

На правах рукописи



Цатиашвили Вахтанг Валерьевич

СНИЖЕНИЕ ЭМИССИИ ОКСИДОВ АЗОТА В  
КАМЕРАХ СГОРАНИЯ ТРДД С КОМПАКТНЫМ  
ДИФФУЗИОННЫМ ФРОНТОМ ПЛАМЕНИ

05.07.05 – Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки  
летательных аппаратов

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Рыбинск –2013

Диссертация выполнена в отделе камер сгорания (КО-203) опытно-конструкторского бюро Открытого акционерного общества «Авиадвигатель», г. Пермь.

Научный руководитель:

Александр Александрович Иноземцев, доктор технических наук, профессор, генеральный конструктор, управляющий директор ОАО «Авиадвигатель».

Официальные оппоненты:

Шота Александрович Пиралишвили, доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П.А. Соловьева»;

Владимир Миронович Захаров, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, Федеральное государственное унитарное предприятие «ЦИАМ им. П.И. Баранова».

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет)», г. Самара.

Защита диссертации состоится 14 июня 2013 г. в 12:00 на заседании диссертационного совета Д 212.210.01 в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П.А. Соловьева» по адресу: 152934, г. Рыбинск, Ярославской области, ул. Пушкина, 53, ауд. Г-237.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П.А. Соловьева».

Автореферат разослан 13 мая 2013 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Конюхов Борис Михайлович

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы

Примерно 81 % от всей вырабатываемой энергии в мире составляет высвобождаемая при сгорании химическая энергия ископаемого топлива, что порождает одну из важнейших проблем современности – загрязнение продуктами сгорания углеводородного топлива атмосферы Земли. При сжигании углеводородных топлив образуются вещества, опасные для здоровья человека и окружающей природной среды – вредные вещества (ВВ).

С целью контроля над эмиссией (выбросами) ВВ на авиационном транспорте в 1986 г. Комитетом по защите окружающей среды от воздействия авиации (САЕР) Международной организации гражданской авиации (ИКАО) были введены первые Международные нормы на эмиссию  $NO_x$  (оксиды азота),  $CO$ ,  $C_xH_y$  (несгоревшие углеводороды) и дыма. Главная цель – контроль загрязнённости воздуха в районе аэропортов за так называемый стандартный взлетно-посадочный цикл (СВПЦ) работы двигателя. Нормирование эмиссии ВВ двухконтурных турбореактивных двигателей (ТРДД) производится по величине параметра эмиссии  $P_{NO_x}$  – отношение массы эмитированного ВВ за режим СВПЦ к установленной взлётной тяге двигателя. С 1986 г. ведётся практика последовательного ужесточения Международных норм ИКАО по сокращению эмиссии  $NO_x$  от ТРДД (САЕР/2 в 1996 г., САЕР/4 в 2004 г., САЕР/6 в 2008 г.) при сохранении эмиссии остальных ВВ на прежнем уровне.

Тенденция повышения эффективного КПД ТРДД с целью улучшения его топливной эффективности ведёт к увеличению давления и температуры газа перед турбиной современных ТРДД и к существенному ускорению реакции образования  $NO_x$  в камере сгорания, что обостряет проблему обеспечения будущих норм на эмиссию ВВ. Фирма GEAE (США) в 2009 г. сертифицировала ТРДД GEpх с взлётной тягой 255,3 кН, имеющий запас  $P_{NO_x}$  65,8 % по отношению к нормам 2008 г.

Передовые современные ТРДД, созданные в постсоветский период, имеют следующие запасы  $P_{NO_x}$  по отношению к нормам 2008 г.: Д-436-148 (ГП «Ивченко-Прогресс», Украина) с тягой 68,8 кН – 21 %; SaM-146 (НПО «Сатурн», Россия и Snesta Moteurs, Франция) с тягой 72,7 кН – 17,4 %.

С 2014 г. вводится норма САЕР/8, регламентирующая сокращение эмиссии  $NO_x$  на 15 % к нормам 2008 г. (или на 50 % к нормам 1986 г.). Планируется дальнейшее ужесточение Международных норм (целевой технологический уровень) к 2020 г. по параметру  $P_{NO_x}$  на 45 %, а к 2030 г. – на 60 % по отношению к нормам 2008 г. Обеспечение перспективных норм по эмиссии ВВ возможно только при условии использования новых малоэмиссионных технологий сжигания топлива.

### Цель работы

Разработка и обоснование концепции малоэмиссионной камеры сгорания ТРДД с компактным диффузионным фронтом пламени, являющейся производным

направлением традиционной технологии сжигания топлива, для обеспечения перспективных Международных норм на эмиссию  $NO_x$ .

### **Задачи работы**

1. Выполнить теоретическую оценку минимально достижимого индекса эмиссии  $NO_x$  в диффузионном фронте пламени.
2. Сформулировать концепцию малоэмиссионной камеры сгорания с компактным диффузионным фронтом пламени.
3. Выполнить оценку степени влияния принципов, заложенных в концепцию, на концептуальной модели камеры сгорания.
4. Выполнить оценку эмиссионных характеристик жаровых труб, изготовленных в соответствии с разрабатываемой концепцией, в стендовых условиях с высокими параметрами.

### **Объект и предмет исследования**

Объект исследования – совокупность способов снижения скорости образования  $NO_x$  в технических системах сжигания углеводородного топлива.

Предмет исследования – камера сгорания ТРДД.

### **Методы исследования**

1. Численные нуль-мерные (в термодинамической постановке) расчёты термохимического состояния газовых смесей в сети химических реакторов с идеальным перемешиванием на основе полных кинетических механизмов реакций окисления (GRI-Mech 3.0).
2. Численные одномерные расчёты термохимического состояния газовой смеси в структуре ламинарного фронта диффузионного пламени на основе редуцированного кинетического механизма реакций окисления (Kee 58).
3. Численные трехмерные расчёты течений с учётом процессов турбулентного горения, излучения, образования оксида азота в камере сгорания на основе осреднённых по Фавру уравнений Навье-Стокса.
4. Экспериментальные измерения целевых параметров потока (температуры, концентрации ВВ) на выходе одnogорелочного отсека с серийными жаровыми трубами и трубами-демонстраторами концепции в соответствии с требованиями «Авиационных Правил. Часть 34. Охрана окружающей среды. Эмиссия загрязняющих веществ авиационными двигателями. Нормы и испытания» и ГОСТ 17.2.2.04-86 «Охрана природы. Атмосфера. Двигатели газотурбинные самолетов гражданской авиации. Нормы и методы определения выбросов загрязняющих веществ».

**Достоверность полученных результатов** подтверждается применением:

1. Сертифицированного коммерческого программного продукта Chemkin фирмы Reaction Design (США), верифицированного разработчиком на задачах определения термохимического состояния газовых смесей.
2. Сертифицированного коммерческого программного комплекса ANSYS Fluent/CFX (США), верифицированного в ОАО «Авиадвигатель» по результатам сравнения с данными, полученными в ходе специальных испытаний элементов камер сгорания на автономных стендах и полноразмерных газогенераторах и двигателях.
3. Стандартизованных методик проведения и обработки результатов испытаний элементов камер сгорания в условиях автономных стендов ОАО «Авиадвигатель».
4. Метрологически аттестованного и поверенного измерительного оборудования в ОАО «Авиадвигатель».
5. Хорошим соответствием результатов трехмерного численного моделирования и результатов испытаний демонстраторов концепции.

### **Научная новизна**

1. Выполнена теоретическая оценка и получена новая аналитическая формула влияния скорости скалярной диссипации в диффузионном фронте пламени на индекс эмиссии  $NO_x$  для реальных условий работы камеры сгорания в ТРДД. Структура формулы адаптирована для проектирования малоэмиссионных камер сгорания диффузионного типа.
2. Разработана научная концепция камеры сгорания с компактным диффузионным фронтом пламени с использованием структурированной системы принципов малоэмиссионного сжигания топлива.

### **Теоретическая значимость**

1. Сформулированные принципы концепции с компактным диффузионным фронтом пламени для снижения эмиссии  $NO_x$  могут быть использованы (с адаптацией к специфике систем) при проектировании любых технических устройств сжигания углеводородного топлива.

### **Практическая значимость**

1. Сформулированные принципы Концепции являются базовым руководством для разработки проектов малоэмиссионных камер сгорания как для модернизируемых, так и для вновь создаваемых авиационных и наземных ГТД.
2. Успешное завершение серии испытаний демонстраторов является основой для начала разработки проектов камер сгорания на базе подтвержденной Концепции по модернизации камер сгорания ГТД ПС-90А2, ГТУ-16П, ГТУ-25П.

### **Апробация работы**

Основные результаты работы представлены на Всероссийской научно-технической конференции «Процессы горения, теплообмена и экология тепловых

двигателей» (Самара, 2007 г.); 56-й научно-технической сессии Комиссии по газовым турбинам Российской академии наук «Применение ГТУ в энергетике и промышленности (г. Пермь, 2009 г.); 8-й Международной конференции «Авиация и космонавтика-2009» (г. Москва, 2009 г.); Международной научно-технической конференции «Проблемы и перспективы развития двигателестроения» (г. Самара, 2011 г.); «ASME Turbo Expo» Turbine Technical Conference & Exposition (г. Копенгаген, 2012 г.). По теме диссертации опубликованы 4 статьи в периодических изданиях, включённых в список ВАК.

### **Внедрение результатов работы**

На основе совокупности полученных результатов численного моделирования рабочего процесса и натурных испытаний демонстраторов Концепции малоэмиссионного сжигания топлива, в соответствии с утверждёнными планами ОАО «Авиадвигатель», проводится разработка камер сгорания для модернизации семейства ТРДД ПС-90А и наземных ГТУ-16П, ГТУ-25П.

### **На защиту выносятся**

1. Результаты анализа снижения индекса эмиссии  $NO_x$  в диффузионном пламени.
2. Обоснование новизны концепции камеры сгорания с компактным диффузионным фронтом пламени по сравнению с альтернативными малоэмиссионными концепциями сжигания топлива в камерах сгорания ГТД.
3. Результаты численного моделирования рабочего процесса в концептуальной модели камеры сгорания.
4. Результаты испытаний серийных вариантов и демонстраторов Концепции.

### **Личный вклад автора**

1. Формулирование и обоснование концепции камеры сгорания с компактным диффузионным фронтом пламени.
2. Подготовка, проведение и анализ результатов расчётов: термохимического состояния газовых смесей в сети химических реакторов; структуры ламинарного диффузионного фронта пламени; трехмерных течений с учётом процессов турбулентного горения, излучения, образования  $NO_x$  в камерах сгорания.
3. Планирование натурных испытаний жаровых труб-демонстраторов концепции и серийных жаровых труб в стендовых условиях с последующей обработкой и анализом результатов испытаний.

### **Структура и объём работы**

Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения и списка литературы из 64 наименований. Основной текст содержит 175 страниц, 116 иллюстраций и 17 таблиц и одно приложение.

## КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** приводится актуальность и раскрывается общая характеристика работы: формулируются цели и задачи исследования; объект, предмет и методы исследования; научная новизна, практическая значимость и результаты, выносимые на защиту автором.

**Первая глава** начинается с общепринятой классификации химических механизмов образования оксидов азота, проявляющихся в технических системах сжигания углеводородного топлива. К ним относятся: термический механизм Зельдовича, быстрый (сверхравновесный) механизм Фенимора, топливный механизм, механизм образования  $NO_x$  через промежуточный компонент  $N_2O$ . На основании литературных данных показан лидирующий вклад термического механизма в суммарное образование  $NO_x$  в камерах сгорания ТРДД.

В сравнительном анализе рассматриваются достоинства и недостатки четырёх основных концепций снижения эмиссии  $NO_x$ , используемые в камерах сгорания современных ТРДД:

1. LPP (Lean Premixed Prevaporized) – горение обеднённой, предварительно испарённой и перемешанной смеси с топливом;
2. RQL (Rich (burn) – (quick) Quench – Lean (burn)) – сжигание обогащённой смеси топлива, быстрым перемешиванием с воздухом и последующем горением обеднённой смеси;
3. Staged Combustion (SC) – зональное сжигание топлива.
4. LDI (Lean Direct Injection) – горение обеднённой смеси с прямым впрыском топлива. Multi-LDI – многофорсуночная (до 860 шт.) камера сгорания, сходная с камерой ЖРД.

Приводится информация о методике нормирования эмиссии ВВ в ИКАО, эволюция ужесточения этих норм и решения 8-го совещания CAEP 2010 г., которые, в частности, предполагают: запрет на производство с 2013 г. ТРДД не обеспечивающих нормы CAEP/6; ужесточение с 2014 г. норм на эмиссию  $NO_x$  по отношению к нормам 2008 г. на 5...15 %; утверждение целевых технологических уровней снижения эмиссии  $NO_x$  ниже норм 2008 г. на 45 % и 60 % соответственно к 2020 г. (среднесрочный уровень) и к 2030 г. (долгосрочный уровень).

Показано, что только двигатели Д-436-148 (ГП «Ивченко-Прогресс») и SaM-146 (НПО «Сатурн» и Snecma Moteurs) обеспечивают нормы по эмиссии  $NO_x$  2014 года. В камерах сгорания указанных двигателей используется, по-сути, развитие традиционной технологии диффузионного сжигания топлива с обогащенным составом смеси во фронте жаровой трубы, схожую с RQL.

Приводится обзор разработок современных камер сгорания для ТРДД в передовых зарубежных двигателестроительных компаниях: General Electric

Aircraft Engines (GEAE, США), Pratt & Whitney (PW, США), Rolls-Royce (RR, Великобритания). Самая передовая фирма GEAE в 2009 г. провела сертификацию ТРДД GEnx для самолёта Boeing 787 Dreamliner, обеспечивающий выполнение долгосрочных целевых норм 2030 г. GEnx имеет камеру сгорания TAPS (Twin Annular Premixing Swirler) – радиальное зонирование горения с предварительным перемешиванием и горением обеднённой по составу смеси. На ее разработку потрачены 8 лет и 60 млн. долларов США.

**Вторая глава** посвящена описанию используемых математических моделей для описания физико-химических процессов в камерах сгорания. Нульмерные модели используются для определения термодинамических характеристик и состава реагирующей газовой смеси в реакторной модели камеры сгорания с идеальным перемешиванием на основе программного продукта Chemkin. Численно решается система уравнений сохранения массы для каждого реактора, баланса концентраций компонентов и сохранения энергии газовой системы в каждом реакторе.

Одномерные численные расчёты используются для расчёта структуры ламинарного диффузионного фронта пламени: распределение температуры и концентраций компонентов газовой смеси. Расчёты проводятся в препроцессоре prePDF 4.1. Определение структуры фронта пламени основано на решении системы уравнений диффузии с источником членом по кинетическому механизму горения и уравнения энергии Flamelet-модели (модель тонкого фронта пламени) диффузионного горения авторов N. Peters (RWTH, г. Ахен, ФРГ) и В. Р. Кузнецова (ЦИАМ, г. Москва).

Трёхмерные численные расчёты проводятся в программном комплексе ANSYS Fluent 12.1 для определения структуры и параметров потока в камере сгорания. Для описания физико-химических процессов в камере сгорания ГТД используются: Модель турбулентного течения смеси газов ( $k-\varepsilon$  realizable); Модель турбулентного горения газообразного топлива (Flamelet-модель с использованием функции распределения плотности вероятности пульсаций концентрации  $\tilde{P}(Z)$  – ФПРВ, в виде  $\beta$ -функции Эйлера); Модель радиационного теплообмена в излучающей среде (DO с моделью взвешенной суммы серых газов  $CO_2$  и  $H_2O$ ); Модель образования  $NO_x$  (с  $\beta$ -функцией Эйлера пульсаций температуры для расчёта осреднённой скорости реакции  $\tilde{S}_{NO}$ ).

Решаются уравнения неразрывности, уравнения количества движения в форме Навье-Стокса, уравнения энергии и уравнения состояния идеального газа по методу контрольных объёмов. Осреднение системы уравнений производится по методу Фавра с использованием плотности в качестве весовой функции.



**Третья глава** посвящена описанию принятой методологии проектирования демонстратора концепции и логической структуры диссертации. В работе используется адаптированная методология NASA (США) проектирования новых систем в аэрокосмической промышленности, основанная на шкале классифицированных уровней готовности (развития) технологий (Уровень).

Шкала Уровней применительно к данной работе состоит из следующих: №4 – Подтверждение характеристик концепции в лабораторных условиях (на основе концептуальной модели камеры сгорания разработаны демонстраторы концепции, прошедшие натурные испытания). №3 – Аналитические и экспериментальные подтверждения критически важных функций и/или характеристик концепции (на основе ключевого принципа концепции выполнено моделирование рабочего процесса в компьютерной концептуальной модели). №2 – Концепция технологии и её применение сформулированы (представлена теоретическая оценка и аналитическая форма эффекта сокращения индекса эмиссии  $NO_x$  при увеличении  $\chi_{st}$ ). №1 – Базовые принципы исследованы и опубликованы (результаты исследований образования  $NO_x$  в пламенах различной конфигурации, разработка методик расчёта).

В качестве прототипа концептуальной камеры сгорания выбрана серийная камера двигателя ПС-90А2 (развитие линейки ПС-90А в классе взлётной тяги от 142,2 до 170,7 кН). Для снижения рисков программы разработки камеры сгорания на основе сформулированной Концепции используются демонстраторы. Их назначение – экспериментальное подтверждение (валидация) сформулированных принципов Концепции по организации малоэмиссионного сгорания топлива. Разработка новой концепции малоэмиссионного горения фокусируется на формировании специфической газодинамической структуры течения внутри жаровой трубы, путем изменения течения газа за счёт конструкции трубы с инвариантной (по отношению к прототипу) системой подачи и впрыска топлива.

Приводится описание конструкции серийных камер сгорания двигателя ПС-90А2 (вариант А2), ПС-90А (вариант А), наземной газоперекачивающей установки ГТУ-16П (вариант П) и диапазон изменения параметров рабочего процесса в камере сгорания от режима малого газа (холостого хода) до взлётного (номинального).

На основе результатов трехмерного моделирования сделан вывод о значительной осевой протяжённости осреднённой поверхности фронта пламени в камере сгорания А2, вблизи которой располагается область образования  $NO_x$ .

**Четвертая глава** содержит этапы разработки Концепции малоэмиссионного диффузионного сжигания топлива. На основе численно-аналитического метода решается задача по теоретической оценке потенциала

снижения индекса эмиссии  $NO$  –  $EINO$  – в диффузионном пламени для общего случая горения ламинарной струи газообразного горючего в открытом воздушном пространстве.

Выведена формула для определения  $EINO$  в зависимости от эффективной скорости скалярной диссипации  $\bar{\chi}_{st}$  в ламинарном диффузионном пламени в общем случае:

$$EINO = 2(1 - Z_{st}) \frac{M_{NO}}{\rho_{st} \bar{\chi}_{st}} \cdot \int_{\Delta Z} S_{NO} dZ \quad (1)$$

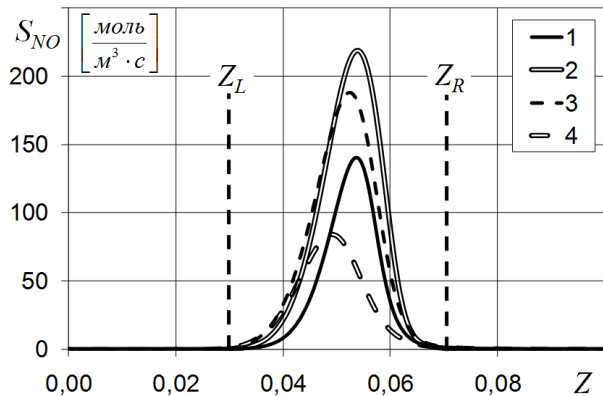


Рисунок 1 - Распределение удельной скорости реакции образования  $NO$  во фронте пламени при значениях  $\chi_{st}=0,01 \text{ c}^{-1}$  (1),  $\chi_{st}=10 \text{ c}^{-1}$  (2),  $\chi_{st}=50 \text{ c}^{-1}$  (3),  $\chi_{st}=150 \text{ c}^{-1}$  (4)

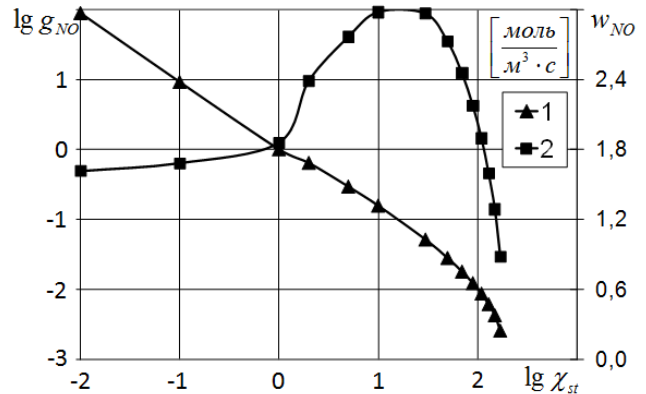


Рисунок 2 - Влияние скорости диссипации пассивной примеси на нормированный поток  $NO$  (1) и суммарную скорость образования  $NO$  (2) в диффузионном пламени

Расчеты по определению зависимости  $S_{NO} = f(Z)$  в формуле (1) проведены путём решения системы уравнений Петерса-Кузнецова с учётом только механизма Зельдовича при температуре воздуха  $T_K = 747 \text{ K}$  и давлении воздуха  $P_K = 1963 \text{ кПа}$ . Для описания горения использован редуцированный механизм окисления метана – Kee 58, содержащий 58 реакций между 18 компонентами (включая атомы  $O$ ). На рис. 1 приведён вид функции  $S_{NO} = f(Z)$  для выборочных значений  $\chi_{st}$ . Интервал  $\Delta Z$  выделяется границами с бедной (L) и богатой (R) стороны относительно стехиометрии ( $st$ ) и включает внутри область источника образования  $NO$  в пламени. На рис. 2 показана зависимость приведённого индекса эмиссии  $NO$   $g_{NO} = \frac{EINO}{(EINO)_{\chi_{st}=1}} = f(\chi_{st})$ , а также суммарная

скорость образования  $NO$  в диффузионном пламени  $w_{NO} = \int_{\Delta Z} S_{NO} dZ = f(\chi_{st})$ .

Несмотря на немонотонный характер функции  $w_{NO} = f(\chi_{st})$ ,  $EINO$  является монотонно убывающей функцией. При сравнении с работами других авторов выявлено, что неучёт дифференциальной диффузии компонентов и излучения пламени приводит к завышению  $g_{NO}$  и  $w_{NO}$  в области  $\chi_{st} < 1$  (проявляется в изломе характеристик). По сравнению с известными корреляционными

зависимостями для индекса эмиссии  $NO_x$  в струйных диффузионных пламенах, формула (1) пригодна в качестве инженерного инструмента проектирования малоэмиссионных камер сгорания диффузионного типа.

Теоретическая оценка эффекта сокращения эмиссии  $NO_x$  при увеличении  $\chi_{st}$  является ключевым положением (ядром) разрабатываемой концепции малоэмиссионного сжигания топлива. Эффективность подавления образования  $NO_x$  проявляется тем сильнее, чем выше адиабатическая температура (низшая теплота  $H_U$  сгорания топлива). Применение альтернативных видов топлив в ТРДД с  $H_U$  близкой или более, чем  $H_U$  керосина, не ограничивает потенциала ядра концепции по сокращению  $NO_x$ .

Сформулированы принципы разрабатываемой Концепции.

*Принцип 1* – обеспечить высокие значения  $\chi_{st}$  по всей поверхности фронта пламени; *Принцип 2* – обеспечить блокирование фронта пламени и высокотемпературных областей в первичной зоне жаровой трубы; *Принцип 3* – сократить объём первичной зоны жаровой трубы; *Принцип 4* – выполнить распределение расхода воздуха между зонами жаровой трубы, обеспечивающее низкую скорость образования  $NO_x$  во вторичной зоне; *Принцип 5* – обеспечить обогащённый топливом состав газовой смеси в зоне обратных токов на основных режимах работы камеры сгорания.

*Принцип 1* – борьба с поверхностным (вблизи фронта пламени) источником образования  $NO_x$ . *Принцип 2* – подавление объёмного источника образования  $NO_x$  в высокотемпературных молях газа, оставшихся после разбавления воздухом. *Принцип 3* – сокращение образования  $NO_x$  за счёт малого времени пребывания газа в первичной зоне жаровой трубы. *Принцип 4* предотвращает образования  $NO_x$  во вторичной зоне, с большим временем пребывания газа с целью завершения реакции окисления  $CO$  до  $CO_2$ . *Принцип 5* – предотвращает образования  $NO_x$  в зоне обратных токов с повышенным временем пребывания газа для обеспечения устойчивого горения в различных условиях эксплуатации камеры сгорания.

Для численного обоснования принципов Концепции сгенерирована геометрическая модель концептуальной камеры сгорания (рис. 3) в которой учтены сформулированные принципы. Проведена серия трёхмерных расчётов различных типов реализации концепции: с противокруткой воздушных потоков завихрителей (*Тип 1*), со спутной закруткой воздушных потоков завихрителей (*Тип 2*), *Тип 1* с подачей воздуха через Ряд №2 (*Тип 3*), *Тип 1* с подачей воздуха через Ряд №1 (*Тип 4*) с вариацией коэффициента избытка воздуха в жаровой трубе путём изменения расхода топлива. Из-за значительной неопределённости в корректном задании граничных условий для впрыска керосина, в расчётах, в качестве топлива, используется метан.

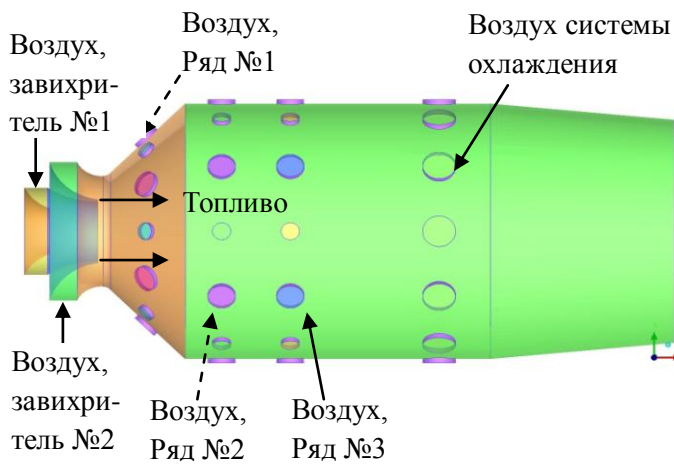


Рисунок 3 – Модель различных типов реализации концептуальной камеры сгорания

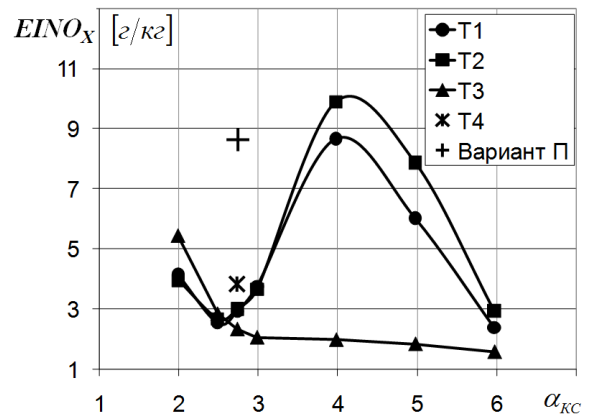


Рисунок 4 – Индекс эмиссии разных типов камер сгорания в зависимости от  $\alpha_{КС}$

$EINO_x$  исследованных типов представлены на рис. 4. Изменение направления вращения воздуха в завихрителях (кривые 1 и 2) практически не влияет на  $EINO_x$  через изменение  $\bar{\chi}_{st}$  из-за различий в пространственном расположении области максимальных касательных напряжений и фронта пламени. *Принцип 1* не продемонстрирован в явном виде, что указывает на нетривиальность задачи увеличения  $\chi_{st}$  на поверхности фронта пламени. Показано, что в условиях представленной геометрической модели, *Принцип 3* совместно с *Принципом 5* имеют определяющее значение для  $EINO_x$ .

Приведена связь (табл. 1) Концепции (КДФП) с представленными в обзоре концепциями по способу воздействия на источник образования  $NO_x$  в объёме, в богатом гомогенном фронте пламени (RF), бедном гомогенном фронте пламени (LF) и диффузионном фронте пламени. Демонстрируется самостоятельность Концепции КДФП и её место среди других концепций малоэмиссионного сжигания топлива в камерах сгорания ТРДД.

**Пятая глава** посвящена описанию стендовой экспериментальной базы ОАО «Авиадвигатель» (одногорелочный отсек), на которой выполнялись натурные испытания демонстраторов Концепции и серийных жаровых труб.

Таблица 1 – Сравнение концепций малоэмиссионного горения




Источник $NO_x$	Способы воздействия концепций на источники образования $NO_x$				
	LPP	RQL	SC	LDI Multi - LDI	КДФП
Поверхностный, $S_{NO}^F$	$(\alpha_\Gamma)_{LF}$	$(\alpha_\Gamma)_{RF}$ , $(\alpha_\Gamma)_{LF}$	$\chi_{st}(D_t)$	$\frac{\alpha_\Gamma[\tilde{P}(Z)]}{\tau_F}$	$\chi_{st}(\nabla Z)$
Объёмный, $S_{NO}^V$	$(\alpha_\Gamma)_L$	$(\alpha_\Gamma)_R$ , $(\alpha_\Gamma)_L$	$\tau_R$	$\alpha_\Gamma(T_{mix})$	$V_{NO}$

Стенд оборудован двумя центробежными электрическими компрессорами. В линии расположен электрический подогреватель воздушного потока. В соответствии с требованиями стандарта ИСАО испытательный стенд ОАО «Авиадвигатель» оборудован системой отбора и анализа проб выхлопного газа для измерения выбросов газообразных загрязняющих веществ. Приводятся технические характеристики газоанализаторов  $NO_x$ ,  $CO$ ,  $CO_2$ ,  $O_2$ ,  $CH_4$ , соответствующие требованиям стандарта ИСАО. Метрологическое обеспечение испытаний соответствует требованиям ГОСТ Р 51672-2000.

**Шестая глава** содержит результаты расчётно-экспериментального подтверждения (обоснования) Концепции на уровне готовности технологии №4 на стенде ОАО «Авиадвигатель». На основе серийной жаровой трубы варианта А2 путём последовательной доработки изготовлены и прошли испытания демонстраторы Концепции Д-1, Д-2, Д-4, Д-5 (табл. 2). Доля расхода воздуха через фронтное устройство и основные отверстия демонстраторов составляет 69...70,5 % от общего расхода, что превышает аналогичную сумму в серийной жаровой трубе А2 ( $\approx 40\%$ ). Испытания Д-1 из-за значительных утечек воздуха признаны некондиционными. Испытания варианта Д-3 признаны нецелесообразными на основании результатов моделирования. Сравнительные испытания проведены при полной температуре воздуха на входе в отсек  $T_K^* = 723\text{ К}$ , полное давление воздуха  $P_K^* = 0,785\text{ МПа}$ . Пределы вариации коэффициента избытка воздуха в жаровой трубе путем изменения расхода топлива  $\alpha_{КС} = 2,75...6$ . В качестве топлива использовался керосин марки ТС-1, подающийся через серийную форсунку камеры сгорания варианта А2.

Для верификации расчётной структуры течения (топливо - метан), горения и образования  $NO_x$  проведена отдельная серия испытаний демонстраторов с подачей природного газа через форсунку, аналогичную форсунке варианта П. Сравнение результатов трёхмерного моделирования и натуральных испытаний по определению  $EINO_x$  представлены на рис. 5.

Таблица 2 – демонстраторы Концепции

Д-2	
Д-4	
Д-5	

Относительная погрешность согласования результатов не более 12,9 %.

Результаты испытаний демонстраторов на керосине представлены на рис. 6 и 7 при сравнении с режимами СВПЦ ПС-90А2.  $R_{00}$  – взлётная тяга ПС-90А2.

Результаты моделирования показывают, что характер изменения  $EINO_x$  Д-2, Д-4, Д-5 является сходственным. Размещение дополнительных основных отверстий на Д-4 позволило эффективней блокировать фронт пламени. Практически постоянный уровень  $EINO_x$  в диапазоне  $\alpha_{КС} = 4 \dots 6$

свидетельствует о диффузионном типе горения. Расчётная интерпретация уменьшения  $EINO_x$  при  $\alpha_{КС} < 4$  связана с действием трёх факторов. Первый – уменьшение доли объёмных реакций образования  $NO_x$ , вблизи стенки трубы. Второй – предотвращение за рядом основных отверстий образования протяжённых зон генерации  $NO_x$ . Третий фактор – увеличение средней по поверхности  $\bar{Z} = Z_{st}$  скорости скалярной диссипации. При  $\alpha_{КС} = 3$  снижение  $EINO_x$  в варианте Д-4 по сравнению с вариантом А2 составляет 35 %. Экстраполяция кривых  $EINO_x$  в

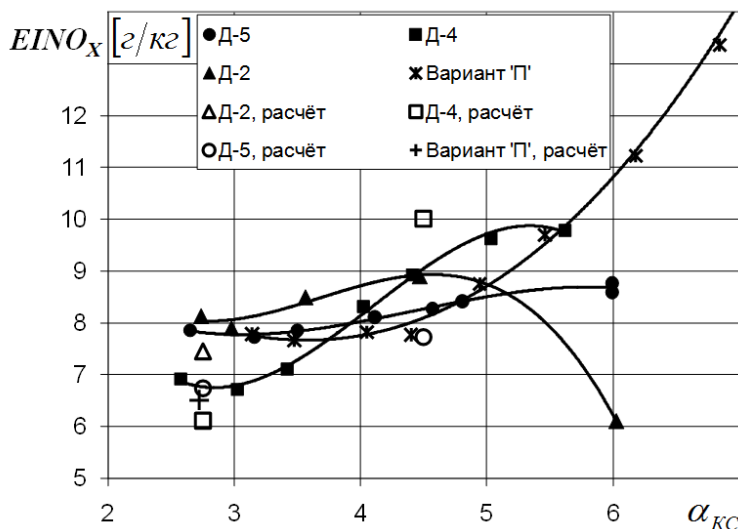


Рисунок 5 – Сравнение  $EINO_x$  варианта II и демонстраторов на природном газе

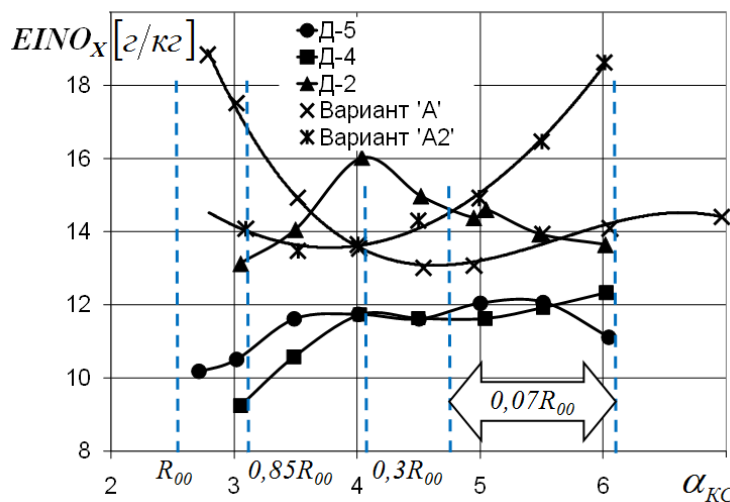


Рисунок 6 – Сравнение  $EINO_x$  вариантов А, А2 и демонстраторов на керосине

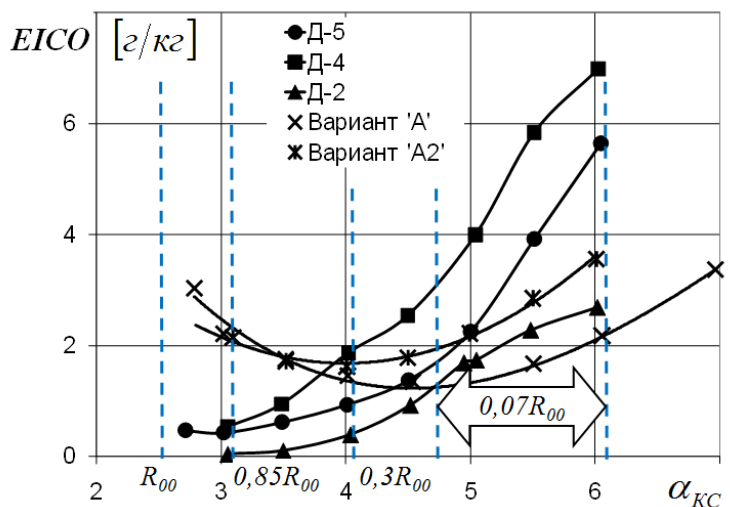


Рисунок 7 – Сравнение  $EICO$  вариантов А, А2 и демонстраторов на керосине

варианте Д-4 и А2 до значения  $\alpha_{KC} = 2,55$  показывает, что Д-4 имеет  $EINO_x$  на  $\approx 47\%$  меньше по сравнению с А2. Все демонстраторы имеют приемлемые  $EICO$  по сравнению с камерами сгорания вариантов А2 и А в диапазоне значений  $\alpha_{KC} = 5..6$ , соответствующих режиму малого газа.

Для надёжной оценки снижения  $P_{NO_x}$  в камере сгорания на основе Д-4 по сравнению с А2 в условиях ПС-90А2, требуется проведение серии испытаний при моделировании  $T_k^*$ ,  $P_k^*$  и  $\alpha_{KC}$ , соответствующие режимам СВПЦ.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Минимальный индекс эмиссии  $NO_x$  в камере сгорания диффузионного типа обеспечивается только за счёт реализации условий, способствующих сгоранию топлива в компактном диффузионном фронте пламени.

2. Сущность концепции камеры сгорания с компактным диффузионным фронтом пламени заключается в подавлении объёмного и поверхностного источников образования  $NO_x$  путём блокирования фронта пламени в первичной зоне жаровой трубы и газодинамической интенсификацией горения топлива.

3. В рамках концепции основные принципы малоэмиссионного сжигания топлива в камерах сгорания ТРДД объединены в структурированную систему с выявленными взаимосвязями.

4. Применение разработанной концепции к жаровой трубе серийной камеры сгорания ТРДД ПС-90А2 в стендовых условиях с высокими параметрами позволяет снизить индекс эмиссии  $NO_x$  на **35 ...47 %** в условиях взлётно-го режима, что по предварительной оценке, обеспечивает целевой параметр эмиссии  $NO_x$  норм ИСАО 2020 г.

5. Концепция камеры сгорания с компактным диффузионным фронтом пламени подтверждена на 4-м уровне готовности технологии. Внедрение разработанной концепции в ТРДД под нормы ИСАО 2020 г. имеет существенно меньший технический риск по сравнению с другими концепциями и не ограничивает использование альтернативных авиационных видов топлив.

## ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

### Статьи в изданиях, рекомендованных ВАК

1. **Цатиашвили, В. В.** Численное моделирование процессов в микрофакельном горелочном устройстве / В.В. Цатиашвили // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. С.П. Королева. – 2007. – №2. – С. 185-190.

2. **Иноземцев, А.А.** Эмиссионное совершенствование камеры сгорания богато-бедного типа на этапе проектирования / А.А. Иноземцев, В.Г.

Августинович, В.В. Цатиашвили // Известия вузов. Авиационная техника. – №4. – Казань, 2010. – С. 44 – 48.

3. **Иноземцев, А.А.** Прогнозирование эмиссионных характеристик на основе реакторной модели камеры сгорания / А.А. Иноземцев, В.Г. Августинович, В.В. Цатиашвили // Известия вузов. Авиационная техника. – №1. – Казань, 2011. – С. 45 – 50.

4. **Цатиашвили, В.В.** Влияние скорости смешения реагентов в диффузионном пламени на эмиссию оксидов азота / В.В. Цатиашвили // Известия вузов. Авиационная техника. – №1. – Казань, 2013. – С. 38 – 43.

#### Статьи в прочих изданиях

5. **Цатиашвили, В.В.** Прогнозирование эмиссионных характеристик в реакторной модели идеальной камеры сгорания «богато-бедного» типа на этапе проектирования / В.В. Цатиашвили // Тезисы докладов 56 научно-технической конференции «Применение ГТУ в энергетике и промышленности»: Комиссия по газовым турбинам РАН – Пермь: ОАО «Всероссийский теплотехнический институт», ОАО «Авиадвигатель», 2009. – С. 60 – 69.

6. **Цатиашвили, В.В.** Результаты численного исследования влияния геометрии струйного смесителя камеры сгорания «богато-бедного» типа на эмиссию оксидов азота / В.В. Цатиашвили // Тезисы 8-й международной конференции «Авиация и космонавтика-2009», – Москва, 2009. – С. 129 – 130.

7. **Inozemtsev, A. A.** Improvement of Rich-Lean Combustion Chamber Emission at the Design Stage / A. A. Inozemtsev, V. G. Avgustinovich, V. V. Tsatiashvili // Russian Aeronautics (Iz. VUZ). – Vol. 53. – No. 4. – 2010.

8. **Inozemtsev, A. A.** Prediction of Emission Characteristics Using the Reactor Model of Combustion Chamber / A. A. Inozemtsev, V. G. Avgustinovich, V. V. Tsatiashvili // Russian Aeronautics (Iz. VUZ). – Vol. 54. – No. 1. – 2011.

9. **Tsatiashvili, V.V.** Nonequilibrium Effect on Nitrogen Oxides Production in a Diffusion Flame / Tsatiashvili V.V., Avgustinovich, V.G. // Paper GT2012-68222. Proceedings of ASME Turbo Expo. – 2012. – P. – [1-8].

Зав. РИО М.А. Салкова

Подписано в печать 13.05.2013.

Формат 60x84 1/16. Уч.-изд. л. 1. Тираж 100. Заказ 150.

Рыбинский государственный авиационный технический университет  
имени П.А. Соловьёва (РГАТУ им. П.А. Соловьёва)

Адрес редакции: 152934, г. Рыбинск, ул. Пушкина, 53

Отпечатано в множительной лаборатории РГАТУ имени П.А. Соловьёва  
152934, г. Рыбинск, ул. Пушкина, 53