

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 24.2.379.10, СОЗДАННОГО  
НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО АВТОНОМНОГО  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«САМАРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ИМЕНИ АКАДЕМИКА С. П. КОРОЛЕВА»  
МИНИСТЕРСТВА НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ,  
ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЁНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело № \_\_\_\_\_  
решение диссертационного совета от 23 мая 2025 г. № 9  
о присуждении Кутлумухамедову Артуру Рамилевичу, гражданину Российской  
Федерации, учёной степени кандидата технических наук.

Диссертация «Метод расчёта выбросов монооксида углерода с формализованным выделением зон, лимитирующих его окисление в камерах сгорания газотурбинных двигателей» по специальности 2.5.15. Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов принята к защите 19 марта 2025 г. (протокол заседания № 6) диссертационным советом 24.2.379.10, созданным на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (443086, г. Самара, Московское шоссе, 34), приказом Минобрнауки России №229/нк от 14 февраля 2023 г.

Соискатель Кутлумухамедов Артур Рамилевич, 22 января 1988 года рождения, окончил федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Уфимский государственный авиационный технический университет» по специальности «Авиационная и ракетно-космическая теплотехника». В 2019 году освоил программу подготовки научно-педагогических кадров в аспирантуре федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уфимский государственный авиационный технический университет» по направлению подготовки 24.06.01 Авиационная и ракетно-космическая техника.

Кутлумухамедов А.Р. работает в должности ведущего инженера-конструктора в отделе камер сгорания и выходных устройств ОКБ «Мотор» ПАО «ОДК-УМПО».

Диссертация выполнена на кафедре авиационной теплотехники и теплоэнергетики федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уфимский университет науки и технологий» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

Научный руководитель – Бакиров Фёдор Гайфуллович, доктор технических

наук, профессор, профессор кафедры авиационной теплотехники и теплоэнергетики федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уфимский университет науки и технологий».

Официальные оппоненты:

Мингазов Биал Галавдинович, доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский национальный исследовательский технический университет имени А.Н. Туполева - КАИ», профессор кафедры реактивных двигателей и энергетических установок;

Грасько Тарас Васильевич, кандидат технических наук, доцент, федеральное государственное казенное военное образовательное учреждение высшего образования «Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», заместитель начальника факультета - начальник учебной части 7 факультета летательных аппаратов -

дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П.А. Соловьева», г. Рыбинск (РГАТУ), в своём положительном отзыве, подписанном Веретенниковым Сергеем Владимировичем, кандидатом технических наук, доцентом, заведующим кафедрой общей и технической физики РГАТУ, Евдокимовым Олегом Анатольевичем, доктором технических наук, профессором кафедры общей и технической физики РГАТУ, и утверждённом Кошкиным Валерием Ивановичем, доктором физико-математических наук, профессором, ректором РГАТУ, указала, что диссертационная работа Кутлумухамедова А.Р. является законченной научной работой, в которой он успешно справился с поставленной задачей разработки метода расчёта выбросов монооксида углерода (СО) из камер сгорания ГТД. Диссертационная работа соответствует требованиям Положения о присуждении учёных степеней, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а её автор, Кутлумухамедов А.Р., заслуживает присуждения учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.5.15. Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов.

Соискатель имеет 13 опубликованных работ, в том числе по теме диссертации опубликовано 11 работ, из них 3 работы опубликованы в периодических изданиях, рекомендованных ВАК России, 1 статья - в издании, индексируемом в базе данных Scopus. Суммарный объем принадлежащего соискателю опубликованного по теме диссертации материала составляет 1,9 печ. л. Из материалов совместных публикаций лично соискателю принадлежат: обобщение и систематизация открытой информации по расчетной оценке выбросов СО из камер сгорания ГТД с

помощью комбинированных методов (вычислительная газовая динамика и реакторный метод); результаты обработки данных трехмерного моделирования; формирование графических схем реакторных моделей; описание процесса формирования реакторной модели камеры сгорания с моделированием «бедных» струек горючей смеси, зоны пламени, зоны обратных токов и смешения потоков; разработка способа оценки состава горючей смеси по распределению объемного содержания азота в жаровой трубе исследуемой камеры сгорания; графическое сопоставление результатов расчетов с экспериментом. В диссертации отсутствуют недостоверные сведения об опубликованных соискателем учёной степени работах, в которых изложены основные научные результаты диссертации.

Наиболее значимые работы:

1) Кутлумухамедов, А.Р. Опыт эволюционной доводки авиационной камеры сгорания, предназначенной для работы в составе наземной энергетической установки / А.Р. Кутлумухамедов, Д.В. Морозов, Н.И. Фокин // Авиадвигатели XXI века: материалы всероссийской науч.-техн. конф. – Москва: ЦИАМ, 2015. – С. 450-452 (материалы конференции 0,188 п.л./0,094 п.л.);

2) Кутлумухамедов, А.Р. Расчетная оценка концентраций монооксида углерода на выходе из малоэмиссионной камеры сгорания с помощью комбинированного метода / А. Р. Кутлумухамедов, Д. В. Скиба, Ф. Г. Бакиров // Проблемы и перспективы развития двигателестроения: материалы докладов междунар. науч.-техн. конф. – Самара: Самарский университет, 2018 – С. 87-88 (материалы конференции 0,125 п.л./0,062 п.л.).

3) Кутлумухамедов, А. Р. Обзор работ, посвященных оценке выбросов монооксида углерода из камер сгорания газотурбинных двигателей по реакторной модели, разработанной на базе результатов трехмерного моделирования / А. Р. Кутлумухамедов, Д. В. Скиба, Ф. Г. Бакиров // Вестник УГАТУ. – 2022. – Т.26, № 1 (95). – С. 69-80 (научная статья 0,75 п.л./0,375 п.л.);

4) Апробация методики расчета выбросов монооксида углерода из камер сгорания ГТД по реакторной модели с отслеживанием «бедных» струек топливовоздушной смеси / А.Р. Кутлумухамедов, Д.В. Скиба, Г.П. Гребенюк, Ф.Г. Бакиров // Вестник УГАТУ. – 2022. – Т. 26, № 2 (96). – С. 82-92 (научная статья 0,688 п.л./0,344 п.л.).

5) Kutlumukhamedov, A. R. Combined Method for Prediction of Carbon Monoxide Emission from Gas Turbine Combustion Chambers / A. R. Kutlumukhamedov, D. V. Skiba, F. G. Bakirov. – DOI 10.1109/EC52789.2021.10016861 // 2021 International Scientific and Technical Engine Conference (EC). – IEEE, 2023. – P.1-4 (материалы конференции 0,250 п.л./0,125 п.л.).

На диссертацию и автореферат поступило 9 отзывов от организаций:

1) Филиал ПАО «ОДК-Сатурн» - ОМКБ, отзыв составлен и подписан Шпаковским Денисом Даниловичем, к.т.н., ведущим инженером-конструктором.

2) АО «Казанское моторостроительное производственное объединение», отзыв составлен и подписан Баклановым Андреем Владимировичем, к.т.н., заместителем главного конструктора;

3) АО «ОДК-Климов», отзыв составлен и подписан Липиным Алексеем Владимировичем, к.т.н., зам. главного конструктора по перспективным разработкам – начальником отдела и Каровецким Алексеем Алексеевичем, инженером-конструктором I категории бригады камер сгорания, форсажных камер и выходных устройств;

4) ФГАОУ ВО «Омский государственный технический университет», отзыв составлен и подписан Яковлевым Алексеем Борисовичем, к.т.н., заведующим кафедрой «Авиа- и ракетостроение» и Жариковым Константином Игоревичем, к.т.н., доцентом кафедры «Авиа- и ракетостроение»;

5) АО «Металлист-Самара», отзыв составлен и подписан Федорченко Дмитрием Геннадиевичем, к.т.н., главным конструктором и Цыбизовым Юрием Ильичом, д.т.н., ведущим конструктором.

6) ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», отзыв составлен и подписан Агульником Алексеем Борисовичем, д.т.н., заведующим кафедрой «Теория воздушно-реактивных двигателей»;

7) ФАУ «Центральный институт авиационного моторостроения», отзыв составлен и подписан Свердловым Евгением Давыдовичем, д.т.н., главным научным сотрудником отдела «Горение и камеры сгорания» и Гольцевым Валентином Федоровичем, к.т.н., старшим научным сотрудником отдела «Специальные авиационные двигатели и химмотология»;

8) «Опытно-конструкторское бюро имени А. Люльки» филиала ПАО «ОДК-Уфимское моторостроительное производственное объединение», отзыв составлен и подписан Фетисовым Сергеем Николаевичем, к.ф.-м.н., ведущим конструктором;

9) АО «Объединенная двигателестроительная корпорация», отзыв составлен и подписан Ляпиным Валерием Павловичем, к.т.н., главным специалистом – ученым секретарем НТС ОДК.

Критическими замечаниями в представленных отзывах являются:

1. Апробация метода выполнена применительно к камере сгорания энергоустановки ГТЭ-10/953 с технологией «богато-бедного» сжигания топлива, тогда как сегодня наибольшее распространение для наземных ГТУ получила технология «бедно-бедного» сжигания, что требует определения границ применимости разработанного метода. 2. Несмотря на наличие экспериментальных данных, не представлено сравнение расчетных потерь полного давления и распределения температуры жаровой трубы с измеренными значениями. Это

позволило бы выполнить верификацию трехмерного CFD моделирования, на базе которого построена реакторная модель камеры сгорания ГТЭ-10/953. 3. В работе не приведены данные о применяемых в CFD-расчетах расчетных сеток и принципах их построения. 4. В тексте автореферата отсутствуют данные о содержании работ по адаптации разработанной методики для жидких топлив. Необходимость такой адаптации упоминается в перспективах по дальнейшему развитию работы, но не раскрыта её суть.

В полученных отзывах отмечено, что указанные замечания в целом не снижают высокой оценки работы, а сама диссертационная работа соответствует требованиям Положения о присуждении учёных степеней, предъявляемым к кандидатским диссертациям, и сделано заключение о возможности присуждения Кутлумухамедову А.Р. учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.5.15. Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов.

Выбор Мингазова Б.Г. в качестве официального оппонента обосновывается его глубокими знаниями, опытом и достижениями в области теории и проектирования камер сгорания ГТД, расчётов и численного моделирования процессов горения, экспериментальных исследований традиционных и малоэмиссионных камер сгорания и горелочных устройств.

Выбор Грасько Т.В. в качестве официального оппонента обосновывается его глубокими знаниями, опытом и достижениями в области исследования основных и форсажных камер сгорания ГТД, улучшения характеристик силовых установок летательных аппаратов за счёт совершенствования рабочих процессов в камерах сгорания и применения альтернативных видов топлива.

Выбор федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П.А. Соловьева» в качестве ведущей организации связан с наличием компетенций в теории и проектировании камер сгорания газотурбинных двигателей, и обосновывается наличием компетентных специалистов, таких как д.т.н., доцент, и.о. директора института авиационных технологий и инженерной физики, профессор кафедры общей и технической физики Гурьянов А.И., д.т.н., профессор кафедры общей и технической физики Евдокимов О.А., к.т.н., доцент, заведующий кафедрой общей и технической физики Веретенников С.В.

**Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:**

**разработаны:**

– метод расчёта выбросов монооксида углерода (СО) из камер сгорания ГТД с применением детальной химической кинетики, отличающийся

формализованным построением реакторной модели камеры сгорания по результатам трёхмерного CFD моделирования со схематичным описанием структуры течения, распределения воздуха и неравномерности коэффициента избытка воздуха;

– критерии моделирования реакторами зон с высоким содержанием CO: критерий моделирования неравномерно распределённых низкотемпературных зон и критерий моделирования зоны пламени.

**предложены:**

– способы обработки результатов трехмерного CFD расчёта камеры сгорания для моделирования реакторами зон, лимитирующих окисление CO (низкотемпературные «бедные» струйки и зона пламени), зоны обратных токов и зоны смешения потоков;

– способ оценки состава горючей смеси по распределению объёмного содержания азота в жаровой трубе исследуемой камеры сгорания.

**доказано**, что объединение «бедных» зон в низкотемпературные «бедные» струйки, с адиабатической температурой продуктов сгорания  $T_{adia}=1450\pm 50$  К, и их отдельное моделирование реакторами, а также выделение высокотемпературной зоны пламени с существенной степенью диссоциации  $CO_2$  в CO, при  $T_{adia} > 1900$  К, в реакторной модели камеры сгорания позволяет повысить точность оценки выбросов CO при работе на природном газе.

**Теоретическая значимость исследования** обоснована тем, что:

**изложены:**

– метод расчёта выбросов монооксида углерода из камер сгорания ГТД с обоснованными, по анализу экспериментальных данных и расчётов пламён с детальной химической кинетикой, критериями, алгоритмами и этапами построения реакторной модели камеры сгорания по результатам трехмерного моделирования;

– результаты расчётных исследований, с применением детальной химической кинетики, влияния различных факторов (состав смеси, температура, давление) и распределения воздуха по длине жаровой трубы на процессы образования и выгорания монооксида углерода;

**изучено:**

– влияние степени детализации механизма химической кинетики на количество CO в продуктах сгорания на примере расчёта реактора идеального смешения, исследования показали, что расчётный уровень выбросов монооксида углерода может отличаться на порядок при сравнении детального и глобального механизмов химической кинетики;

– влияние температуры исходной метановоздушной смеси на время задержки воспламенения, получено, что при температуре исходной смеси  $T \leq$

1400 К время задержки воспламенения превышает 1 мс, соответственно, локальное время пребывания горючей смеси в камере сгорания ГТД может оказаться недостаточным для завершения процессов горения;

– расчётно-экспериментальные данные по влиянию температуры на степень термической диссоциации продуктов сгорания, исследования показали, что при оценке выбросов монооксида углерода необходимо учитывать эффекты термической диссоциации  $\text{CO}_2$  в  $\text{CO}$  в зонах с температурой более 1900 К;

– влияние распределение воздуха в жаровой трубе на выбросы монооксида углерода по разработанной реакторной модели камеры сгорания со схематичным описанием структуры течения, исследования показали, что неэффективной организации процессов смешения соответствуют низкая полнота сгорания топлива и высокий уровень выбросов  $\text{CO}$ .

**доказана** эффективность применения метода расчёта выбросов монооксида углерода ( $\text{CO}$ ) с формализованным выделением зон, лимитирующих его окисление в камерах сгорания ГТД, применение которого в среднем уменьшает погрешность прогнозирования зависимости выбросов  $\text{CO}$  от коэффициента избытка воздуха с 40-100 % до 13 % при использовании RANS моделей турбулентности, которые на порядок экономичнее нестационарных URANS (Unsteady RANS) моделей и в 100-1000 раз экономичнее LES (Large Eddy Simulation) моделей турбулентности.

**Значение полученных соискателем результатов исследования для практики** подтверждается тем, что:

– применение разработанного метода позволяет решать практические задачи по прогнозированию выбросов  $\text{CO}$  из камер сгорания ГТД и оптимизации распределения воздуха по длине жаровой трубы, что снижает материальные и временные затраты по доводке камеры сгорания.

– материалы диссертационной работы **использовались** в ОКБ «Мотор» ПАО «ОДК-УМПО» в рамках расчётов камеры сгорания наземной энергетической установки ГТЭ-10/953, разработки технического предложения по газотурбинной энергетической установке ГТУ-2У мощностью 2,5 МВт, оценки вредных выбросов при стендовых испытаниях авиационных двигателей (подтверждено актом внедрения от 8 октября 2024 года), а также в ООО «НПФ «Теплофизика» в рамках исследования рабочих процессов малоэмиссионных камер сгорания газотурбинных газоперекачивающих агрегатов ГТК-10ИР, ГТК-25ИР, ДГ-90 (подтверждено актом внедрения от 8 октября 2024 года);

– результаты диссертационного исследования **включены в курс** «Современные проблемы проектирования авиационных двигателей и энергоустановок» специальности 25.05.02 «Проектирование авиационных двигателей» и «Моделирование процессов горения в камерах сгорания ГТД» для

направления магистратуры 24.04.05 «Двигатели летательных аппаратов» в рамках учебного процесса Уфимского университета науки и технологий (подтверждено актом внедрения от 8 октября 2024 года).

**определены** перспективы практического использования предложенного метода расчёта выбросов монооксида углерода из камер сгорания ГТД на предприятиях авиационного отрасли, таких как ПАО «ОДК-Кузнецов» (г. Самара), АО «ОДК-ПМ» (г. Пермь), ПАО «ОДК-УМПО» (г. Уфа), ПАО «ОДК-Сатурн» (г. Рыбинск), АО «218 АРЗ» (г. Гатчина), АО НПЦ Газотурбостроения «Салют» (г. Москва) и иных.

**Оценка достоверности** результатов исследования выявила:

результаты **экспериментальных исследований** получены на поверенных средствах измерений, аттестованном испытательном оборудовании, обеспечивающем воспроизводимость результатов исследования;

**теория**, лежащая в основе метода расчета выбросов СО из камер сгорания ГТД, построена на классических положениях термодинамики, механики жидкости и газа, теплообмена и теории горения, а также теории воздушно-реактивных двигателей, и согласуется с опубликованными данными по теме диссертации и смежным отраслям;

**идея** базируется на анализе практики проектирования камер сгорания ГТД и научном обобщении опыта математического моделирования рабочих процессов горелочных устройств для оценки уровня выбросов монооксида углерода;

**установлено** качественное и количественное совпадение результатов численного моделирования рабочего процесса камер сгорания ГТД с экспериментальными данными, а также результатов, полученных автором диссертации, с результатами, представленными в независимых литературных источниках по тематике исследования, когда такое сравнение является обоснованным;

**использовано** лицензионное программное обеспечение (CANTERA 2.4.0, ANSYS CFX v. 16.1, Siemens NX 9.0, КОМПАС-3D v.18.1), а также известные численные методы, обладающие высокой точностью при проведении вычислительных экспериментов.

**Личный вклад соискателя** состоит в непосредственном участии соискателя в получении исходных данных, проведении аналитических и расчетных исследований, разработке критериев и алгоритмов обработки результатов трёхмерного моделирования в рамках предлагаемого метода расчёта выбросов монооксида углерода из камер сгорания ГТД, получении результатов аналитических и расчётных исследований, обработке результатов экспериментов, апробации разработанного расчётного метода и подготовке

основных публикаций по выполненной работе. Все результаты, выносимые на защиту, получены автором лично, либо при его определяющем личном участии.

В диссертации отсутствует заимствованный материал без ссылки на автора и (или) источник заимствования, результаты научных работ, выполненные соискателем учёной степени в соавторстве, без ссылок на соавторов.

В ходе защиты диссертационной работы не было высказано критических замечаний. Соискатель Кутлумухамедов А.Р. ответил на задаваемые ему в ходе заседания вопросы и привёл собственную аргументацию по высказанным замечаниям.

Диссертация Кутлумухамедова А.Р. является законченной научно-квалификационной работой, соответствует специальности 2.5.15. Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов и отвечает критериям, предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени кандидата наук. В диссертации решена научная задача, имеющая значение для развития авиационного двигателестроения, направленная на повышение эффективности проектирования камер сгорания газотурбинных двигателей, при оценке выбросов монооксида углерода, за счёт применения нового расчётного метода с детальной химической кинетикой, отличающегося формализованным выделением в реакторной модели камеры сгорания зон, лимитирующих окисление монооксида углерода в низкотемпературных «бедных» струйках и зоне пламени.

На заседании 23 мая 2025 г. диссертационный совет за решение научной задачи, имеющей существенное значение для развития соответствующей отрасли знаний, принял решение присудить Кутлумухамедову Артуру Рамилевичу учёную степень кандидата технических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 11 человек, из них 5 докторов наук по специальности рассматриваемой диссертации, участвовавших в заседании, из 14 человек, входящих в состав совета, проголосовали: за – 11, против – 0, недействительных бюллетеней – 0.

Председатель

диссертационного совета 24.2.379.10  
академик РАН, д.т.н., профессор



Шахматов Евгений Владимирович

Учёный секретарь

диссертационного совета 24.2.379.10  
д.т.н., доцент

23.05.2025

Виноградов Александр Сергеевич