченных процессов, характеризующихся числами Da_t , Ka_t (рисунок 15), имеет место в двух областях по составу смеси $\alpha \approx 0,6$ и $\alpha \approx 2,3$. Полученные результаты и отмеченные значения α коррелируют с данными изучения эмиссионных характеристик созданных опытных образцов ПВГУ, исследования которых приведены в главе 6.

Обобщение результатов проведённых исследований выполнено в виде методики расчёта вихревых горелочных устройств противоточного типа. Она даёт возможность определить наиболее важные интегральные параметры термогазодинамики и горения, оценка которых позволяет сократить объём экспериментальных доводочных работ энергетической установки, в составе которой работает ПВГУ. Алгоритм расчёта позволяет определить геометрические характеристики основных элементов конструкции, ограничивающих противоточное течение, интегральные термогазодинамические параметры потока в характерных сечениях, коэффициенты гидравлических и энергетических потерь, концентрационный диапазон устойчивого горения (характеристики срыва пламени), оценить механизм горения и количественно сравнить его с условиями в гомогенном реакторе. На завершающем этапе проверяется соответствие расчёт-

ных и известных, из исходных данных, параметров. Общая структура расчёта основана на использовании разработанной физико-математической модели смесеобразования, полученных уравнений подобия и дополняется интегральными балансовыми соотношениями массы и энергии, а также известными методиками расчёта процессов термогазодинамики и горения, нашедшими отражение в литературе.

Выполненные комплексные исследования позволили поставить и решить научно-практическую задачу горения в закрученном противоточном течении в условиях относительного перепада давления менее 3 %, позволившую выявить эффект совместного влияния геометрии проточной части, термогазодинамических входных параметров и коэффициента избытка воздуха на характеристики воспламенения и устойчивости горения с обобщением результатов в виде критериальных уравнений. Полученные новые данные и установленные закономерности влияния степени расширения на концентрационные пределы срыва пламени и полноту сгорания легли в основу организации горения «бедной» смеси ($1,8 \leq \alpha \leq 2,3$) в низкорепадном противоточном течении, обеспечивающего достижение полноты сгорания выше 0,999. На основе экспериментальных исследований доказана возможность устойчивого горения в противоточном течении в диапазоне коэффициента избытка воздуха от 0,4 до 18 при степенях расширения от 1,03 до 1,2, что открывает новые области их практического применения в технике.

Четвёртая глава посвящена разработке методических основ и изучению аэродинамических особенностей стабилизации пламени в потоке с использованием системы закрученных струй, а также применению характерных особенностей противоточных течений и полученных результатов исследования их термогазодинамики к созданию и определению параметров вихревых воспламенителей-генераторов стабилизирующих струй. Изучение вопросов стабилизации пламени в потоке показало, что применение газодинамических стабилизаторов пламени позволяет изменять размер рециркуляционной зоны, её химический состав и локальное положение в области камеры в зависимости от режима её работы. Это является несомненным преимуществом перед распространённым классом механических стабилизаторов в виде неудобнообтекаемых тел и способствует снижению гидравлических потерь за счёт минимизации вносимых в поток возмущений.

Обоснование метода запуска поточной камеры сгорания и стабилизации пламени в ней поперечным вдувом системы высокоэнthalпийных закрученных струй обусловило разработку и реализацию вихревых противоточных воспламенителей. Для этого выполнены численные исследования трёхмерного противоточного течения, целью которых являлся поиск области варьирования режимных и геометрических факторов, при которых применение рассматриваемых методов эффективно. Это позволило существенно сократить число экспериментов и определить область эмпирического поиска необходимых параметров стабилизации фронта пламени. Исследованы три варианта ВПВ: с длиной вихревой камеры $9d_k$ со сверхзвуковым соплом без диафрагмирования; с длиной

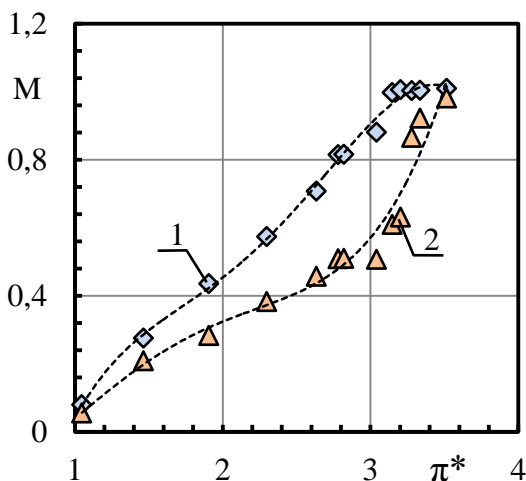


Рисунок 16 – Зависимость числа Маха от степени расширения:

1 – критическое сечение; 2 – выходное сечение; $1,2 - T_g^* = 323 K, \bar{F}_c = 0,22$

число экспериментов и определить область эмпирического поиска необходимых параметров стабилизации фронта пламени. Исследованы три варианта ВПВ: с длиной вихревой камеры $9d_k$ со сверхзвуковым соплом без диафрагмирования; с длиной

вихревой камеры $9d_k$ с дозвуковым соплом и диафрагмированием; с длиной вихревой камеры $7d_k$ с дозвуковым соплом и диафрагмированием. На рисунке 16 показана зависимость числа Маха, рассчитанного по среднерасходной полной скорости в критическом и выходном сечениях сопла-

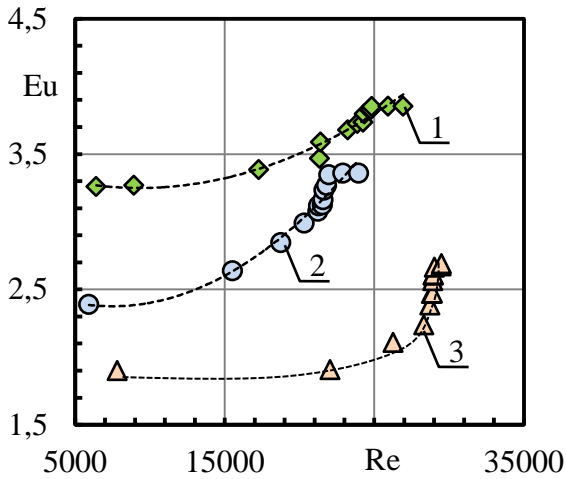


Рисунок 17 – Зависимость числа Эйлера от числа Рейнольдса: 1 – вариант 1; 2 – вариант 2; 3 – вариант 3; 1 – 3 – $T_g^* = 323 K$, $\bar{F}_c = 0,22$

ских особенностей эволюции противоточного закрученного течения в ограниченном осесимметричном канале, и связанных с ним сопутствующих явлений организации трёхмерных турбулентных структур различного масштаба и интенсивности, позволило получить картину развития течения, а также найти распределение термогазодинамических параметров по объёму проточной части вихревой горелки и характеристик сме-

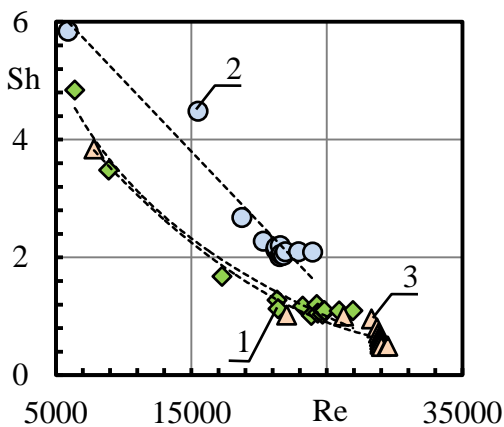


Рисунок 18 – Зависимость числа Струаля от числа Рейнольдса: 1 – вариант 1; 2 – вариант 2; 3 – вариант 3; 1 – 3 – $T_g^* = 323 K$, $\bar{F}_c = 0,22$

сеобразования с использованием разработанной во главе 2 физико-математической модели при работе ВПВ на жидком топливе.

На рисунке 17 показана зависимость числа Эйлера Eu , характеризующего рост коэффициента гидравлических потерь от числа Re . Сравнение трёх вариантов показало, что наибольшим коэффициентом потерь обладает первый вариант со сверхзвуковым соплом. Минимальный коэффициент гидравлических потерь имеет вариант с длиной вихревой камеры $7d_k$ и дозвуковым соплом. Выполненное численное моделирование аэродинамических особенностей эволюции противоточного закрученного течения в ограниченном осесимметричном канале, и связанных с ним сопутствующих явлений организации трёхмерных турбулентных структур различного масштаба и интенсивности, позволило получить картину развития течения, а также найти распределение термогазодинамических параметров по объёму проточной части вихревой горелки и характеристик сме-

Определённые в результате исследования характеристики прецессии приосевого квазитвёрдого ядра приосевого течения и крупномасштабных вихревых структур, развивающихся в потоке, позволили обосновать условия стабилизации пламени в противоточном течении. Подтверждена возможность аэродинамической стабилизации волны реакции при сверхкритическом перепаде давления на границах противоточного течения ($\pi^* > 3$) за счёт организации в зоне воспламенения квазистационарного парного тороидального вихря, обнаруженного в исследованиях, проведённых в главе 2, динамику которого не нарушает прецессия приосевого потока, затухающая на меньшей относительной длине $6,0 \leq \bar{l} \leq 6,5$ при всех исследованных значениях степени расширения. В

остальных вариантах геометрии интенсивная прецессия осевого потока вносит существенную нестационарность и вызывает пространственное колебание зоны воспламенения. Это приводит к возбуждению нелинейных механизмов обратной связи и развитию собственной неустойчивости пламени к газодинамическим и тепловым возмущениям потока, что вызывает его колебания и увеличивает вероятность срыва. Исследования показали, что надёжным вариантом с точки зрения воспламенения и стабилизации фронта пламени является вариант воспламенителя с длиной вихревой камеры $9d_k$ и дозвуковым соплом.

На рисунке 18 приведена зависимость числа Струхалия от числа Рейнольдса. Видно, что с увеличением π^* и, как следствие, Re , число Струхалия уменьшается и устанавливается на постоянном уровне $Sh \approx 1,0$.

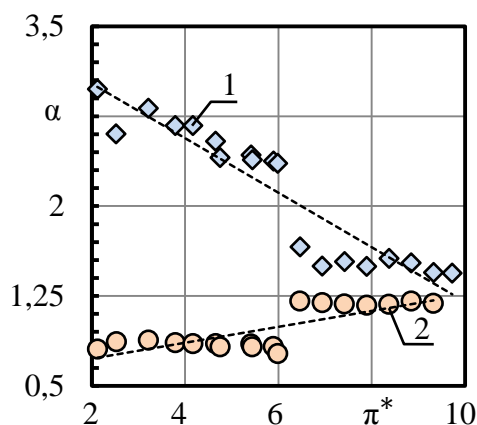


Рисунок 19 – Срывные характеристики ВПВ: 1 – «бедный» срыв; 2 – «богатый» срыв; 1 – 2 – $T_g^* = 323 K$, $\bar{F}_c = 0,22$, $\bar{R}_d = 0,32$

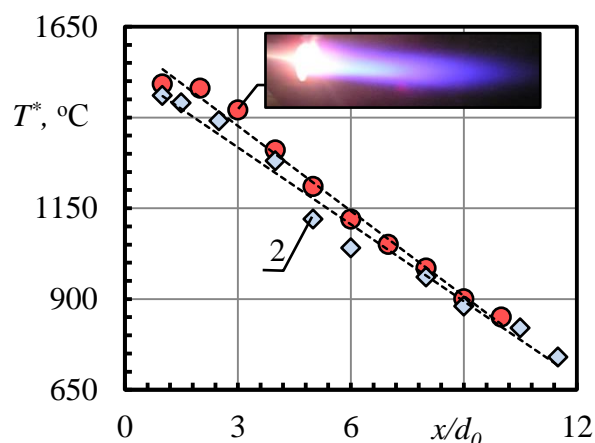


Рисунок 20 – Максимальная температура по оси стабилизирующей струи: 1 – $P_g^* = 0,3 MPa$, $\alpha = 1,3$; 2 – $P_g^* = 0,2 MPa$, $\alpha = 1,5$; 1 – 2 – $T_g^* = 323 K$, $\bar{F}_c = 0,22$, $\bar{R}_d = 0,32$

Это означает рост влияния на газодинамику течения нестационарных эффектов, связанных с наличием вторичных вихревых структур, зон обратных токов, рециркуляционных течений, прецессирующего вихревого ядра потока, соответствующих $\pi^* > 3,2$. При дальнейшем увеличении Re значения Sh находятся в области автомодельности, при этом прецессия ядра потока не влияет на картину течения в области воспламенения и стабилизации, газодинамика которой организована с условием образования области вторичной закрутки в виде квазистационарного парного тороидального вихря, необходимого для повышения эффективности стабилизации фронта волны горения и расширения диапазона рабочих режимов ВПВ.

Вывод подтверждают результаты экспериментальных исследований ВПВ. Срывные характеристики противоточного воспламенителя представлены на рисунке 19. Генератор стабилизирующих струй устойчиво работает при давлении воздуха на входе от 0,12 МПа до 0,6 МПа. Развиваемая при этом максимальная относительная тепловая мощность факела 3,1 (значения отнесены к стехиометрической мощности) при $\alpha \approx 0,8$, а минимальная относительная тепловая мощность равна 0,23 при $\alpha \approx 3$. На удалении $\sim 2,5$ калибра от среза сопла течение в факеле становится автомодельным. Падение максимальной температуры и скорости на оси происходит обратно пропорционально удалению от среза сопла (рисунок 20).

Выполненные исследования показали, что развиваемая тепловая мощность стабилизирующих струй на выходе из ВПВ достаточна для воспламенения топливовоздушной смеси в сносящем потоке. С учётом результатов численных расчётов, показавших область экспериментального поиска, опытные исследования газодинамической стабилизации пламени проведены при вдуве

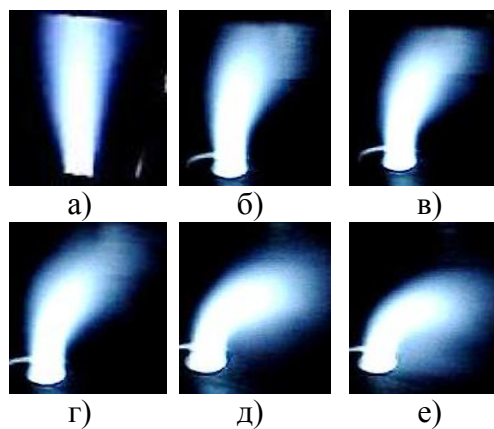


Рисунок 21 – Образование зоны обратных токов при радиальном вдуве закрученной струи в сносящий поток: а) – $\bar{v} = 835$; б) – $\bar{v} = 87$; в) – $\bar{v} = 52$; г) – $\bar{v} = 40$; д) – $\bar{v} = 32$; е) – $\bar{v} = 26$; $\bar{v} = v_c/v_n$; v_c – скорость струи; v_n – скорость сносящего потока

при вдуве одиночной струи и системы из двух струй под углами 45° , 90° и 135° относительно направления сносящего потока. В опытах по воспламенению поточной камеры сгорания в качестве топлива использовался керосин. Проводилась визуализация течения, измерялись поля температуры в области вдува стабилизирующих струй, определялась пусковая характеристика камеры, велась видеорегистрация процесса запуска и стабилизации, исследовались гидравлические характеристики КС.

Результаты экспериментальных исследований показали, что закрученная струя, вдуваемая в сносящий поток, является своеобразным неудобобтекаемым телом (рисунок 21). Под воздействием сносящего потока струя деформируется, её ось искривляется, а поперечное сечение приобретает подковообразную форму, образованную парой крупномасштабных тороидальных вихрей, закрученных в противоположные стороны. В центральной части, вблизи стержневой струи, наблюдается значительное снижение скорости течения и образуется устойчивая зона обратных токов, форма и параметры которой определяются характеристиками закрученной струи. Исследования газодинамической стабилизации пламени проводилось на малоразмерной модели прямооточной камеры сгорания (рисунок 22). При критическом перепаде давления реализованы исследованные выше режимы работы ВПВ, на которых параметры факела практически не зависят от слабых возмущений среды, в которую происходит истечение. В этом случае достигается максимальная эффективность стабилизации при условии критического истечения продуктов сгорания.



Рисунок 22 – Воспламенение смеси и стабилизация пламени в модельной КС закрученной струей: $\bar{v} = 40$

Визуализация течения при вдуве в поток стабилизирующего факела продуктов сгорания показала, что поперечное сечение факела приобретает подковообразную форму. Это свидетельствует о формировании в следе струи пары вихрей, закрученных в противоположные стороны. С подветренной стороны струи формируется зона рециркуляции, позволяющая осуществить стабилизацию пламени. Измерения пространственного распределения температуры в области вдува факела подтвердили наличие зон, в которых возможно тепловое воспламенение смеси керосина с воздухом. Причём объём зоны воспламенения существенно увеличивается с появлением в факеле активных центров реакции и при наклоне струи навстречу потоку. Увеличение угла вдува струи приводит к значитель-

ному (до 2 раз) росту гидравлического сопротивления. Увеличение числа струй также существенно повышает гидравлические потери (при использовании двух воспламенителей величина гидравлических потерь достигала значения 0,41). Важным параметром, определяющим возможность воспламенения топливовоздушной смеси и стабилизацию фронта пламени, является объём зоны рециркуляции. Увеличение объёма путём вдува струи навстречу основному потоку привело к воспламенению потока керосино-воздушной смеси с начальной температурой, равной 293 К. Целесообразный угол вдува по данным исследования составил 135° .

В пятой главе исследованы условия горения в водород-кислородных камерах сгорания противоточной схемы, позволившие выбрать оптимальные режимы работы с условием обеспечения высокой полноты сгорания и тепловой защиты элементов конструкции. Цель состояла в определении термогазодинамических характеристик рабочего процесса, режимных и геометрических параметров вихревой камеры сгорания для обеспечения её надёжного запуска и устойчивой работы. Основными из них являются: абсолютная величина температуры перегрева пара; тепловая мощность; степень неравномерности поля температуры перегретого пара на выходе. Во всем исследуемом диапазоне расходов смеси процесс истечения струи из сопла с относительным диаметром 0,15 является ламинарным. А при меньших значениях относительного диаметра (0,1 и 0,075) можно выделить ламинарный, переходный и турбулентный режимы истечения. Как показали экспериментальные исследования, режим

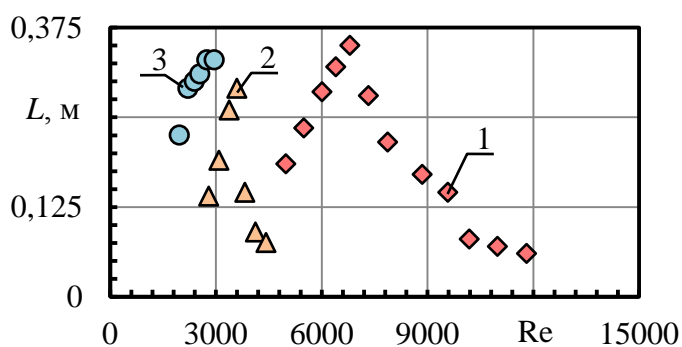


Рисунок 23 – Зависимость длины зоны горения водород-кислородного факела от режима истечения горючей смеси: экспериментальные данные, для форсунок с относительными диаметрами: 1 – $\bar{d} = 0,075$; 2 – $\bar{d} = 0,1$; 3 – $\bar{d} = 0,15$; $\bar{d} = d_c/d_k$; d_c – диаметр сопла форсунки; d_k – диаметр вихревой камеры

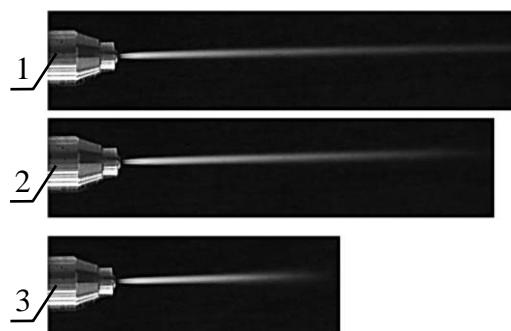


Рисунок 24 – Внешний вид факелов продуктов сгорания водород-кислородной смеси для нескольких режимов истечения смеси: 1 – ламинарный; 2 – переходный; 3 – турбулентный

истечения струи водород-кислородной смеси оказывает существенное влияние на длину зоны горения. Оценка этой величины достаточно важна с точки зрения организации тепловой защиты внутренних поверхностей камеры сгорания, ограничивающих первичную зону горения, а также с позиции тепло- и массообмена высокотемпературного факела с закрученным потоком пара. Экспериментально измеренные значения

длины зоны горения водород-кислородного факела в зависимости от числа Рейнольдса в выходном сечении сопел показаны на рисунке 23.

Видно, что эти зависимости имеют экстремальный характер с максимумами в области значений Re , соответствующих переходному режиму истечения. Полученные зависимости использованы при выборе оптимального значения диаметра топливного

сопла на различных режимах работы камеры. Внешний вид факелов продуктов сгорания водород-кислородной смеси для нескольких режимов её истечения показаны на рисунке 24. Одной из основных характеристик камеры для использования в циклах

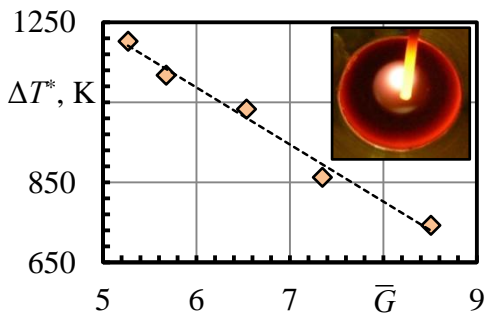


Рисунок 25 – Зависимость абсолютной величины среднерасходной температуры перегрева пара от его относительного расхода:

$$\bar{G} = G_n / G_{cm}; \quad G_n - \text{расход пара};$$

$$G_{cm} - \text{расход водородной смеси}$$

высокотемпературных паровых турбин комбинированных энергетических установок является температура перегретого пара на выходе, а также возможность её регулирования в зависимости от типа турбины, мощности и термодинамических параметров цикла. Выполненные опытные исследования вихревой водород-кислородной камеры сгорания позволили определить абсолютную величину температуры перегрева пара ΔT_n^* в зависимости от его относительного расхода. Результаты приведены на рисунке 25. Для практики в энергетике они являются лидирующими. Результаты исследований позволили создать метод расчёта водородных камер сгорания, обеспечивающих надёжную стабилизацию пламени и эффективное охлаждение жаровой трубы. Организация горения стехиометрической водород-кислородной

смеси в инертной среде водяного пара в условиях аэродинамического противотока течения позволяет организовать естественное конвективное охлаждение камеры сгорания с максимальным значением $\theta = 1,5$ на стенке жаровой трубы. Применение противотока позволяет получить полноту сгорания на выходе 99,9%, в то время как пря-

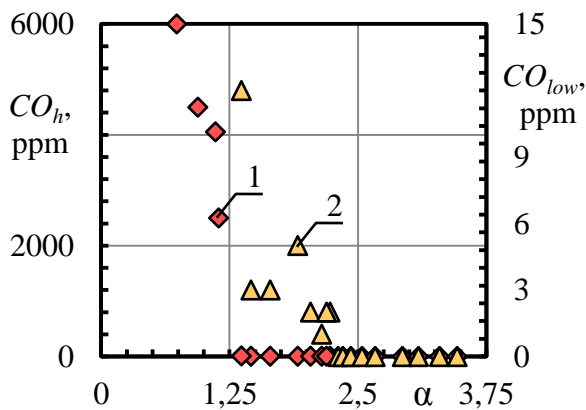


Рисунок 26 – Зависимость концентрации монооксида углерода от коэффициента избытка воздуха: 1 – CO_h ; 2 – CO_{low}

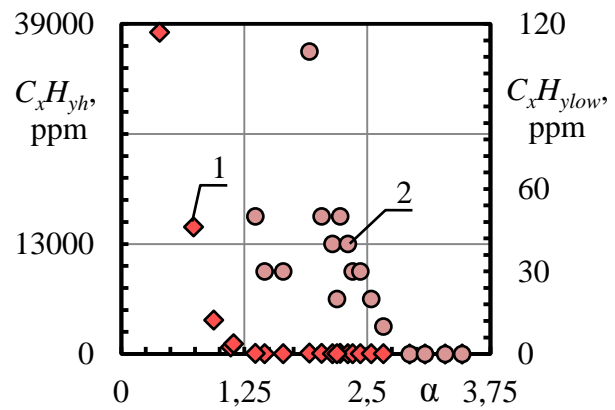


Рисунок 27 – Зависимость концентрации несгоревших углеводородов от коэффициента избытка воздуха: 1 – CO_h ; 2 – CO_{low}

моточная схема движения закрученного потока даёт 99,3%. Результаты исследований подтвердили целесообразность применения вихревой противоточной схемы организации течения в камере сгорания и возможность перегрева водяного пара до температуры 1100°C с использованием стехиометрической водород-кислородной смеси.

В шестой главе с использованием разработанных методик рассчитан и спроектирован ряд противоточных вихревых горелочных устройств, экспериментальные продувки которых показали совпадение расчётных и опытных данных по срывным характеристикам с расхождением не более 7 %, расходным характеристикам – не более 4 %, гидравлическим – не более 8 %, температуре – не более 10 % и мощности факела

– не более 4 %. Результаты расчётов и экспериментов показывают, что закрутка потока, интенсивная турбулентность, наличие крупномасштабных вторичных течений и зон обратных токов подтверждают возможность применения вихревых горелок противоточного типа в качестве форсуночно-горелочных модулей, формирующих первичную зону авиационных камер сгорания, воспламенителей форсажных камер сгорания, горелок технологического назначения, водород-кислородных камер сгорания комбинированных энергоустановок получения тепла и электричества.

Изучение эмиссии CO и несгоревших углеводородов на созданных противоточных горелках подтверждает предположение об их преимуществах при организации малоэмиссионного горения в области «бедных» ($1,5 \leq \alpha \leq 2,5$) смесей (рисунок 26). Индексом CO_h (по левой оси ординат) обозначена концентрация оксида углерода во всем диапазоне значений α , индексом CO_{low} (по правой оси ординат) концентрация CO в диапазоне изменения коэффициента избытка воздуха, соответствующего малоэмиссионному (менее 15 ppm) режиму работы вихревой противоточной горелки. В отмеченной области монооксид углерода полностью окисляется до CO_2 благодаря тому, что время пребывания топливовоздушной смеси значительно больше, чем в прямоточных горелочных устройствах, в том числе и вихревых. В результате, в случае низких скоростей окислительно-восстановительных реакций, имеющих место при го-

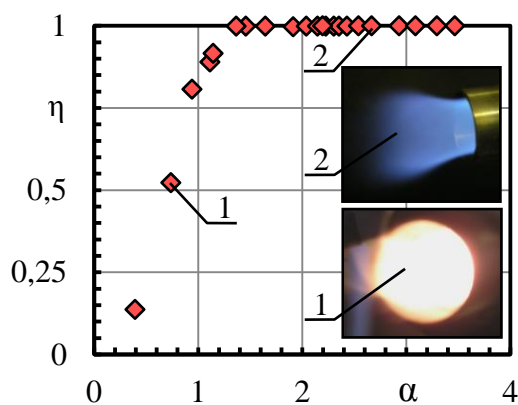


Рисунок 28 – Зависимость полноты сгорания от коэффициента избытка воздуха: 1 – «богатое» горение; 2 – «бедное» горение

рени «бедных» смесей, время пребывания в условиях противотока вихрей достаточно для полного завершения процесса горения CO . Наличие развитой рециркуляционной зоны в виде тороидального вихря в области стабилизации пламени дополнительно способствует увеличению времени пребывания и позволяет сохранить малоэмиссионный режим работы вплоть до границы «бедного» срыва. Вид зависимости концентрации несгоревших углеводородов (рисунок 27) с увеличением α имеет подобный характер, поскольку определяется теми же физико-химическими факторами. Характер изменения концентрации монооксида углерода и выбросов несгоревших углеводородных компонентов определяет возможность обеспечения полного сгорания топлива и достижения полноты сгорания η больше значения 0,999, продиктованного действующими стандартами. Зависимость полноты сгорания от α показана на рисунке 28. Область низкоэмиссионного горения совпадает с областью максимальной полноты сгорания и реализуется в диапазоне $\alpha > 1,2$.

Эксперименты, проведённые с разработанными горелочными устройствами в составе опытно-промышленных образцов, подтвердили целесообразность их применения в конверсионных процессах и позволили внедрить часть из них на практике.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработанные научные основы проектирования и создания горелочных устройств с использованием термогазодинамических особенностей ограниченных закрученных противоточных течений позволили решить актуальную народнохозяйственную проблему повышения эффективности сжигания топлива и стабилиза-

ции горения.

2. Выявлено, что зона наибольших эффектов подогрева, обусловленных эффектом энергоразделения в закрученном противоточном течении, меняет положение в диапазоне относительной длины вихревой камеры от 2,85 до 7,1 в зависимости от давления на входе.

3. Применение разработанной модели процесса смесеобразования в противоточном течении к расчёту вихревых горелочных устройств позволила улучшить характеристики распыла с 80 мкм до 20 мкм. Установлено, что капли диаметром больше 20 мкм подвергаются вторичному дроблению, а капли с диаметром больше 15 мкм отбрасываются на стенку и испаряются с неё, образуя спиральные жгуты, обеспечивающие конвективно-плёночное охлаждение элементов проточной части.

4. Экспериментальное исследование полей температуры в вихревых противоточных горелках выявило, что наибольшие эффекты подогрева (выше 40 %) достигаются при относительной площади соплового ввода 0,22 и относительном радиусе отверстия сопла-диафрагмы 0,86.

5. На основе экспериментальных исследований доказана возможность устойчивого горения в противоточном течении в диапазоне коэффициента избытка воздуха от 0,4 до 18 при степенях расширения от 1,025 до 1,2, что открывает новые области их практического применения в технике. В диапазоне $1,2 \leq \pi^* \leq 6,0$ показана возможность создания вихревых воспламенителей автомоделных относительно условий в сносящем потоке.

6. Выявлено, что применение противотока позволяет получить полноту сгорания 99,9%, в то время как прямоточная схема движения закрученного потока в идентичных условиях даёт не более 99,3%.

7. Установлено, что рабочий процесс противоточных вихревых горелок, по сравнению с горелочными устройствами других типов, для наиболее совершенных из которых число $Da_r \sim 10^{-1}$, более близок к условиям модели гомогенного реактора идеального перемешивания – $Da_r \sim 10^{-3}$. Для вихревой горелки $Da_r \sim 10^{-2}$.

8. Полученные новые данные и установленные закономерности влияния степени расширения на концентрационные пределы срыва пламени и полноту сгорания позволили разработать научно-обоснованный метод организации горения «бедной» смеси ($1,8 \leq \alpha \leq 2,3$) в низкоперепадном противоточном течении, обеспечивающий достижение полноты сгорания выше 0,999.

9. Разработанные пилотные образцы вихревых противоточных камер сгорания перегрева пара позволяют организовать надёжный запуск и устойчивое горение водород-кислородной смеси в среде разбавляющего нейтрального потока подогреваемого пара с выделением для этой цели тепловой мощности, регулируемой расходом горючей смеси, а также осуществить надёжное охлаждение стенок.

10. Для предотвращения проскока пламени и обеспечения устойчивости горения при условии подачи стехиометрической смеси, необходимо отношение площади сопла форсунки подвода горючей смеси к площади камеры сгорания в сечении соплового ввода выбирать равным 0,15, а относительную длину огневой камеры не менее 9.

11. Проведённые исследования показали, что созданный пилотный образец водородной камеры сгорания с противотоком обеспечивает на выходе полноту сгорания 0,999, Содержание неконденсирующихся газов (водорода и кислорода) не превышает 0,01 %.

12. Испытания разработанного пилотного образца водород-кислородной камеры сгорания подтверждают возможность перегрева водяного пара до температуры

1300 °С, при этом температура ограждающих наружных поверхностей не превышает 260 °С.

13. Спроектированы и изготовлены противоточные вихревые горелки – воспламенители, генерирующие стабилизирующие струи продуктов сгорания, устойчиво работающие при давлениях воздуха на входе от 0,12 МПа до 0,2 МПа, при этом развиваемая максимальная относительная тепловая мощность факела достигает 3,1 при $\alpha \approx 0,8$, а минимальная – 0,23 при $\alpha \approx 3$.

14. Экспериментально подтверждена возможность запуска КС от вдуваемых в сносный (основной) поток системы стабилизирующих высокоэнтальпийных струй продуктов сгорания в диапазоне коэффициентов избытка воздуха воспламенителя $0,8 \leq \alpha \leq 3,0$ со стабилизацией фронта пламени в более широком диапазоне $0,6 \leq \alpha \leq 6,0$.

15. Экспериментально подтверждено, что с точки зрения запуска и стабилизации пламени целесообразна комбинация вдува двух струй продуктов сгорания под углом 135° относительно направления основного потока.

16. Переход от воспламенения и стабилизации на одиночной высокоэнтальпийной закрученной струе, поперечно вдуваемой в поток, на систему из двух струй с сохранением расхода вдуваемого газа, позволил снизить импульс вдуваемых струй при сохранении эффектов запуска и стабилизации на 30 %, повысить симметричность процесса стабилизации и горения в камере; расширить верхнюю границу срыва пламени по коэффициенту избытка воздуха в 2 раза.

17. По разработанным методикам рассчитаны и спроектированы конструкции противоточных вихревых горелочных устройств и камер сгорания, что позволило обосновать возможность их применения в качестве форсуночно-горелочных модулей, воспламенителей форсажных камер сгорания, горелок технологического назначения, водород-кислородных камер сгорания комбинированных энергоустановок получения тепла и электричества.

18. Эксперименты, проведённые с разработанными устройствами сжигания топлива в составе опытно-промышленных образцов, подтвердили их расчётные характеристики и позволили внедрить часть из них на практике.

СПИСОК РАБОТ ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ДИССЕРТАЦИИ

По списку ВАК

1. **Гурьянов, А. И.** Вихревые горелочные устройства [Текст] / А. И. Гурьянов, О. В. Казанцева, М. В. Медведева, Ш. А. Пиралишвили // Инженерный журнал. – 2005. – №5. – прил. – С. 8 – 15.

2. **Пиралишвили, Ш. А.** Аэродинамика закрученного потока в вихревых горелках [Текст] / Ш. А. Пиралишвили, А. И. Гурьянов, Ахмед Мамо Демена, С. М. Хасанов // Авиакосмическое приборостроение. – 2007. – № 9. – С. 3 – 8.

3. **Пиралишвили, Ш. А.** Разработка инфракрасного газового горелочного устройства на базе вихревого эжектора [Текст] / Ш. А. Пиралишвили, А. И. Гурьянов, Р. И. Иванов // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королева. – 2007. – № 2 (13). – С. 151 – 154.

4. **Пиралишвили, Ш. А.** Установка термической утилизации низкокалорийных твёрдых бытовых отходов [Текст] / Ш. А. Пиралишвили, М. М. Гурьянова, А. И. Гурьянов // Конверсия в машиностроении – Conversion in machine building of Russia. – 2008. – № 2. – С. 64 – 69.

5. **Пиралишвили, Ш. А.** Вихревые горелки с противотоком [Текст] /

Ш. А. Пиралишвили, А. И. Гурьянов, // Конверсия в машиностроении – Conversion in machine building of Russia. – 2008. – № 1. – С. 11 – 16.

6. **Piralishvili, Sh. A.** Dimensionless base of experimental investigation of thermogasdynamics parameters in a twisted flow with combustion [Text] / Sh. A. Piralishvili, A. I. Guryanov // Heat Transfer Research. – 2008. – Т. 39. – № 8. – P. 703 – 712.

7. **Пиралишвили, Ш. А.** Исследование характеристик пневматической форсунки [Текст] / Ш. А. Пиралишвили, А. И. Гурьянов, Абере Гобезе, А. А. Добренко // Авиакосмическое приборостроение. – 2008. – № 12. – С. 38 – 45.

8. **Евдокимов, О. А.** Моделирование кривой выгорания топлива в трубчатой камере сгорания [Текст] / О. А. Евдокимов, А. И. Гурьянов // Авиакосмическое приборостроение. – 2009. – № 11. – С. 22 – 28.

9. **Гурьянов, А. И.** Высокотемпературный перегрев водяного пара в вихревых водород-кислородных пароперегревателях [Текст] / А. И. Гурьянов, Г. Ш. Пиралишвили // Авиакосмическое приборостроение. – 2009. – № 11. – С. 28 – 34.

10. **Гурьянов, А. И.** Экспериментальное и теоретическое исследование механизмов горения в ограниченном закрученном потоке [Текст] / А. И. Гурьянов, Ш. А. Пиралишвили // Тепловые процессы в технике. – 2009. – Т. 1 – № 5. – С. 170 – 177.

11. **Гурьянов, А. И.** Вихревые противоточные горелки авиационного назначения [Текст] / А. И. Гурьянов, Ш. А. Пиралишвили // Вестник Рыбинской государственной авиационной технологической академии имени П.А. Соловьёва. – 2010. – № 1 (16). – С. 59 – 66.

12. **Гурьянов, А. И.** Теплофизика водород-кислородных камер сгорания высокотемпературных турбин комбинированных ПГУ [Текст] / А. И. Гурьянов, Г. Ш. Пиралишвили, И. М. Верещагин // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королева (национального исследовательского университета). – 2011. – № 3 (27). – Часть 2. – С. 137 – 144.

13. **Гурьянов, А. И.** Расчётно-экспериментальное исследование полноты сгорания топлива в потоке [Текст] / А. И. Гурьянов, О. А. Евдокимов // Вестник Рыбинской государственной авиационной технологической академии имени П.А. Соловьёва. – 2011. – № 1 (19). – С. 182 – 188.

14. **Пиралишвили, Ш. А.** Численное исследование интегральных газодинамических характеристик противоточного горелочного модуля с использованием анизотропных моделей турбулентности [Текст] / Ш. А. Пиралишвили, А. И. Гурьянов, А. В. Бадерников // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королева (национального исследовательского университета). – 2011. – № 3 (27). – Часть 1. – С. 123 – 130.

15. **Гурьянов, А. И.** Тепломассообмен и горение в водород-кислородной камере сгорания [Текст] / А. И. Гурьянов, Г. Ш. Пиралишвили, И. М. Верещагин // Вестник Рыбинского государственного авиационного технического университета имени П.А. Соловьёва. – 2011. – № 2 (21). – С. 3 – 9.

16. **Азимов, Р. А.** Анализ возможности стабилизации горения в высокоскоростном потоке вихревыми горелками с резонатором [Текст] / Р. А. Азимов, В. И. Богданов, А. И. Гурьянов, Ш. А. Пиралишвили // Вестник Рыбинского государственного авиационного технического университета имени П.А. Соловьёва. – 2012. – № 2 (23). – С. 109 – 113.

17. **Гурьянов, А. И.** Эмиссионные характеристики горения в закрученном течении с газодинамическим противотоком [Текст] / А. И. Гурьянов // Тепловые процессы в технике. – 2013. – Т. 1 – № 1. – С. 5 – 12.