

АННОТАЦИЯ

диссертации, представленной на соискание степени доктора философии (PhD)
по образовательной программы 8D07102 - Теплоэнергетика

САДЫКОВОЙ САМАЛ БЕКБОЛАТОВНЫ

Разработка и исследование микромодульных воздушных форсунок для
кольцевых камер сгорания ГТД

Актуальность темы диссертационного исследования. В связи с быстрым ростом численности населения спрос на электроэнергию и транспорт привел к новой волне исследований в энергетическом секторе. Для производства и транспортировки энергии требуется сжигать большое количество топлива. Газотурбинные двигатели вот уже несколько десятилетий вносят вклад в производство энергии. Разработка таких двигателей помогла уменьшить потребление топлива, а также уменьшить количество загрязняющих веществ в уходящих газах. Выхлопные газы газотурбинных двигателей делятся на основные и второстепенные. Нормы выбросов для газотурбинных двигателей стали более строгими, начиная с момента заключения Киотского протокола в 1997 году, из-за их воздействия на окружающую среду и здоровье человека.

Конструкция газотурбинного двигателя и состав топлива являются ключевыми параметрами для количественной оценки выбросов. Сегодня производители оборудования газовых турбин разрабатывают новые конструкции для работы в широком диапазоне нагрузок и на различных видах топлива, соблюдая при этом нормы выбросов, а также повышая экономичность по расходу топлива. Данные устройства основываются на нескольких концепциях для конструкции камеры сгорания (КС) при разработке методов охлаждения, а именно размер камеры сгорания может быть уменьшен с увеличением производительности двигателя. Это помогает снизить как содержание влаги, так и выбросы CO. Кроме того, выбросы парниковых газов могут быть снижены за счёт улучшения качества топлива и повышения эффективности сгорания. Следовательно, уровень выбросов можно контролировать за счёт рабочей нагрузки газотурбинного двигателя. Но основной вклад в общий объем выбросов при любых условиях вносит NO_x. Таким образом, стандарты по выбросам NO_x строго регламентированы во всём мире. Для удовлетворения вводимых в настоящее время весьма жестких требований и ограничений на вредные выбросы газотурбинных двигателей (ГТД), потребуются существенные изменения конструкции фронта кольцевых камер и внедрение микромодульных форсунок с низкими выбросами NO_x < ppm.

Высокие экологические показатели КС и всей газотурбинной установки (ГТУ) можно получить тремя основными методами:

- применением мокрых КС обычной конструкции с диффузионным факелом и впрыском воды (пара);
- дополнительным использованием каталитической очистки выходных газов ГТУ;

- применением сухого микрофакельного многоступенчатого сжигания обедненной топливной смеси в сухих КС.

Цель работы. Разработка и исследование микромодульной воздушной форсунки для кольцевых камер сгорания ГТД с пониженными выбросами NO_x .

Задачи исследования:

- провести литературно-патентные исследования причин появления эмиссий вредных газов в топливосжигающих устройствах и основных направлений улучшения технических и экологических показателей кольцевых камер сгорания ГТД;

- разработать конструкцию новой микромодульной воздушной форсунки, позволяющую эффективно сжигать топливоздушную смесь с низкой эмиссией NO_x ;

- выполнить теоретические исследования с использованием пакета программ Ansys fluent, для выбора эффективных углов закрутки потока на входе и выходе из модуля и влияния их на эмиссию NO_x ;

- провести изотермическое исследование интенсивности турбулентности входного воздушного потока на качество смешения топливоздушной смеси;

- провести огневое испытание физической модели ММВФ, с целью определения влияния геометрических параметров лопаточных завихрителей на выбросы токсичных оксидов азота и CO ;

- с использованием регрессионного анализа получить аналитические уравнения для расчета коэффициента интенсивности турбулентности и выбросов NO_x ;

- провести сравнительный анализ расчетных и экспериментальных значений NO_x ;

- сформулировать конструкционные рекомендации для возможного массового создания конструкций, а также оценить экономическую эффективность предлагаемых решений; запатентовать полученные результаты путем подачи заявки на изобретение.

Объект исследования. Топливо-воздушные потоки внутри микромодульной воздушной форсунки и за её пределами.

Методы исследования. Методологическая база основана на: основных законах и закономерностях термодинамики, теплообмена и механики жидкости и газа, а также экспериментальных и теоретических данных в области исследования интенсивности турбулентности в кольцевых камерах. В качестве информационных источников были использованы материалы научных статей, международных конференций, монографий, справочные данные, а также данные собственного математического моделирования и экспериментов.

Научная новизна:

1) Исследуемая камера была смоделирована на базе платформы Ansys Fluent с применением кода CFD (computation fluid dynamics). Оптимизирован ряд геометрических характеристик, способствующих интенсивному образованию топливно-воздушной смеси за счет повышения степени турбулентности в потоке. Моделирование осуществлялось с учетом процессов горения и без них.

2) Был проведен изотермический эксперимент, в ходе которого измерялось

изменение турбулентности (масштаб и интенсивность) воздушного потока внутри микромодульных воздушных форсунок с разными диаметрами микромодулей и разными углами лопастей входного завихрителя, на основании, которого определены оптимальные геометрические параметры микромодулей и выявлены рациональные углы закрутки входного и выходного потоков.

3) Были проведены огневые испытания, которые доказали ценность предлагаемой конструкции и адекватность проведенного ранее математического моделирования. Были получены новые экспериментальные результаты, такие как температурное поле, длина факела, концентрация вредных выбросов и т.д.

4) По имеющимся в работе данным, получена многофакторная регрессионная зависимость интенсивности турбулентности от геометрических характеристик, позволяющая воссоздать поле турбулентности внутри ММВФ, также выведены математические зависимости температуры, КПД горения и эмиссий CO и NO_x от таких показателей как интенсивность турбулентности внутри микромодуля и углов поворота лопаток входного и выходного завихрителей. Установлено влияние степени турбулентности на образование NO_x и в методику расчета NO_x внесены поправки.

5) На новые конструкции ММВФ и КС получено три патента Республики Казахстан.

6) Конкретизация новизны заключается в создании новой конструкции ММВФ, содержащая цилиндрический обвод на входе с завихрителем воздуха, углы которого выявлены теоретико-эмпирическим способом, и магистраль подвода топлива. Внутри цилиндра на выходе устанавливается последовательно два регистра (завихрители) с определенным шагом на одной оси с завихрителем воздуха, углы которых также проанализированы расчетно и экспериментально.

Практическая значимость работы. Конструкция устройства обеспечит организацию предварительного смешивания воздуха и топлива, турбулизацию пламени и стабилизацию процесса горения.

Практическая значимость данного исследования отображается в использовании результатов в учебном процессе (акт внедрения в учебный процесс) и в производстве (акт внедрения в производство). Полученные численные значения, формулы и коэффициенты внедрены в учебный процесс ЕНУ им. Л.Н. Гумилева и АУЭС им. Г. Даукеева с 2021/22 учебного года.

Обоснованность и достоверность научных положений. Достоверность подтверждается приведенными результатами сравнения численных методов и экспериментального исследования, а также сравнением с аналогичными исследованиями. Средняя несходимость результатов не превышает 12,5 %. При проведении опытов применялось поверенное оборудование, с высоким классом точности. Среднеквадратическое отклонение измерений не превышает предела допустимой погрешности измерительного оборудования.

Положения, выносимые на защиту:

- рациональные условия образования топливно-воздушной смеси в кольцевых камерах микромодульных воздушных форсунок камер сгорания газотурбинных установок;

- результаты математического моделирования поля скоростей и интенсивности турбулентности изотермических потоков в микромодульной воздушной форсунке;

- результаты математического моделирования условий горения и выхода вредных выбросов потоков, на примере NO_x и CO, в микромодульной воздушной форсунке;

- экспериментальные данные по изучению средней скорости и интенсивности турбулентности изотермических потоков внутри микромодульной воздушной форсунки;

- рациональная конструкция микромодульной воздушной форсунки камеры сгорания газовой турбины.

Личный вклад автора. Обзор и патентный поиск по теме диссертационного исследования, осуществление математического моделирования на платформе Ansys Fluent, разработка стратегии экспериментальных исследований, подготовка и проведение экспериментов, обработка результатов опытов, подготовка публикаций в научных журналах, подготовка патентов, апробация результатов работы. Научное направление исследования и идея определены при участии научного руководителя и зарубежного консультанта.

Апробация результатов диссертации. Основные результаты были представлены и обсуждены в Международных научно-практических и научно-технических конференциях:

- Международная научная конференция: «Technium». – Constanta (Румыния), 2019.

- Научно-практическая конференция: Угольная теплоэнергетика в Казахстане: проблемы, решения и перспективы развития. - Нур-Султан: Назарбаев университет, 27-28 февраля 2020 г.

- Международная научно-техническая конференция: I Юбилейные чтения Бойко Ф.К., посвященная 100-летию Бойко Ф.К. – Павлодар: ПГУ им. С.Торайгырова, 2020.

- VIII Международная научно – практическая конференция: Актуальные проблемы транспорта и энергетики: пути их инновационного решения. - Нур-Султан: ЕНУ им. Л.Н.Гумилева, 20 марта 2020 г.;

- XV Международная научная конференция: «Gulum jane bilim-2020». - Нур-Султан: ЕНУ им. Л.Н.Гумилева, 10 апреля 2020 г.

Публикации. По теме диссертации опубликованы: одна статья в журнале, входящем в базу Web of Science, три статьи в журналах, рекомендуемых ККСОН, а также три патента на изобретение Республики Казахстан, пять докладов в сборниках международных отечественных и зарубежных конференций.

Объем и структура диссертации. Диссертационная работа содержит введение, четыре раздела, заключение, список использованной литературы и приложения.

Во введении раскрыта актуальность научной работы, изложена исследуемая проблема. Приведены основная идея, научная новизна, основные

положения работы, личный вклад автора, а также апробация результатов и публикации.

В первом разделе диссертации представлен обзор актуальных достижений по различным темам, связанным с объектом исследования, таких как причины образования вредных выбросов и методы борьбы с ними, влияние эффективности смещения ТВС на эмиссию NOx, аналогичные экспериментальные исследования микромодульных установок, а также способы математического моделирования динамики турбулентного горения.

Во втором разделе теоретически раскрывается влияние закрученных потоков на процесс горения на примере турбулентности, а также содержит описание разработанной математической модели изотермических потоков в микромодуле, а также с учетом химических реакций горения.

В третьем разделе разработаны, собраны и испытаны в изотермическом режиме и условиях реального горения газового топлива несколько модулей для оптимизации параметров конструкции, таких как угол поворота лопаток завихрителей, диаметр микромодуля, расстояние до подачи топлива в поток воздуха и углы поворота лопаток выходных завихрителей. Также в главе описываются экспериментальные установки, используемые для исследования как в холодном режиме, так и для горячих потоков пламени с оценкой точности измерения. Обсуждаются результаты холодного потока, полученные в результате измерений аэродинамики, качества перемешивания и выбросы, как оксидов азота, так и угарного газа.

В четвертом разделе приводится математический анализ полученных в экспериментах данных с выводом универсальных уравнений, применимых для создания аналогичных конструкций. В выводах завершается текущая разработка нового микромодуля и приводятся рекомендации для дальнейшего применения.

В заключении отражены основные результаты и выводы по диссертационной работе.