

На правах рукописи

Бадерников Артем Витальевич

**МОДИФИЦИРОВАННЫЙ МЕТОД РАСЧЕТА ГОРЕНИЯ В ВИХРЕВЫХ
ПРОТИВОТОЧНЫХ ГОРЕЛОЧНЫХ УСТРОЙСТВАХ**

Специальность 01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника

АВТОРЕФЕРАТ

**диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук**

Рыбинск – 2019

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

Научный руководитель: заслуженный деятель науки и техники РФ, профессор кафедры «Общая и техническая физика» ФГБОУ ВО РГАТУ имени П.А. Соловьева, доктор технических наук, профессор **Пиралишвили Шота Александрович**

Официальные оппоненты:

Снегирёв Александр Юрьевич, доктор технических наук, доцент, ФГ АОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», Институт прикладной математики и механики, профессор кафедры «Гидроаэродинамика, горение и теплообмен».

Зубрилин Иван Александрович, кандидат технических наук, ФГАОУ ВО «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева», научно-образовательный центр газодинамических исследований, инженер лаборатории моделирования процессов горения.

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)»

Защита состоится **26 июня 2019 года в 12:00** часов на заседании диссертационного совета Д 212.210.03 в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П.А. Соловьева» по адресу: 152934, г. Рыбинск, Ярославская область, ул. Пушкина, 53, ауд. Г -

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П.А. Соловьева», www.rsatu.ru.

Автореферат разослан 25 апреля 2019 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
д-р техн. наук, доцент

А.И. Гурьянов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Неуклонное повышение требований к эффективности и экологичности процесса сжигания топливных смесей в горелочных устройствах, камерах сгорания ГТУ и энергетических установках приводят к необходимости поиска новых способов организации эффективного горения.

Исследования взаимодействия свободных противоположно направленных струй показали, что сдвиговые слои смешения порождают турбулентность высокой интенсивности, крупномасштабные вихри и трёхмерные вихревые структуры. Обнаруженные эффекты могут быть использованы для организации интенсивного смешивания компонентов топлива и воздуха, а значит и для интенсификации процесса горения подготовленной топливно-воздушной смеси (ТВС) с высокой интенсивностью в ограниченном объёме. Концепция организации горения на встречно направленных закрученных потоках получила своё развитие в конструкциях противоточных горелочных устройств (рисунок 1).

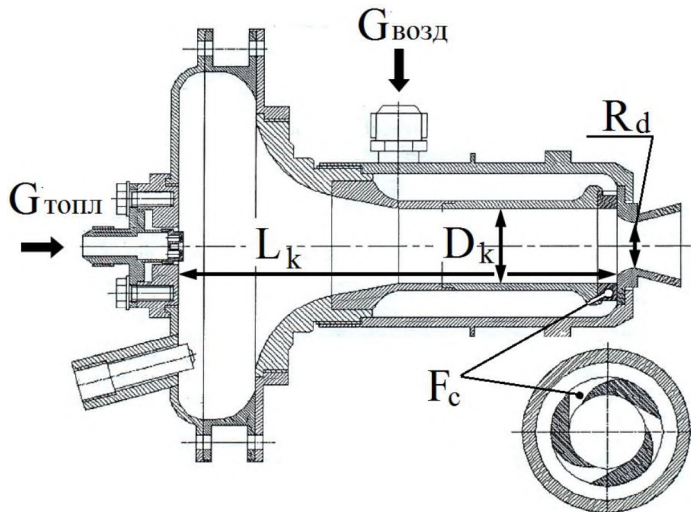


Рисунок 1 – Схема вихревой противоточной горелки

Характерными геометрическими размерами вихревых противоточных горелочных устройств являются: \bar{F}_c – относительная площадь минимального сечения соплового ввода; \bar{R}_d – относительный радиус минимального сечения сопла-диафрагмы; \bar{L}_k – относительная длина вихревой камеры (величины отнесены к площади поперечного сечения вихревой камеры, радиусу и диаметру вихревой камеры соответственно).

Результаты экспериментов показали, что в противоточных вихревых горелках наблюдается горение при параметрах, близких к реактору идеального смешения, что повышает устойчивость процесса и улучшает эмиссионные характеристики. Из экспериментальных работ известны следующие характерные особенности, присущие течению ограниченного закрученного потока с реакциями горения: возникновение течения по закону свободного вихря в вихревой камере и формирование фронта пламени, ограниченного периферийным потоком не реагирующего воздуха. Важным преимуществом организации процесса горения в вихревой противоточной камере сгорания является возможность создания эффективной системы охлаждения стенок холодным периферийным потоком. Такая система охлаждения стенок не приводит к полному отказу от регенеративного охлаждения, но позволяет снизить требуемый расход охладите-

ля, увеличить ресурс камеры сгорания с помощью снижения тепловых потоков, сделать конструкцию проще в производстве и эксплуатации.

В то же время, недостаток данных о процессах тепломассообмена внутри конструкции при её проектировании может привести к неожиданным результатам: переходу от турбулентного горения к ламинарному на определённых режимах работы; снижению удельного импульса камеры сгорания с 97% до 80% от теоретически возможного из-за неполного сгорания топливной смеси; значительному росту температуры стенок из-за снижения эффективности охлаждения.

Несмотря на то, что в настоящее время сформированы аналитические соотношения и критериальные зависимости для проектирования вихревых противоточных горелочных устройств, перечисленные выше проблемы проявились только в ходе экспериментальных исследований. При этом осуществить доводку конструкции без детального понимания процессов внутри горелочного модуля сложно, а процесс экспериментальной доводки длительный и дорогостоящий. В этом случае, применение трёхмерного численного моделирования для расчёта параметров потока является наиболее эффективным и удачно дополняет проекторные критериальные зависимости и аналитические соотношения. Необходимо отметить, что применение численного моделирования не отменяет необходимость экспериментального исследования, но повышает качество технических решений и культуру проектирования.

Моделирование процессов горения одна из наиболее сложных задач вычислительной теплофизики. Это обусловлено сочетанием трех основных процессов, требующих совместного решения – турбулентности, химических реакций, конвективного и лучистого теплообмена. Для каждого из рассматриваемых физических явлений существует большое количество математических моделей, что не позволяет сформулировать универсальный, однозначный подход к моделированию горения.

В настоящее время, несмотря на то, что проблемой численного моделирования процессов в вихревых противоточных горелочных модулях занимались научные группы в России, США, Индии и Китае, не существует общепринятого подхода к моделированию вихревых противоточных горелочных устройств. Почти нет работ, где исследовано влияние моделей турбулентности и горения на результаты расчёта процессов в противоточных горелочных модулях. Наиболее часто используются стандартные двухпараметрические модели турбулентности k - ϵ или k - ϵ RNG совместно с глобальными кинетическими механизмами без учёта теплообмена со стенками вихревой камеры, что может приводить к значительному расхождению расчёта и эксперимента. При этом успехи в создании горелочных устройств достигнуты сочетанием теоретического и экспериментального подходов в процессе длительной доводки.

Сокращение времени проектирования и дальнейшее повышение эффективности рабочего процесса в вихревых противоточных горелочных устройствах является актуальной задачей, которую возможно решить только обладая надёжной численной моделью.

Цель работы: на основе трёхмерного численного решения уравнений Навье-Стокса и химической кинетики разработать физико-математическую модель и модифицированный метод расчёта процессов в вихревых противоточных горелочных модулях, позволяющий отразить возникновение течения по закону свободного вихря в вихревой камере и формирование фронта пламени, ограниченного периферийным потоком не реагирующего воздуха.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи**:

- по результатам анализа экспериментальных работ выделить принципиальные свойства микро- и макроструктуры потока в вихревых трубах и горелочных модулях. Проанализировать подходы, применяемые при численном моделировании вихревых горелочных устройств;
- провести анализ наиболее часто используемых моделей турбулентности, горения и излучения. Определить их преимущества, недостатки и выбрать модели для верификационных расчётов;
- провести численные верификационные исследования на различных моделях горения и турбулентности для ряда известных вихревых устройств;
- на основе полученных результатов сформулировать физико-математическую модель и основные положения метода расчёта процессов в вихревых противоточных горелочных модулях;
- провести экспериментальное исследование теплового состояния противоточного горелочного модуля. На основе полученных в эксперименте данных провести апробацию разработанного метода расчёта и физико-математической модели.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности 01.04.14 – теплофизика и теоретическая теплотехника. Соответствует формуле специальности в части: «выявление механизмов переноса массы, импульса и энергии при конвекции, излучении, сложном теплообмене и физико-химических превращениях», **пункту 6** – «экспериментальные исследования, физическое и численное моделирование процессов переноса массы, импульса и энергии»; **пункту 7** – «экспериментальные и теоретические исследования процессов совместного переноса тепла и массы в бинарных и многокомпонентных смесях веществ, включая химически реагирующие смеси».

Научная новизна

1) Разработаны и верифицированы физико-математическая модель и модифицированный метод численного расчёта совместного переноса массы, импульса и энергии в многокомпонентной химически реагирующей смеси по проточной части вихревых противоточных горелочных модулей, позволяющие обеспечить среднее отклонение расчёта от эксперимента не более 25% в диапазоне режимов работы $Re=10200\div 38400$, коэффициента избытка воздуха $\alpha=0,59\div 1,1$ и геометрических параметров $\bar{F}_c=0,1\div 0,12$; $\bar{R}_d=0,511\div 0,8$; $\bar{L}_k=2\div 5,73$.

2) Доказано, что модели рейнольдсовых напряжений и двухпараметрические модели турбулентности с поправкой на кривизну линий тока предсказывают возникновение свободного вихря в вихревой камере противоточного горелочного устройства, в отличие от широко используемых классических двухпараметрических моделей турбулентности.

3) Предложена к использованию поправка на кривизну линий тока (Спаларт, Шур) для модели турбулентности $k-\epsilon$, ранее не применявшаяся для расчёта вихревых противоточных горелочных модулей, обеспечивающая повышение точности расчёта окружной компоненты скорости реагирующего потока в $1,5 \div 2$ раза и снижение среднего отклонения от эксперимента по температуре стенок с $15 \div 24\%$ до $7 \div 9\%$ по сравнению с классической моделью турбулентности $k-\epsilon$, а также уменьшающая время расчёта в $4 \div 5$ раз по сравнению с моделями рейнольдсовых напряжений.

На защиту выносятся:

1) Физико-математическая модель описания процессов в вихревом противоточном горелочном модуле на основе двухпараметрической модели турбулентности с коррекцией кривизны линий тока, модели горения с учётом детальной химической кинетики и теплообмена со стенками.

2) Модифицированный метод расчёта процессов в вихревых противоточных горелочных модулях, позволяющий корректно отразить характерные особенности, присущие течению закрученного потока с учётом реакций горения.

3) Результаты экспериментального исследования теплового состояния противоточного горелочного модуля и их сопоставление с численными расчётами, подтвердившими качество и достоверность разработанного модифицированного метода расчёта.

Практическая значимость работы

Применение разработанной физико-математической модели и модифицированного метода для расчётов теплового состояния стенок и параметров потока по проточной части вихревых противоточных горелочных модулей позволяет значительно сократить сроки проектировочных работ и объём экспериментальной доводки за счёт замены натуральных испытаний их математической моделью.

Предложенный метод на основе модели турбулентности $k-\epsilon$ с коррекцией кривизны линий тока даёт возможность получить устойчивое решение на расчётных сетках среднего качества, что позволяет привлекать к работам инженеров-расчётчиков, не обладающих узкоспециализированными экспертными знаниями в области вычислительной газодинамики, а также использовать результаты диссертации в учебном процессе.

Результаты работы внедрены в учебный процесс кафедры «Общая и техническая физика» ФГБОУ ВО РГАТУ им. П.А. Соловьева при обучении студентов по направлению 16.03.01 «Техническая физика» и 13.03.01 «Теплоэнергетика и теплотехника», применяются на ПАО «ОДК-Сатурн» при проектировании камер сгорания газотурбинных установок и могут быть применены в

других областях теплотехники при разработке высокоэффективных устройств сжигания топлива.

Достоверность полученных результатов достигается:

- использованием фундаментальных законов сохранения массы, импульса, энергии, с обоснованием выбора той или иной физической модели при одновременном контроле сходимости решения математической модели;
- применением сертифицированного программного комплекса ANSYS CFX, верифицированного на наборе задач, используемых для оценки качества физико-математических моделей горения;
- согласованием расчётных данных с результатами натуральных экспериментов, проведенных с применением сертифицированного измерительного оборудования.

Апробация работы. Основные результаты были представлены на Пятой российской национальной конференции по теплообмену (РНКТ-5, Москва, 2010), на международной научно-технической конференции «Проблемы и перспективы развития двигателестроения» (СГАУ, Самара, 2011), на IX всероссийской конференции с международным участием «Горение топлива: теория, эксперимент, приложения» (Новосибирск, 2015), на международной научно-технической конференции «Проблемы и перспективы развития двигателестроения» (СГАУ, Самара, 2016), на 9-ом международном семинаре по структуре пламени (9ISFS, Новосибирск, 2017), на X конференции «Процессы горения, теплообмена и экология тепловых двигателей» (СГАУ, Самара, 2017), на международной конференции «Физика и химия горения» (ComPhysChem'18, Самара, 2018).

Личный вклад автора

Автором проведены численные верификационные исследования на различных моделях горения и турбулентности для ряда известных вихревых устройств. Обобщение и анализ полученных результатов позволили сформулировать основные положения метода расчёта процессов в вихревых противоточных горелочных модулях. Для подтверждения корректности разработанного метода выполнено численное моделирование и экспериментальное исследование теплового состояния вихревого противоточного горелочного модуля.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 9 работ, из них 1 статья в журнале, рекомендованном ВАК, 1 статья в зарубежном электронном издании, индексируемом в базе данных Scopus, 7 тезисов доклада.

Объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка использованной литературы и приложений. Полный объем диссертации составляет 168 страниц, которые содержат 106 рисунков, 137 наименований литературы, 2 приложения.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении представлено обоснование актуальности темы диссертации, сформулированы задачи исследования, основные защищаемые положения работы, а также их научная новизна и практическая значимость.

В первой главе проанализированы экспериментальные данные, структура течения и методы моделирования в устройствах с противотоком – вихревой трубы, вихревой камеры и вихревой горелки.

Анализ процессов в вихревых трубах и вихревых камерах проведен на основе работ Ш.А. Пиралишвили, А.П. Меркулова, А.В. Мартынова, В.М. Бродянского, В.М. Поляева, Р.Б. Ахмедова, Ю.А. Кныша, С.В. Алексеенко, А.Н. Штыма, К.А. Штыма, В.П. Лебедева, С.В. Лукачева, Ю.В. Чижикова и др. Значительный вклад в практическую реализацию концепции горения на встречно направленных, закрученных потоках внесли Ш.А. Пиралишвили, А.Н. Мухин, А.И. Гурьянов, А.Н. Штым, N. Syred, A. Gutsol, I. Matveev, M. Chiaverini, J. Majdalani и др.

Анализ принципиальных свойств микро- и макроструктуры потока в вихревых трубах и горелочных модулях показал, что течение в вихревых противоточных горелочных устройствах обладает следующими характерными особенностями: а) высокой степенью анизотропности; б) наличием двух вихрей: периферийного (по закону свободного вихря) и приосевого (по закону вращения квазитвёрдого тела); в) расположением фронта пламени, ограниченным периферийным потоком не реагирующего воздуха.

Из анализа работ, посвященных численному моделированию вихревых устройств А.И. Гурьянова, С.В. Веретенникова, А. Kumar, I. Matveev, M. Anderson и др. следует, что наиболее часто применяемые для расчёта вихревых противоточных горелочных устройств методы численного моделирования: а) не учитывают анизотропность турбулентности; б) используют глобальные кинетические механизмы, что приводит к завышенной температуре пламени; в) не обеспечивают расчёт температуры стенок вихревой камеры, т.к. стенки полагаются адиабатными. Это подтверждает целесообразность и актуальность выбранной цели исследования.

Во второй главе изложены наиболее часто используемые физико-математические модели для расчёта турбулентного течения закрученного потока с тепломассообменом, процессов горения, лучистого теплообмена и теплопередачи. Проанализированы их преимущества, недостатки и выбраны модели для верификационных расчётов.

В третьей главе представлен способ отдельной отработки на простых модельных задачах элементов физико-математической модели с последующей проверкой их совместной работы. В главе приведены верификационные расчёты модельных задач, по результатам которых найдена комбинация моделей турбулентности, горения, химической кинетики и излучения, наилучшим образом предсказывающая эксперимент.

В первом разделе третьей главы представлены результаты расчётов модельной задачи течения не реагирующего потока в вихревой камере И.И. Смутьского с целью выбора модели турбулентности, позволяющей наилучшим образом предсказать эксперимент. Безразмерные параметры вихревой камеры $\bar{L}_k = 1,25$, $\bar{R}_d = 0,344$, $\bar{F}_c = 0,09$ близки к тем, что применяются в вихревых противоточных горелочных модулях. Расчёты выполнены на режиме

работы с числом Рейнольдса $Re=27000$, вычисленном по скорости потока в закручивающем устройстве и радиусу вихревой камеры. Исследована сеточная сходимость на блочно-структурированной гексаэдральной сетке (сектор 30°), которая достигается для размерности $75 \times 45 \times 31$ элементов в осевом, радиальном и окружном направлении соответственно. Проведены расчёты на 10 моделях турбулентности: двухпараметрических k - ϵ , k - ϵ RNG, SST; рейнольдсовых напряжений: RSM BSL, LRR, IQ, SSG; двухпараметрических с коррекцией кривизны линий тока: k - ϵ CC, k - ϵ RNG CC, SST CC.

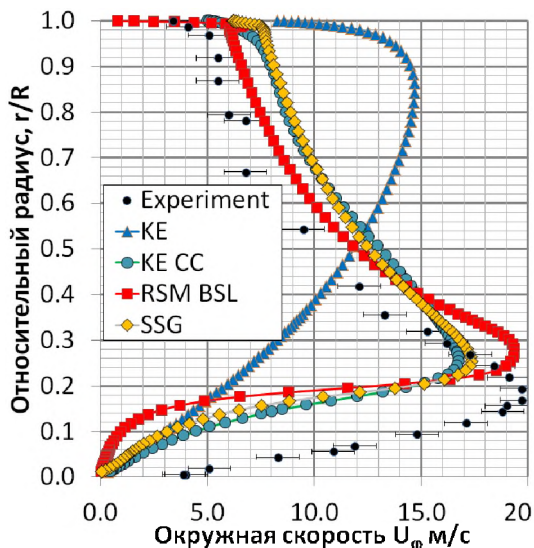


Рисунок 2 – Окружная скорость в среднем сечении вихревой камеры $z/L=0,5$. Расчёты выполнены автором. Экспериментальные данные И.И. Смульского

Наименьшее отклонение расчёта от эксперимента достигается при использовании следующих моделей турбулентности: SSG ($\sim 21\%$) и k - ϵ CC ($\sim 20\%$).

Во втором разделе третьей главы проведена оценка влияния учёта анизотропности турбулентности при движении воздуха без горения в вихревой камере горелочного модуля сложной геометрии. Учёт анизотропности турбулентности сильно влияет на расчётные параметры течения горелочном модуле, в частности модель рейнольдсовых напряжений RSM BSL показывает наличие свободного вихря в торцевой части и существование радиального переноса массы в системе винтовых вихрей (рисунок 3), располагающихся в цилиндрической части вихревой камеры, что подтверждается экспериментальными данными (рисунок 4).

В третьем разделе третьей главы представлены результаты верификационных расчётов моделей химической кинетики, доступных в ANSYS CFX. Цель решения данной задачи заключается в исследовании влияния кинетического механизма горения метано-воздушных смесей на результаты моделирования характеристик пламени в ANSYS CFX и выборе модели горения. Для исследования выбраны кинетические схемы, представленные в ANSYS CFX – WD1, C1, C2, LCSR, C1C4 и GRI-Mech 3.0.

Результаты расчётов сопоставлены с экспериментом по осевой и окружной компонентам скорости, а также величине статического давления в четырёх сечениях вихревой камеры ($z/L=0.1; 0.5; 0.9$ и 1.2). Расчёты показали, что классические модели k - ϵ , k - ϵ RNG и SST могут привести к качественно различающимся с экспериментом результатам моделирования закрученного потока в ограниченном пространстве (рисунок 2). При этом модели рейнольдсовых напряжений и двухпараметрические модели k - ϵ CC, k - ϵ RNG CC и SST CC качественно и количественно предсказывают параметры потока в области возникновения свободного вихря и удовлетворительно предсказывают течение потока в приосевой зоне.

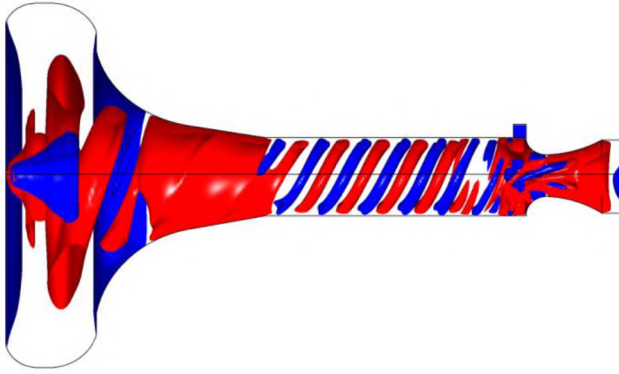


Рисунок 3 – Изоповерхности радиальной компоненты скорости, модель турбулентности RSM BSL

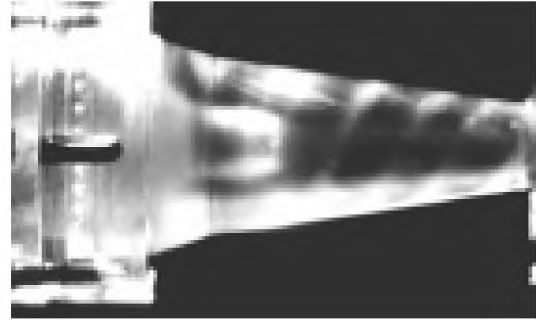


Рисунок 4 – Фотография крупномасштабных вихревых структур в вихревой трубе (фото Ш.А. Пиралишвили)

Равновесные температуры, полученные в результате расчета в ANSYS CFX, сравнивались с результатами расчёта многоцелевого программного комплекса АСТРА 4/ps версия 1.07. Основные отличия между механизмами наблюдаются при избытке топлива в смеси и стехиометрическом соотношении.

Сравнение расчёта температуры (рисунок 5) и концентраций промежуточных компонентов на оси пламени Sandia Flame D с экспериментом показало, что наиболее близкие к эксперименту значения достигаются при использовании кинетического механизма GRI-Mech 3.0. Из встроенных в ANSYS CFX механизмов наилучшие результаты у C1C4 и LCSR. Применение в расчётах одношагового механизма WD1 не позволяет с достаточной точностью предсказать температуру в области богатых и стехиометрических смесей.

В четвёртом разделе третьей главы представлены результаты комплексной проверки совместной работы моделей турбулентности и горения, выбор модели излучения и способа моделирования теплообмена со стенками. В качестве модельной задачи выбрано горение смеси воздуха и метана в вихревой противоточной камере сгорания, экспериментально исследованной S.E. Najim, A.C.

Styles, N. Syred. Диаметр вихревой камеры – $D_k=152,5$ мм, длина сопла-диафрагмы – $L_s=125$ мм. Относительные параметры вихревой камеры ($\bar{F}_c=0,12$, $\bar{R}_d=0,511$, $\bar{L}_k=2$) близки к ранее рассмотренной вихревой камере И.И. Смутьского. На вход подавалась заранее перемешанная смесь топлива и воздуха с коэффициентом избытка воздуха $\alpha=1.1$, число Рейнольдса, рассчитанное по радиусу вихревой камеры и параметрам на входе в тангенциальные отверстия, составляет $Re=34400$.

Анализ расчётов показал, что учёт неадиабатности стенок вихревой камеры играет значительную роль в формировании

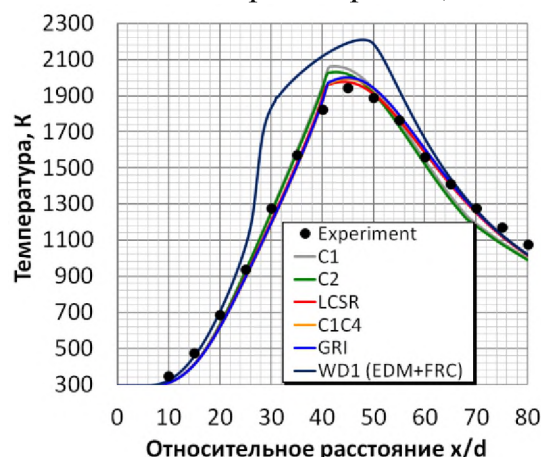


Рисунок 5 – Температура на оси пламени Sandia Flame D для различных кинетических механизмов. Расчёты выполнены автором. Эксперимент – Sandia Labs

поля температуры в торцевой части вихревой камеры. В расчётах необходимо учитывать как конвективный теплообмен, так и теплообмен излучением. Оптимальным выбором по производительности и точности является модель излучения дискретного переноса.

Проведены сопоставительные расчёты процессов в вихревой камере с различными моделями турбулентности. Наиболее близкие к эксперименту результаты достигаются на модели k-ε CC (рисунок 6). Погрешность определения параметров в вихревой камере составляет: температура ~25%; окружная компонента скорости ~12%; осевая компонента скорости ~20%. Модель k-ε CC прогнозирует возникновение течения по закону свободного вихря в вихревой камере, не уступает в точности моделям реинольдсовых напряжений и позволяет в ~ 2 раза улучшить точность расчёта окружной компоненты скорости по сравнению с классическими двухпараметрическими моделями турбулентности.

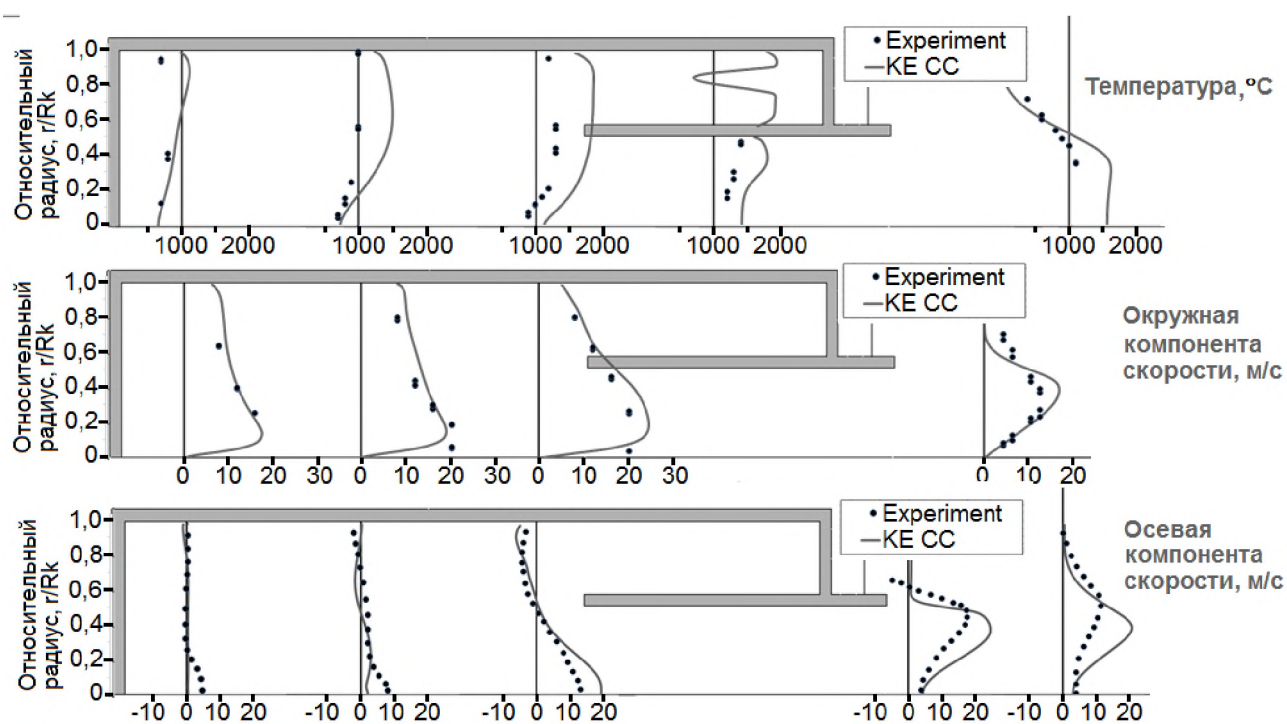


Рисунок 6 – Параметры потока в сечениях вихревой противоточной камеры сгорания. Расчёты выполнены автором. Эксперимент – S.E. Najim, A.C. Styles, N. Syred

В четвёртой главе приведен разработанный метод моделирования процессов горения в вихревых противоточных устройствах и перечислены модели замыкающие физико-математическую модель: модель турбулентности k-ε CC с поправкой на кривизну линий тока, предложенной Спалартом и Шуром; модель горения Burning Velocity Model с детальным механизмом химической кинетики и выражением Зимонта для расчёта турбулентной скорости горения; модель излучения Direct Transfer с количеством лучей равно 32 в приближении серого газа; модель сопряжённого теплообмена для расчёта теплопередачи через стенки вихревой камеры. Основные отличия модифицированного метода и физико-математической модели от известных подходов представлены на рисунке 7.

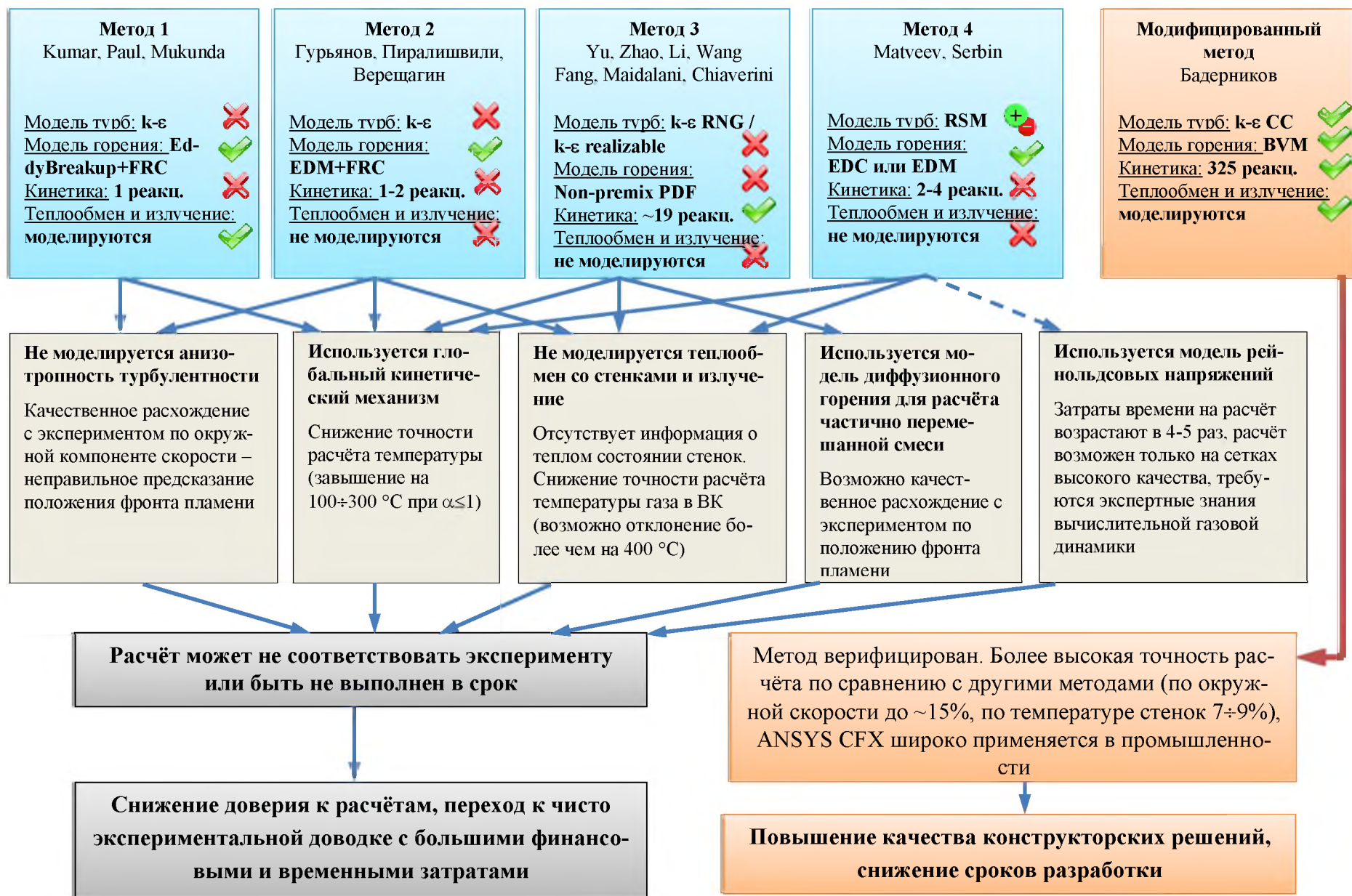


Рисунок 7 – Основные отличия модифицированного метода и физико-математической модели от известных подходов

Также в четвёртой главе изложены основные положения метода расчёта, который содержит требования к геометрической модели, требуемой густоте сетки, типу граничных условий, настройкам контрольных параметров и анализу полученных результатов.

Пятая глава посвящена описанию экспериментального исследования теплового состояния вихревого противоточного горелочного модуля и апробации разработанного метода и физико-математической модели по полученным в эксперименте данным.

Для исследования теплового состояния вихревого противоточного горелочного модуля смонтирован стенд, состоящий из двух отдельных линий подачи сжатого воздуха и пропана с расходомерами-регуляторами, позволяющими точно устанавливать расход и необходимое соотношение топлива с воздухом. В эксперименте измерялась температура наружной поверхности горелочного модуля с геометрическими параметрами: диаметр $D_k=30$ мм; $\bar{F}_c=0,1$; $\bar{R}_d=0,8$; $\bar{L}_k=5,73$, покрытого толстым слоем сажи (рисунок 8). Измерения про-

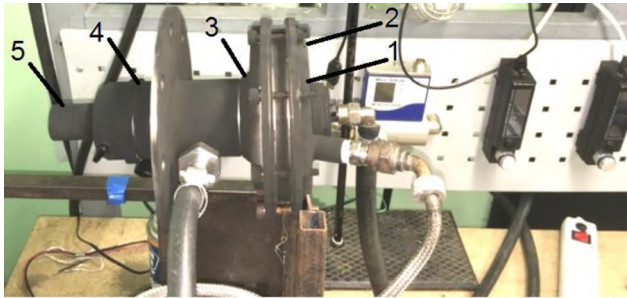


Рисунок 8 – Фотография вихревого противоточного горелочного модуля, смонтированного на экспериментальном стенде. 1–5 контрольные точки измерения температуры

камеры) и коэффициента избытка воздуха $\alpha=0,88\div 0,59$ (рисунок 9).

С целью апробации физико-математической модели и модифицированного метода моделирования построена трёхмерная модель (сектор 120°) и проведены расчёты на режимах эксперимента.

Анализ результатов расчётов (рисунок 9) показал, что разработанная физико-математическая модель и метод моделирования позволяют получить качественно и количественно согласующийся с экспериментом результат, где фронт пламени ограничен периферийным потоком нереагирующего воздуха. Возможная причина повышенной расчётной температуры стенок в точке 3 – модель горения BVM не учитывает погасание пламени в окрестности стенок, что приводит к их повышенной температуре относительно эксперимента.

Применение в модифицированном методе и физико-математической модели поправки на кривизну линий тока (рисунок 10) позволяет значительно улучшить среднюю точность расчёта теплового состояния стенок с $15\div 24\%$ до $7\div 9\%$ (указаны осреднённые отклонения расчёта от эксперимента по всем рассмотренным точкам).

ведены тепловизором с верхним диапазоном температуры 350 °С. Величина среднеквадратической погрешности определения температуры составляет $\sigma_T=\pm 3\%$.

Проведены измерения теплового состояния на четырёх режимах в диапазоне числа $Re=10200\div 38400$ (вычислено по скорости воздуха в сопловом вводе и радиусу вихревой

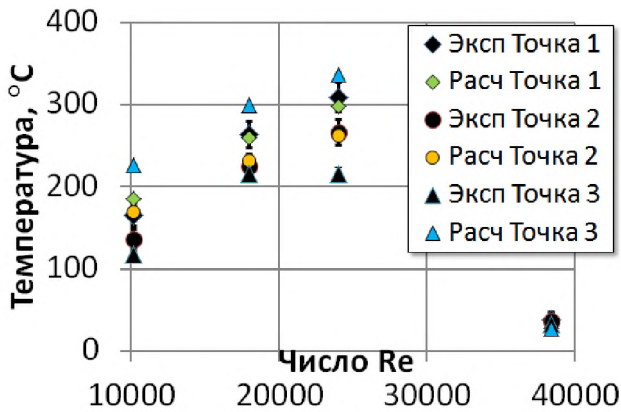


Рисунок 9 – Расчётные и экспериментальные температуры в контрольных точках 1–3 для всех исследованных режимов

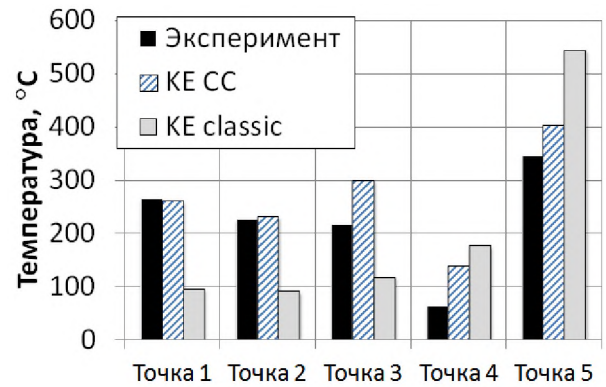


Рисунок 10 – Расчётные и экспериментальные температуры в контрольных точках на режиме $Re=18000$

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

В результате проведённого исследования решена актуальная научная задача, имеющая значение для выявления механизмов переноса массы, импульса и энергии при конвекции, излучении, сложном теплообмене и физико-химических превращениях с помощью численного моделирования в вихревых противоточных горелочных устройствах и получены следующие результаты:

1) Предложена физико-математическая модель на основе осреднённых уравнений Навье-Стокса, модели турбулентности $k-\varepsilon$ с коррекцией кривизны линий тока Спаларта и Шура, модели горения с учётом детальной химической кинетики, модели излучения и теплообмена со стенками, позволяющая учесть явления совместного переноса массы, импульса и энергии в многокомпонентной химически реагирующей смеси в ограниченном закрученном потоке с реакциями горения.

2) Разработан и верифицирован модифицированный метод расчёта процессов в вихревых противоточных горелочных модулях на основе предложенной физико-математической модели, позволяющий в диапазоне режимов работы $Re=10200 \div 38400$, $\alpha=0,59 \div 1,1$ и геометрических параметров $\bar{F}_c=0,09 \div 0,12$; $\bar{R}_d=0,344 \div 0,8$; $\bar{L}_k=1,25 \div 5,73$ корректно отразить возникновение течения по закону свободного вихря в вихревой камере, формирование фронта пламени, ограниченного периферийным потоком нереагирующего воздуха, а также рассчитать тепловое состояние стенок.

3) Проведённые верификационные расчёты на известных модельных задачах доказали, что экспериментально зафиксированное существование свободного вихря в ВК предсказывается моделями рейнольдсовых напряжений или двухпараметрическими моделям турбулентности с поправкой на кривизну линий тока. Наиболее близкие к эксперименту результаты достигаются при использовании модели турбулентности $k-\varepsilon$ совместно с поправкой на кривизну линий тока, предложенной Спалартом и Шуром. Применение в модели поправки на кривизну линий тока позволяет в $1,5 \div 2$ раза улучшить точность расчёта

окружной компоненты скорости в реагирующем потоке по сравнению с классическими двухпараметрическими моделями турбулентности.

4) По результатам верификационных расчётов для модифицированного метода и физико-математической модели погрешность определения параметров в вихревой камере составляет: температура $\sim 25\%$; окружная компонента скорости $\sim 12\%$; осевая компонента скорости $\sim 20\%$. Применение в модели поправки на кривизну линий тока позволяет снизить время расчёта в $4\div 5$ раз по сравнению с моделями рейнольдсовых напряжений.

5) Экспериментально исследовано тепловое состояние противоточного горелочного модуля на четырёх режимах работы в диапазоне $Re=10200\div 38400$, $\alpha=0,59\div 0,88$ и проведена апробация разработанной физико-математической модели и модифицированного метода расчёта горения в вихревом противоточном горелочном модуле на задаче расчёта теплового состояния его стенок. Разработанный метод расчёта позволяет на этапе проектирования вычислять температуру стенок с отклонением до 24% в отдельных точках, среднее отклонение по температуре от эксперимента составляет $7\div 9\%$.

Использование результатов диссертационной работы возможно при проектировании нового класса противоточных горелочных устройств – камер сгорания ЖРД или других устройств, в которых присутствуют встречно направленные закрученные потоки и предъявляются жёсткие требования по температурам стенок.

Дальнейшая разработка темы диссертации возможна в области исследования нестационарных процессов в вихревых противоточных горелочных устройствах с применением вихреразрешающих моделей турбулентности и уточнением динамики положения фронта пламени.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК:

1) **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. – 2011. – №3-1(27), С. 123-130.

Публикации в изданиях, индексируемых в базе данных Scopus:

2) **Badernikov, A.V.** Results of Numerical Modeling of Combustion Processes in a Vortex Chamber [Электронный ресурс] / A.V. Badernikov, S.A. Piralishvily, A.I. Guryanov // International Conference on Combustion Physics and Chemistry. MATEC Web of Conferences. – 2018. – Vol. 209. – 00023. – 5 p. <https://doi.org/10.1051/matecconf/201820900023>

В других изданиях:

3) **Пиралишвили, Ш.А.** Численное исследование характеристик противоточного горелочного модуля (тезисы доклада) / Ш.А. Пиралишвили, А.И. Гурьянов, А.В. Бадерников // Труды Пятой российской национальной конференции по теплообмену (РНКТ-5). – Москва: Изд. дом МЭИ. – 2010. – Т. 3

4) **Пиралишвили, Ш.А.** Численное исследование интегральных газодинамических характеристик противоточного горелочного модуля с использованием анизотропных моделей турбулентности (тезисы доклада) / Ш.А. Пиралишвили, А.И. Гурьянов, А.В. Бадерников // Материалы докладов международной научно-технической конференции «Проблемы и перспективы развития двигателестроения». – Самара: СГАУ, 2011. – Часть 1. – С. 282-283

5) **Бадерников, А.В.** Результаты численного моделирования процессов горения и выбросов NO на ANSYS CFX (тезисы доклада) [Электронный ресурс] / А.В. Бадерников, Р.А. Диденко, Д.С. Ханталин, М.В. Малыгина // Материалы IX Всероссийской конференции с международным участием «Горение топлива: теория, эксперимент, приложения». – Новосибирск: Изд-во Института теплофизики СО РАН, 2015. CD. – 1 с. – ISBN 978-5-89017-043-9

6) **Бадерников, А.В.** Исследование влияния моделей турбулентности на результаты моделирования характеристик закрученного потока в вихревой камере и противоточном горелочном модуле (тезисы доклада) [Текст] / А.В. Бадерников, Ш.А. Пиралишвили // Материалы докладов международной научно-технической конференции «Проблемы и перспективы развития двигателестроения». – Самара: Изд-во Самарский университет. – 2016. – Часть 1. – С. 232

7) **Бадерников, А. В.** Результаты численного моделирования процессов горения в вихревых противоточных горелочных модулях / А.В. Бадерников, Ш.А. Пиралишвили, А.И. Гурьянов // X Международная научно-техническая конференция «Процессы горения, теплообмена и экология тепловых двигателей»: сб. трудов. / М-во образования и науки Рос. Федерации; Самар. нац. исслед. ун-т им. С. П. Королева (Самар. ун-т). – Самара: Изд-во Самарский университет. – 2017. – С. 36-38.

8) **Badernikov, A.V.** Study of relations between kinetics of methane-air mixture combustion and modeling of flame parameters using ANSYS CFX software (тезисы доклада) [Текст] / A.V. Badernikov, S.A. Piralishvily // 9th International seminar on flame structure. Book of Abstracts, Novosibirsk, Institute of Chemical Kinetics & Combustion SB RAS. – 2017. – p. 35

9) **Badernikov, A.V.** Results of Numerical Modeling of Combustion Processes in a Vortex Chamber [Текст] / A.V. Badernikov, S.A. Piralishvily, A.I. Guryanov // International Conference on Combustion Physics and Chemistry. Technical program and book of abstracts, Samara: Samara National Research University. – 2018. – p. 38.