

На правах рукописи



Беляев Владимир Васильевич

ПОВЫШЕНИЕ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ГТУ
ПУТЕМ ОРГАНИЗАЦИИ МАЛОЭМИССИОННОГО ГОРЕНИЯ
В КАМЕРАХ СГОРАНИЯ ГТД

Специальность 05.07.05

Тепловые, электроракетные двигатели
и энергоустановки летательных аппаратов

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Самара 2006

Работа выполнена в ОАО “Самарский научно–технический комплекс им. Н.Д.Кузнецова” и ГОУВПО “Самарский государственный аэрокосмический университет им. академика С.П.Королева”.

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Цыбизов Юрий Ильич

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Кныш Юрий Алексеевич;
кандидат технических наук, доцент
Свердлов Евгений Давыдович

Ведущая организация: ОАО “Самарское конструкторское бюро машиностроения”

Защита диссертации состоится «22» сентября 2006г. на заседании диссертационного совета Д212.215.02 в Самарском государственном аэрокосмическом университете (СГАУ) по адресу:
443086, г.Самара, Московское шоссе, 34а.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке СГАУ.

Отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенный гербовой печатью предприятия, просим направлять по указанному адресу на имя ученого секретаря совета.

Автореферат разослан «21» августа 2006г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор технических наук,
профессор

В.Н.Матвеев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы:

В настоящее время применение газотурбинной техники для преобразования скрытой энергии органических топлив в те виды энергии, которые освоены человеком в его жизнедеятельности (эффективная тяга для приведения транспортных устройств в движение, тепло и электричество для применения в быту и в производстве, и т.п.) достигло высокой степени совершенства разработки, производства и эксплуатации.

Высокий уровень экономичности, эксплуатационной эффективности и экологической безопасности таких устройств – основные требования мирового рынка применительно к ГТД. Принято экологическую безопасность двигателей оценивать по их эмиссионным характеристикам и шуму.

Эмиссионную характеристику двигателя определяет, в основном, рабочий процесс камеры сгорания. Ужесточение требований к выбросам вредных веществ и рост параметров цикла ГТД значительно усложняет задачу проектирования камер сгорания, удовлетворяющих требованиям технического задания не только по выбросам вредных веществ, но и по работоспособности и надежности. Это обуславливает необходимость предварительного прогнозирования основных характеристик камер сгорания на этапе проектирования.

Недостаточный уровень знаний особенностей рабочих процессов приводит к тому, что в случае невыполнения одного или нескольких требований технического задания, решение проблемы осуществляется в ходе исключительно трудоемкого и дорогостоящего процесса экспериментальной доводки.

Для малоэмиссионных камер сгорания (МКС) ГТД с высокими параметрами термодинамического цикла (ГТД ВПТЦ), у которых $\pi_k^* \geq 25$, трудоемкость этапа экспериментальной доводки существенно возрастает из-за необходимости моделирования или имитации рабочих условий, что влечет за собой усложнение и, как следствие, удорожание процедуры испытаний.

Одной из существенных проблем обеспечения экологической безопасности ГТД является значительная зависимость скорости окисления азота от

рабочих параметров в камере сгорания T_k^* и P_k^* . Эту проблему решают, в основном, путем сжигания заранее перемешанной “бедной” топливовоздушной смеси (ТВС).

Известна существенная зависимость температуры пламени от коэффициента избытка воздуха $\alpha_{ТВС}$ предварительно перемешанной ТВС. Это обстоятельство позволяет выбирать для работы камеры сгорания такой диапазон по $\alpha_{ТВС}$, в котором возможно сжигание топлива с высокой полнотой сгорания и с незначительным образованием NO_x . Для практического использования указанный диапазон ограничен резким снижением полноты сгорания топлива и ухудшением устойчивости горения в области $\alpha_{ТВС} > 2$. В условиях камер сгорания ТВС имеет некоторую неравномерность концентрации топлива, выраженную в том, что в потоке рабочего тела одновременно существуют “по соседству” моли газа с различными значениями коэффициента избытка воздуха, что обостряет указанную проблему.

Для решения проблем устойчивости и полноты сгорания “бедных” ТВС организуют так называемое зонное горение: ТВС подают в камеру сгорания двумя или более потоками в разных сечениях жаровой трубы. Горение каждого потока ТВС происходит в “своей” зоне. Выключение одной или нескольких зон позволяет сместиться по диапазону $\alpha_{ТВС}$ так, чтобы обеспечить устойчивость и полноту сгорания. Возможно также перераспределение топлива по зонам с той же целью.

Организация многозонного горения приводит к необходимости продолжительной отработки температурной неравномерности на выходе из жаровой трубы МКС и согласования этой характеристики со смежными узлами.

В условиях ГТД ВПТЦ особенно актуальным является исследование особенностей рабочего процесса камер сгорания, влияющих на образование вредных веществ и работоспособность системы горения, в частности, эффективности подготовки ТВС и расположения зон горения.

Цель работы: снижение выбросов вредных веществ на основе организации малоэмиссионного горения в камере сгорания конвертированного ГТД ВПТЦ.

Задачи исследования:

1. Разработать способ организации малоэмиссионного горения в камерах сгорания ГТД, позволяющий снизить выбросы вредных веществ и минимизировать объем экспериментальной отработки.

2. На основе разработанного способа получить технические решения по модернизации МКС двигателя НК–38СТ.

3. Выполнить численное и экспериментальное исследования рабочего процесса разработанной МКС с предварительным тестированием математической модели и последующим обобщением результатов.

Достоверность, обоснованность и представительность результатов работы обеспечены корректным применением в расчетно–теоретическом исследовании законов сохранения в общепризнанном виде, использованием апробированных методик проведения экспериментов, экспериментальных данных, полученных на аттестованных стендах квалифицированными специалистами.

Научная новизна работы:

1. Разработан оригинальный способ организации малоэмиссионного горения в камерах сгорания ГТД, позволяющий значительно снизить выбросы вредных веществ.

2. Обобщены результаты теоретического и экспериментального исследований рабочего процесса МКС ГТД ВПТЦ НК–38СТ, в конструкции которой реализован полученный комплекс научно обоснованных технических решений.

Практическая ценность и внедрение результатов работы:

1. Разработанный способ организации малоэмиссионного горения, реализованный в конструкции МКС ГТД ВПТЦ НК–38СТ, позволяет:

– получить на номинальном режиме двигателя конкурентоспособные уровни выбросов вредных веществ $NO_x \leq 50 \text{ мг/м}^3$ и $CO \leq 50 \text{ мг/м}^3$;

– снизить материалоемкость двигателя за счет размещения конструкции МКС в габаритах авиационного ГТД.

2. Методика выбора параметров системы подготовки ТВС внедрена в систему проектирования камер сгорания ОАО “СНТК им. Н.Д.Кузнецова”.

3. Зависимость выбросов NO_x от режимных параметров и неравномерности концентрации топлива в ТВС может быть использована как номограмма при выборе геометрии МКС ГТД ВПТЦ.

Апробация работы:

Основные результаты диссертации поэтапно докладывались на:

– Всероссийской научно–технической конференции “Процессы горения, теплообмена и экология тепловых двигателей”, г. Самара, 2000г.; 2002г.; 2004г.;

– Всероссийской научно–технической конференции, посвященной памяти Н.Д.Кузнецова, г. Самара, 2003г.;

– Научно–техническом семинаре по проблемам низкоэмиссионных камер сгорания газотурбинных установок “Опыт разработки, проблемы создания и перспективы развития низкоэмиссионных камер сгорания ГТУ”, г. Москва, ЦИАМ–ВТИ, 2004г.;

– Международной научно–технической конференции “Двигатели XXI века”, посвященной 75–летию ЦИАМ, г. Москва, 2005г.;

– НТС ОАО “СНТК им. Н.Д.Кузнецова”, г. Самара, 2003г.; 2004г. и др.

Публикации:

По теме диссертации опубликовано 10 печатных работ, в том числе: 5 статей, 3 тезиса доклада, 2 научно–технических отчета.

Структура и объем работы:

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка использованных источников. Диссертация изложена на 150 страницах машинописного текста, содержит 64 иллюстрации, 5 таблиц и список использованных источников из 137 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении раскрывается актуальность темы исследования, показаны особенности конвертирования авиадвигателей в наземные ГТД.

В первой главе проведен обзор работ, посвященных разработке МКС.

Показаны особенности организации рабочего процесса МКС по известным схемам сжигания топлива без подачи вспомогательных веществ (воды, пара,

аммиака и др.) в тракт двигателя: “LPP”, “RQQL” и их комбинации. В данном исследовании рассматривается “LPP” схема организации малоэмиссионного горения.

Представлен современный уровень разработок МКС, нашедших применение в серийно выпускаемых авиапроизводных ГТД ВПТЦ. В мировой практике стационарного турбостроения общепринятым показателем экологической безопасности двигателя является достижение уровня выбросов NO_x и $CO \leq 50$ мг/м³.

В настоящее время только три фирмы серийно производят конвертированные ГТД ВПТЦ с МКС:

– *General Electric* – двигатели LM5000 ($\pi_k^*=26$) и LM6000 ($\pi_k^*=30$) с многогорелочной трехъярусной (трехзонной) кольцевой МКС;

– *Rolls-Royce – Trent* ($\pi_k^*=35$) с модульной трехзонной трубчато-кольцевой МКС с радиальными жаровыми трубами;

– ОАО “СНТК им. Н.Д.Кузнецова” – двигатель НК-38СТ ($\pi_k^*=26$) с модульной трубчато-кольцевой двухзонной МКС с диагональными жаровыми трубами.

Проведенный анализ способов организации малоэмиссионного горения, реализованных в ГТД ВПТЦ, показал, что основным недостатком многозонных МКС являются их развитые габариты и, как следствие, большая материалоемкость, что обусловлено стремлением разработчиков обеспечить необходимую эффективность подготовки ТВС. К недостаткам можно отнести также применение усложненных систем регулирования МКС.

В ходе анализа высказано предположение, что в настоящее время существует возможность повышения эффективности подготовки “бедной” ТВС и осуществления ее сжигания в габаритах авиационных камер сгорания без ухудшения полноты сгорания.

Таким образом, вопрос сокращения числа зон горения (или их объединения) с целью снижения материалоемкости и стоимости ГТД ВПТЦ остается открытым и требует дополнительного исследования.

Обоснованы методы, используемые для решения поставленных задач исследования. В данной работе применялись:

- 1) теоретические методы – идеализация и формализация;
- 2) экспериментальные методы – натурный эксперимент с количественным измерением интересующих величин, наблюдение и сравнение;
- 3) эмпирико–теоретические методы для исследования рабочих процессов – формализация и анализ.

Во второй главе представлен разработанный автором оригинальный способ организации малоэмиссионного горения, основанный на сжигании “бедной” предварительно подготовленной ТВС. Оригинальность предложенного способа заключается в сочетании прямоточной подачи воздуха в завихритель горелочного устройства при отсутствии загромождения проточной части топливоподводящими элементами, стабилизации пламени комбинацией закрутки ТВС, плохообтекаемого тела и газодинамического способа и “фиксировании” приосевой зоны обратных токов (ЗОТ) посредством профилированной поверхности контакта плохообтекаемого тела и ЗОТ.

В первом разделе разработан способ организации малоэмиссионного горения, сформирована его структурная схема. На рисунке 1 показана схематизированная картина течения в области подготовки, стабилизации и сжигания предварительно подготовленной ТВС.

Система комбинированной стабилизации пламени (рисунок 2) основана на использовании трех механизмов: 1) образования радиального градиента статического давления при закрутке, способствующего приосевому распаду закрученного потока, 2) действия градиента давления на срезе плохообтекаемого тела – развитой втулки завихрителя, 3) газодинамической стабилизации на струях воздуха, вдуваемого внутрь жаровой трубы из отверстий в окончании центрального тела под углом к линиям тока. Дополнительная стабилизация осуществлена путем профилирования поверхности контакта втулки завихрителя с ЗОТ по линиям тока.

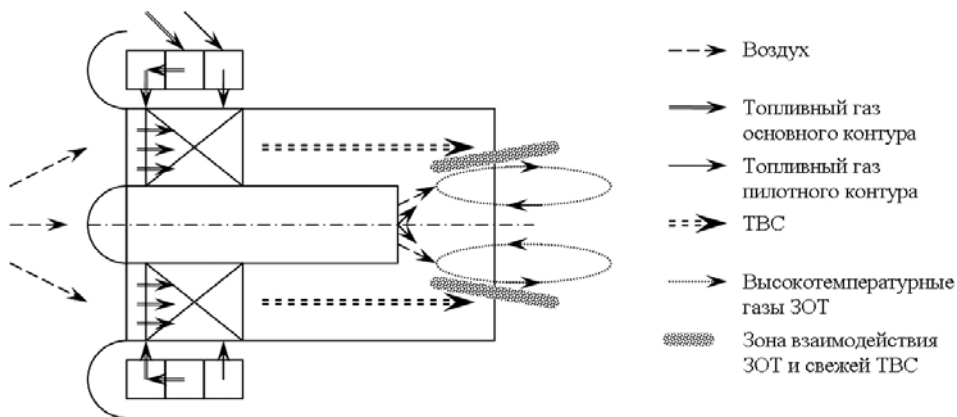


Рисунок 1 – Картина течения в МКС

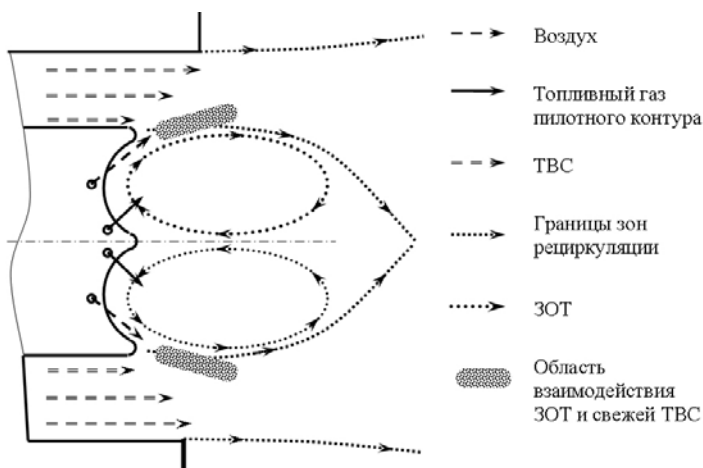


Рисунок 2 – Система комбинированной стабилизации пламени

Разработана методика выбора параметров системы подготовки ТВС, основное содержание которой заключается в “адресной” подаче топливного газа в поток воздуха с целью эффективного использования рабочего пространства смесительного элемента.

Методика основана на использовании известного эмпирического уравнения формы оси поперечной струи в сносящем потоке

$$\frac{x}{d_T} = \frac{q_T}{q_B} \cdot \left(\frac{y}{d_T}\right)^{2,55} + \frac{y}{d_T} \cdot \left(1 + 2,5 \cdot \frac{q_T}{q_B}\right) \cdot \text{tg}(90^\circ - \beta),$$

где x и y – текущие координаты;

d_T – диаметр топливного отверстия;

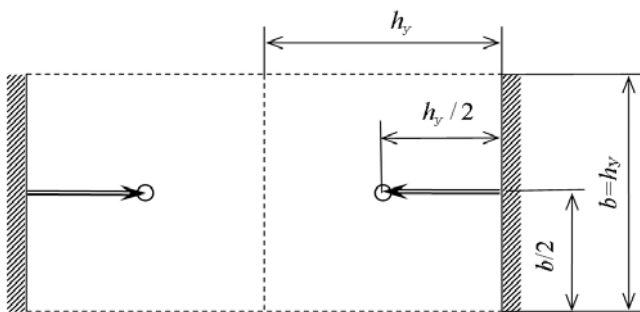
$q_T = \rho_T \cdot V_T^2 / 2$ – скоростной напор потока топливного газа;

$q_B = \rho_B \cdot V_B^2 / 2$ – скоростной напор воздушного потока;

β – угол ввода струи.

Основным параметром, характеризующим условия в канале смешения, является скоростной напор воздуха $\rho_B \cdot V_B^2 / 2$, определяющий в свою очередь скоростной напор струй топлива $\rho_T \cdot V_T^2 / 2$, необходимый для их внедрения в поток воздуха с целью эффективного использования пространства канала смешения.

Расчетная схема элементарного участка межлопаточного канала представлена на рисунке 3.



○ – “адрес” подачи топлива

Рисунок 3 – Схема элементарного участка межлопаточного канала “адресной” системы подготовки ТВС

Схема течения поперечной струи в сносящем потоке показана на рисунке 4. На основе анализа литературных источников высказано предположение о границе индивидуальности поперечной струи в сечении $x/d_T = 25$. Следовательно, “адресом” подачи струи будет координата y/d_T ее оси в сечении $x/d_T = 25$. Предположим, что струи топлива от сечения ввода вниз по потоку увлекаются воздухом, проходящим в межлопаточных каналах завихрителя, и незначительно влияют на общее поле течения. Тогда координата y/d_T , спроецированная на

указанное сечение, совпадет с центром участка воздействия струи.

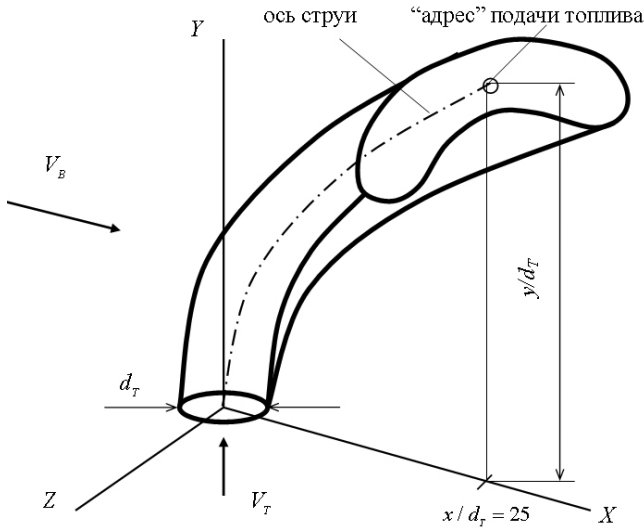


Рисунок 4 – Схема течения поперечной струи в сносящем потоке

Принимая угол ввода струи $\beta = 90^0$, можно определить число и размеры отверстий для межлопаточного канала завихрителя из условия “адресной” подачи топлива

$$\begin{cases} \frac{\rho_B \cdot V_B \cdot h_y^2}{\rho_T \cdot V_T \cdot \frac{\pi d_T^2}{2}} = \alpha_{TBC} \cdot L_0; \\ \frac{\rho_T \cdot V_T^2}{\rho_B \cdot V_B^2} \cdot 25 = \left(\frac{h_y}{2 \cdot d_T} \right)^{2,55} \end{cases}$$

Предполагается, что с использованием представленной методики перемешивание топлива с воздухом до молекулярного уровня произойдет на наименьшей длине.

В реальных конструкциях камер сгорания участки подготовки ТВС имеют неправильные формы, к тому же они ограничены габаритами горелочных устройств. Возникает необходимость оценки качества перемешивания топлива с воздухом для определения степени совершенства конструкции МКС.

Для оценки эффективности подготовки ТВС предложен безразмерный

параметр, характеризующий качество смешения топлива с воздухом

$$\eta_{TBC} = \int_m \left(1 - \left| \frac{(C_T)_{cp} - C_T}{(C_T)_{cp}} \right| \right) dm,$$

где C_T – массовая концентрация топлива в произвольной точке исследуемой области, кг/кг;

dm – относительный массовый расход ТВС через элементарную площадку;

$$(C_T)_{cp} = \frac{G_T}{G_B + G_T} - \text{средняя массовая концентрация топлива в ТВС,}$$

кг/кг, характеризующая усредненный по всей ТВС уровень концентрации топливного газа. Здесь G_T и G_B – расходы топлива и воздуха соответственно.

В главе 3 предложенный параметр применен как основной для определения влияния конструктивных факторов на выбросы вредных веществ.

Во втором разделе главы на основе разработанного способа организации малоэмиссионного горения создана кольцевая прямоточная МКС двигателя НК–38СТ, конструктивная схема которой представлена на рисунке 5.

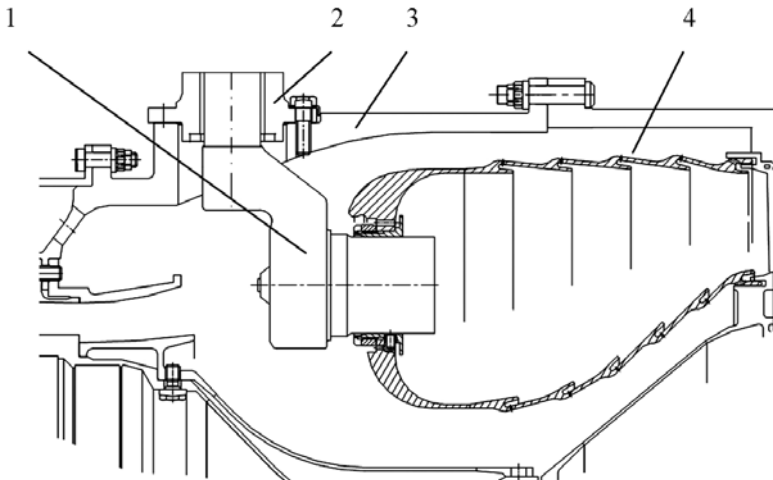


Рисунок 5 – Кольцевая прямоточная МКС ГТД ВПТЦ НК–38СТ

Конструктивное исполнение жаровой трубы 4, узлов крепления 2 горелочных устройств 1 и жаровой трубы, а также корпусов 3 указанной МКС

выполнено в манере, традиционной для ОАО “СНТК им. Н.Д.Кузнецова”. МКС размещена в габаритах авиа-прототипа НК-93.

Основой МКС является разработанное автором горелочное устройство, особенности конструкции которого представлены ниже.

В соответствии с предложенным способом организации малоэмиссионного горения конструктивная схема горелочного устройства (рисунок 6) включает в себя следующие элементы.

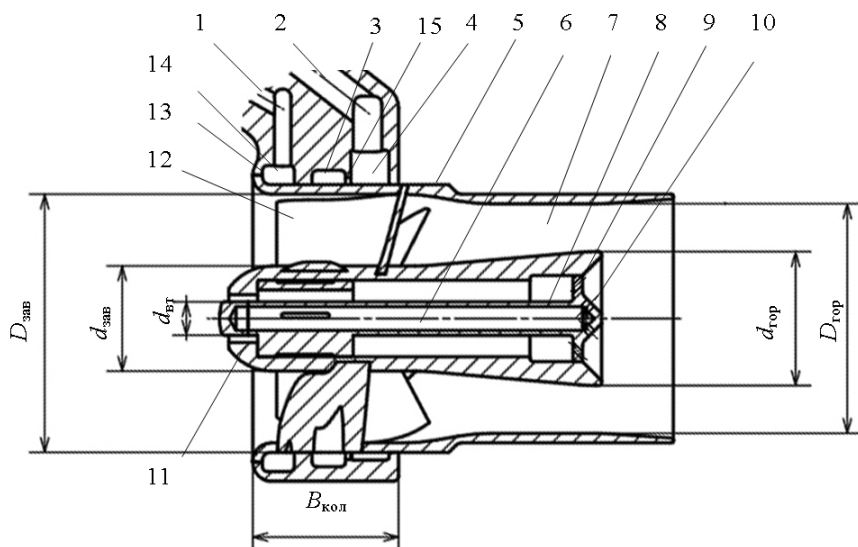


Рисунок 6 – Конструктивная схема горелочного устройства МКС ГТД ВПТЦ НК-38СТ

1) Блок газосборников 13 с выполненными в нем каналами подачи пилотного 1 и основного 2 топлива, газосборников пилотного 14 и основного 4 топлива, коллектора основного топлива 3, сообщенного с полостями (условно не показаны) перфорированных лопаток 12.

2) Завихритель горелочного устройства, состоящий из наружной втулки 5, втулки центрального тела 11, набора перфорированных полых лопаток 12.

3) Втулка 8 предназначена для перепуска небольшой части воздуха, поступающего из компрессора, внутрь жаровой трубы через отверстия 9 в днище центрального тела для его охлаждения и дополнительной газодинамической стабилизации пламени.

Система транспортировки пилотного топлива включает в себя: газосборник 14 пилотного топлива, сообщенный с коллектором 6 посредством каналов (условно не показаны), размещенных в лопатках и пилонах втулки 8. Коллектор 6 сообщен с жаровой трубой посредством отверстий 10 подачи пилотного топлива.

В результате введения выравнивающей решетки 15 (рисунок 6) и профилирования топливного коллектора 4 по закону $dF / d\varphi = const$ снижена неравномерность распределения топливного газа по лопаткам завихрителя с $\pm 12,5\%$ до $\pm 0,5\%$.

Для формирования межлопаточного пространства завихрителя и обеспечения равномерного радиального профиля составляющих вектора скорости на выходе из зоны подготовки ТВС 7 (рисунок 6), втулочный и периферийный профили, выполненные, как показано на рисунке 7, разнесены от оси с целью обеспечения плавности конфузорных межлопаточных каналов.

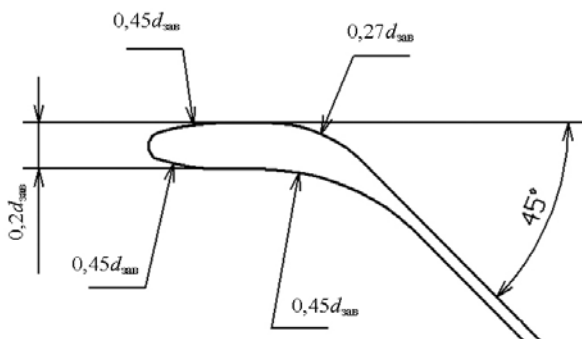


Рисунок 7 – Профиль пера лопатки завихрителя

По аналогии с известным авиационным термином предложено название представленного способа малоэмиссионного горения: “LPS” – *Lean Premixed and Stabilized* (“бедная” – предварительно перемешанная – стабилизированная).

В третьей главе составлена математическая модель горения газообразного топлива, и на ее основе проведено численное исследование рабочего процесса МКС ГТД ВПТЦ НК-38СТ.

На основании анализа литературных источников для использования в данном исследовании были выбраны:

– модель течения, основанная на турбулентных уравнениях Навье–Стокса в форме Рейнольдса и гипотезе Буссинеска о виде рейнольдсовых напряжений для моделирования турбулентной вязкости;

– модель турбулентности $k-\varepsilon$ Лондера–Сполдинга, как наиболее апробированная в мировой практике расчетов турбулентных течений и обладающая лучшим отношением точность/устойчивость;

– модель горения газообразного метана на основе известных уравнений сохранения вещества и энергии и уравнений химической кинетики;

– модель учета влияния турбулентных пульсаций, основанная на описании рассеяния вихрей, являющаяся развитием модели распада вихря Д.Сполдинга;

– модель окисления азота воздуха, основанная на известном расширенном механизме Я.Б.Зельдовича.

Для тестирования составленной модели рассчитаны течения закрученного кольцевого потока в модели трубчатой камеры сгорания и в области поперечной струи в сносящем потоке для $q_T / q_B = 4,75$. Результаты, представленные на рисунках 8 и 9, позволяют заключить о применимости составленной модели для расчетов сложных течений, в том числе с ЗОТ.

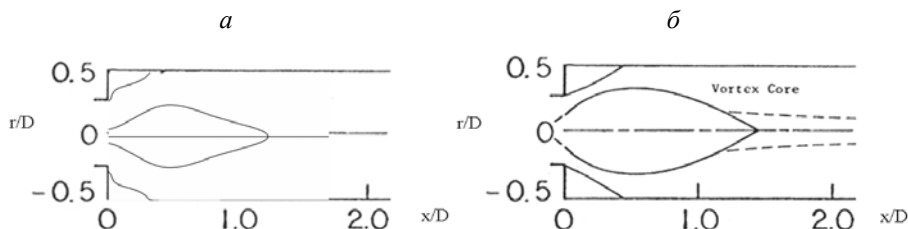


Рисунок 8 – Границы ЗОТ, полученные при тестировании (а) и в эксперименте Д.Лилли (б)

Тестирование модели образования оксидов азота NO_x проведено на модели базовой МКС двигателя НК-38СТ. Результаты сравнения рассчитанных и измеренных значений NO_x представлены в таблице 1.

На низких режимах работы двигателя расчет базовой МКС занижает значения выбросов NO_x . Это объясняется неоптимальным составом в МКС на этих режимах и небольшой полнотой сгорания, характерных для низких режимов стационарных ГТД.

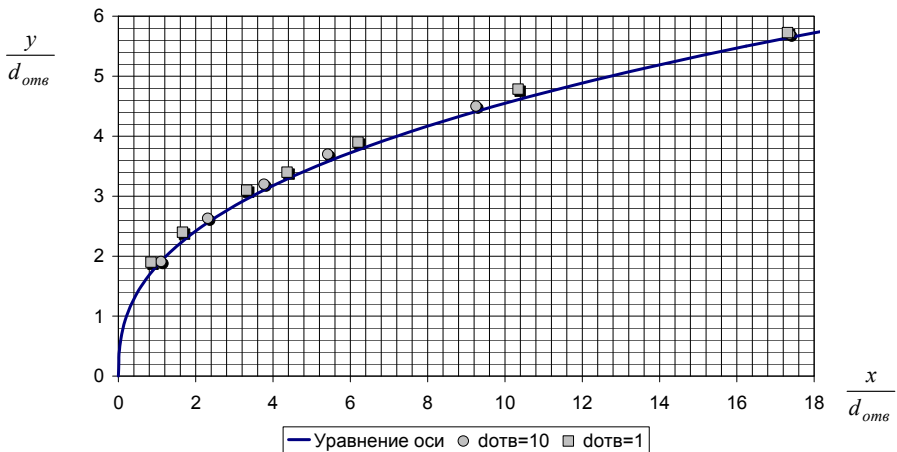


Рисунок 9 – Конфигурация оси поперечной струи в сносящем потоке

Таблица 1 – Сравнение рассчитанных и измеренных значений NO_x НК–38СТ с трубчато–кольцевой МКС базовой конструкции

Мощность двигателя N , МВт	NO_x , мг/м ³ эксперимент	NO_x , мг/м ³ расчет
1,96	15	11
8,56	56	63
12,91	160	173

В целом можно сделать вывод, что составленная математическая модель позволяет прогнозировать выбросы вредных веществ, в частности NO_x .

Работа МКС в составе двигателя отличается от работы традиционных камер сгорания необходимостью перераспределения топлива по контурам с тем, чтобы обеспечить устойчивость работы МКС. Указанная особенность обуславливает выбор в качестве основного режимного параметра исследуемой МКС отношения расхода топлива, подаваемого в пилотный контур, к суммарному расходу топлива $G_{T1к}/G_T$.

Численное исследование рабочего процесса разработанной МКС проведено в двух направлениях:

1) Исследованы влияния режимных и конструктивных факторов на выбросы оксидов азота $NO_x = f(\alpha_{TBC}, P_{TBC}^*, T_{TBC}^*, \eta_{TBC})$. Расчеты рабочего процесса с образованием NO_x проведены на следующих режимах:

$P_{TBC}^* = 0,1; 1,0; 2,6$ МПа при $T_{TBC}^* = 800\text{K}$ и $T_{TBC}^* = 650; 500\text{K}$ при $P_{TBC}^* = 2,6\text{МПа}$. На всех режимах менялись значения $\eta_{TBC} = 0,6; 0,88; 1,0$ и $\alpha_{TBC} = 1,5; 1,75; 2,0$.

2) Рассчитаны значения выбросов NO_x на режимах дроссельной характеристики двигателя НК–38СТ, а также на режимах стендовых экспериментов, в зависимости от $G_{T1к}/G_T$.

Результаты первого направления исследования представлены на рисунке 10 в обобщенном виде.

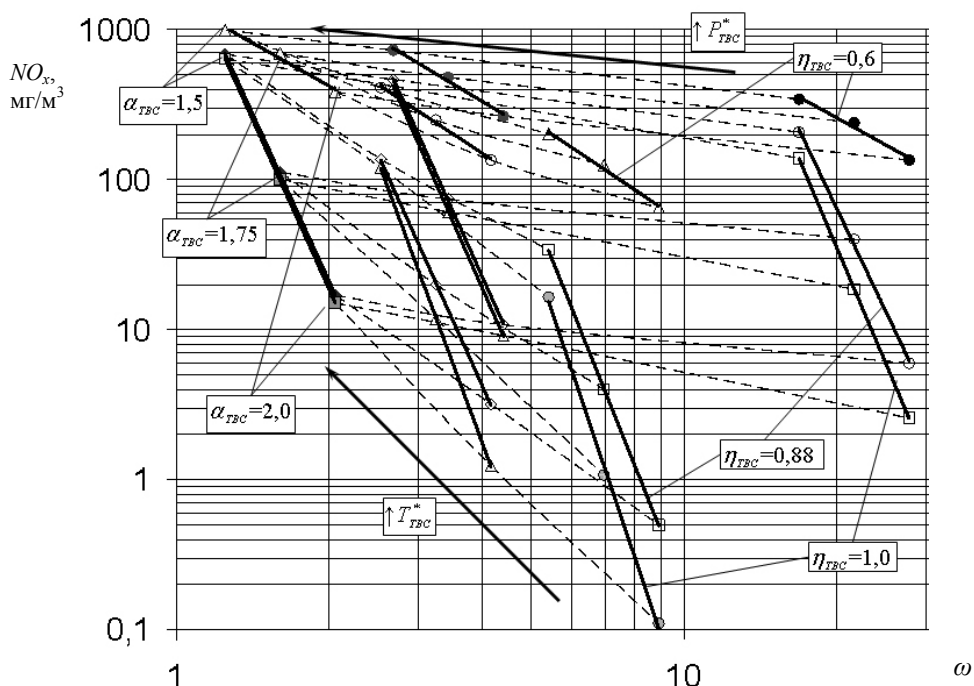


Рисунок 10 – Влияние режимных и конструктивных факторов на выбросы NO_x

Для учета влияния реакционной способности ТВС, а также времени пребывания, координатой по оси абсцисс выбран параметр форсирования $\omega = G_{TBC} \cdot \exp(\alpha_{TBC} - T_{TBC}^* / 300) / V_{ЖТ}$, предложенный А.М.Постниковым. Сплошные линии – изолинии η_{TBC} , пунктирные – изолинии α_{TBC} .

Из рассмотрения графиков рисунка 10 следует, что влияние режимных параметров T_{TBC}^* и P_{TBC}^* на выбросы NO_x зависит от η_{TBC} и α_{TBC} , причем

зависимость от α_{TBC} тем сильнее, чем эффективнее подготовлена ТВС.

Результаты второго направления исследования, представленные на рисунке 11, позволяют предположить, что в диапазоне мощности двигателя НК-38СТ $(0,7 \dots 1,0) N_{ном}$ выбросы NO_x не превысят 50 мг/м^3 при $G_{T1к}/G_T \leq 0,05$.

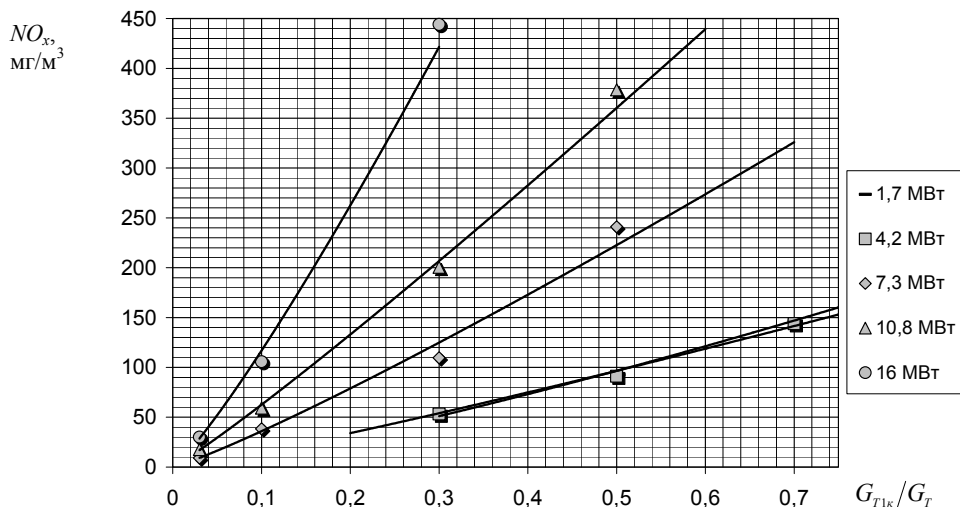


Рисунок 11 – Значения рассчитанных выбросов NO_x на режимах дроссельной характеристики ГТД ВПТЦ НК–38СТ с разработанной МКС

Четвертая глава содержит описание экспериментальных установок для исследований рабочего процесса МКС, методики проведения испытаний отсека и полноразмерной МКС, а также результаты экспериментов.

Изображения отсека и установки представлены на рисунке 12. При испытаниях получено согласование измеренных значений NO_x на отсеке и полноразмерной установке МКС.

Анализ экспериментальных данных (рисунки 13...15) показал согласованность результатов испытаний на отсеке и полноразмерной МКС с расчетами главы 3.

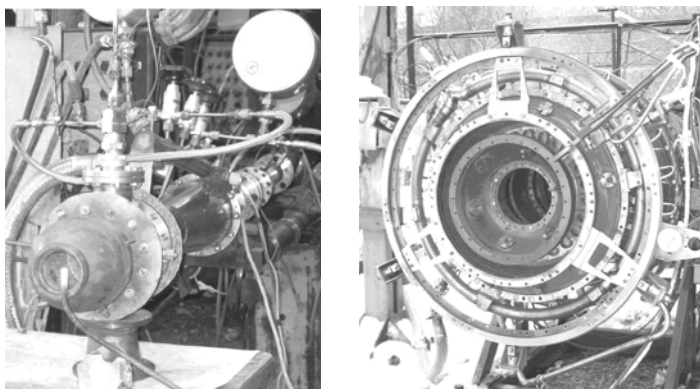


Рисунок 12 – Внешний вид одnogорелочного отсека (слева) и полноразмерной установки (справа) разработанной МКС ГТД ВПТЦ НК–38СТ

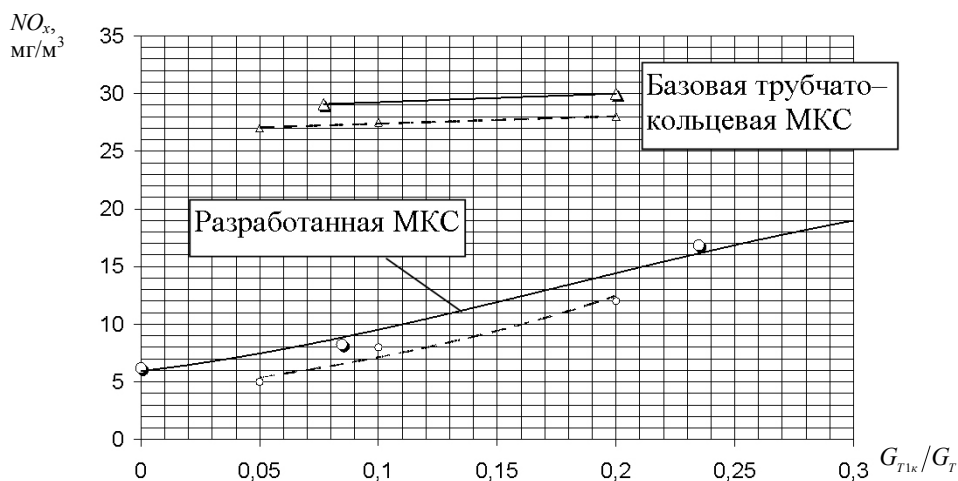


Рисунок 13 – Выбросы NO_x на выходе из базовой и разработанной МКС на режиме: $\alpha_{доп}=1,8$; $P^*_{ТВС}=0,1$ МПа; $T^*_{ТВС}=590$ К. Пунктирные линии (маленькие значки) – рассчитанные значения. Экспериментальные значения базовой МКС получены В.Н.Лавровым.

Эффективность разработанного способа организации малоэмиссионного горения иллюстрируется рисунком 13, на котором представлена зависимость выбросов NO_x от относительного расхода пилотного топлива G_{T1k}/G_T базовой и разработанной МКС при работе на атмосферном давлении. Разработанная МКС имеет более чем 3-х кратное снижение NO_x в области $G_{T1k}/G_T < 0,1$ по сравнению с базовой конструкцией.

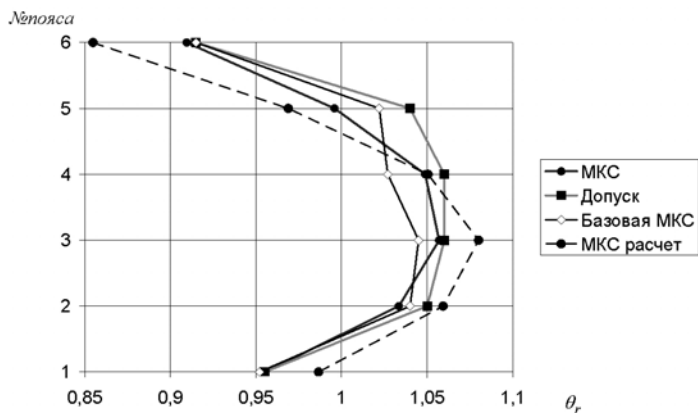


Рисунок 14 – Профили радиальной температурной неравномерности на выходе из МКС НК-38СТ

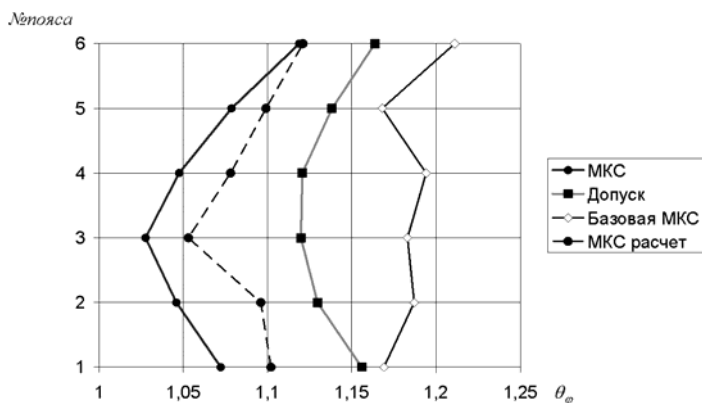


Рисунок 15 – Профили окружной температурной неравномерности на выходе из МКС НК-38СТ

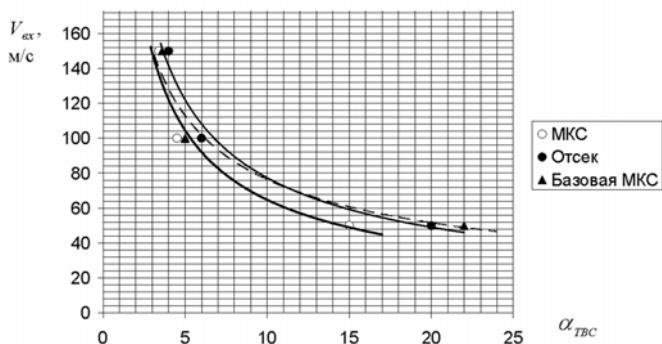


Рисунок 16 – Измеренные значения срыва пламени в МКС НК-38СТ

При испытаниях в одинаковых условиях выбросы оксидов углерода CO у разработанной МКС оказались в 1,2 раза выше, чем у базовой. НК-38СТ с базовой МКС на режиме номинальной мощности показал результат $CO = 40$ мг/м³. Следовательно, можно ожидать у разработанной МКС $CO = 48$ мг/м³.

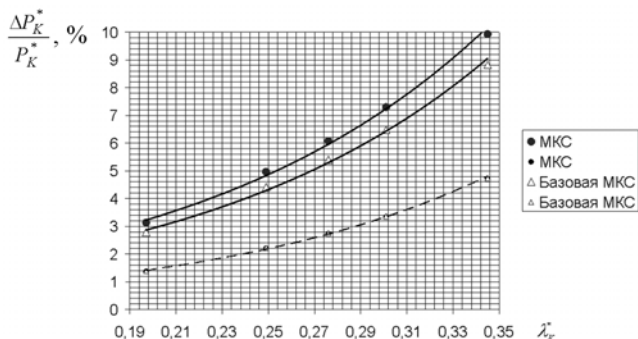


Рисунок 17 – Измеренные значения потерь полного давления МКС НК–38СТ. Пунктирная линия – перепад на жаровой трубе.

Можно отметить, что у разработанной МКС имеется незначительное ухудшение характеристики срыва пламени, а также увеличение гидравлических потерь, характерные для МКС LPP .

В целом МКС, сконструированная и изготовленная в соответствии с разработанным способом организации малоэмиссионного горения, в составе ГТД ВПТЦ НК–38СТ позволяет выполнить требования перспективных норм по выбросам вредных веществ: $NO_x \leq 50$ мг/м³, $CO \leq 50$ мг/м³.

Основные результаты и выводы по работе:

1. Разработан новый способ организации малоэмиссионного горения в камерах сгорания ГТД, позволяющий значительно снизить выбросы вредных веществ, в частности, оксидов азота.

2. Предложена методика подготовки ТВС, позволяющая достичь в условиях кольцевых прямоточных МКС ГТД ВПТЦ уровня эффективности $\eta_{TBC} \geq 0,88$.

3. Предложена система стабилизация пламени “бедной” ТВС, основанная на комбинации плохообтекаемого тела, закрутки потока и газодинамической стабилизации. Дополнительная стабилизация достигнута профилированием

поверхности контакта плохообтекаемого тела и ЗОТ.

4. Доказана принципиальная возможность снижения выбросов оксидов азота в конвертированных ГТД ВПТЦ при использовании компактных кольцевых однорядных МКС. Разработанный способ организации рабочих процессов МКС, реализованный в конструкции ГТД ВПТЦ НК-38СТ, позволяет получить на номинальном режиме двигателя конкурентоспособные уровни выбросов вредных веществ $NO_x \leq 50 \text{ мг/м}^3$ и $CO \leq 50 \text{ мг/м}^3$.

5. Обобщены экспериментальные и рассчитанные данные по зависимостям уровней выбросов вредных веществ от режимных параметров и неравномерности концентрации топлива в ТВС виде графиков, позволяющих выполнять режимное и геометрическое моделирование.

6. Установлены основные закономерности влияния отдельных режимных и конструктивных факторов на образование оксидов азота в условиях горения “бедных” предварительно подготовленных ТВС. Решающим значением в этом обладает неравномерность концентрации топлива. При среднемассовой эффективности подготовки ТВС $\eta_{ТВС} < 0,8$ горение приобретает диффузионный характер, и влияние давления и температуры проявляется в большей степени.

7. Установлено, что режимные и конструктивные факторы, которые снижают абсолютное значение выбросов NO_x , приводят к росту относительных значений NO_x при повышении режимных параметров.

Основные положения диссертационной работы изложены в следующих работах:

1. Постников А.М., Лавров В.Н., Цыбизов Ю.И., Беляев В.В. Влияние режимных параметров и конструктивного исполнения камер сгорания ГТУ на эмиссию вредных веществ//Вестник СГАУ. Серия: Процессы горения, теплообмена и экология тепловых двигателей. – Самара, 2000. – Вып. 3. – С.196–201
2. Беляев В.В., Лавров В.Н., Постников А.М., Церерин Н.В., Цыбизов Ю.И. Опыт создания и направления дальнейшего совершенствования малотоксичных камер сгорания ГТД и ГТУ//Вестник СГАУ. Серия: Процессы горения, теплообмена и экология тепловых двигателей. – Самара, 2002. – Вып. 4. – С.18–22.
3. Постников А.М., Цыбизов Ю.И., Анисимов В.Н., Беляев В.В. Особенности

отработки экологических характеристик и надежности камер сгорания ГТУ//Вестник СГАУ. Серия: Процессы горения, теплообмена и экология тепловых двигателей. – Самара, 2002. – Вып. 4. – С.8–12.

4. Беляев В.В. Результаты отработки камеры сгорания двигателя НК–38СТ по надежности и эмиссии.: Технический отчет СНТК № 001.13579, г.Самара, 2003г.

5. Беляев В.В. Применение параллельных вычислений для решения задач организации рабочего процесса камер сгорания ГТД И ГТУ//Вестник СГАУ. Серия: Процессы горения, теплообмена и экология тепловых двигателей. – Самара, 2004. – Вып. 5. – С.16–18.

6. Беляев В.В., Цыбизов Ю.И. Численное моделирование рабочего процесса камеры сгорания двигателя НК–38СТ//Вестник СГАУ. Серия: Процессы горения, теплообмена и экология тепловых двигателей. – Самара, 2004. – Вып. 5. – С.196–200.

7. Беляев В.В. Результаты численного моделирования рабочего процесса в камерах сгорания.: Технический отчет СНТК № 001.13633, г.Самара, 2004г.

8. Беляев В.В., Цыбизов Ю.И. Численное моделирование рабочего процесса малоэмиссионных камер сгорания ГТД и ГТУ//Научно–технический семинар по проблемам низкоэмиссионных камер сгорания газотурбинных установок, ЦИАМ–ВТИ, г.Москва, 2004г.

9. Постников А.М., Лавров В.Н., Церерин Н.В., Цыбизов Ю.И., Беляев В.В. Состояние отработки малоэмиссионных камер сгорания ГТД наземного применения семейства “НК”//Научно–технический семинар по проблемам низкоэмиссионных камер сгорания газотурбинных установок, ЦИАМ–ВТИ, г.Москва, 2004г.

10. Беляев В.В. Разработка и исследование МКС для двигателя с высокими параметрами термодинамического цикла//Международная научно–техническая конференция “Авиадвигатели 21 века”, посвященная 75–летию ЦИАМ: Сборник тезисов докладов, т.3. – Москва, ЦИАМ, 2005г. – С. 322–323.

Беляев Владимир Васильевич



ПОВЫШЕНИЕ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ГТУ
ПУТЕМ ОРГАНИЗАЦИИ МАЛОЭМИССИОННОГО ГОРЕНИЯ
В КАМЕРАХ СГОРАНИЯ ГТД

Специальность 05.07.05

Тепловые, электроракетные двигатели
и энергоустановки летательных аппаратов

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать 30.06.2006
решением диссертационного совета Д212.215.02, протокол №79 от 30.06.2006.

Формат бумаги 60×84/16

Печать оперативная. Усл. печ. л. 1,5.

Тираж 100 экз.

Отпечатано в ОАО “СНТК им. Н.Д.Кузнецова”.