

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

Мингазова Билала Галавтдиновича

на диссертационную работу Кутлумухамедова Артура Рамилевича «Метод расчёта выбросов монооксида углерода с формализованным выделением зон, лимитирующих его окисление в камерах сгорания газотурбинных двигателей», представленную на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.5.15. Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов

В настоящее время одной из главнейших проблем современности является снижение выбросов загрязняющих веществ энергетическими установками, в том числе авиационным транспортом – главным загрязнителем верхних слоев атмосферы, в особенности озонового слоя Земли – естественного заградителя от прямого ультрафиолетового излучения. Проблема снижения вредных выбросов существующих двигателей и разработка новых малотоксичных двигателей требует качественного изменения в конструкции основного источника загрязнителей – камер сгорания (КС). Для создания методов снижения вредных выбросов нужно знать законы их образования в процессе горения топлива в воздухе, а для конкретной конструкции КС и условия сжигания топлива в её жаровой трубе (ЖТ).

Если в последние годы все усилия исследователей были брошены на борьбу с эмиссией оксидов азота NO_x , то на выделение монооксида углерода CO не обращалось много внимания, т.к. считалось, что здесь все просто – CO определяется полнотой сгорания топлива. Однако, монооксид углерода CO является токсичным и опасным газом. Несмотря на многолетний опыт использования горения, мы очень часто сталкиваемся с трагическими случаями отравления этим газом.

Действительно, на первый взгляд считается, что для уменьшения выбросов CO необходимо улучшить горение и повысить полноту сгорания, за счет оптимальной подачи воздуха, повышения температуры горения или увеличения времени пребывания.

Например, А. Лефевр выделяет следующие причины повышенного уровня CO :

- «низкая скорость горения в первичной зоне вследствие недостатка топлива и (или) нехватки времени пребывания;
- недостаточное перемешивание топлива и воздуха, в результате чего образуются зоны, в которых смесь слишком бедна, чтобы в них поддерживалось горение, а также зоны с излишне богатой смесью, горение в которых приводит к высоким местным концентрациям CO ;
- «замораживание» продуктов горения, вовлекаемых в слои воздуха, охлаждающие стенки жаровой трубы».

Однако, в последние годы более тщательные исследования показали, что процесс выделения СО в камерах сгорания гораздо сложнее, поэтому прогноз и возможность управления этим процессом неоднозначны, т.е. имеется много побочных факторов, влияющих на выбросы СО, и требующих своего понимания.

В связи с вышесказанным работа Кутлумухамедова А.Р., является своевременной и посвящена актуальной проблеме снижения выбросов СО в камерах сгорания ГТД.

В соответствии с направлением исследований автор ставит **целью работы** повышение эффективности проектирования камер сгорания газотурбинных двигателей, работающих на природном газе, при оценке выбросов монооксида углерода за счёт формализованного выделения зон, лимитирующих его окисление.

В первой главе автор провел глубокий и детальный анализ работ в области исследований эмиссии СО, что позволило ему поставить обоснованные научные направления для решения поставленной цели:

1 Разработать метод расчёта выбросов СО из камер сгорания ГТД по формализованной реакторной модели с детальной химической кинетикой.

2 Получить критерии формирования реакторной модели камеры сгорания по результатам обработки трёхмерного CFD моделирования.

В соответствии с поставленной целью исследований автор ставит следующие задачи.

1 Исследовать влияние физико-химических факторов на процессы образования и выгорания монооксида углерода.

2 Разработать метод расчёта выбросов СО из камер сгорания ГТД по формализованной реакторной модели с детальной химической кинетикой и схематичным описанием структуры течения, распределения воздуха и неравномерности по коэффициенту избытка воздуха.

3 Разработать критерии формирования реакторной модели камеры сгорания по результатам обработки трёхмерного CFD моделирования.

4 Выполнить апробацию разработанного метода на исходной и конвертированной малоэмиссионной конструкции камеры сгорания с сопоставлением расчётных выбросов СО с результатами лабораторных и натурных измерений при работе на природном газе.

Для выяснения этих процессов и точного расчета автор выделяет основные методы оценки концентраций СО на выходе из камер сгорания:

- расчет полуэмпирическим зависимостям и статистическим данными;
- реакторный метод и вычислительная газовая динамика (CFD).

Каждый метод имеет определенные сложности при расчете выбросов СО и степень точности оценки.

В настоящей работе автором в качестве приоритетной выбрана комбинация CFD и реакторного метода расчёта выбросов вредных веществ из

камер сгорания. Этот подход требует детального изучения формализованного метода выделения зон, лимитирующих окисление CO в камерах сгорания ГТД. В комбинированных методах расчета выбросов вредных веществ из камеры сгорания ГТД её реакторная модель строится на базе результатов трехмерного CFD моделирования. Этот метод по мнению автора позволяет точнее учесть структуру течения газов в камере сгорания с возможностью применения детальных механизмов химической кинетики и уменьшения времени подготовки исходных данных и вычислений.

Во второй главе автор исследует более подробно комбинированные методы расчета выбросов монооксида углерода из камер сгорания ГТД. Автором установлено, что в рассмотренных работах расчетные модели камер сгорания в основном построены с помощью реакторов идеального смешения PSR и идеального вытеснения PFR.

Автор проводит глубокий анализ математической модели реактора идеального смешения (PSR), которая состоит из уравнений сохранения массы и энергии с добавлением уравнения состояния идеального газа. Исследуется также математическая модель реактора идеального вытеснения (PFR). На основании проведенного анализа проведено расчетное исследование влияния отдельных факторов на уровень выбросов CO. Получены интересные зависимости выбросов CO от коэффициента избытка воздуха и температуры на входе в камеру сгорания, проведено сравнение с равновесными значениями. Отметим, что расчетная закономерность выбросов CO от коэффициента избытка воздуха α качественно согласуется с нашими экспериментальными данными, полученными для камер сгорания наземной ГТУ.

В комбинированном методе расчета выбросов вредных веществ в камерах сгорания ГТД автор строит реакторную модель на базе результатов трехмерного CFD моделирования. Этот метод позволяет более точно учесть структуру течения газов в камере сгорания с возможностью проведения быстрых вычислений и применения детальных механизмов химической кинетики.

Необходимо отметить, что реакторная модель совместно с CFD применяется также в программе **Networks Flownex** совместно с **NASA CEA**, которая позволяет комплексно прогнозировать следующие процессы:

- 1) Распределение воздуха;
- 2) Процесс сгорания;
- 3) Теплопередача;
- 4) Распределения давления и массового расхода в объеме камеры сгорания.

Поэтому было бы интересным проведение сравнения возможностей каждой программы.

В **третьей главе** рассматривается метод расчета выбросов монооксида углерода с формализованным выделением зон, лимитирующих его окисление в камерах сгорания ГТД.

В рамках концепции комбинированных методов (CFD и реакторный метод), разработан метод расчета выбросов монооксида углерода с формализованным выделением зон, лимитирующих его окисление в камерах сгорания ГТД. Сформировано два критерия моделирования реакторами зон с высоким содержанием СО: критерий моделирования неравномерно распределённых низкотемпературных зон и критерий моделирования зоны пламени, которые лимитируют окисление монооксида углерода.

Представлены основные этапы формализованного построения реакторной модели камеры сгорания по разработанному методу.

В работе уделяется внимание моделированию горения. Модель горения количественно определяет влияние турбулентности на процессы горения. Основная задача моделей горения – расчет скорости выгорания топлива в турбулентном потоке (с учетом влияния турбулентности). Решение этой задачи осложняется экспоненциальной зависимостью скорости химических реакций от температуры. При такой нелинейной зависимости нельзя использовать осредненную по времени температуру горючей смеси, необходимо учитывать пульсационную составляющую температуры в турбулентном потоке.

Разработан новый метод расчёта выбросов монооксида углерода (СО) в камерах сгорания ГТД с применением детальной химической кинетики, отличающийся формализованным построением реакторной модели камеры сгорания по результатам трёхмерного CFD моделирования со схематичным описанием структуры течения, распределения воздуха и неравномерности коэффициента избытка воздуха.

Метод предназначен для расчетов камер сгорания ГТД различной конструкции во всем диапазоне рабочих режимов. Разработанные критерии построения реакторной модели существенно упрощают технологию моделирования - что позволяет оперативно проводить расчеты камер сгорания различной конструкции на различных режимах. Разработанные критерии моделирования «бедных» струек и зоны пламени основаны на количественной оценке процессов горения метановоздушных смесей (природного газа). Автором отмечается то, что в случае применения **другого топлива** могут потребоваться дополнительные исследования.

В четвертой главе проводится апробация разработанного метода расчета выбросов монооксида углерода на примере расчета выбросов СО из одnogорелочного отсека «богато-бедной» малоэмиссионной камеры сгорания наземной газотурбинной энергоустановки ГТЭ-10/953, конвертированной из авиационного двигателя типа Р-95Ш.

В ходе исследований **определены** следующие характеристики камеры сгорания:

- полнота сгорания топлива ($\eta_r = f(\alpha)$);
- потери полного давления;
- радиальная и окружная неравномерность температурного поля газов на выходе;
- температура стенок жаровой трубы (измерения выполнены с помощью ХА термопар и термоиндикаторных красок ТР-10);
- концентрация вредных веществ на выходе (NO_x , CO);
- диапазон устойчивого горения по коэффициенту избытка воздуха;
- пульсации давления.

К сожалению, не все результаты перечисленных экспериментов представлены.

По результатам расчетов получены данные с распределением параметров и количества вредных веществ в элементах реакторной модели камеры сгорания для рабочего диапазона по α . Получено хорошее согласование расчетных и экспериментальных данных по выбросам CO (расхождение в среднем составило порядка 13 %).

Научная новизна состоит в том, что

1 Разработан новый метод расчёта выбросов монооксида углерода (CO) из камер сгорания ГТД с применением детальной химической кинетики, отличающийся формализованным построением реакторной модели камеры сгорания по результатам трёхмерного CFD моделирования со схематичным описанием структуры течения, распределения воздуха и неравномерности коэффициента избытка воздуха.

2 Разработан новый критерий формирования реакторной модели камеры сгорания, отличающийся обобщением «бедных» зон, неравномерно распределённых в рабочем объёме, в низкотемпературные «бедные» струйки с низкой скоростью окисления монооксида углерода.

3 Разработан новый критерий моделирования реакторами зоны пламени, отличающийся выделением высокотемпературной зоны с существенным сдвигом равновесия в сторону монооксида углерода.

4 Представлены новые расчётные зависимости влияния на выбросы CO распределения коэффициента избытка воздуха по длине жаровой трубы конвертированной «богато-бедной» малоэмиссионной камеры сгорания, отличающиеся законом подвода воздуха и режимными параметрами, совместно с данными сравнительного анализа результатов расчётов с экспериментом.

Практическая значимость работы заключается в разработанном расчетном методе, позволяющим прогнозировать выбросы CO в камерах

сгорания ГТД на этапе оптимизации распределения воздуха по длине, что снижает материальные и временные затраты по доводке камеры сгорания. Результаты исследования нашли практическое применение в ОКБ «Мотор» ПАО «ОДК-УМПО» в рамках расчётов камеры сгорания наземной энергетической установки ГТЭ-10/953, разработки технического предложения по газотурбинной энергетической установке ГТУ-2У мощностью 2,5 МВт, оценке вредных выбросов при стендовых испытаниях авиационных двигателей, что подтверждается актом внедрения от 08.10.2024, а также в учебном процессе УУНиТ и исследовательских работах ООО «НПФ «Теплофизика».

Замечания к работе

1 В работе отмечается, что разработанный расчетный метод универсален (за исключением рода топлива) и потенциально позволяет проводить расчеты различных камер сгорания т.к. «не использует количественные конструктивные характеристики камеры сгорания, не требует ввода эмпирических коэффициентов и не вводит ограничений по параметрам на входе». К сожалению, отсутствует более развернутое обоснование универсальности метода, например применительно к камерам сгорания с предварительным смешением топлива.

2 Одно из указанных достоинств разработанного метода – возможность применения экономичных, с позиции вычислительных затрат, моделей горения и турбулентности с обеспечением приемлемой точности оценки выбросов СО. Однако, в работе не указаны временные затраты на обработку результатов CFD моделирования в ходе построения реакторной модели камеры сгорания.

3 В работе приведены экспериментальные данные по влиянию типа завихрителя на относительную площадь зоны обратных токов по длине жаровой трубы. К сожалению, отсутствует сравнение результатов трехмерного моделирования с экспериментальными данными.

4 В работе отмечено, что игнорирование пульсаций может привести к существенным ошибкам при расчете уровня выбросов вредных веществ, при этом неясно как пульсации учитываются в разработанном методе.

Заключение

Оценивая работу в целом, считаю, что диссертационная работа Кутлумухамедова Артура Рамилевича является законченной научно-квалификационной исследовательской работой, выполненной на актуальную тему по разработке нового метода, позволяющего определять с большой точностью выделение СО в камерах сгорания и прогнозировать выбросы СО

из камер сгорания ГТД на этапе оптимизации распределения воздуха по длине, что снижает материальные и временные затраты по доводке камеры сгорания. В разработанном методе расчета реакторная модель исследуемой камеры сгорания строится на базе результатов трехмерного CFD моделирования (объединяются достоинства реакторного метода и CFD). Особенность метода в выделении зон, лимитирующих окисление монооксида углерода. Работа выполнена на достаточно высоком научно-техническом уровне, с применением современных методов программирования и расчета сложных процессов на этапе доводки камер сгорания. Полученные в работе результаты могут использоваться при создании и доводке современных камер сгорания ГТД.

Опубликованные автором работы и автореферат достаточно полно отражают содержащиеся в диссертации научные результаты. Считаю, что работа **«Метод расчёта выбросов монооксида углерода с формализованным выделением зон, лимитирующих его окисление в камерах сгорания газотурбинных двигателей»** соответствует требованиям пункта 9 «Положения о присуждении ученых степеней» ВАК Минобрнауки РФ, а ее автор Кутлумухамедов Артур Рамилевич заслуживает присвоения учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.5.15. Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов.

Профессор кафедры «Реактивных двигателей
и энергетических установок»
ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский
технический университет имени А.Н. Туполева - КАИ»,
доктор технических наук, профессор

Мингазов Биалал Галавтдинович

28.04.2015

Подпись Мингазова Биалала Галавтдиновича
удостоверяю:

7

Подпись Мингазов Б.Г.
заверяю. Начальник управления
делопроизводства и контроля



Контактные данные официального оппонента Мингазова Билала Галавтдиновича:

тел.: 8-9172999361; e-mail: bgmingazov@kai.ru

Специальность, по которой официальным оппонентом защищена диссертация:

05.07.05 «Тепловые, электроракетные двигатели и энергетические установки летательных аппаратов»

Адрес места работы: 420111, Россия, г. Казань, ул. Карла Маркса 10, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский национальный исследовательский технический университет имени А.Н. Туполева – КАИ»

Тел.: 8 (843) 238-97-70, e-mail: info@kafedrardeu.ru, web-сайт: www.kai.ru.