

На правах рукописи



Тарасенко Антон Николаевич

**РАЗРАБОТКА РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ МЕТОДИКИ  
ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ЭМИССИИ ВРЕДНЫХ ВЕЩЕСТВ В КАМЕРАХ  
СГОРАНИЯ ПЕРСПЕКТИВНЫХ ГРАЖДАНСКИХ ГАЗОТУРБИННЫХ  
ДВИГАТЕЛЕЙ И СИЛОВЫХ УСТАНОВОК**

Специальность: 2.5.15. Тепловые, электроракетные двигатели  
и энергоустановки летательных аппаратов

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Москва – 2026

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)».

Научный руководитель: **Силуянова Марина Владимировна**,  
доктор технических наук, профессор.

Официальные оппоненты: **Гурьянов Александр Игоревич**,  
доктор технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П.А. Соловьева», и.о. директора института авиационных технологий и инженерной физики

**Мингазов Билал Галавtdинович**,  
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.

Ведущая организация: АО «ОДК-Авиадвигатель»

Защита диссертации состоится 16 ноября 2026 года в 10 часов 00 минут на заседании диссертационного совета 24.2.327.06 в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» (МАИ) по адресу: 125993, г. Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д. 4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» (МАИ) по адресу: 125993, г. Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д. 4, а также на сайте института по адресу [https://mai.ru/events/defence/?ELEMENT\\_ID=188549](https://mai.ru/events/defence/?ELEMENT_ID=188549).

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2026 г.

Отзывы, заверенные печатью, просим высылать по адресу: 125993, г. Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д. 4, Ученый совет МАИ.

Ученый секретарь  
диссертационного совета 24.2.327.06,  
д.т.н., доцент



Краев Вячеслав Михайлович

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы исследования

Разработка современных авиационных силовых установок (СУ) на основе газотурбинных двигателей (ГТД) представляет собой крайне трудоемкий процесс: с одной стороны, необходимо обеспечить технико-экономическое совершенство такого изделия, а с другой – соответствовать широкому перечню предъявляемых требований. Камера сгорания (КС), будучи одним из основных узлов любого ГТД, реализует наиболее важный с точки зрения термодинамического цикла процесс – подвод в систему тепла путем преобразования химической энергии, запасенной в топливе. Тем не менее, рабочий процесс КС одновременно приводит также к образованию целого ряда вредных веществ, загрязняющих атмосферу. Для контроля за экологической обстановкой Международной организацией гражданской авиации (ИКАО) был разработан и введен в действие том II Приложения 16 к Конвенции о международной гражданской авиации, который вводит перечень нормируемых загрязнителей, методы их определения, предельные значения, а также единую систему количественных показателей, и который должен выполняться всеми производителями авиационной техники. С момента создания нормы в части предельных выбросов оксидов азота ( $\text{NO}_x$ ) неоднократно пересматривались, и несмотря на отсутствие изменений с 2014 г. дальнейшее их ужесточение со стороны ИКАО с каждым годом становится все более вероятным: так, в ежегодном Экологическом отчете ИКАО за 2025 г. в качестве вероятных долгосрочных сценариев по борьбе с  $\text{NO}_x$  уже рассматривается ужесточение требований к 2036 г. вплоть до 100 % относительно экспертных оценок, сделанных в период седьмого заседания Комитета по защите окружающей среды от воздействия авиации (CAEP/7). Помимо этого, в 2022 г. в Российской Федерации введен действие национальный стандарт в части эмиссии вредных веществ авиационными двигателями, а именно «Нормы летной годности. Охрана окружающей среды. Эмиссия загрязняющих веществ авиационными двигателями. Нормы и испытания. НЛГ 34» (НЛГ-34), полностью гармонизированный с требованиями ИКАО в рамках 4-го издания тома II Приложения 16 с поправкой 9, что значительно повышает актуальность вопроса учета экологических требований при разработке новых двигателей.

Гарантировать, что двигатель соответствует требованиям в части эмиссии вредных веществ возможно только путем проведения соответствующих дорогостоящих испытаний. Несмотря на высокую достоверность при соблюдении правильной методологии постановки эксперимента, в условиях создания перспективных двигателей с высокими параметрами рабочего процесса – суммарной степенью повышения давления  $\pi_k$  более 60 и температурами на входе в КС более 900 К – определение характеристик КС таким способом существенно усложняется. Более того, на данный момент обеспечить проведение автономных испытаний при таких параметрах в России оказывается крайне затруднительно. Альтернативный подход – исследование КС в составе газогенератора двигателя – является более трудоемким и дорогостоящим, но при этом менее подробным, и слабо применим на ранних этапах разработки. Снизить объем требуемых испытаний возможно за счёт применения методов компьютерного моделирования и созданных на его основе оптимизационных методик. Тем не менее, степень их достоверности и пределы предиктивной способности могут быть оценены исключительно по результатам валидации, которая предполагает наличие качественных экспериментальных данных. В случае такого узла как КС, для которой характерен большой объем взаимосвязанных одновременно протекающих процессов, использование расчетных подходов само по себе не гарантирует повышения эффективности процесса разработки. Эти факторы обуславливают существенную актуальность проблемы создания достоверных

предиктивных инструментов и методик, позволяющих оперативно оценивать экологические характеристики КС на начальном этапе разработки для сокращения затрат на последующую доводку КС. Решению этих проблем посвящена данная работа.

### **Степень разработанности темы исследования**

Рассматриваемой задаче по разработке методики прогнозирования эмиссии вредных веществ в КС авиационных двигателей посвящено множество исследований, как в России, так и за рубежом. В части полуэмпирических и аналитических способов определения основных и экологических характеристик КС, в том числе, при помощи нуль- и одномерных полуэмпирических моделей процесса горения в КС, можно отметить работы коллективов Самарского университета им. С.П. Королева, коллектива Саркисова А.А., Рудакова О.А. и Митрофанова В.А., коллектива КНИТУ-КАИ. Работы коллективов АО «ОДК-Авиадвигатель» и Пермского политехнического университета, коллективов Самарского университета им. С.П. Королева, коллективов ИТ СО РАН, коллективов РГТУ им. П.А. Соловьева, коллективов ЦИАМ, коллектива КНИТУ-КАИ, а также коллективов NASA Glenn Research Center и GE Aerospace посвящены применению различных подходов к компьютерному и численному моделированию процессов горения для определения состава продуктов сгорания и эмиссии вредных веществ. Работы Кузнецовой Т.А. и Августиновича В.Г., Kayaalp K., Ge F. и Chen L. посвящены возможности прогнозирования при помощи комбинированных методов, в том числе с использованием методов машинного обучения и нейросетевых моделей. Работы Сальникова А.В., Железняковой А.Л. посвящены вопросам, связанным с валидацией и верификацией при использовании численного и компьютерного моделирования.

Несмотря на большое количество исследований, посвященных вопросу прогнозирования эмиссии вредных веществ, основными проблемами остаются, во-первых, обобщение результатов на различные типы ГТД, схемы организации малоэмиссионного горения и виды применяемых топлив, а во-вторых, количественное определение влияния различных факторов: от параметров рабочего процесса до геометрических размеров отдельных элементов КС. Кроме этого, в большинстве работ не проводится многокритериальной валидации применяемой математической модели, и используются либо крайне затратные методы, либо, наоборот, вводятся достаточно значимые допущения. Также, чаще всего не проводится анализ за пределами параметров рассмотренных объектов, или рассматриваемые объекты и их параметры не являются современными или перспективными. Таким образом, в проблеме прогнозирования эмиссии вредных веществ остаются открытыми вопросы достоверности математических моделей для проведения расчетных исследований, обобщения подходов для различных современных и перспективных конфигураций и параметров КС, определения качественного и количественного влияния различных факторов на эмиссию вредных веществ в широком диапазоне значений, а также обеспечение возможности прогнозирования экологических характеристик на ранних этапах разработки КС.

**Объектами диссертационного исследования** являются:

- малоэмиссионные КС современных и перспективных гражданских ГТД;
- аналитические, эмпирические и иные подходы, а также методы компьютерного моделирования применительно к прогнозированию выбросов вредных веществ в КС современных и перспективных гражданских ГТД;
- факторы, влияющие на образование вредных веществ в КС современных и перспективных гражданских ГТД.

**Предметом исследования** является вопросы применения расчетно-экспериментальных подходов для достоверного прогнозирования экологических характеристик КС современных и перспективных гражданских ГТД и СУ.

**Целью работы** является создание методики прогнозирования эмиссии вредных веществ в КС современных и перспективных гражданских ГТД и СУ, применимой на ранних этапах разработки, с использованием комплекса достоверных расчетно-экспериментальных данных.

Для достижения поставленной цели были сформированы следующие **задачи работы**:

1) провести анализ действующих экологических требований, предъявляемых к КС современных гражданских ГТД и СУ, а также подходов к организации малоэмиссионного горения и существующих методов прогнозирования эмиссии вредных веществ;

2) осуществить и обосновать выбор объектов валидации и валидационного базиса применительно к КС современных и перспективных гражданских ГТД и СУ, а также уточнить методики валидации и проведения испытаний для ее обеспечения применительно к КС, и на их основе провести валидацию расчетных стратегий для моделирования процессов горения и определения экологических характеристик;

3) на основе анализа способов организации малоэмиссионного горения провести анализ принципиальных конструкций КС современных и перспективных гражданских ГТД и СУ для выявления перечня потенциальных факторов влияния на эмиссию оксидов азота и монооксида углерода, которые можно учесть на ранних этапах разработки;

4) определить наиболее трудоемкие для расчетного исследования факторы влияния, получение данных для которых более достоверно и менее ресурснозатратно с использованием экспериментальных методов;

5) разработать серию модельных КС и провести с на их основе расчетно-параметрические исследования с целью количественного и качественного определения влияния различных факторов на эмиссию оксидов азота и оксидов углерода;

6) разработать структуру расчетно-экспериментальной методики, алгоритм ее применения и обобщить расчетно-экспериментальные данные при помощи методов машинного обучения с последующей валидацией полученных моделей аппроксимации;

7) провести апробацию разработанной методики путем ее применения при разработке модельных КС ГТД с перспективными параметрами рабочего процесса для использования в составе СУ гражданских дозвуковых и сверхзвуковых самолетов.

### **Научная новизна**

1. Разработана методика прогнозирования эмиссии вредных веществ в КС современных и перспективных гражданских ГТД, применяемая на начальных этапах разработки для широкого диапазона параметров рабочего процесса с минимизацией необходимых экспериментальных данных и повышенной достоверностью за счет использования многостадийной валидации.

2. Разработанная методика обобщена для анализа экологических характеристик КС современных и перспективных гражданских ГТД с различными схемами организации малоэмиссионного горения, в том числе, для КС двигателей с высокими параметрами рабочего процесса, а также для КС, работающих на альтернативных топливах типа SAF.

3. Разработаны алгоритмы применения методики для оценки экологических характеристик КС современных и перспективных гражданских ГТД и СУ, а также программная реализация с использованием нейросетевой модели.

### **Теоретическая и практическая значимость**

В работе определены качественные и количественные зависимости эмиссии вредных веществ от различных факторов влияния, таких как схема организации малоэмиссионного горения в КС, параметры рабочего процесса, геометрические параметры. Установлена связь между стехиометрическим значением скалярной диссипации и прогнозируемыми значениями  $\text{NO}_x$  и монооксида углерода (CO) при

использовании модели многообразия тонких фронтов пламени, а также выполнена аппроксимация этой зависимости для автоматизации и повышения достоверности расчетов. Разработанная методика позволяет на ранних этапах разработки КС по набору параметров геометрии и рабочего процесса с учетом некоторых известных экспериментальных данных прогнозировать потенциально возможную эмиссию вредных веществ с обеспеченной достоверностью. Учета влияния множества факторов позволяет на последующих этапах проектирования локализовать элементы, требующие доработки, и оперативно оценить результат внесенных изменений, тем самым обеспечивая рационализацию требующихся временных, материальных и человеческих ресурсов.

Результаты, полученные в ходе разработки методики, а также сама методика могут быть использованы при проведении исследований перспективных технологий малоэмиссионного горения, в том числе, с использованием альтернативных топлив. В рамках работы продемонстрировано применение методики на примере разработки модельных обликов малоэмиссионных КС перспективных ГТД для применения в составе СУ гражданских дозвуковых и сверхзвуковых самолетов.

### **Методология и методы исследования**

Общий методологический подход работы базируется на основных положениях теории горения и прикладной газовой динамики, а также современных методах математической статистики в приложении теории искусственного интеллекта и машинного обучения. Проведение расчетных исследований проводилось с использованием ГОСТ Р 57700.44-2024 «Численное моделирование физических процессов. Термины и определения», ГОСТ Р 57700.4-2017 «Численное моделирование физических процессов. Термины и определения в областях механики сплошных сред: гидромеханика, газовая динамика», ГОСТ Р 57700.22-2020 «Компьютерные модели и моделирование. Классификация». При проведении валидации расчетных моделей использовались ГОСТ Р 57700.23-2020 «Компьютерные модели и моделирование. Валидация. Общие требования», ГОСТ Р 57700.24-2020 «Компьютерные модели и моделирование. Валидационный базис», ГОСТ Р 57700.25-2020 «Компьютерные модели и моделирование. Процедуры валидации». Обработка результатов исследований проводилась с использованием программного обеспечения ЭВМ. При проведении компьютерного моделирования и разработке моделей применялись верифицированные программные продукты.

### **Основные положения диссертации, выносимые на защиту**

Расчетно-экспериментальная методика прогнозирования эмиссии вредных веществ в КС, применимая на начальных этапах разработки, в том числе для двигателей с высокими рабочими параметрами.

Многокритериальная валидация, методика ее проведения и подход к формированию валидационного базиса применительно к КС для разработки математической модели, обеспечивающей достоверное определение экологических характеристик.

Результаты расчетно-параметрических исследований влияния различных факторов на экологические характеристики КС.

Применение методов машинного обучения для аппроксимации параметров расчетных моделей и характеристик КС, а также для прогнозирования эмиссии вредных веществ.

### **Личный вклад соискателя**

Автором сформулированы цель, задачи и методы исследования, выполнен обзор научных работ по теме диссертационного исследования, а также анализ нормативной документации в части ограничения вредных выбросов авиационной техникой и

различных подходов к их прогнозированию. Разработаны расчетно-экспериментальная методика прогнозирования эмиссии вредных веществ в КС ГТД, применимая на ранних этапах разработки двигателя, методика проведения валидации и формирования валидационного базиса применительно к КС ГТД, валидированная математическая модель для исследования процессов в КС ГТД, нейросетевая модель прогнозирования эмиссии вредных веществ в КС ГТД, а также облики модельных малоэмиссионных КС для двигателей с перспективными параметрами рабочего процесса.

#### **Степень достоверности положений, результатов и выводов работы**

Применяемая математическая модель для исследования факторов влияния параметров геометрии и рабочего процесса прошла многокритериальную валидацию в соответствии с предложенной методикой, основанной на требованиях ГОСТ, в четырех различных КС и показала высокое соответствие с результатами испытаний. При использовании расчетной модели для всех рассмотренных случаев достигнута численная сходимость. Применяемые модели и допущения при описании физических и химических явлений согласуются с известными подходами, описанными в различных литературных источниках, и опубликованными исследованиями по рассматриваемой тематике. Все расчеты выполнялись в верифицированных программных продуктах. Экспериментальные данные были получены на поверенном сертифицированном оборудовании. Качество прогнозирования эмиссии вредных веществ при использовании нейросетевой модели оценено по результатам двойной валидации с результатами тестовой подвыборки и результатами испытаний объектов валидации. Выбранные подходы к аппроксимации и прогнозированию экологических характеристик и полученные результаты не противоречат результатам, опубликованным другими авторами.

#### **Реализация и внедрение результатов работы**

Результаты работы использовались при разработке и анализе КС для проекта СУ сверхзвукового пассажирского самолета второго поколения в рамках Программы создания и развития научного центра международного уровня «Сверхзвук» на 2020-2025 годы при финансовой поддержке Минобрнауки России (Соглашение от 24 июня 2021 г. № 075-15-2021-605). Также результаты работы использовались в ФАУ «ЦИАМ им. П.И. Баранова» при выполнении научно-исследовательских работ по тематике при разработке малоэмиссионных КС и при выполнении исследований в рамках проекта №24-29-00152 при финансовой поддержке Российского научного фонда

#### **Апробация результатов работы**

Основные результаты исследований докладывались на различных всероссийских и международных конференциях, в том числе, 20-я Международная конференция «Авиация и космонавтика» (22-26 ноября 2021 г., г. Москва); VII Всероссийская научная конференция «Теплофизика и физическая гидродинамика» (5-14 сентября 2022 г., Россия, г. Сочи); Восьмая Российская национальная конференция по теплообмену (17-22 октября 2022 г., г. Москва); Научно-технический конгресс двигателестроения в рамках Международного форума по двигателестроению (26-28 октября 2022 г., г. Москва); 21-ая Международная конференция «Авиация и космонавтика» (21-25 ноября 2022 г., г. Москва); 22-ая Международная конференция «Авиация и космонавтика» (20-24 ноября 2023 г., г. Москва); I Международная молодежная научная конференция «Гагаринские чтения» (9-12 апреля 2024 г., г. Москва); XVII Минский международный форум по тепломассообмену (20-24 мая 2024 г., Республика Беларусь, г. Минск); 11-й Международный симпозиум по неравновесным процессам, плазме, горению и атмосферным явлениям (7-11 октября 2024 г., Россия, г. Сочи); Всероссийский научно-технический форум по двигателям и энергетическим установкам имени Н.Д. Кузнецова (10-11 октября 2024 г., Россия, г. Самара); Научно-технический конгресс по

двигателестроению в рамках Международного форума двигателестроения (23-25 октября 2024 г., г. Москва); 23-ая Международная конференция «Авиация и космонавтика» (18-22 ноября 2024 г., г. Москва); LI Международная молодежная научная конференция «Гагаринские чтения» (14-16 апреля 2025 г., г. Москва).

### Структура и объем работы

Диссертационная работа состоит из введения, основной части, заключения, списка сокращений и условных обозначений и списка литературы. Основная часть диссертационной работы состоит из четырех глав, включает 76 рисунков и 25 таблиц. Список литературы включает 267 источников. Общий объем работы составляет 168 страниц.

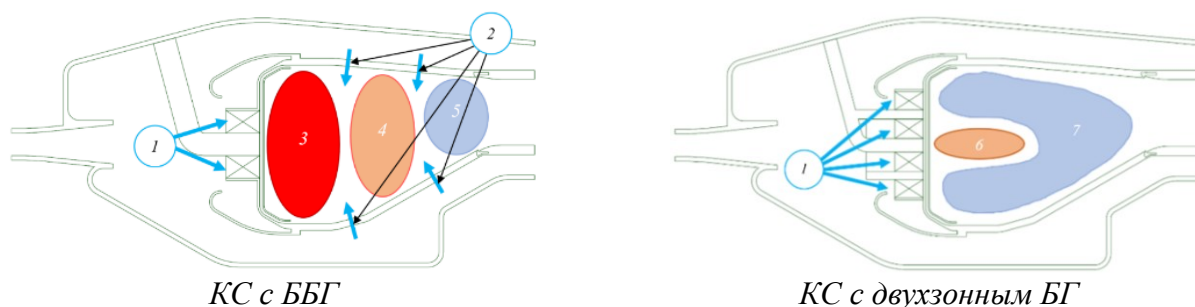
### Публикации

Результаты диссертационного исследования опубликованы в 28 научных работах, из которых 3 работы опубликованы в научных изданиях, рекомендованных ВАК по специальности 2.5.15. – Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов, 3 работы опубликованы в научных журналах, индексируемых в международных базах цитирования, 22 работ опубликовано в сборниках международных и всероссийских конференций, симпозиумов, форумов и т.д. В соавторстве оформлено 2 патента на полезные модели.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы исследования, проанализирована степень ее разработанности, обозначен предмет и объект исследования, определена цель диссертационной работы, поставлены задачи исследования, отражена научная новизна и практическая значимость работы, представлены используемые методы исследования, отмечены основные положения диссертации, выносимые на защиту, обозначен личный вклад соискателя в работу, а также обоснована достоверность полученных результатов.

В **первой главе** выполнен анализ текущего состояния в части требований и подходов к определению экологических характеристик КС ГТД. На основе действующих нормативных документов определены виды подлежащих регулированию вредных веществ, способы их учёта, а также количественные характеристики, используемые для определения соответствия установленным требованиям. В ходе анализа литературных источников определены подходы к организации малоэмиссионного горения и принята общая классификация типов малоэмиссионных КС с разделением подходов на КС богато-бедного (ББГ) и бедного типов (БГ) (рисунок 1).



- 1 – воздух, идущий через фронтальное устройство; 2 – воздух, идущий через систему основных отверстий; 3, 4, 5 – зоны горения, смешения (разбавления) и охлаждения, соответственно; 6, 7 – пилотная и основная зоны горения, соответственно.

Рисунок 1 – Основные схемы организации малоэмиссионных КС

В ходе проведения статистического анализа сертифицированных авиационных ГТД на основе информации, опубликованной в официальной базе данных ИКАО, установлено, что запасы по эмиссии  $\text{NO}_x$ , определенные относительно норм 2014 г., демонстрируют

существенное преимущество КС с БГ с точки зрения эмиссии  $\text{NO}_x$  над КС с ББГ в части максимальных значений. При этом, устойчиво высокий запас по эмиссии  $\text{NO}_x$  обеспечивает только усовершенствованная технология ББГ (УББГ) TALON-X, использующаяся в линейках двигателей Pratt & Whitney PW11xx, PW19xx, PW15xx, PW14xx, в то время как у линеек двигателей General Electric GEnx и CFM International LEAP, в которых используется, соответственно, первое и второе поколения TAPS, относящиеся к КС с двухзонным БГ, только первое поколение TAPS обеспечивает стабильно низкую эмиссию, а в случае второго поколения TAPS запасы по существенно зависят от конкретной модели двигателя. Хотя КС с технологией TALON-X обеспечивают запас по эмиссии CO в среднем не более 75 %, КС линейки двигателей Rolls Royce Trent 7000, которые также относятся к КС с ББГ, демонстрируют запасы по CO более 90 % при почти нулевой эмиссии несгоревших углеводородов (НС). Это означает, что запас по эмиссии  $\text{NO}_x$  в КС с ББГ и УББГ потенциально может быть обеспечен путем незначительного снижения полноты сгорания. В ходе статистического анализа приведённых величин индексов эмиссии  $\text{NO}_x$  ( $EI_{\text{NO}_x}$ ) и CO ( $EI_{\text{CO}}$ ) всех рассмотренных двигателей на различных режимах взлётно-посадочного цикла (ВПП), было обнаружено, что характер поведения  $EI_{\text{NO}_x}$  и  $EI_{\text{CO}}$  для двигателей с КС одного и того же типа оказывается крайне близок, что может быть использовано для выстраивания зависимости от параметров двигателя.

В завершении главы проведен анализ механизмов образования нормируемых загрязнителей, а также различных существующих расчётных подходов к определению экологических характеристик КС для выбора наиболее оптимальной с точки зрения применимости для многопараметрического исследования расчётной стратегии.

Во **второй главе** на основе нормативной документации и, с учетом специфики КС, предложены методика проведения валидации и критерии выбора объектов валидации и наполнения валидационного базиса, на основе чего произведен выбор соответствующих объектов (рисунок 2). С учетом стендового оборудования для проведения испытаний КС и сформулированной методики проведения валидации, предложена методика проведения испытаний КС в обеспечение валидации расчетных моделей.

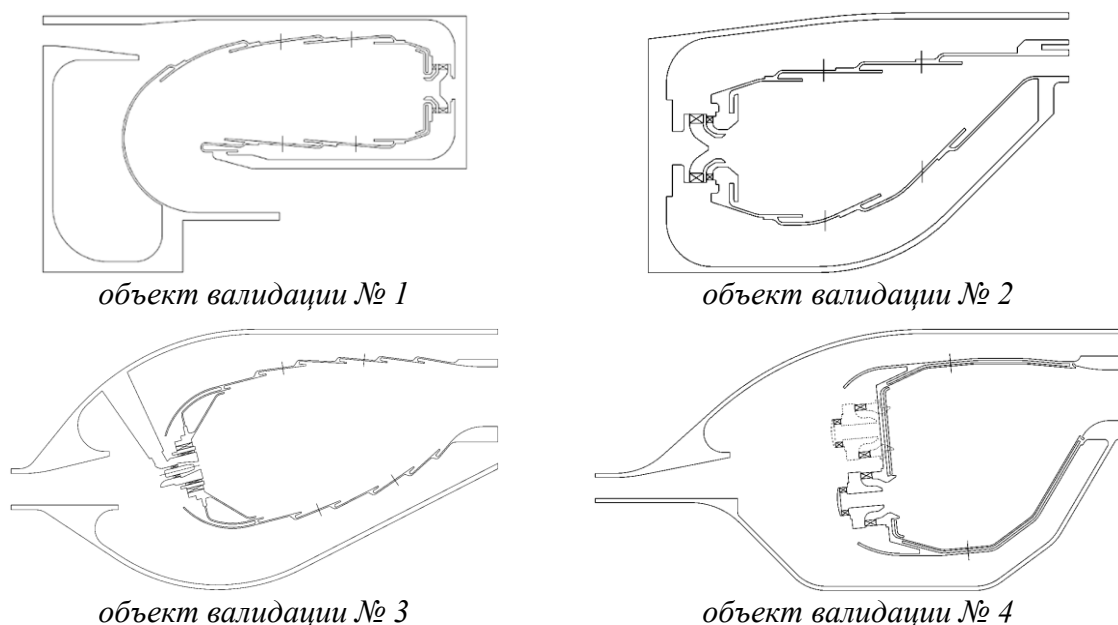


Рисунок 2 – Схемы выбранных объектов для валидации

На основе анализа литературных источников, определены наиболее подходящие варианты математических моделей (таблица 1).

Таблица 1 – Варианты математических моделей для получения расчетных данных с целью дальнейшей валидации

| №                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | Модель турбулентности      | Модель горения                                | Модель образования NO <sub>x</sub> | Модель образования остальных ПС                            |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------|-----------------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------------------------------|
| 1                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | <i>k-ε</i> RNG, МПФ        | Комбинированная модель FR/EDM                 | Термический механизм Зельдовича    | Двухстадийная глобальная кинетика Вестбрука и Драйера      |
| 2                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | <i>k-ε</i> Realizable, МПФ |                                               |                                    |                                                            |
| 3                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | <i>k-ω</i> SST             |                                               |                                    |                                                            |
| 4                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | <i>k-ε</i> RNG, МПФ        | Модель FGM с замыканием TXB по модели Зимонта | Уравнения скалярного переноса      | Уравнение скалярного переноса для CO; PDF для остальных ПС |
| 5                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | <i>k-ε</i> Realizable, МПФ |                                               |                                    |                                                            |
| 6                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | <i>k-ω</i> SST             |                                               |                                    |                                                            |
| ПС – продукты сгорания; МПФ – масштабируемые пристеночные функции; FR/EDM – комбинированная модель конечно-скоростной химии (Finite-Rate) и модели диссипации вихря (Eddy Dissipation model); FGM – модель многообразия тонких фронтов пламени (Flamelet Generated Manifold); TXB – турбулентно-химическое взаимодействие. |                            |                                               |                                    |                                                            |

Также на основе анализа определены кинетические механизмы горения керосин-воздушных смесей и составы имитации суррогатов керосина (таблица 2).

Таблица 2 – Кинетические механизмы горения керосин-воздушной смеси для проведения валидации

| №                                                                                                                                                                                                                                                                  | Название механизма и ключевые авторы | Состав имитации суррогата керосина                                                                           |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1                                                                                                                                                                                                                                                                  | RKM12 (Kundu et al.)                 | C <sub>11</sub> H <sub>21</sub>                                                                              |
| 2                                                                                                                                                                                                                                                                  | RKM14 (Kundu et al.)                 | C <sub>12</sub> H <sub>23</sub>                                                                              |
| 3                                                                                                                                                                                                                                                                  | RKM45 (Луховицкий и др.)             | SF2                                                                                                          |
| 4                                                                                                                                                                                                                                                                  | SK54 (Yao et al.)                    | nC <sub>12</sub> H <sub>26</sub>                                                                             |
| 5                                                                                                                                                                                                                                                                  | HyChem Skeletal (A2, HT)             | C <sub>11</sub> H <sub>21</sub> (posf10325)                                                                  |
| 6                                                                                                                                                                                                                                                                  | SJF5 (Савельев и др.)                | 1) SF2; 2) SF5                                                                                               |
| 7                                                                                                                                                                                                                                                                  | SK91 (Lucas et al.)                  | 1) SF2; 2) nC <sub>10</sub> H <sub>22</sub> + C <sub>3</sub> H <sub>7</sub> + C <sub>9</sub> H <sub>18</sub> |
| 8                                                                                                                                                                                                                                                                  | HyChem Detailed (A2, DHT)            | C <sub>11</sub> H <sub>22</sub> (posf10325)                                                                  |
| 9                                                                                                                                                                                                                                                                  | DKM225 (Dagaut et al.)               | 1) SF2; 2) nC <sub>10</sub> H <sub>22</sub> + C <sub>3</sub> H <sub>7</sub> + C <sub>9</sub> H <sub>18</sub> |
| 10                                                                                                                                                                                                                                                                 | POLIMI (Creck HT&LT)                 | 1) SF2; 2) SF5                                                                                               |
| SF2 – смесь nC <sub>10</sub> H <sub>22</sub> и C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> ; SF5 – смесь nC <sub>12</sub> H <sub>26</sub> , nC <sub>10</sub> H <sub>22</sub> , iC <sub>16</sub> H <sub>34</sub> , C <sub>7</sub> H <sub>8</sub> и C <sub>8</sub> H <sub>18</sub> |                                      |                                                                                                              |

Для разработки компьютерной модели внутрикамерных процессов выбраны общие неизменные составляющие численной схемы и математической модели. Во всех случаях используется стационарная периодическая постановка с рассмотрением единичного сектора КС, включающего одно фронтное устройство (ФУ) для одноярусных КС и два ФУ для двухъярусных КС. Граничные условия (ГУ) на входе в расчетную область представляют собой одномерный массив вида  $S = \{p, T, I_t, d_r\}$ , где  $p$  – полное давление потока воздуха,  $T$  – полная температура потока воздуха,  $I_t$  – интенсивность турбулентности потока воздуха,  $d_r$  – гидравлический диаметр. На выходе из расчетной области задается ГУ в виде массового расхода газа  $G$ . Стенки, ограничивающие расчетную область, считаются адиабатическими. Моделирование течения газа проводится путем численного решения системы уравнений Навье-Стокса для сжимаемого газа совместно с уравнениями модели турбулентности, уравнениями модели имитации распыла жидкого топлива, уравнениями модели горения и уравнениями модели образования NO<sub>x</sub>. Для имитации распыла используется модель дискретной фазы (DPM) с учетом испарения капель, начальные размеры которых задаются по распределению Розин-Раммлера. В качестве метода интерполяции градиентов потока используется ориентированный по ячейкам метод наименьших квадратов. Для интерполяции давления применяется схема PRESTO. Схема адвекции для всех уравнений – второго порядка по направлению потока.

По результатам валидации математических моделей из таблицы 1 на предмет соответствия результатам испытаний (рисунок 3), выбрана модель № 5 из таблицы 1: при использовании совместно с кинетическим механизмом № 3 из таблицы 2 она обеспечила точность прогнозирования основных и экологических характеристик более 97 %.

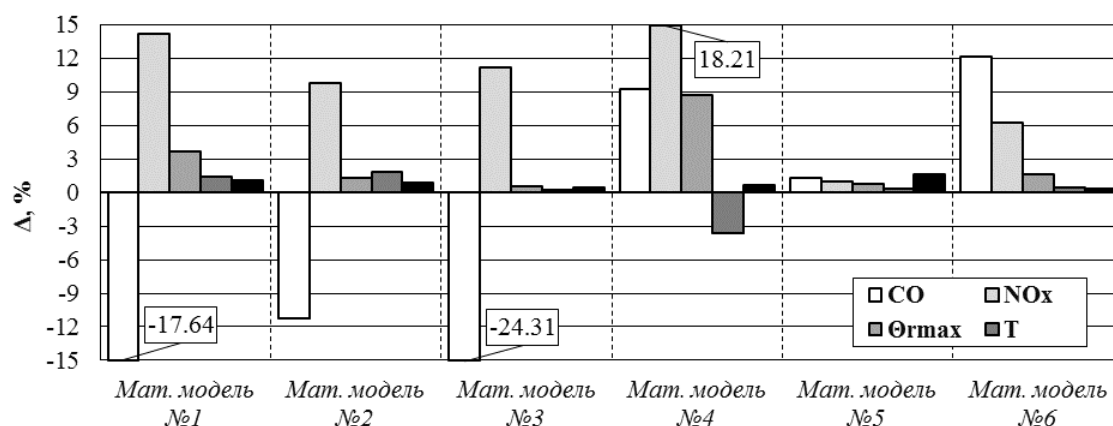


Рисунок 3 – Результаты валидации математических моделей из таблицы 1 на основе валидационного базиса объекта № 1 на максимальном режиме

По результатам валидации кинетических механизмов и составов суррогатов керосина из таблицы 2 на предмет соответствия результатам испытаний (рисунок 4), выбраны пары № 3, № 6-1 и № 6-2: при их использовании точность прогнозирования основных и экологических характеристик составила более 97 %. Влияние выбора состава суррогата в случае механизма № 6 оказалось малозначительным.

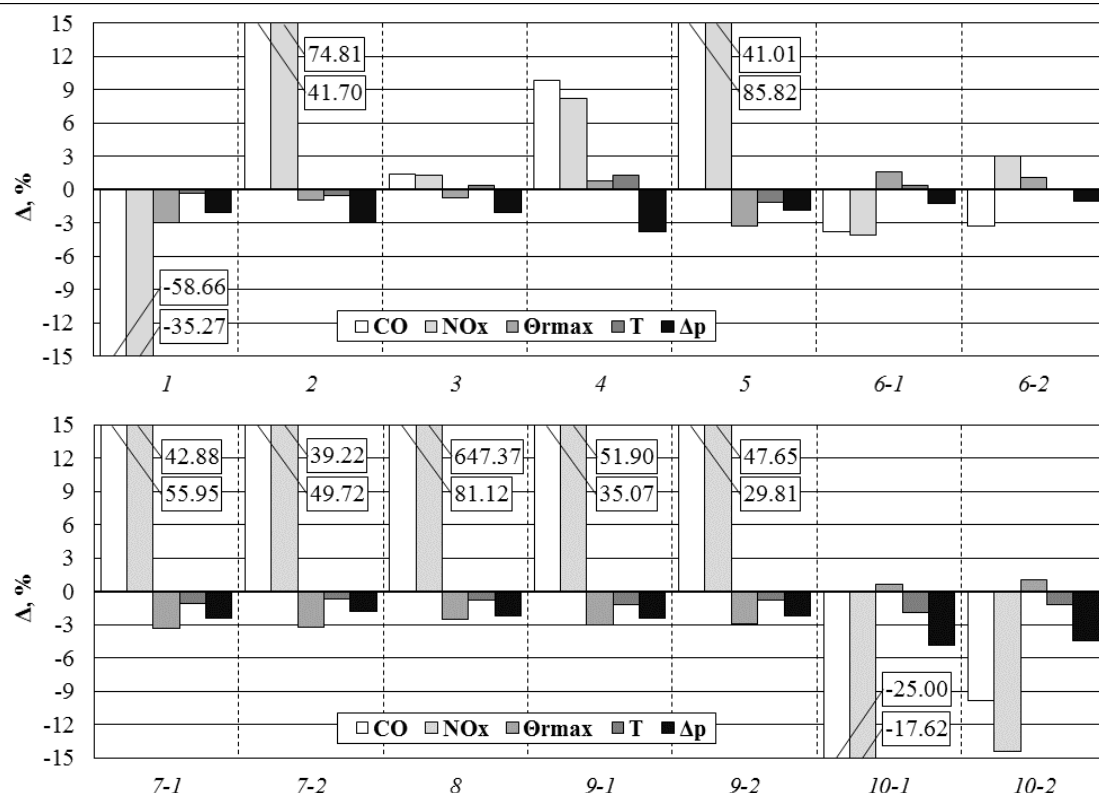


Рисунок 4 – Результаты валидации кинетических механизмов из таблицы 2 на основе валидационного базиса объекта № 1 на максимальном режиме

При рассмотрении остальных режимов, включенных в валидационный базис объекта № 1, определено, что механизм № 6 демонстрирует более существенное снижение

точности при понижении параметров рабочего процесса, чем механизм № 3 (рисунок 5), поэтому для дальнейшей валидации было решено использовать механизм № 3.

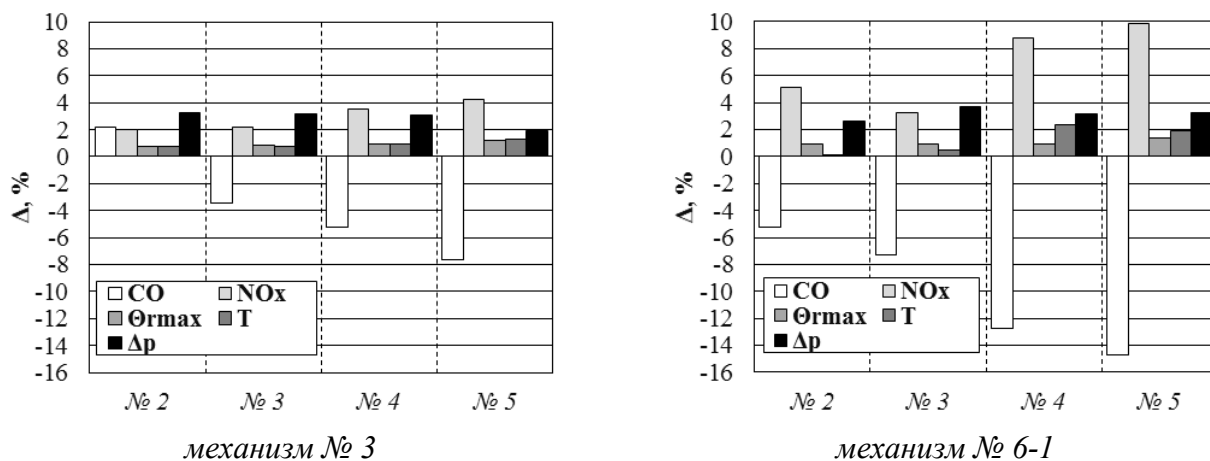


Рисунок 5 – Результаты валидации кинетических механизмов № 3 и № 6-1 на основе валидационного базиса объекта № 1 на режимах ниже максимального

По результатам валидации математической модели № 5 совместно с кинетическим механизмом № 5 на основе валидационных базисов объектов № 3 и № 4 было определено, что данная комбинация обеспечивает среднюю точность в 96 % при прогнозировании экологических характеристик и 99 % при прогнозировании основных характеристик КС (рисунок 6).

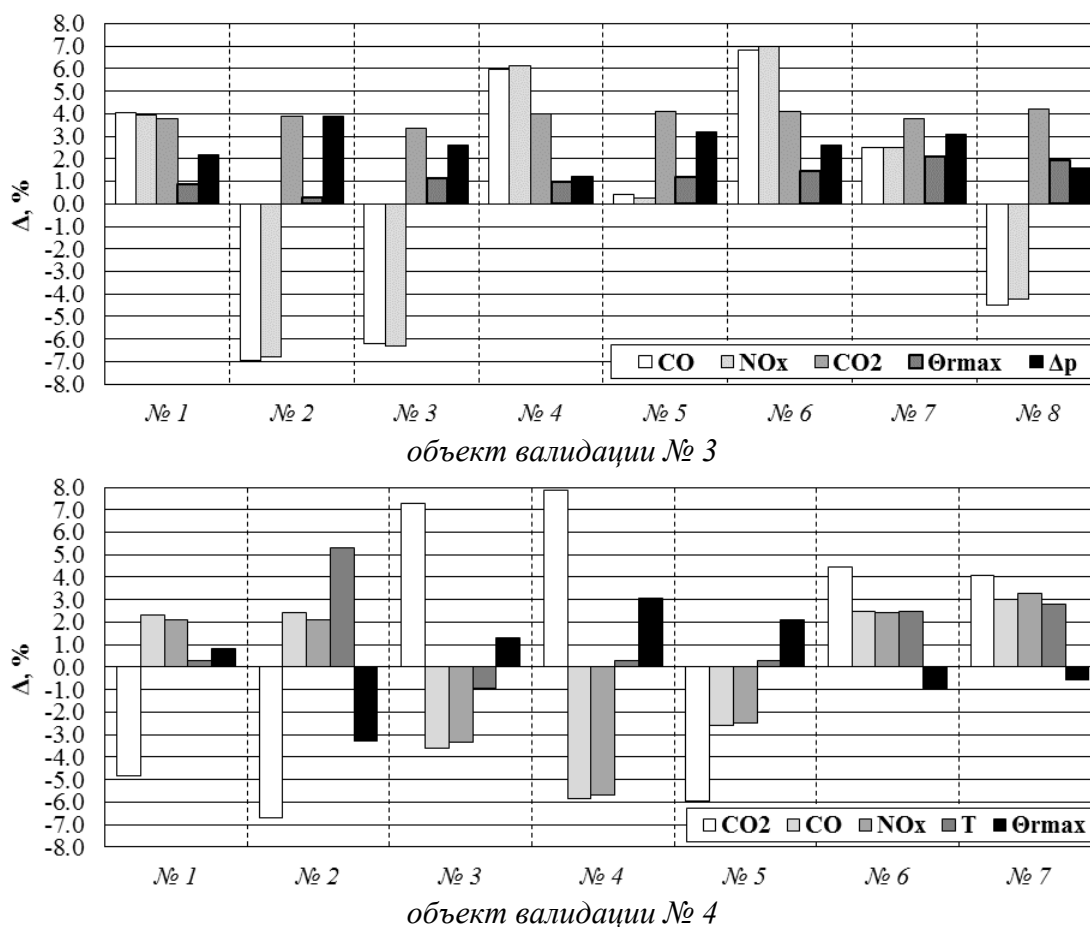


Рисунок 6 – Результаты дополнительной валидации на основе валидационных базисов объектов № 3 и № 4 на различных режимах

В ходе исследования была обнаружено влияние выбранной величины стехиометрического значения скалярной диссипации  $\chi_{ст}$  на значение мольных долей  $NO_x$  и  $CO$ . В связи с тем, что математическая модель необходима для проведения достоверных расчетно-параметрических исследований, для которых отсутствуют экспериментальные данные, было предложено исключить необходимость в них, связав  $\chi_{ст}$  с параметрами КС. На основе данных, полученных в ходе валидации, была проведена аппроксимация при помощи полиномиальной регрессии и по результатам сравнения с результатами эмпирического подбора получено, что использование регрессии увеличивает отклонение в среднем на 3 процентных пункта, однако средняя точность прогнозирования эмиссии по-прежнему остается высокой: порядка 93 % (рисунок 7).

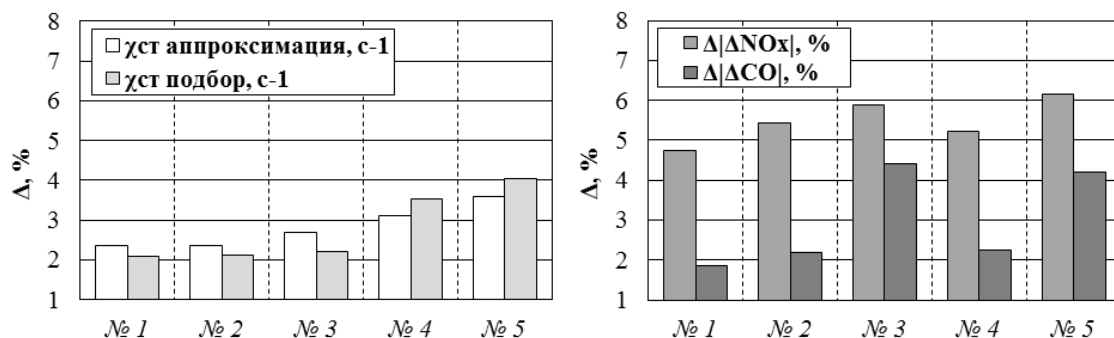


Рисунок 7 – Сравнение значений  $\chi_{ст}$ , полученных двумя подходами, и абсолютный прирост погрешности при определении экологических характеристик, связанный с различиями значений  $\chi_{ст}$ , на основе валидационного базиса объекта № 2

В **третьей главе** проведено комплексное расчётно-параметрическое исследование для выявления качественного и количественного влияния различных факторов на экологические характеристики КС. В качестве современного типа малоэмиссионных КС выбрана КС с ББГ, а в качестве перспективных – КС с УББГ и КС с БГ типа TAPS. На основе структурного анализа разработаны модельные КС, обеспечивающие возможность эффективного варьирования параметров (рисунок 8).

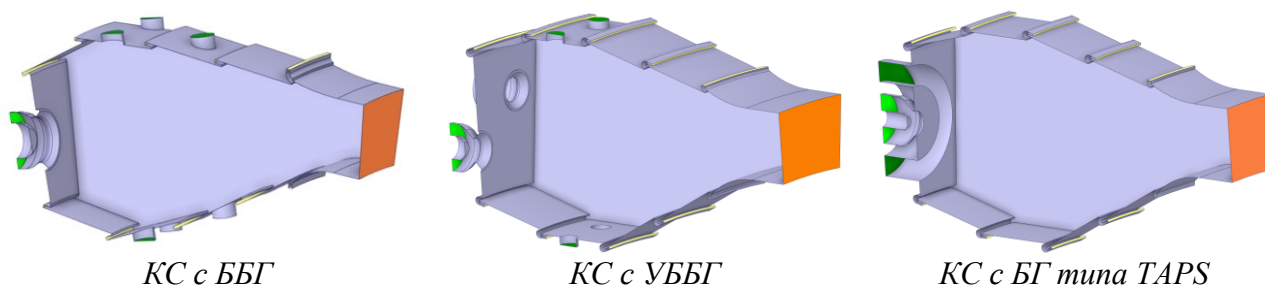


Рисунок 8 – Общий внешний вид модельных объектов для параметрического исследования.

С учётом возможностей математической модели сформулированы основные допущения и упрощения, принимаемые в исследовании, а также определены оптимальные соотношения для ряда параметров в КС с целью сокращения объема варьирования. Используя валидированную математическую модель совместно с аппроксимацией для  $\chi_{ст}$ , проведены расчётные исследования для оценки влияния различных факторов на эмиссию  $NO_x$  и  $CO$  (рисунок 9). Аналогично исследованиям, проведенным для КС с ББГ, были проведены расчётно-параметрические исследования для КС с УББГ и КС с БГ.

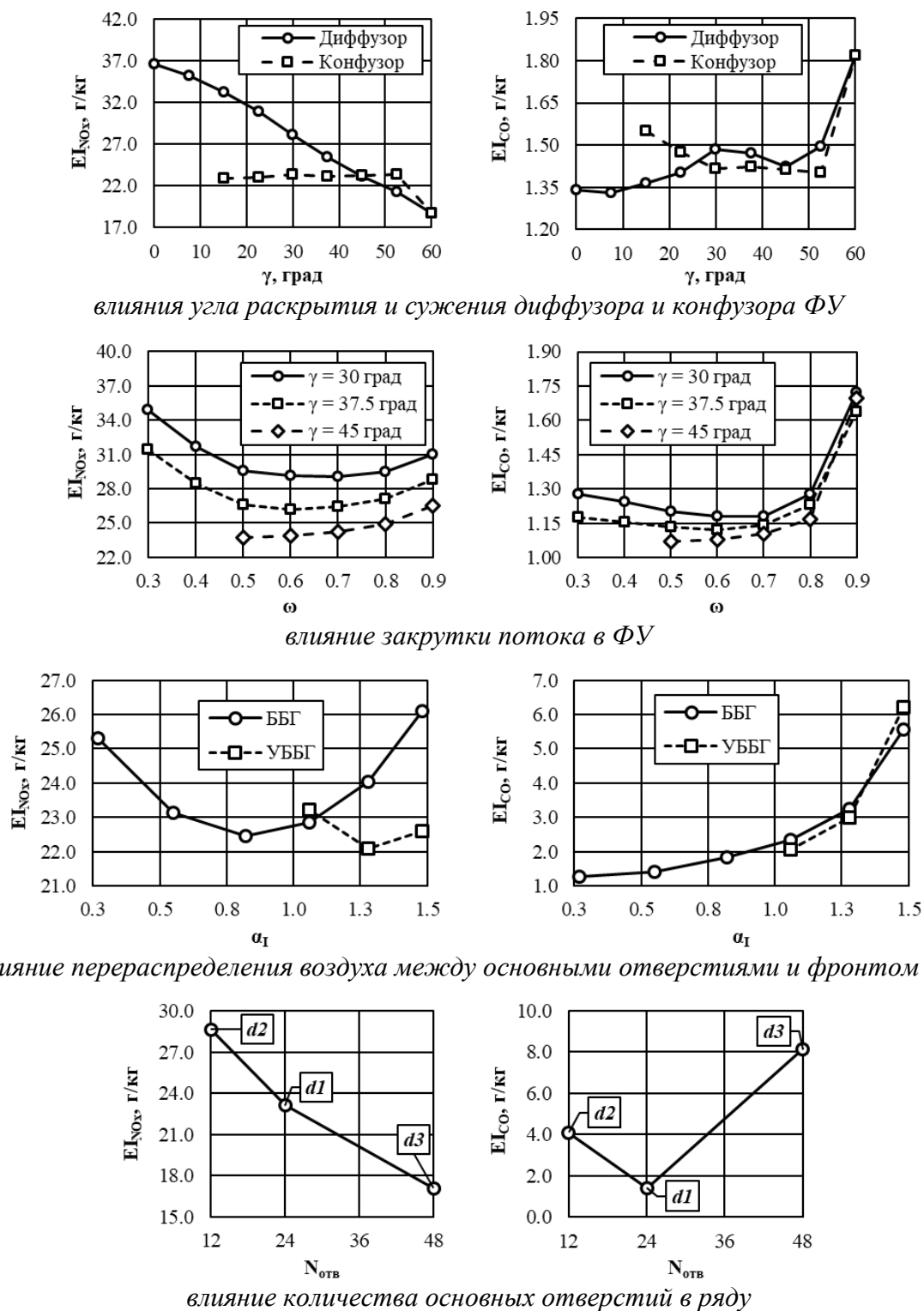


Рисунок 9 – Зависимости  $EI_{NOx}$  и  $EI_{CO}$  от различных факторов влияния

Для возможности рассмотрения в рамках разрабатываемой методики альтернативных топлив, было проведено сравнительное исследование, по результатам которого определено, что использование состава топлива, имитирующего SAF, вместо традиционного авиационного керосина приводит к приросту выбросов  $NO_x$  примерно на 14 % при одновременном снижении выбросов CO почти на 25 % (рисунок 10).

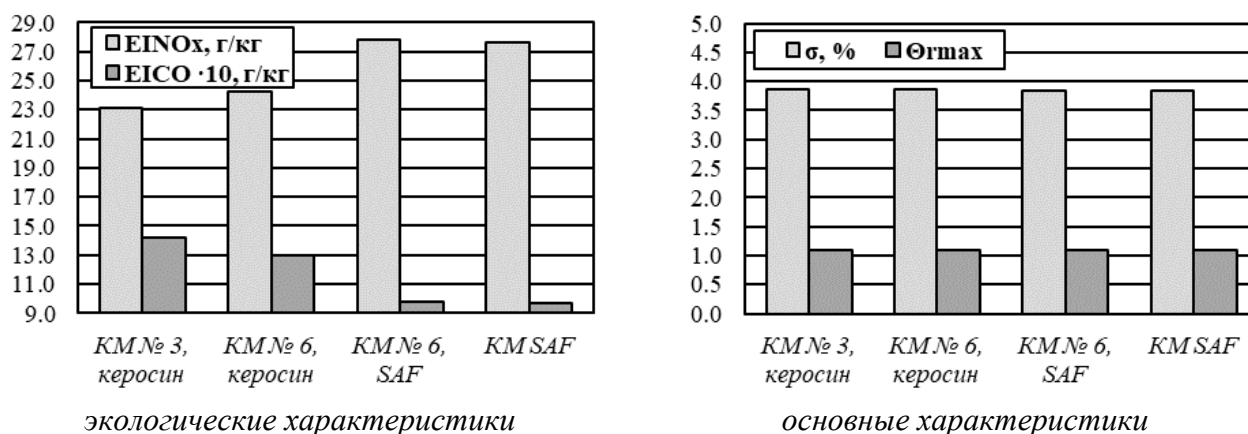


Рисунок 10 – Изменение основных и экологических характеристик при переходе на SAF

На основе всей совокупности данных, полученных в ходе расчётно-параметрического исследования, с целью их аппроксимации для использования при прогнозировании вредных выбросов, были рассмотрены два подхода – нейросеть с архитектурой многослойного перцептрона (MLP) и метод градиентного бустинга XGBoost. Для увеличения объема исходной выборки были использованы, во-первых, интерполяция результатов, полученных в ходе проведения параметрических исследований, а во-вторых, аппроксимация результатов проведенного в первой главе статистического анализа поведения  $EI_{NOx}$  и  $EI_{CO}$  в существующих двигателях для режимов стандартного ВПЦ. По итогам варьирования параметров и количества исходных данных, а также валидации путем сравнения результатов прогнозирования моделей с результатами испытаний, было решено использовать нейросетевую модель на базе архитектуры MLP, которая обеспечила среднюю точность порядка 90.2 % для объектов валидации № 3 и № 4 при максимальной погрешности прогноза не более 15 % (рисунок 11).

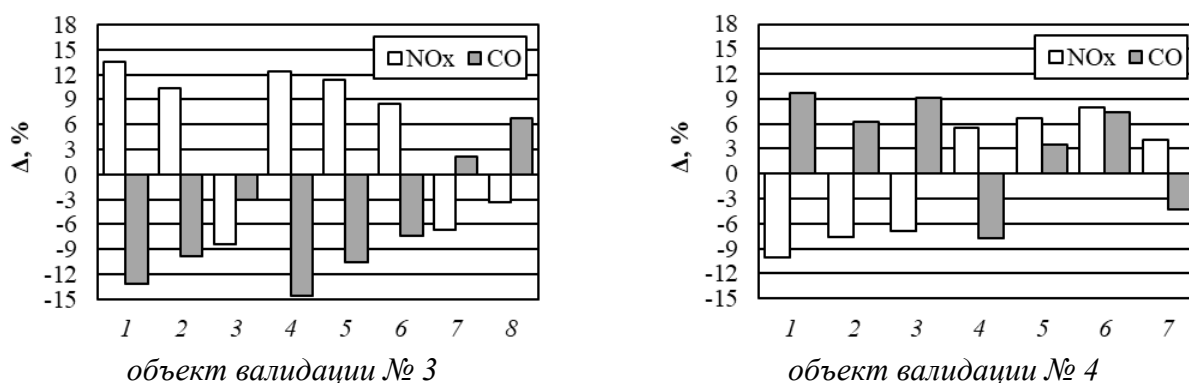


Рисунок 11 – Результаты валидации модели MLP для выбранных объектов валидации с точки зрения экологических характеристик

В четвертой главе на основе всей совокупности полученных в ходе работы данных сформирована расчетно-экспериментальная методика прогнозирования эмиссии вредных веществ в КС, применяемая на ранних этапах разработки и имеющая повышенную достоверность в сравнении с традиционным моделированием, а также разработан алгоритм её применения (рисунок 12).

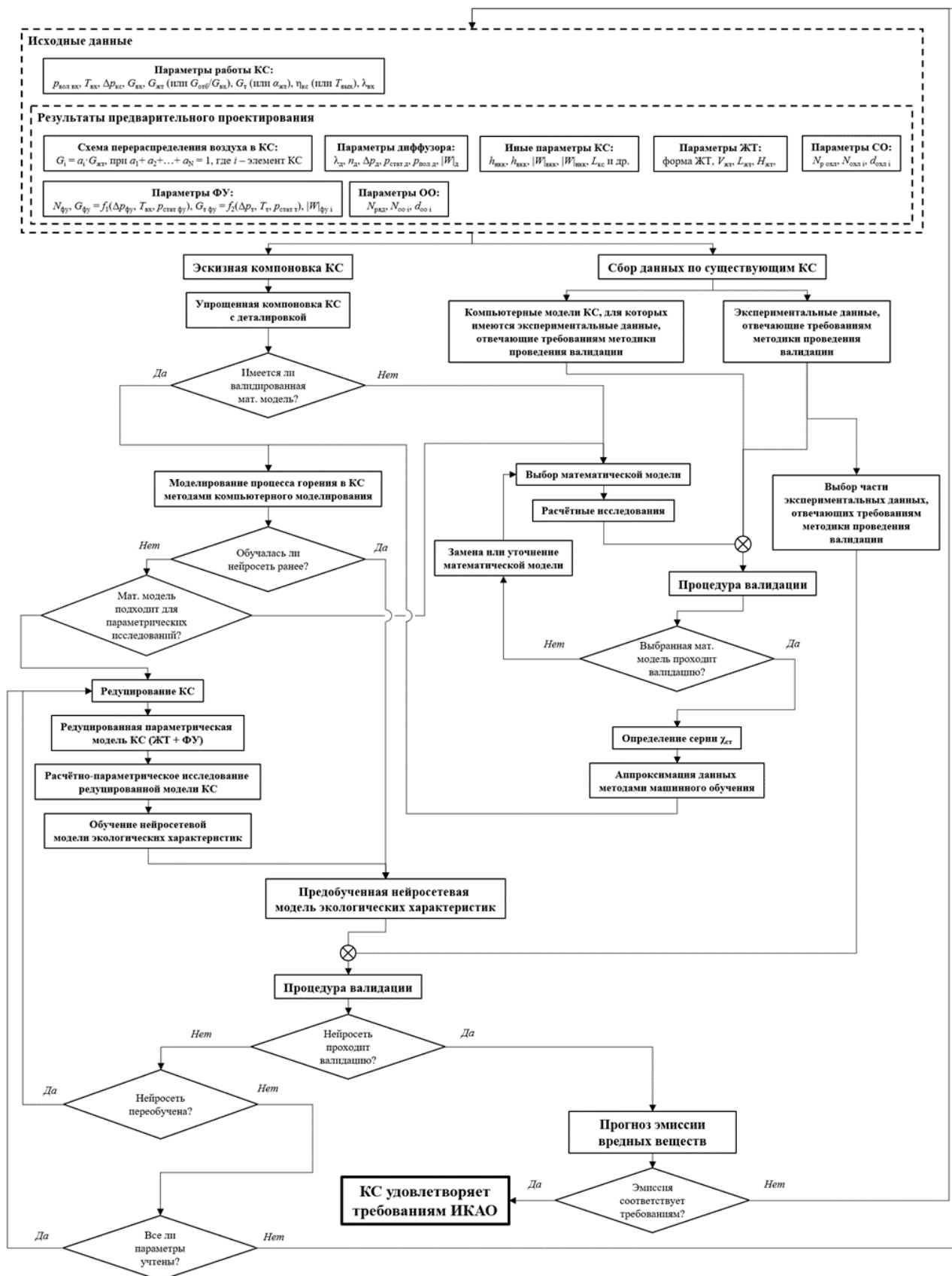


Рисунок 12 – Алгоритм применения методики расчетно-экспериментального прогнозирования эмиссии вредных веществ в КС ГТД

Обобщённая методика проектирования КС, построенная за счёт объединения и модификации с учётом современных требований известных методик предварительного проектирования КС, позволила на основе результатов термогазодинамического расчета

трех вариантов ТРДД провести разработку эскизных компоновок КС трех типов: с УББГ для ТРДД-16 с тягой 160 кН и с БГ для ТРДД-32 с тягой 320 кН для использования в СУ гражданских дозвуковых самолетов, а также с ББГ для ТРДД-8 с тягой 80 кН для использования в СУ гражданских сверхзвуковых самолетах (рисунок 13).

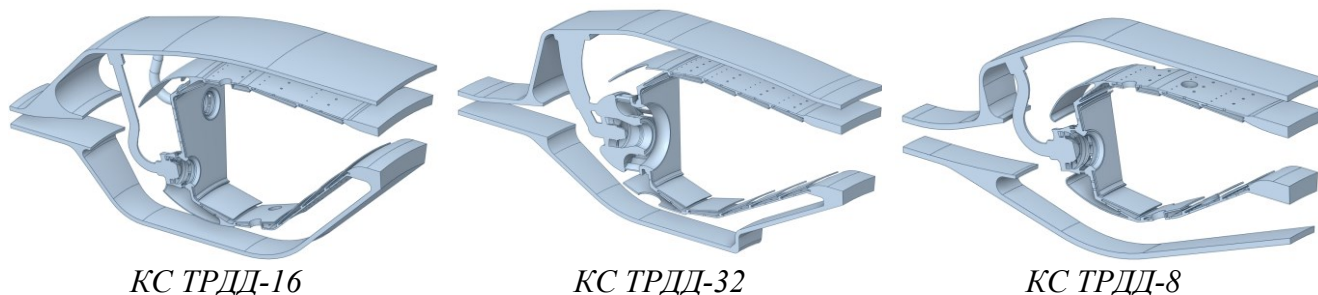


Рисунок 13 – Внешний вид секторов компоновок КС ТРДД-16, ТРДД-32 и ТРДД-8

Методами компьютерного моделирования при использовании валидированной математической модели показано, что редуцированные версии КС, построенные на основе трехмерных моделей КС ТРДД-16, КС ТРДД-32 и КС ТРДД-8, обеспечивают крайне близкую к оригиналам структуру течения в ЖТ и корректно прогнозируют величины основных и экологических характеристик (рисунок 14).

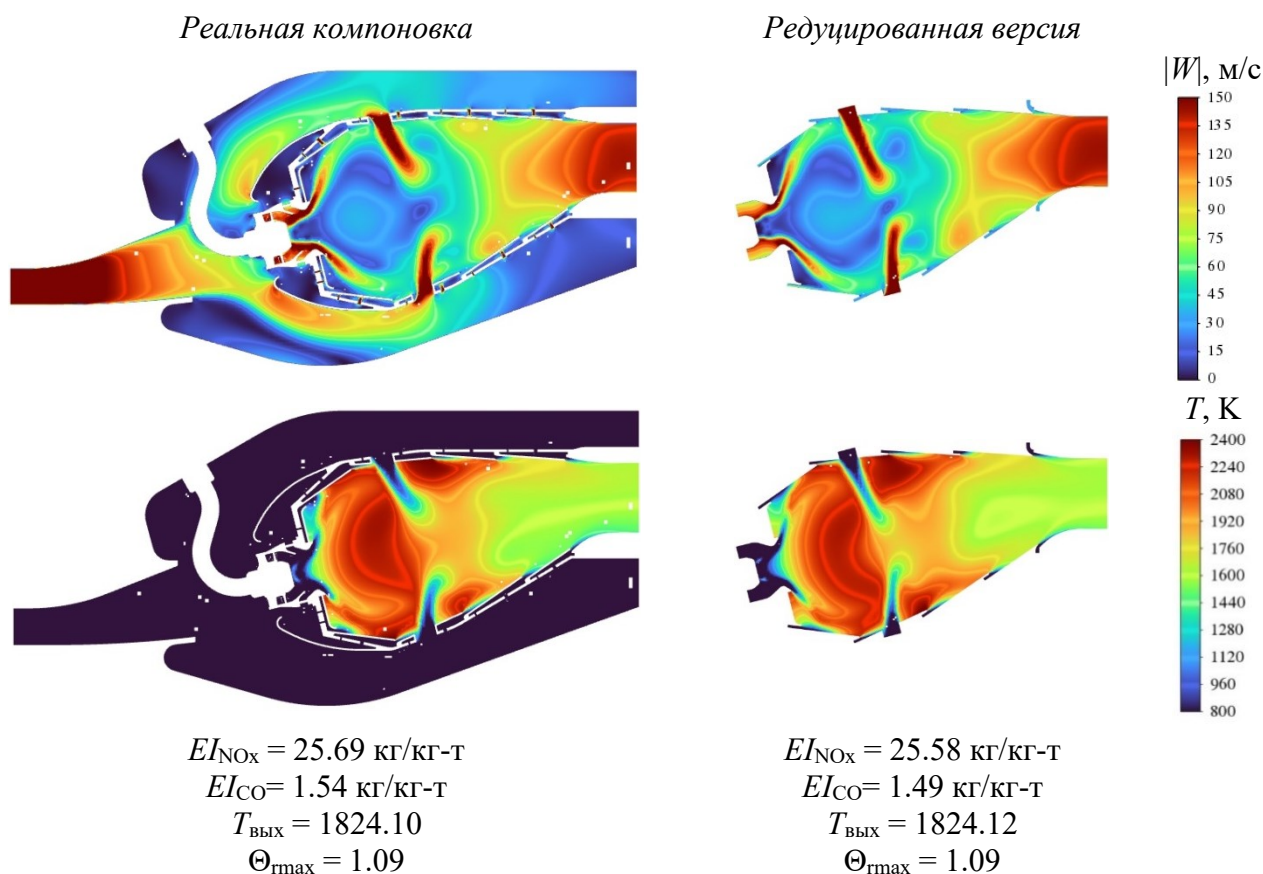


Рисунок 14 – Сравнение полей распределения модуля скорости и температуры газа в продольном сечении, а также результатов оценки количественного соответствия результатов в полной постановке и редуцированной КС для ТРДД-8

На основе этих результатов также проверено, что прогноз эмиссии вредных веществ, полученный при помощи нейросетевой модели прогнозирования, соответствует значениям экологических характеристик, полученным при помощи методов компьютерного моделирования (CFD-расчёт) (рисунок 15).

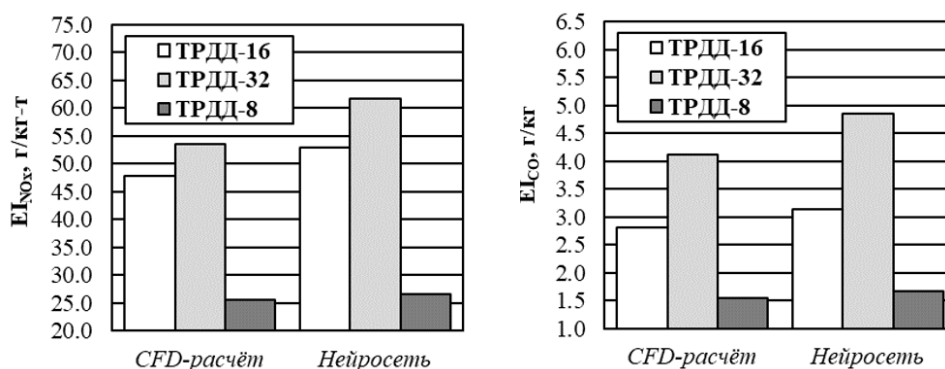


Рисунок 15 – Сравнение  $EI_{NOx}$  и  $EI_{CO}$  на режиме «Взлет», определенных при помощи валидированной математической модели и нейросетевой модели

Используя разработанную нейросетевую модель прогнозирования эмиссии вредных веществ, определено, что компоновки КС ТРДД-16 и КС ТРДД-8 даже с учетом корректировочного коэффициента обеспечивают соответствие требованиям ИКАО с запасами по  $NO_x$  на уровне 4.02 % и 26.10 %, соответственно. Для КС ТРДД-32 нормы эмиссии и  $NO_x$ , и  $CO$  оказались выше нормы. При помощи модели прогнозирования эмиссии вредных веществ предпринята попытка улучшить текущие характеристики КС ТРДД-32, однако результат оказался отрицательным. Тем не менее, методика подтвердила свою эффективность, тем самым еще на этапе предварительной проработки КС определив невозможность обеспечения норм ИКАО при выбранных параметрах КС ТРДД-32

В **заключении** сформулированы основные результаты данной работы.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты, полученные в настоящей работе, состоят в следующем:

1. Выполненный анализ проблем разработки малоэмиссионных КС показал, что среди всего многообразия вариантов существующих концепций малоэмиссионного горения наиболее проработаны схемы ББГ, УББГ и двухзонного БГ. В ходе статистического анализа приведённых величин  $EI_{NOx}$  и  $EI_{CO}$  всех рассмотренных двигателей на различных режимах взлётно-посадочного цикла (ВПЦ), было обнаружено, что характер поведения  $EI_{NOx}$  и  $EI_{CO}$  для двигателей с КС одного и того же типа оказывается крайне близок.

2. На основе нормативной документации и с учетом специфики КС, предложена методика проведения валидации, критерии выбора объектов валидации и наполнения валидационного базиса для разработки компьютерных моделей комплексного анализа внутрикамерных процессов. На основе этого произведен выбор объектов валидации. С учетом стендового оборудования для проведения испытаний КС ГТД и сформулированной методики проведения валидации, предложена методика проведения испытаний КС в обеспечение валидации расчетных моделей.

3. Определены наиболее подходящие варианты математических моделей, кинетических механизмов горения керосин-воздушных смесей и составов имитации суррогатов керосина, а также выбраны общие неизменные составляющие численной схемы и математической модели для разработки компьютерной модели внутрикамерных процессов. По результатам многокритериальной валидации выбрана математическая модель совместно с кинетическим механизмом, обеспечившая среднюю точность в 96 % при прогнозировании экологических характеристик и 99 % при прогнозировании основных характеристик КС.

4. Для обеспечения возможности автоматизированного использования валидированной математической модели в отсутствии экспериментальных данных была

проведена аппроксимация эмпирически установленных значений  $\chi_{ст}$  при помощи методов машинного обучения. Оценка применимости полученной полиномиальной регрессии показала, что использование аппроксимирующего полинома увеличивает отклонение относительно расчета с эмпирическим подбором, но при этом обеспечивает среднюю точность определения экологических характеристик на уровне 93 %, что позволяет применять полученную аппроксимацию для дальнейших исследований.

5. На основе разработанных моделей КС проведено расчетно-параметрическое исследование качественного и количественного влияния различных факторов на экологические характеристики. В ходе исследования удалось сократить объем варьируемых параметров за счет, во-первых, интерполяции результатов, полученных в ходе исследований КС с ББГ, а во-вторых, аппроксимации результатов анализа поведения  $EI_{NOx}$  и  $EI_{CO}$  для различных режимов ВПЦ при помощи полиномиальной регрессии.

6. По итогам варьирования параметров и количества исходных данных на основе полученных метрик качества, а также валидации путем сравнения результатов прогнозирования моделей с результатами испытаний для объектов валидации, с целью аппроксимации исходных данных для прогнозирования вредных выбросов было решено использовать нейросетевую модель на базе MLP-архитектуры, которая обеспечила среднюю точность порядка 90.2 % для объектов валидации № 3 и № 4.

7. На основе всей совокупности полученных в ходе работы данных сформирована расчетно-экспериментальная методика прогнозирования эмиссии вредных веществ в КС, а также разработан алгоритм её применения. Используя разработанные компоновки модельных КС, проведена апробация применения разработанной методики и показано, что прогноз эмиссии вредных веществ, полученный при помощи нейросетевой модели, соответствует значениям экологических характеристик, полученным в расчёте с валидированной математической моделью.

8. Используя разработанную нейросетевую модель прогнозирования эмиссии вредных веществ, определено, что компоновки КС ТРДД-16 и КС ТРДД-8 даже с учетом корректировочного коэффициента обеспечивают соответствие требованиям ИКАО с запасами по  $NO_x$  на уровне 4.02 % и 26.10 %, соответственно, а для КС ТРДД-32 нормы эмиссии и  $NO_x$ , и  $CO$  оказались выше требований. Предложенная методика продемонстрировала свою применимость и эффективность, определив еще фактически на этапе предварительной проработки невозможность обеспечения норм ИКАО при выбранных параметрах КС.

### **Перспективы дальнейшей разработки темы**

Полученные в настоящей диссертации результаты могут использоваться для прогнозирования экологических характеристик современных и перспективных малоэмиссионных КС на ранних этапах разработки двигателя. Основные направления развития предложенной методики заключаются в увеличение количества учитываемых факторов влияния, в том числе перспективных топлив (водород, АСКТ) и возможности разработки модели прогнозирования не только вредных веществ, но и основных характеристик, а также полей распределения различных параметров потока в КС без использования трехмерного компьютерного моделирования.

## **ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

**Публикации в рецензируемых научных изданиях из перечня ВАК и публикации, приравненные к ним:**

1. Тарасенко А.Н., Васильев А.Ю., Силуянова М.В. Сравнительный анализ схем организации малоэмиссионного горения в камерах сгорания авиационных двигателей // Авиационные двигатели. 2024. № 3. С. 51-62.

2. Тарасенко А.Н., Янук А.В., Панов Е.Н. Применение методов машинного обучения для прогнозирования концентраций отдельных продуктов сгорания в задаче об обтекании клиновых стабилизаторов при варьировании коэффициента избытка воздуха // *Авиационные двигатели*. 2025. № 1. С. 49-56.

3. Васильев А.Ю., Тарасенко А.Н., Майорова А.И., Свириденков А.А., Шлыков Д.А. Применение богато-бедной схемы организации горения при разработке камеры сгорания малоразмерного газотурбинного двигателя // *Авиационные двигатели*. 2025. № 3. С. 43-52.

4. Savel'ev A.M., Savel'eva V.A., Tarasenko A.N., Torokhov S.A., Novakovskii D.V. Complex multicomponent surrogates of commercial aircraft kerosene fuels: simulation of main physical and chemical properties // *Thermal Engineering*. 2025. V. 72. N. 7. P. 527-549.

5. Savel'ev A.M., Savel'eva V.A., Tarasenko A.N., Torokhov S.A., Kadochnikov I.N., Novakovskii D.V. Complex multicomponent surrogates of commercial aircraft kerosene-type fuels: modeling fuel combustion characteristics // *Combustion, Explosion, and Shock Waves*. 2026. V. 62. N. 1. P. 25-46.

6. Tarasenko A.N., Vasil'ev A.Yu., Loukhovitski B.I., Sharipov A.S., Siluyanov M.V. Low-emission combustors for aircraft engines: development and numerical analysis of technical concepts using the reduced kinetic mechanism // *Russian Aeronautics*. 2025. V. 68. N. 2. P. 423-432.

#### **Другие публикации по теме работы:**

1. Тарасенко А.Н., Силуянова М.В. Аналитический обзор методов и проблем организации малоэмиссионного горения и проведения расчётных исследований в камерах сгорания гражданских ГТД // *Сборник тезисов 20-ой Международной конференции «Авиация и космонавтика» (22-26 ноября 2021 г., г. Москва)*. 2021. С. 146-148.

2. Тарасенко А.Н., Васильев А.Ю. Особенности применения расчётных методов при исследовании камер сгорания ГТД // *Сборник тезисов Научно-технического конгресса двигателестроения (26-28 октября 2022 г., г. Москва)*. 2022. С. 60-61.

3. Тарасенко А.Н., Васильев А.Ю. Перспективы использования технологии богато-бедного горения для создания малоэмиссионной камеры сгорания перспективного ТРДД СПС // *Сборник тезисов Международной конференции «Фундаментальные проблемы создания СПС нового поколения» (4-9 сентября 2022 г., Россия, г. Сочи)*. 2022. С. 194-196.

4. Васильев А.Ю., Тарасенко А.Н., Силуянова М.В. Численный анализ процессов горения в фронтном устройстве камеры сгорания при использовании различных типов топлива // *Сборник тезисов VII Всероссийской научной конференции «Теплофизика и физическая гидродинамика» (5-14 сентября 2022 г., Россия, г. Сочи)*. 2022. С. 158.

5. Васильев А.Ю., Тарасенко А.Н. Оценка применимости системы охлаждения чешуйчатого типа для камер сгорания авиационных ГТД // *Сборник тезисов VII Всероссийской научной конференции «Теплофизика и физическая гидродинамика» (5-14 сентября 2022 г., Россия, г. Сочи)*. 2022. С. 159.

6. Тарасенко А.Н., Васильев А.Ю. Особенности применения расчётных методов при исследовании камер сгорания ГТД // *Сборник тезисов Научно-технического конгресса двигателестроения (26-28 октября 2022 г., г. Москва)*. 2022. С. 60-61.

7. Тарасенко А.Н., Васильев А.Ю. Исследование влияния распределения топлива между пилотной и основной зоной на радиальную неравномерность температурного поля и величину эмиссии NOx в модельной камере сгорания с использованием методов численного моделирования // *Материалы Восьмой Российской национальной конференции по теплообмену (17-22 октября 2022 г., г. Москва)*. 2022. С. 206-207.

8. Тарасенко А.Н., Силуянова М.В. Исследование возможности применения равновесных приближений для определения концентраций продуктов сгорания при моделировании горения в модельном фронтном устройстве камеры сгорания // Материалы Восьмой Российской национальной конференции по теплообмену (17-22 октября 2022 г., г. Москва). 2022. С. 208-209.

9. Тарасенко А.Н., Силуянова М.В. Влияние учёта соседних фронтных устройств на эмиссию вредных веществ при проведении численных исследований процессов в камерах сгорания ГТД // Сборник тезисов 21-ой Международной конференции «Авиация и космонавтика» (21-25 ноября 2022 г., г. Москва). 2022. С. 175-176.

10. Тарасенко А.Н. Влияние формы и расположения основных отверстий жаровой трубы на основные и экологические характеристики в модельной камере сгорания газотурбинного двигателя // Сборник тезисов XLIX Международной молодёжной научной конференции «Гагаринские чтения» (11-14 апреля 2023 года, г. Москва). 2023. С. 142-143.

11. Тарасенко А.Н., Силуянова М.В. Исследование влияния применения технологии прямого впрыска бедной смеси на основные и экологические характеристики модельной камеры сгорания авиационного двигателя // Сборник тезисов 23-ей Международной конференции «Авиация и космонавтика» (18-22 ноября 2024 г., г. Москва). 2024. С. 92-93.

12. Тарасенко А.Н. Расчётное определение корректировок в зависимости между объемом жаровой трубы и полнотой сгорания в модельной камере сгорания при варьировании её размера // Сборник тезисов 50-й Международной молодёжной научной конференции «Гагаринские чтения» (9-12 апреля 2024 г., г. Москва). 2024. С. 90-91.

13. Васильев А.Ю., Фурлетов В.И., Тарасенко А.Н. Исследование влияния характеристик распыла жидкого топлива на эмиссию NOx в модельной малоэмиссионной камере сгорания ГТД // Материалы XVII Минского международного форума по тепло- и массообмену (20-24 мая 2024 г., Республика Беларусь, г. Минск). 2024. С. 193-196.

14. Савельев А.М., Савельева В.А., Новаковский Д.В., Тарасенко А.Н. Комплексные суррогаты авиационного коммерческого топлива типа керосин для моделирования рабочего процесса в малоэмиссионных камерах сгорания газотурбинных двигателей // Материалы 11-го Международного симпозиума по неравновесным процессам, плазме, горению и атмосферным явлениям (7-11 октября 2024 г., Россия, г. Сочи). 2024. С. 29-36.

15. Тарасенко А.Н., Васильев А.Ю., Янук А.В., Панов Е.Н. Методы повышения эффективности проектирования и анализа камер сгорания авиационных двигателей // Сборник тезисов Научно-технического конгресса двигателестроения (23-25 октября 2024 г., г. Москва). 2024. С. 266-268.

16. Тарасенко А.Н., Янук А.В., Панов Е.Н. Влияние параметров имитации распыливания и перераспределения топлива между пилотной и основной зонами горения бедной смеси на основные и экологические характеристики камеры сгорания // Сборник докладов Всероссийского научно-технического форума по двигателям и энергетическим установкам имени Н.Д. Кузнецова (10-11 октября 2024 г., Россия, г. Самара). С. 179-180.

17. Тарасенко А.Н., Силуянова М.В. Анализ одномерной методики газодинамического проектировочного расчёта прямоточной камеры сгорания с технологией богато-бедного горения // Сборник тезисов 22-ой Международной конференции «Авиация и космонавтика» (20-24 ноября 2023 г., г. Москва). 2023. С. 108.

18. Тарасенко А.Н. Оценка основных и экологических характеристик модельной камеры сгорания авиационного двигателя при её конвертировании для наземного применения // Сборник тезисов 51-й Международной молодёжной научной конференции «Гагаринские чтения» (15-18 апреля 2025 г., г. Москва). 2025. С. 138-139.

19. Савельева В.А., Савельев А.М., Тарасенко А.Н., Торохов С.А. Кинетическая модель для четырёхкомпонентных суррогатов  $iC_8H_{18}/iC_{16}H_{34}/nC_{12}H_{26}/nC_{10}H_{22}$  синтетического изопарафинового топлива: разработка и применение // Материалы 15-ого Международного colloквиума по импульсной и непрерывной детонации «Передовые направления в исследованиях детонации» (20-24 апреля 2026 г., Россия, г. Санкт-Петербург). 2026. С. 33-41.

20. Янук А.В., Тарасенко А.Н., Шлыков Д.А. Имитационное моделирование течения газа в прямоугольных каналах методами нейросетевого моделирования // Сборник тезисов Международной научно-технической конференции по авиационным двигателям «ISAM 2025» (1-3 декабря 2025 г., г. Москва). 2025. С. 395-396.

21. Тарасенко А.Н., Васильев А.Ю. Анализ современных и перспективных способов снижения эмиссии вредных веществ применительно к камерам сгорания авиационных двигателей // Сборник тезисов Международной научно-технической конференции по авиационным двигателям «ISAM 2025» (1-3 декабря 2025 г., г. Москва). 2025. С. 409-410.

22. Тарасенко А.Н., Васильев А.Ю., Янук А.В., Панов Е.Н., Шлыков Д.А. Влияние выбора кинетического механизма на результаты моделирования основных и экологических характеристик камер сгорания газотурбинных двигателей на режимах работы с низкими параметрами // Материалы XVIII Минского международного форума по тепло- и массообмену (18-21 мая 2026 г., Республика Беларусь, г. Минск). 2026.

**Другие материалы, опубликованные по теме работы:**

1. Васильев А.Ю., Тарасенко А.Н., Котельников А.Ю. Элемент системы охлаждения жаровой трубы камеры сгорания // Патент на полезную модель № 215442, заявка № 2022127332 от 13.12.2022 г. 2022.

2. Васильев А.Ю., Тарасенко А.Н., Долгополова Т.Л. Элемент двустенной жаровой трубы камеры сгорания // Патент на полезную модель № 232996, заявка № 2024125830 от 03.09.2024 г. 2024.