

На правах рукописи

Нугуманов Алексей Дамирович

**МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ДОВОДКИ
НИЗКОПЕРЕПАДНЫХ КАМЕР СГОРАНИЯ
ГАЗОТУРБИННЫХ УСТАНОВОК
ПО ЭКОЛОГИЧЕСКИМ НОРМАМ**

05.07.05 – Тепловые, электроракетные двигатели
и энергоустановки летательных аппаратов

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Пермь 2022

Работа выполнена в АО «ОДК-Авиадвигатель» в отделении камер сгорания.

Научный руководитель:

Сипатов Алексей Матвеевич, доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты:

Мингазов Биалал Галавтдинович, заслуженный деятель науки Республики Татарстан, доктор технических наук, профессор, Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Казанский национальный исследовательский технический университет имени А.Н. Туполева – КАИ», профессор кафедры «Реактивные двигатели и энергетические установки»

Гомзиков Леонид Юльевич, кандидат технических наук, ООО «Саровский инженерный центр», начальник сектора С1 отдела ТМП (тепломассопереноса)

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение высшего образования «Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П.А. Соловьева», г. Рыбинск.

Защита диссертации состоится 10 июня 2022 г. на заседании диссертационного совета Д ПНИПУ.05.11 на базе Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» по адресу: 614990, Пермский край, г. Пермь, Комсомольский проспект, д 29. ауд. 345.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Пермский национальный исследовательский университет» и на сайте: <https://pstu.ru/diss/2022/04/08/>

Автореферат разослан: «08» апреля 2022 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета Д ПНИПУ.05.11

Нихамкин М.Ш.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования.

В газотурбинных установках широко распространена технология диффузионного сжигания топливовоздушной смеси, при которой выбросы вредных веществ не соответствуют действующим жестким нормативным актам. Для примера, в России сейчас действуют для газоперекачивающих агрегатов ГОСТ 28775–90 ($\text{NO}_x \leq 150 \text{ мг/м}^3$, $\text{CO} \leq 300 \text{ мг/м}^3$), для газотурбинных электростанций – ГОСТ 29328–92 ($\text{NO}_x \leq 50 \text{ мг/м}^3$, CO – регламентируется заказчиком).

Основные «загрязнители» окружающей среды в составе выхлопных газов газотурбинных установок, работающих на природном газе, – оксиды азота NO и NO_2 вместе с монооксидом углерода CO . Данные вещества оказывают серьезное влияние на здоровье человека и могут приводить к смертельно опасным заболеваниям. Создание оптимальной конструкции малоэмиссионной камеры сгорания (МЭКС), обеспечивающей низкие уровни вредных выбросов в купе с выполнением эксплуатационных требований по надежности, является очень сложной задачей в связи с их крайней противоречивостью.

Технология сжигания бедных заранее перемешанных топливовоздушных смесей LPP (Lean Premixed Pre vaporized) считается на сегодня самой успешной для камер сгорания ГТУ. В переводе, дословно, сжигание «бедной, предварительно испаренной, перемешанной» топливовоздушной смеси. За рубежом мировые лидеры GE, Siemens, Solar прорабатывали эту технологию 20–30 лет. Данная технология основана на снижении температуры пламени за счет сжигания обедненной топливовоздушной смеси, которая подготавливается в специальном смесителе. Подготовка подразумевает подачу газообразного топлива и перемешивание его с воздухом до однородного состояния. Из смесителя гомогенная смесь попадает в жаровую трубу и сгорает при более низких локальных температурах, которые определяются составом смеси. Сжигание обедненной смеси существенно подавляет генерацию оксидов азота по термическому механизму, но значительное обеднение зоны горения приводит к увеличению эмиссии оксида углерода и снижению полноты сгорания. Поэтому в каждом конкретном случае отыскивается оптимум между эмиссией оксидов азота и углерода. Преимуществом этой концепции – разрыв обратной связи между NO_x и CO по времени пребывания, когда термический механизм образования NO_x подавлен, газ внутри жаровой трубы (объем жаровой трубы) можно увеличить в целях повышения полноты сгорания и, как следствие, снижения CO . Однако для реализации

данной концепции по снижению выбросов вредных веществ в широком климатическом и мощностном диапазоне работы ГТУ требуется исключение виброгорения и проскока пламени в смеситель КС, которые могут привести к быстрому разрушению двигателя или существенному сокращению его ресурса. Также важным для КС является обеспечение приемлемого температурного состояния элементов горячей части и надежного запуска КС. Использование сухой малоэмиссионной технологии привело к увеличению потерь в КС, в первую очередь на фронтном устройстве, что напрямую оказывает воздействие на снижение КПД двигателя в целом. Особенностью разработанной и доведенной камеры сгорания является низкий перепад на фронтном устройстве порядка 1 % на уровне диффузионных КС, тогда как зарубежные образцы имеют потери порядка 3–4 % от давления за КВД. Данный фактор значительно усложняет экспериментальную доводку по обеспечению отсутствия виброгорения и особенно проскока пламени, но позволяет сохранить КПД двигателя на приемлемом уровне.

Теоретические и численные методики в настоящее время недостаточно развиты для проектирования только на их основе бедных сухих малоэмиссионных камер сгорания по технологии LPP. Значительная доля проверочных и доводочных работ по конструкции КС, в том числе уточнение расчетных методик, приходится на экспериментальные работы. На первом этапе работы проводят на модельных отсеках, имитирующих часть (сектор) КС на стендах, обеспечивающих полные параметры и условия работы КС в составе двигателя. После получения удовлетворительных результатов в составе модельных отсеков переходят к проверке характеристик в составе двигателя.

Представленная работа посвящена экспериментальной методике доводки низкорепадных камер сгорания газотурбинных установок по экологическим нормам. Показаны основные этапы экспериментальных работ во взаимодействии с расчетными исследованиями, а также последовательность и особенности настройки основных характеристик для обеспечения устойчивой работы КС в максимально широком малоэмиссионном диапазоне.

Данная методика формировалась и проверялась при создании МЭКС для газотурбинной установки мощностью 16 МВт разработки АО «ОДК-Авиадвигатель».

В целом полученные в работе научно-технические решения вносят значительный вклад в развитие экологических технологий в газотурбинной отрасли страны, которые позволят минимизировать влияние на окружающую среду и здоровье людей, а также конкурировать с зарубежными двигателями на мировом рынке за счет более высокого КПД.

Цели работы

1. Разработка методики доводки низкоперепадных малоэмиссионных камер сгорания ГТД на основе обобщения основных характеристик, требующих тонкой расчетно-экспериментальной настройки при использовании технологии сжигания бедных топливовоздушных смесей, что позволит обеспечить соответствие современным экологическим нормам.

2. Экспериментальная доводка конструкции МЭКС для газотурбинной установки мощностью 16 МВт, обеспечивающей широкий малоэмиссионный ($\text{NO}_x < 50 \text{ мг/м}^3$, $\text{CO} < 100 \text{ мг/м}^3$) диапазон устойчивой работы двигателя.

Задачи работы

1. Выполнить литературный обзор ГТД с МЭКС бедного типа основных мировых производителей.

2. Определить алгоритм настройки малоэмиссионного диапазона устойчивой работы КС.

3. Сформировать критерии и способы проверки отсутствия проскока пламени.

4. Определить алгоритм проверки и экспериментальной отстройки КС от пульсаций давления.

5. На основании экспериментальных исследований в составе одногорелочного отсека определить основные зависимости и обобщить их в качестве методики экспериментальной доводки низкоперепадной МЭКС бедного типа.

6. Выполнить отработку методики при создании МЭКС двигателя ПС-90ГП-2М мощностью 16 МВт.

Объект и предмет исследования

Объект исследования – малоэмиссионная камера сгорания ГТД.

Предмет исследования – устойчивый малоэмиссионный диапазон работы КС.

Научная новизна

1. Создана авторская методика, объединяющая в себе основные характеристики процесса сухого малоэмиссионного горения, которая позволяет усовершенствовать процессы проектирования и экспериментальной доводки КС экологически чистых ГТД.

2. Разработана система требований к конструктивной схеме МЭКС, необходимых для обеспечения широкого малоэмиссионного диапазона устойчивой работы по температуре в зоне горения более 150 градусов, а также устойчивости к проскоку пламени в условиях широкого диапазона эксплуатационных нагрузок.

3. Разработаны критерии, обеспечивающие возможность уменьшения потерь полного давления в МЭКС.

Теоретическая значимость работы

1. Впервые основные характеристики процесса сухого малоэмиссионного горения объединены в авторскую методику, которая позволяет выполнить экспериментальную доводку МЭКС.
2. Сформулированы рекомендации по минимальному перечню экспериментальных исследований в составе одnogорелочного отсека по определению основных зависимостей рабочих параметров МЭКС ГТУ.
3. Определен критерий, позволяющий оптимизировать потери давления в фронтном устройстве.

Практическая значимость работы

1. Полученные результаты исследований и авторскую методику возможно использовать при создании новых и усовершенствовании существующих конструкций КС согласно экологическим нормам для любых газотурбинных установок, схожих по параметрам рабочего цикла, что позволит значительно сократить время их создания, стоимость и эксплуатационные риски.
2. На основании методики выполнена доводка конструкции МЭКС ГТУ мощностью 16 МВт, подтвердившая уровень выбросов оксида азота (NO_x) менее 50 мг/м^3 и оксида углерода (CO) менее 100 мг/м^3 при относительно низком уровне потерь полного давления в КС, что позволило сохранить высокий КПД двигателя в целом.

Методы исследования

1. Численные методы исследования, включая одномерные и трехмерные методы расчетного анализа. Моделирование процессов горения и турбулентного смешения на основе передовых методов расчетного анализа (DES-модели для описания турбулентных пульсаций, EDC-модели горения).
2. Экспериментальные методы исследования характеристик камер сгорания в составе специальных приспособлений, одnogорелочных отсеков и технологических газогенераторов.
3. Методы анализа полученных результатов (математические, статистические).

Положения, выносимые на защиту

1. Авторская методика, объединяющая в себе основные характеристики процесса сухого малоэмиссионного горения, позволяет усовершенствовать процессы проектирования и экспериментальной доводки КС экологически чистых ГТД.

2. Критерии, позволяющие уменьшить потери полного давления в МЭКС на 2 % от давления за КВД, обеспечивают также более высокий КПД ГТД в целом.

3. Система требований к конструктивной схеме МЭКС, обеспечивает широкий малоэмиссионный диапазон устойчивой работы по температуре горения более 150 градусов.

Достоверность полученных результатов подтверждается:

1) проведением экспериментальных исследований на современном стенде, обеспечивающем в модельном одногорелочном отсеке (1/12 часть КС) полные параметры процесса в КС (температуру, давление, расходы воздуха и топливного газа);

2) близким совпадением результатов экспериментальных исследований и расчетного моделирования;

3) использованием стандартных методик обработки результатов исследований и доводочных испытаний на стенде с высокими параметрами рабочего процесса АО «ОДК-Авиадвигатель»;

4) использованием высокоточного, современного измерительного оборудования, поверенного и имеющего сертификаты метрологической аттестации
в
АО «ОДК-Авиадвигатель»;

5) использованием современных расчетных пакетов типа комплекса ANSYS Fluent/CFX (США), верифицированного по результатам испытаний в АО «ОДК-Авиадвигатель».

Апробация результатов исследования

Основные результаты работы представлены: на всероссийской научно-технической конференции «Авиадвигатели XXI века» (г. Москва, 2015); международном форуме двигателестроения «Научно-технический конгресс по двигателестроению. НТКД-2016» (г. Москва, 2016); всероссийской специализированной научно-практической конференции молодых специалистов «Современные технологии в энергетике». ОАО «ВТИ». (г. Москва, 2017); X Международной научно-технической конференции «Процессы горения, теплообмена и экологии тепловых двигателей». СГАУ (г. Самара, 2017), LXIV Научно-технической сессии по проблемам газовых турбин «Фундаментальные проблемы применения современных ГТУ в отечественной экономике – результаты освоения и эксплуатации и задачи на будущее» (г. Казань, 2017); LXV Научно-технической сессии по проблемам газовых турбин «Исследование, разработка и реализация научных достижений в области газовых турбин в российской экономике» (г. Санкт-Петербург, 2018); LXVI Научно-технической сессии РАН по проблемам газовых турбин и парогазовых установок «Научно-технические

проблемы проектирования, локализации производства и эксплуатации ГТУ в экономике РФ» (г. Пермь, 2019); LXVII Научно-технической сессии по проблемам газовых турбин «Научно-технические проблемы широкого применения газотурбинных и парогазовых установок в электроэнергетике РФ». АО «Силовые машины» (г. Санкт-Петербург, 2020).

Публикации

По теме диссертации опубликованы шесть статей в периодических изданиях, включенных в список ВАК, две из них – в Scopus, и один патент.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 80 наименований. Основной текст содержит 132 страницы, 79 иллюстраций и пять таблиц.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении показана важность проведения исследований в целях улучшения экологических характеристик газотурбинных двигателей. Определены основные цели и задачи работы.

Первая глава представляет собой описание существующих малоэмиссионных технологий сжигания топливного газа, а также аналитический обзор конструкций МЭКС промышленных ГТД мировых производителей, таких как General Electric, Siemens, Kawasaki Heavy Industries, Solar, Mitsubishi Hitachi Power Systems.

В КС промышленных ГТУ снижение эмиссии оксидов азота достигается за счёт:

- впрыска воды или пара;
- каталитической нейтрализации в шахте выхлопа;
- сжигания бедной предварительно перемешанной топливоздуш-ной смеси.

МЭКС промышленных ГТД ведущих мировых производителей обеспечивают уровень эмиссии вредных веществ 50 мг/нм^3 (25 ppm) и ниже в основном за счет технологии «сухого» сжигания обедненной топливоздушной смеси.

Большинство «сухих» малоэмиссионных камер сгорания имеют трубчатую конструкцию с выносными жаровыми трубами (за исключением компании Solar и авиапроизводных ГТУ GE, в которых используется кольцевые невыносные КС).

Для обеспечения малоэмиссионного режима работы КС в промышленных ГТД ведущих мировых производителей, включая наиболее со-

временные ГТД – SGT-750 Siemens, Titan 250 Solar, LMS100 GE, в той или иной степени используют:

- многоколлекторную схему подвода топлива для управления полем концентраций топлива в зоне горения;
- поддержание температуры горения ТВС в узкозаданном диапазоне за счет регулирования расхода воздуха в КС посредством перепуска воздуха на вход в двигатель/атмосферу или/и за счет поворотных ВНА;
- управление расходом воздуха во фронтное устройство (только фирмой Solar);
- систему контроля и ухода от пульсаций в камере сгорания.

Регулирование ВНА компрессора применяется на стационарных одновалвных ГТД, использующихся для привода электрогенератора переменного тока на электростанциях, с постоянной частотой вращения. При снижении расхода воздуха через КВД поддержание заданного режима (частоты вращения) происходит за счет увеличения расхода топлива.

Для двигателей со свободной турбиной, имеющей с газогенератором только газодинамическую связь, прикрытие программой ВНА приводит к изменению расходной характеристики КВД и, как следствие, к увеличению частоты вращения ротора компрессора для обеспечения требуемого для поддержания режима расхода воздуха; остальные параметры практически не изменяются, соответственно, для такого типа ГТУ регулирование ВНА не подходит в качестве способа обеспечения параметров в зоне горения. На них используется только перепуск воздуха из-за компрессора. Недостатком обеспечения малоэмиссионного режима работы КС за счет перепуска воздуха из-за компрессора является снижение КПД двигателя.

Применение технологии сжигания бедной предварительно перемешанной топливовоздушной смеси приводит:

- к усложнению системы регулирования двигателя: управление дополнительным перепуском воздуха и/или регулированием ВНА;
- применению более сложной топливной автоматики: вводятся от 2 до 4 топливных коллекторов;
- увеличению потерь давления в МЭКС с выносными ЖТ до 9 %;
- снижению КПД двигателя.

Снижение уровня эмиссии ниже 25 ppm в малоэмиссионных камерах сгорания достигается за счет следующих факторов или их сочетания:

- низкие параметры термодинамического цикла ГТД;
- внедрение более сложных систем управления двигателем;
- реализация стадийного сжигания топлива в объеме камеры сгорания;
- совершенствование процессов смесеобразования и сжигания топлива в горелочных устройствах;
- селективное восстановление оксидов азота в выхлопных газах ГТД с расходным катализатором (впрыск раствора аммиака) или нерас-

ходным катализатором (технология SoLoNOx) для обеспечения эмиссии оксидов азота на уровне 5 мг/м^3 .

Все производители ведут непрерывную работу по улучшению характеристик ГТД с МЭКС в условиях указанных ограничений.

Вторая глава посвящена этапу экспериментальной доводки малоэмиссионного диапазона. Показана связь теоретически возможного и практически реализуемого малоэмиссионного диапазона с пошаговым определением границ в ходе испытаний в составе отсека.

Основная идея технологии «сухого» сжигания обедненной топливовоздушной смеси состоит в том, чтобы сжигать топливовоздушную смесь обедненного состава и тем самым минимизировать формирование оксидов азота по термическому механизму, экспоненциально зависящему от температуры в зоне горения. Таким образом для реализации данной технологии в целях поддержания малоэмиссионного диапазона работы ГТД необходимо находиться в границах по коэффициенту избытка воздуха в пределах от 1,6 (ограничение эмиссии окислов азота не более 50 мг/м^3) до 1,8 (ограничение по эмиссии окислов углерода не более 100 мг/м^3), что проецируется в температуру в КС между 1700 К и 1900 К (рисунок 1).

Температура пламени в первичной зоне камеры сгорания значительно изменяется при изменении режима работы двигателя (мощностная составляющая) и изменении входных условий окружающей среды, в первую очередь температуры (климатическая составляющая). Для примера возьмем газотурбинный двигатель мощностью 16 МВт разработки АО «ОДК-Авиадвигатель». Изменение температуры в КС при изменении режима мощности с 70 до 100% составляет $141 \text{ }^\circ\text{C}$, а при изменении окружающей температуры от минус 30 до плюс $25 \text{ }^\circ\text{C}$ на номинальном режиме составляет $214 \text{ }^\circ\text{C}$.

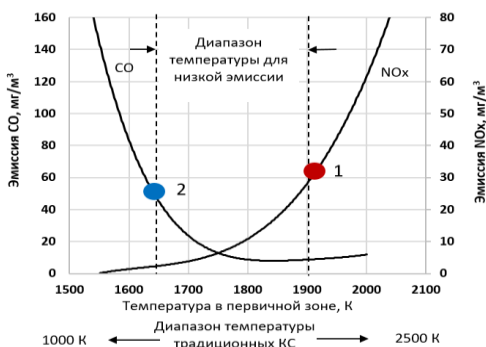


Рисунок 1 – Зависимость эмиссии CO и NO_x от температуры в первичной зоне

Таким образом, совместное влияние климатической и мощностной характеристики в указанном выше диапазоне на температуру в зоне горения составляет порядка 350 °С, что значительно больше теоретического малоэмиссионного диапазона (см. рисунок 1).

Объектом исследования и экспериментальной доводки была противоточная, с 12 выносными жаровыми трубами КС (рисунок 2). В ее составе одномодульное фронтное устройство, отличительной особенностью которого является организация процесса горения за развитым плоскообтекаемым телом со сложной геометрией, с минимальной круткой потока воздуха. Охлаждение жаровой трубы осуществляется за счет снятия тепла импактно – конвективным способом с наружной поверхности, на которой для увеличения теплосъема применяются кольцевые ребра. Топливо в КС подается по двум коллекторам: диффузионному; гомогенному.

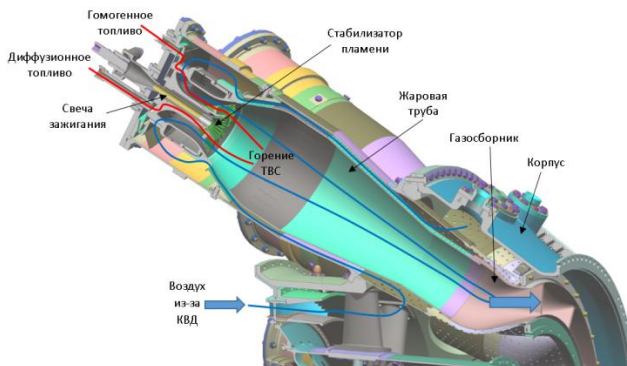


Рисунок 2 – Одномодульная МЭКС для ГТУ мощностью 16 МВт

МЭКС, представленная на рисунке 2, работает следующим образом. Воздух из компрессора проходит диффузионный участок и попадает в корпус КС, где разворачивается и равномерно распределяется по 12 отдельным жаровым трубам через перфорированные кожухи, обтекатели жаровых труб и газосборников. Воздух проходит в полости между жаровой трубой и корпусом, обеспечивая конвективный теплосъем с жаровой трубы и газосборника. Далее воздух попадает в радиальный завихритель фронтного устройства, где разворачивается и направляется, обтекая лепестковый стабилизатор пламени, в зону горения в жаровой трубе. Диффузионное топливо из коллектора равномерно распределяется по всем 12 жаровым трубам и через каналы в стабилизаторе пламени подается непосредственно в зону горения. Основное назначение диффузионного

контура – обеспечение розжига и поддержание горения в КС на низких режимах мощности. Гомогенное топливо подается через отверстия, расположенные в радиальном завихрителе, после чего осуществляется активное смешение с воздухом с учетом обеспечения заданной эпюры концентрации на входе в жаровую трубу. Гомогенное топливо вкупе с увеличенным относительно диффузионных камер сгорания объемом жаровой трубы обеспечивает малоэмиссионные характеристики КС.

Экспериментальные исследования КС выполнялись в составе одногорелочного отсека (рисунок 3) (1/12 часть КС) на стенде АО «ОДК-Авиадвигатель», обеспечивающем полные параметры рабочего процесса ($P_k = 22 \text{ кгс/см}^2$, $G_v = 4 \text{ кг/с}$, $T_k = 550 \text{ }^\circ\text{C}$). В процессе экспериментальной доводки конструкции и отладки методики было проведено более 350 испытаний, исследовано более 100 конструктивных вариантов



Рисунок 3 – Одномодульная МЭК в составе одногорелочного отсека

Одногорелочный отсек оборудован специальными замерах параметров рабочей среды: температур, давлений, перепадов давлений. Все использованные гребенки и датчики аттестованы как СИ и имеют действующие сертификаты калибровки. Измерение пульсаций выполнялось пьезоэлектрическими датчиками типа CP-103, RAV-6, установленными непосредственно напротив зоны горения через специальный переходник. Отбор пробы газа осуществлялся водоохлаждаемой гребенкой, установленной на выходе из КС в мерном участке, далее проба транспортировалась по обогреваемой линии в газоаналитическую лабораторию стенда. Анализ пробы газа выполнялся газоанализаторами Emerson, MGA5+, Testo, IMR с обязательной проверкой градуировочных характеристик до и после испытания.

В главе описаны шаги экспериментальной проверки и настройки малоэмиссионного диапазона, а именно точки №1 – как ограничение по

уровню NO_x и точки №2 – как ограничение по уровню CO , а также набор шагов по сдвигке диапазона.

Приводится описание настройки малоэмиссионного диапазона выносной противоточной КС для ГТУ мощностью 16 МВт во всем рабочем климатическо-мощностном диапазоне. Подробно рассмотрены зависимости эмиссии NO_x и CO от температуры первичной зоны и соотношения топливного газа по топливным коллекторам (рисунок 4).

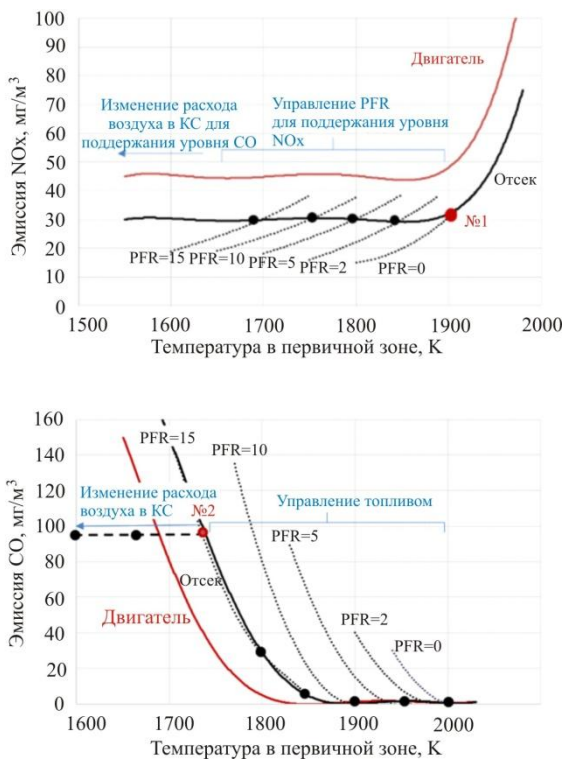


Рисунок 4 – Экспериментальные зависимости уровней NO_x и CO от температуры в первичной зоне прототипа МЭКС для ГТУ мощностью 16 МВт

В работе показан необходимый запас по экологическим характеристикам при доводочных работах в составе модельных установок для перехода в условия полноразмерного двигателя с целью компенсации неравномерности расходов топлива и воздуха в составе двигателя.

Третья глава описывает вторую по важности характеристику всех МЭКС бедного типа – это акустическую характеристику. Понимание ключевых факторов, влияющих на динамику горения, способность прогнозировать это явление и выполнять доводку конструкции имеет первостепенное значение при создании камер сгорания с низким уровнем термоакустических пульсаций. В работе рассмотрены основные механизмы возбуждения виброгорения и воздействия на него на основе критерия Рэлея.

Трёхмерное моделирование процесса возникновения пульсаций давления в конкретной конструкции МЭКС выполнялось в пакете Ansys CFX в следующей постановке:

1. Решение нестационарных трёхмерных уравнений Навье-Стокса с моделью отсоединенного вихря (Detached Eddy Simulation, DES) для моделирования турбулентности.

2. Двухфронтная модель турбулентного горения для моделирования динамики гомогенного и диффузионного фронта пламени, предложенная д.т.н. Ю.Г. Куценко (техн. отчет № 1-2020. Численная оценка устойчивости одномодульной малоэмиссионной камеры сгорания к возникновению пульсаций давления).

Двухфронтная модель горения построена на взаимодействии диффузионного и гомогенных фронтов пламени, а также на наличии высокотемпературных зон.

Данная модель использовалась как критерий определения изоповерхностей, присоединенных диффузионных и гомогенных пламён, а также показывала присутствие оторванных пламён от основной зоны горения (рисунок 5), размеры которых в дальнейшем использовались для оценки возможных частот пульсаций давления.

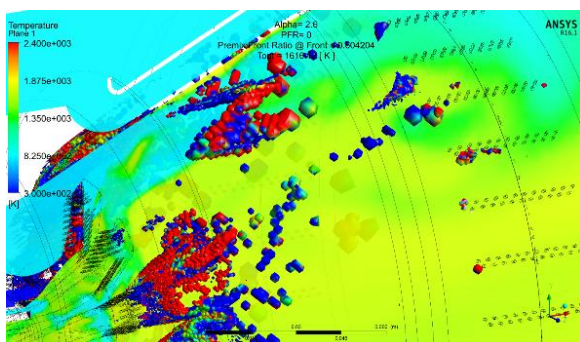


Рисунок 5 – Расположение оторванных и присоединенных пламён диффузионного (красный) и гомогенного (синий) типа

В ходе расчетных исследований определены основные возможные частоты пульсаций давления и условия их возникновения в зависимости от альфы фронта (рисунок 6).

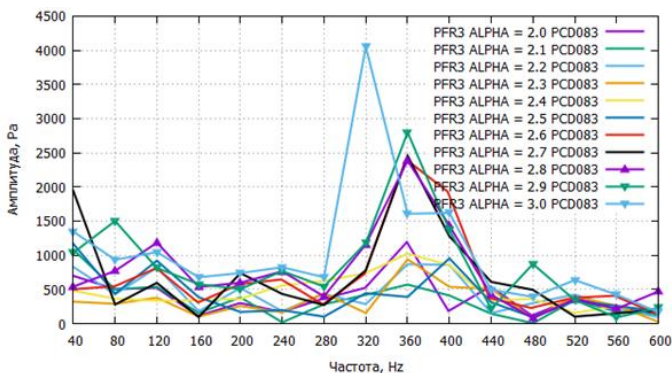


Рисунок 6 – Эволюция спектра пульсаций давления при изменении α от 2,0 до 2,9 при PFR = 3 %

Возникновение пульсаций на частоте 320–360 Гц в данной МЭКС связано с появлением отрыва пламени от части стабилизаторов, особенно сильно проявляется при значениях α фронта более 2,6.

В эксперименте проверку и доводку акустических характеристик необходимо обеспечить в рабочем малоэмиссионном диапазоне соответствующей ГТУ. Как правило, при экспериментальном исследовании акустических характеристик исследователь встречается с возникновением высоких амплитуд пульсаций вблизи самой горячей точки малоэмиссионного диапазона (горячий тон пульсации); возбуждение пульсаций в этой зоне, вероятнее всего, связано с нестационарным высокотемпературным изменением положения фронта пламени в потоке заранее подготовленной топливо-воздушной смеси при возникновении регулярных пульсаций гидродинамических параметров, а также со снижением до нулевых расходов диффузионного топлива для поддержания стабильности горения. Как правило, в данном диапазоне температура первичной зоны от 1900 до 2200 К ($\alpha_{\text{фр}} = 1,8\text{--}2,3$) возникают высокочастотные пульсации давления от 300 до 3000 Гц. На этом этапе доводки необходимо обеспечить сдвигку данных пульсаций выше по температуре фронта пламени, в более высокотемпературные зоны, за рабочий диапазон. Это достигается за счет конструктивных изменений, влияющих на характеристики смешения ТВС и взаимодействия зон рециркуляции.

Также практически всегда встречаются с предсрывными пульсациями давления в самой холодной точке малоэмиссионного диапазона (холодный тон пульсации) по температуре фронта пламени от 1600 до 1700 К ($\alpha_{\text{фр}} = 3,0 \dots 3,6$); возбуждение данных пульсаций связано с локальными срывами пламени в зоне рециркуляции гомогенных топливовоздушных смесей. Как правило, данные пульсации характеризуются низкими частотами в районе 60–120 Гц. Данные пульсации давления являются ограничением малоэмиссионного диапазона, дальнейшее движение в сторону забеднения температуры фронта пламени приведет к росту амплитуд пульсаций и срыву пламени в камере сгорания. Уход от данного рода пульсаций осуществляется путем регулирования расхода воздуха в камере сгорания для ухода в более горячие рабочие области с обогащением топливовоздушной смеси $\alpha_{\text{фр}}$ (рисунок 7).

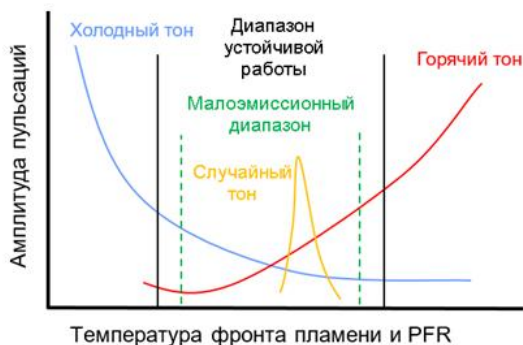


Рисунок 7 – Положение диапазона устойчивой работы МЭКС в зависимости от температуры фронта пламени

В работе по созданию методики экспериментальной доводки в составе однокорпусного отсека определены основные тоны пульсаций давления для прототипа МЭКС ГТУ мощностью 16 МВт. Полученные результаты близко соответствуют численному моделированию. При экспериментальных исследованиях пульсации давления проявились на частотах 320–360 Гц, которые являются продольной модой колебаний, возбуждающейся при появлении нестационарного тепловыделения от оторванных пламен в зоне горения. В ходе работы выполнена отстройка частот пульсаций согласно разработанной методике, а именно горячие тона вынесены за рабочий малоэмиссионный диапазон за счет внедрения конструктивных мероприятий.

В четвертой главе описана методика экспериментальной доводки и проверки устойчивости к проскоку пламени.

В работе определен ряд требований к конструкции, которые закладываются при проектировании и подтверждаются численным моделированием. Чаще всего проскок пламени проходит вблизи стенок по пограничному слою, после чего стабилизируется во фронтном устройстве; фактором, усиливающим возможность проскока, является виброгорение. Поэтому при формировании эпюры концентраций топливовоздушных смесей необходимо стараться обеспечивать негорючие бедные концентрации топлива вдоль стенок каналов, отсутствие отрывных зон, образующихся как от крутки потока, так и от наличия плохо обтекаемых тел, уступов и прочих элементов, а в самом канале получить скорости потока, гарантированно обеспечивающие невозможность прохождения горения в смесительное устройство.

В ходе экспериментальных исследований и аналитического анализа данных удалось выявить важную зависимость, представленную на рисунке 8, которую следует учитывать на этапе проектирования.

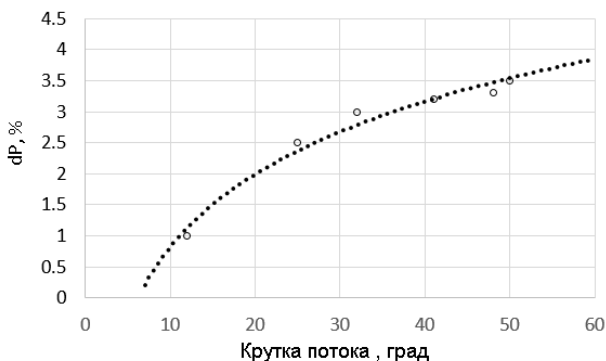


Рисунок 8 – Экспериментальная зависимость крутки потока от уровня потерь полного давления на фронтном устройстве

По данной зависимости определяется минимальный перепад на смесительном устройстве в зависимости от выбранной крутки основного потока. У большинства МЭКС, созданных на основании концепции горения бедных предварительно подготовленных топливовоздушных смесей, стабилизация фронта пламени осуществляется за счет закрутки основного потока, как правило от 40 до 70 градусов. В подобного рода камерах

сгорания для получения осевой скорости потока не менее 35 м/с минимальный перепад на фронтном устройстве должен быть не менее 3 % от давления на входе в КС. Большинство КС данного типа имеют перепад давления от 3 до 4 %.

Меньшее количество современных малоэмиссионных камер сгорания с целью сохранения высокого КПД двигателя и минимизации потерь давления, стабилизацию фронта пламени осуществляют за счет применения плохообтекаемого тела, что позволяет снизить потери давления на фронтном устройстве до 1 % от давления на входе в камеру сгорания. Однако в таких камерах сгорания для обеспечения приемлемых осевых скоростей необходимо значительно уменьшать крутку основного потока, что значительно сказывается на формировании гомогенной топливовоздушной смеси. Также в этого рода камерах сгорания возникает достаточно серьезная проблема с охлаждением устройств, стабилизирующих пламя, ввиду их близости к основному фронту пламени. Для расчета границы проскока пламени использовался критерий Пекле разработанный группой авторов Мюнхенского технического университета – М. Kroner, J. Fritz и Т. Sattelmayer. Используя эту модель, для горелки, можно определить коэффициент гашения, который является критерием обратного сопротивления проскока и позволяет рассчитать границу проскока для всех режимов работы на основе ограниченного числа испытаний с проскоком.

В работе описаны поэтапные шаги проверки отсутствия проскока пламени, выполненные при доводке прототипа МЭКС для газотурбинной установки мощностью 16 МВт. Основным из них стал специальный тест с искусственным кратковременным поджогом топливовоздушной смеси в зоне предварительного смешения с помощью специального воспламенителя. Определены наиболее опасные режимы для проскока пламени с максимальными температурами и расходом топлива и минимальными миделевыми скоростями. В ходе теста специальными термомпарами контролировалось воспламенение и выдув пламени из зоны предварительного смешения тепловоздушной смеси.

В результате исследований удалось создать конструкцию низкоперепадного фронтного устройства малоэмиссионной камеры сгорания бедного типа, имеющую потери на фронтном устройстве порядка 1 % от давления за компрессором высокого давления, что в среднем на 2 % лучше существующих прототипов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Впервые на основе интеграции основных характеристик процесса сухого малоэмиссионного горения создана авторская методика, которая позволяет усовершенствовать процессы проектирования и экспериментальной доводки КС экологически чистых ГТД.

2. Показаны шаги настройки максимально широкого малоэмиссионного диапазона работы, не менее 150 градусов, по температуре в зоне горения.

3. Показаны основные возможные тоны пульсаций давления: холодный; горячий; случайный, а также способы ухода от них.

4. Предложена методика проверки отсутствия возможности проскока пламени в зону предварительного смешения топливовоздушной смеси.

5. Определены критерии, обеспечивающие возможность снижения перепада на смесительном устройстве на 2 %, для обеспечения более высокого КПД ГТД.

6. Получен широкий малоэмиссионный диапазон устойчивой работы МЭКС с обеспечением уровня $\text{NO}_x < 50 \text{ мг/м}^3$, $\text{CO} < 100 \text{ мг/м}^3$.

7. На основе методики выполнена экспериментальная доводка прототипа малоэмиссионной камеры сгорания газотурбинной установки мощностью 16 МВт разработки АО «ОДК-Авиадвигатель».

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ РАБОТЫ

Статьи в изданиях, рекомендованных ВАК:

1. Численная доводка полей температуры газов на выходе из камеры сгорания газотурбинной установки / А.М. Сипатов, К.А. Шилов, **А.Д. Нугуманов**, Т.В. Абрамчук // Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника. – 2016. – № 46. – С. 40–55.

2. Сипатов, А.М. Использование мирового опыта регулирования газотурбинных двигателей (ГТД) с малоэмиссионной камерой сгорания (МЭКС) по режимам мощности и в климатическом диапазоне при создании МЭКС для ГТД разработки АО «ОДК-Авиадвигатель» / А.М. Сипатов, **А.Д. Нугуманов**, В.А. Назукин // Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника. – 2017. – № 50. – С. 139–147.

3. Концепция управления малоэмиссионной камерой сгорания авиационного ГТД и ее эксперт-модель для обучения нейронной сети смарт-регулятора / В.Г. Августинovich, Т.А. Кузнецова, А.И. Фатыков, **А.Д. Нугуманов** // Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника. – 2018. – № 53. – С. 5–19.

4. Обеспечение малоэмиссионной работы камеры сгорания в широком диапазоне климатических условий применительно к авиа-производным ГТУ / Л.А. Булысова, А.Г. Тумановский, М.Н. Гутник, В.Д. Васильев, А.М. Сипатов, **А.Д. Нугуманов** // Электрические станции. – 2019. – № 12. – С. 20–23.

Статьи, опубликованные в изданиях, индексируемых в базе Scopus:

5. Августинович, В.Г. Разработка нейронных систем мониторинга и управления эмиссией вредных веществ для газотурбинных газоперекачивающих агрегатов и электростанций / В.Г. Августинович, Т.А. Кузнецова, **А.Д. Нугуманов** // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2019. – Т. 330, № 8. – С. 20–23.

6. Low-emission operation of aeroderivative gas-turbine combustor over a wide range of ambient conditions / L.A. Bulysova, A.G. Tumanovsky, M.N. Gutnik, V.D. Vasiliev, A.M. Sipatov, **A.D. Nugumanov** // Power Technology and Engineering. – 2020. – Vol. 54, № 1. – P. 2–5.

Патенты:

7. Пат. 2665602 С1 Рос. Федерация. Способ регулирования подачи топлива в газотурбинный двигатель: СПК № F02C9126 (2006.01) / Печков А.П., Андрюков Н.А., **Нугуманов А.Д.** – заявл. 07.12.2017; опубл. 31.08.2018, Бюл. 25. – 6 с.

Подписано в печать 06.04.2022. Тираж 100 экз.
Усл. печ. л. 1,25. Формат 60×84/16.

Отпечатано с готового оригинал-макета
в типографии издательства Пермского национального
исследовательского политехнического университета
614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, к. 113.