

## ОТЗЫВ

официального оппонента **Муравьева Анатолия Викторовича** на диссертационную работу **Ахмед Ашраф Абдулла Ахмед** на тему «**Повышение эффективности сжигания твердого топлива и отходов в котлах малой мощности с колосниковой решеткой**», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности

### **2.4.6. Теоретическая и прикладная теплотехника**

#### **Актуальность темы**

Научная актуальность исследования сжигания твердых коммунальных отходов (ТКО) в котлах малой мощности на колосниковой решетке обусловлена сочетанием задач децентрализованной энергетики, сокращения объемов захоронения отходов и соблюдения жестких экологических нормативов.

В отличие от крупных мусоросжигательных заводов, малые установки характеризуются работой с крайне нестабильным по составу, влажности и теплотворной способности топливом. Это создает фундаментальные научные проблемы, связанные со стабилизацией процесса горения, управлением температурным полем в топке и минимизацией образования вредных выбросов, таких как оксиды азота, диоксины и фураны.

Такие установки особенно востребованы для удаленных населенных пунктов, малых предприятий и локальных энергокомплексов, где строительство крупных мусоросжигательных заводов невозможно.

Поэтому научно-техническая задача повышения эффективности горения, обеспечение полного сгорания топлива и снижение объема вредных выбросов при сжигании неоднородного твердого топлива в топках печей и котлов малой мощности является актуальной.

Указанная задача в диссертационной работе Ахмед Ашраф Абдулла Ахмед решается за счет организации рациональной структуры газового потока в топке и дожига несгоревших соединений и загрязняющих веществ после нее с использованием экспериментальных методов исследования и численного моделирования процессов теплообмена.

#### **Структура и содержание диссертационной работы**

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, библиографического списка, включающего 222 наименований, и четырех приложений. Объем диссертационной работы с приложением – 196 страниц.

**Во введении** обоснована актуальность диссертационной работы; поставлена цель, определены задачи исследования; приведены сведения о научной новизне, теоретической и практической значимости работы; представлены обос-

нованность и достоверность полученных результатов, апробация и общая структура работы.

**В первой главе** представлен обзор текущего состояния в технологии и методах сжигания твердых коммунальных отходов (ТКО) и моделировании процесса сжигания твердого топлива, освещаются экологические проблемы и роль вычислительной гидродинамики (CFD) в исследовании этих процессов. На основании анализа литературных источников показано, что фактическое содержание загрязняющих веществ в отходящих газах при сжигании отходов часто соответствует или даже ниже предельно допустимых пределов, установленных после систем газоочистки. На величину выбросов в наибольшей степени влияют температура горения и присутствие хлорсодержащих веществ в отходах, а состав органических отходов на них практически не влияет. Существенная проблема заключается в управлении режимами горения для обеспечения температуры и времени пребывания продуктов сгорания в установке. Эффективность сжигания топлива и отходов и образование выбросов в значительной степени зависят от обеспечения условий горения, в частности, температуры, соотношения воздуха и топлива и времени пребывания газов в топке. Применение методов математического моделирования и CFD-систем является эффективным инструментом для анализа, прогнозирования и исследования систем термической утилизации твердых отходов.

**Во второй главе** рассмотрено построение расчетной модели горения твердого топлива на колосниковой решетке и предложены критерии оценки эффективности горения в топке.

В связи со сложностью моделирования процессов горения принято упрощение, при котором топливный слой не выделяется в отдельную расчетную область, а заменяется граничными условиями. Расчетная область включает только газовый объем, при этом топливо поступает в нее через границу, соответствующую поверхности топливного слоя.

Упрощения модели заключаются в следующем: процесс горения включает гетерогенные реакции газификации на поверхности топлива и гомогенное окисление летучих компонентов в газовой фазе. Унос твердых частиц не учитывается.

Разработан метод оценки времени пребывания газового потока в зоне после догорания на основе линий тока, полученных при CFD-моделировании в ANSYS Fluent. Метод позволяет при проектировании и анализе работы твердо-топливных котлов оценивать границы зоны горения и полноту разложения загрязняющих веществ.

Для оценки эффективности сжигания предложены критерии, включающие долю несгоревших горючих компонентов и КПД топки с учетом потерь тепла и полноты сгорания. Эти показатели позволяют оптимизировать проектирование и эксплуатацию котлов малой мощности.

Введен обобщенный критерий выбросов, учитывающий суммарную массу нормированных по ПДК загрязняющих веществ, отнесенную к единице теплоты сгорания топлива.

**В третьей главе** выполнена валидация разработанной модели вычислительной гидродинамики (CFD) на основе данных промышленных испытаний сжигания RDF-топлива с подтверждением путем сравнения расчетов выбросов различных видов твердого топлива с нормативными методами. Проверка с использованием данных промышленных испытаний включала сравнение экспериментальных результатов с результатами численного моделирования процесса горения. Расчеты выбросов модели были подтверждены путем сравнения результатов численного моделирования сжигания шести различных видов твердого топлива с результатами, полученными с помощью двух нормативных методов расчета. Таким образом, модель может быть использована для исследования эффективности горения и экологической оценки процессов сжигания твердого топлива и твердых бытовых отходов.

**В четвертой главе** проведено компьютерное исследование влияния режима сжигания на эффективность горения и образование вредных веществ. Сначала рассматривался существующий котел, установлено противоречивое влияние коэффициента избыточного воздуха на полноту горения и выбросы, значительная неоднородность распределения скоростей, температур и концентрации кислорода, что снижает эффективность сжигания. Полное окисление топлива достигается при коэффициенте избытка воздуха 1,8, однако это сопровождается ростом эмиссии загрязняющих веществ. Для устранения этого противоречия предложено использовать минимально необходимый объем воздуха с организацией дожига в вертикальном газоходе при температуре свыше 850°C в течение двух секунд. Определены оптимальные параметры работы: коэффициент избытка воздуха 1,4–1,6 и влажность топлива не более 30%. Для котлов малой мощности предложена система газоочистки в двух вариантах исполнения – с отечественным или импортным оборудованием.

**В заключении** сформулированы основные выводы по результатам проведенных исследований.

**Приложения** к диссертационной работе общим объемом 42 с. содержат:

В первом приложении представлены акты внедрения результатов диссертационного исследования в производственную деятельность предприятия по

переработке отходов ООО «ТК «Экотранс», внедрения и использования результатов в учебный процесс БГТУ им. Шухова и Тикритского университета.

Во втором приложении размещен Протокол промышленных испытаний котла при сжигании RDF-топлива. Приведены характеристики топлива, перечень используемых измерительных средств, методика проведения испытаний и результаты измерений. Протокол подписан сотрудниками университета и предприятия, участвовавшими в испытаниях, и утвержден руководством предприятия.

В третьем приложении приведена методика и результаты статистической обработки данных испытаний, также приведены результаты расчета теплового баланса по данным испытаний.

В четвертом приложении размещен текст программы, разработанной по методике, предложенной в подразделе 2.2.

### **Обоснованность научных положений и достоверность полученных результатов**

Достоверность полученных результатов обеспечена обоснованным применением теоретических зависимостей, допущений и ограничений, корректностью методологии ведения исследований, использованием современных, надежных, эффективных методов и технологий проведения теоретических и экспериментальных исследований и подтверждается качественной и количественной сходимостью результатов в ходе апробации расчетных моделей.

#### **Научной новизной обладают следующие результаты работы.**

– результаты исследования горения твердого топлива в неподвижном слое на колосниковой решетке в котле малой мощности 1 МВт методами вычислительной гидродинамики и установленные по результатам моделирования закономерности влияния режима сжигания на эффективность горения и образование вредных веществ;

– критерии оценки эффективности горения топлива в топке;

– методика расчета времени течения газового потока после завершения горения по данным линий тока газовой среды для определения границ области горения и полноту разложения загрязняющих веществ;

– обобщенный критерий выбросов, включающий сумму массовых выбросов, нормируемых с учетом коэффициентов, определяемых по ПДК соединений и отнесением величины выбросов к единице теплоты сгорания топлива.

## **Значимость полученных автором диссертации результатов для науки и производства**

1. Разработана модель процесса горения твердого топлива в неподвижном слое на колосниковой решетке с помощью системы CFD-моделирования ANSYS Fluent.

2. Показана возможность энергетического использования отходов при использовании рекомендуемых режимов горения и способов организации горения.

3. Результаты работы могут быть использованы при конструировании и анализе работы котлов, сжигающих твердое топливо или отходы.

Результаты выполненного диссертационного исследования рекомендованы при создании новых и для модернизации существующих автономных источников энергоснабжения, сжигающих ТКО, и внедрены в производственную деятельность ООО «ТК «Экотранс», в учебный процесс БГТУ им. Шухова, используются в учебном процессе Тикритского университета.

## **Соответствие диссертации и автореферата паспорту научной специальности**

Диссертационная работа и автореферат соответствуют паспорту специальности 2.4.6. Теоретическая и прикладная теплотехника, а именно пунктам:

п. 9 – системы обеспечения теплового режима теплоэнергетических, промышленных и коммунальных объектов, теплопотребляющего и тепловыделяющего оборудования, методы их совершенствования. Математическое моделирование и оптимизация энерготехнологических систем промышленных предприятий и систем теплоснабжения зданий, районов и городов.

п. 10 – Теоретические аспекты и методы интенсивного энергосбережения в тепловых технологических системах и процессах. Теоретические основы создания малоотходных и безотходных тепловых технологических установок, способствующих защите окружающей среды.

Соответствие содержания диссертационной работы специальности 2.4.6. Теоретическая и прикладная теплотехника, по которой она представляется к защите, подтверждается апробацией работы, ее научной новизной, теоретической и практической значимостью.

## **Общие замечания по содержанию и оформлению диссертации**

1. В работе не указано, как задавался требуемый коэффициент избытка воздуха при горении топлива.

2. На с. 50 указано, что рассмотрены различные варианты размеров расчетной области топлива и выбран вариант с равномерными участками, но не приведены рассматриваемые варианты и численные результаты, по которым был сделан выбор.

3. Почему для границ расчетной области и газового объема выбраны различные типы сеток, не приведет ли это к повышению погрешности из-за несовпадения расчетных узлов?

4. Почему в работе моделируются только образование оксидов азота, серы и сероводорода, но не рассчитываются содержание других соединений: формальдегидов, бензопирена, диоксинов и фуранов, хотя CFD-система Ansys Fluent имеет возможность добавления дополнительных моделей образования загрязняющих веществ?

5. Работа содержит определенное количество грамматических и орфографических ошибок, например: «Рисунке 3.1), Котел» – лишняя скобка, запятая вместо точки (с. 68), «отопления трех объектов» – ошибка в окончании (с. 68), «теплотехнической» (с. 83), «другие летучи[ продуктов» (с. 114), лишний символ «Е» (с. 127), и др.

#### **Оценка языка и стиля диссертации и автореферата**

Автореферат отражает основные положения диссертационной работы, выдержан по форме и объему. Язык и стиль написания диссертации характеризуется ясностью и четкостью изложения материала.

#### **Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации**

Обоснованность и достоверность научных положений и выводов, полученных в диссертации, подтверждается корректным использованием современных и эффективных методов исследования. Достоверность результатов моделирования разработанной модели обоснована её апробацией по данным промышленных испытаний, верификацией расчетов выбросов с расчетом по двум нормативным методикам, а также аналитического анализа результатов.

#### **Подтверждение опубликования основных результатов диссертации в научной печати**

По теме диссертации опубликовано 14 печатных работ (статей), в том числе 3 статьи в изданиях, рецензируемых ВАК РФ, три статьи в изданиях, индексируемых в Scopus. Получено одно свидетельство на государственную регистрацию программы для ЭВМ. Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на пяти международных и всероссийских профильных конференциях.

#### **Заключение**

Указанные в отзыве замечания не снижают общей положительной оценки, а также теоретической и практической ценности диссертационной работы Ахмед Ашраф Абдулла Ахмед на тему «Повышение эффективности сжигания твердого топлива и отходов в котлах малой мощности с колосниковой решет-

кой». Диссертация Ахмед А.А.А. является законченным самостоятельным научно-квалификационным исследованием, в котором предложено решение важной научно-практической задачи. Оформление диссертации и автореферата соответствует требованиям. Содержание автореферата соответствует основному содержанию и положениям диссертации. По актуальности, научной новизне, научной и практической значимости полученных результатов, уровню исполнения и личному вкладу автора диссертационная работа «Повышение эффективности сжигания твердого топлива и отходов в котлах малой мощности с колосниковой решеткой» соответствует требованиям п. 9–14 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842, предъявляемых к кандидатским диссертациям, а ее автор – Ахмед Ашраф Абдулла Ахмед заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.4.6. Теоретическая и прикладная теплотехника.

Официальный оппонент

кандидат технических наук (специальности  
01.04.14 - Теплофизика и теоретическая теплотехника,  
05.14.04 - Промышленная теплоэнергетика), доцент,  
заведующий кафедрой «Теплоэнергетика на  
железнодорожном транспорте» ФГБОУ ВО «Ростовский  
государственный университет путей сообщения»

  
Муравьев А.В.

Дата: 17.11.2025 г.

Адрес организации: 344038, Ростовская область, городской округ город Ростов-на-Дону, город Ростов-на-Дону, площадь Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, зд. 2.

Телефон: +7 (863) 272-62-19

E-mail: up\_del@rgups.ru

Подпись Муравьева А.В.

УДОСТОВЕРЯЮ

Начальник управления делами  
ФГБОУ ВО РГУПС

« 17 » 11 2025

  
Т.М. Канина