

ОТЗЫВ

Официального оппонента на диссертацию Нугуманова Алексея Дамировича. «МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ДОВОДКИ НИЗКОПЕРЕПАДНЫХ КАМЕР СГОРАНИЯ ГАЗОТУРБИННЫХ УСТАНОВОК ПО ЭКОЛОГИЧЕСКИМ НОРМАМ», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.07.05 «Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов».

В настоящее время охрана окружающей среды является магистральным направлением современности и имеет важное значение, поэтому создание экологических камер сгорания является одной из основных задач в двигателестроении. Создание оптимальной конструкции малоэмиссионной камеры сгорания ГТД, обеспечивающий низкие уровни вредных выбросов, наряду с выполнением эксплуатационных требований по надежности, является очень сложной задачей в связи с их крайней противоречивостью.

Основными веществами, загрязняющими окружающую среду в выхлопных газах газотурбинных установок, работающих на природном газе, являются 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. В настоящее время основным направлением снижения выбросов является метод сжигания топливовоздушной смеси обедненного состава, позволяющий минимизировать выделение оксидов азота по термическому механизму. С другой стороны, необходимость уменьшения потерь в камере сгорания приводит к снижению скорости потоков в жаровой трубе, что обуславливает недостаточное смешение и соответственно к организации диффузионного горения. Вследствие этого часто используется схема двухзонного горения с гомогенным горением в первой зоне, что способствует снижению выделения NO_x и последовательно - во второй зоне дожиганием CO . Однако, одновременно со снижением перепада давления в камере сгорания появляется неустойчивое горение и соответственно пульсации давления и вибрационное горение у границ срыва пламени. Поэтому работа Нугуманова А.Д. «Методика экспериментальной доводки низкоперепадных камер сгорания газотурбинных установок по экологическим нормам» посвящена весьма актуальной проблеме по исследованию и разработке низкоперепадной камеры сгорания, позволяющий одновременно снизить гидравлические потери и обеспечивать малоэмиссионное горение.

С целью выполнения данной работы автором поставлены весьма сложные задачи, которые включают:

1. Проведение экспериментальных исследований по определению алгоритма настройки малоэмиссионного диапазона устойчивой работы КС и определение критериев появления проскока пламени.

2. Создание алгоритма проверки и экспериментальной отстройки КС от пульсаций давления и определение основных зависимостей и обобщение их в методику экспериментальной доводки низкочастотной МЭКС бедного горения.

При выполнении указанных задач автор проводит большую экспериментально-расчетную работу по созданию методики усовершенствования конструкций камер сгорания по экологическим нормам.

Целью работы является создание методологии доводки низкочастотной камеры сгорания, обеспечивающей одновременно, малоэмиссионное горение, отсутствие вибрационного горения и проскока пламени.

Новизна работы заключается

В разработке авторской методики проектирования и экспериментальной доводки КС обеспечивающей малые гидравлические потери, малоэмиссионное горение, отсутствие вибрационного горения и проскока пламени в условиях широкого диапазона эксплуатационных нагрузок.

В первой главе автором проведен обширный обзор мировых достижений в области создания малоэмиссионных камер сгорания и 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.

Показано, что в КС промышленных ГТУ снижение эмиссии оксидов азота достигается за счёт:

- впрыска воды или пара;
- каталитической нейтрализации в шахте выхлопа;
- сжигание бедной предварительно перемешанной топливовоздушной смеси.

На основании проведенного анализа автор приходит к необходимости применения схемы бедного горения предварительно перемешанной смеси в первичной зоне.

Во второй главе представлены результаты экспериментальной доводки малоэмиссионной камеры сгорания. Показана связь теоретически возможного и практически реализуемого малоэмиссионного диапазона по температуре в зоне горения с пошаговым определением границ в ходе испытаний в составе отсека. Основная идея технологии малоэмиссионного горения топливовоздушной смеси

состоит в том, чтобы сжигать топливовоздушную смесь обедненного состава, и тем самым минимизировать формирование оксидов азота по термическому механизму, экспоненциально зависящим от температуры в зоне горения. Установлено, что при реализации данной технологии, для поддержания малоэмиссионного диапазона работы ГТД необходимо обеспечивать границы состава смеси по коэффициенту избытка воздуха в пределах от 1,6 (ограничение эмиссии окислов азота не более 50 мг/м³) до 1,8 (ограничение по эмиссии окислов углерода не более 100 мг/м³).

В связи с тем, что при снижении потерь давления в камере сгорания появляется неустойчивость горения, третья глава посвящена исследованию акустических характеристик КС обедненного горения. Для этого в работе рассмотрены основные механизмы возбуждения виброгорения и воздействия на него на основе анализа изменения критерия Рэлея. С помощью трехмерного моделирования процесса возникновения пульсаций давления в пакете Ansys CFX получены картины возникновения диффузионного и гомогенных фронтов пламени, а также высокотемпературных зон, которые в дальнейшем использовались для оценки возможных частот пульсаций давления. В ходе расчетных исследований определены основные возможные частоты пульсаций давления и условия их возникновения в зависимости от состава смеси. Выполнена оценка частоты и амплитуды термоакустических колебаний с использованием двух фронтовой модели турбулентного горения, интегрированной в пакет Ansys CFX. Проведенный анализ выявил, что эффект подавления амплитуды колебаний системой перфорации жаровой трубы связан с появлением диффузионного пламени, в котором сгорает недогоревшее топливо, вблизи отверстий перфорации. Получено, что диффузионное пламя обладает повышенными характеристиками стабильности в диапазоне коэффициента избытка воздуха в камере сгорания от 2,0 до 2,6 на режиме испытаний камерного отсека. Кроме того, установлено, что на некоторых режимах работы камеры сгорания появляется проскок пламени во фронтное устройство, что потребовало проведение дополнительных исследований.

В четвертой главе описана методика экспериментальной доводки и проверки устойчивости КС к проскоку пламени. Определен ряд требований к конструкции, которые необходимы при проектировании и подтверждаются численным моделированием. Чаще всего проскок пламени проходит вблизи стенок по пограничному слою после чего стабилизируется во фронтном устройстве. Получено, что основным фактором, усиливающим возможность проскока, является виброгорение. Поэтому при организации смесеобразования необходимо обеспечивать бедные концентрации топлива вдоль стенок жаровой трубы без отрывных зон, образующихся от различных возмущающихся факторов.

В ходе экспериментальных исследований автору удалось выявить важное соотношение, позволяющее учитывать появление проскока пламени в камере

сгорания в зависимости от выбранной крутки основного потока и определять минимально необходимый перепад давления на смесительном устройстве

У большинства камер сгорания, 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 создания осевой составляющей скорости потока не менее 35 м/с, требуется минимальный перепад на фронтном устройстве, обеспечивающий отсутствие проскока пламени в зону предварительного смещения с потерей не менее 3 % давления на входе в КС. Автором получено, что для снижения потребного перепада давления целесообразно применение плохообтекаемого тела во фронтном устройстве, что позволит снизить потери давления до 1 % от давления на входе в камеру сгорания. Установлено, что для устранения условий проскока и обеспечения стабилизации пламени в фронтном устройстве необходимо обеспечивать скорость потока на выходе из горелки выше скорости распространения пламени и отсутствие стехиометрических концентраций топлива вблизи стенок горелки.

С целью реализации данного подхода разработана пошаговая методика экспериментальной проверки условий отсутствия горения в смесительном устройстве. С помощью данной методики выполнено проектирование и создана методика экспериментальной доводки характеристик малоэмиссионной камеры сгорания газотурбинной установки мощностью 16 МВт.

Таким образом в диссертационной работе Нугуманова А.Д. выполнена большая работа, имеющая значительное научно-практическое применение в области создания современных малоэмиссионных камер сгорания, которая включает:

1. Модернизацию процессов проектирования и экспериментальной доводки низкоперепадной КС малоэмиссионного горения.
2. Обеспечение широкого диапазона устойчивой работы КС с эмиссией $\text{NO}_x < 50 \text{ мг/м}^3$, и $\text{CO} < 100 \text{ мг/м}^3$.
3. Определение критерия отсутствия проскока пламени в зоне предварительного смещения топливовоздушной смеси.
4. Уменьшения гидравлических потерь во фронтном устройстве КС, что позволяет повысить эффективность ГТД в целом.

Наряду с этим необходимо отметить также замечания по данной работе:

1. Неясно как в работе оценивались температуры в первичной зоне на графиках, приведенных на рис. 2.16 и 2.17, т.к. для их определения необходимо знать состав смеси и полноту сгорания в первичной зоне.

2. В четвертой главе описывается модель проскока пламени на основе критерия Пекле, однако неясно как он использовался на практике.

3. Отсутствуют пояснения к графикам на рис 4.9 и 4.10.

4. Из результатов неясно насколько универсальны разработанные в работе методики, можно ли применить их для других камер сгорания.

Заключение

Оценивая работу в целом, считаю, что она является законченной научно-квалификационной исследовательской работой, выполненной на актуальную тему, создания и экспериментальной доводки низкоперепадных камер сгорания малоэмиссионного горения для современных ГТД. Работа выполнена на достаточно высоком научно-техническом уровне, с применением современных методов экспериментального исследования и грамотного применения цифровой технологии при анализе результатов исследований. Полученные в работе результаты используются при создании и доводке новых современных малоэмиссионных камер сгорания ГТД.

Опубликованные автором работы и автореферат достаточно полно отражают содержащиеся в диссертации научные результаты. Считаю, что работа «Методика экспериментальной доводки низкоперепадных камер сгорания газотурбинных установок по экологическим нормам» соответствует требованиям пункта 9 «Положения о присуждении ученых степеней» ВАК Минобрнауки РФ., а ее автор Нугуманов Алексей Дамирович заслуживает присвоения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.07.05. «Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов».

Профессор кафедры «Реактивных двигателей и энергетических установок» ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технический университет»,

доктор технических наук,


профессор

по специальности 05.07.05

 Мингазов Биалал Галавтдинович

420111 г. Казань, ул. Карла Маркса 10

тел.89172999361

Подпись 
заверяю. Начальник управления
делами КНИТУ-КАИ 