

На правах рукописи



АХМЕД АШРАФ АБДУЛЛА АХМЕД

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ
СЖИГАНИЯ ТВЕРДОГО ТОПЛИВА И ОТХОДОВ
В КОТЛАХ МАЛОЙ МОЩНОСТИ
С КОЛОСНИКОВОЙ РЕШЕТКОЙ**

Специальность

2.4.6. Теоретическая и прикладная теплотехника

АВТОРЕФЕРАТ

**диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Воронеж 2025

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова» (БГТУ им. В.Г. Шухова)

Научный руководитель:

Трубаев Павел Алексеевич

доктор технических наук, доцент,
профессор кафедры энергетики теплотехнологии

Официальные оппоненты:

Слюсарев Михаил Иванович,

доктор технических наук, доцент,
Федеральное государственное казенное военное образовательное учреждение высшего образования «Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж) Министерства обороны Российской Федерации (ВУНЦ ВВС «ВВА»),
профессор кафедры криогенных машин, установок и электрогазовой техники, г. Воронеж

Муравьев Анатолий Викторович,

кандидат технических наук, доцент,
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ростовский государственный университет путей сообщения» (РГУПС),
заведующий кафедрой теплоэнергетики на железнодорожном транспорте, г. Ростов-на-Дону

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Донецкий национальный технический университет», г. Донецк

Защита состоится 25 декабря 2025 г. в 14⁰⁰ на заседании диссертационного совета 24.2.286.07, созданного на базе ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», по адресу: г. Воронеж, Московский проспект, 14, ауд. 216.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке ФГБОУ ВО «БГТУ» и на сайте <https://cchgeu.ru/>.

Автореферат разослан 12 ноября 2025 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета

24.2.286.07,

канд.физ.-м.наук, доц.



Рязских Александр Викторович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Работа выполнена по направлению теплотехники и теплоэнергетики – сжиганию твердых коммунальных отходов (ТКО) в установках малой мощности.

Образование и утилизация отходов является актуальной проблемой. В условиях раздельного сбора отходов и экономики замкнутого цикла часть отходов невозможно использовать для вторичной переработки и их необходимо утилизировать. Получение энергии из биотоплива и горючих отходов осуществляется за счет сжигания с применением котельных установок, оснащенных колосниковыми решетками различного типа, которые позволяют эффективно сжигать разнообразные виды топлив с различным уровнем влажности и требуют его предварительной подготовки, но на эффективность сжигания существенно влияют условия эксплуатации и горения.

Термическая утилизация отходов осуществляется в крупных установках мощностью 60...300 МВт. В работе рассматривается альтернативный подход – сжигание в установках малой мощности в пределах полигонов ТКО для обеспечения местного энергоснабжения. Процесс горения твердого топлива в котлах малой мощности формализован не достаточно и поэтому трудно прогнозируем, особенно в условиях неоднородности топлива.

Одной из важных проблем угольных котельных и термической утилизации ТКО является образование загрязняющих веществ. Для крупных установок на мусоросжигательных заводах трудно обеспечить качественную сортировку, поэтому на них используются дорогостоящие системы очистки, которые часто по стоимости в несколько раз выше стоимости котлов. Для котлов малой мощности установка систем очистки, сопоставимых по характеристикам с крупнотоннажными, связана с крайне большими затратами.

Научной гипотезой исследования является предположение, что решение проблем выбросов может быть достигнуто обеспечением рационального режима сжигания, а эффективное управление горением и прогнозирование образования выбросов наряду с экспериментальными методами может выполняться на основе методов вычислительной гидродинамики (CFD – Computational Fluid Dynamics), в том числе с использованием специализированного программного обеспечения.

С практической точки зрения, в отличие от крупных мусоросжигательных заводов (МСЗ), сжигание отходов в установках малой мощности, расположенные в пределах полигонов ТКО, имеет следующие особенности: а) функционирование на полигонах ТКО, уже являющихся участками с неблагоприятной экологической обстановкой с выделенной санитарно-защитной зоной, в пределах которой будут распространяться выбросы; б) небольшая производительность позволяет осуществить качественную сортировку с отбором фракций, содержащих тяжелые металлы (вся проблема выбросов тяжелых металлов в МСЗ заключается только в их наличии в сжигаемых отходах, то есть в некачественной сортировке).

Тематика работы соответствует одному из научных направлений БГТУ им. В.Г. Шухова «Энергетическое использование биогаза и отходов». Работа выполнена в рамках проекта 77/20 БГТУ им. В.Г. Шухова «Разработка технологии энергетического использования твердых коммунальных отходов».

Степень разработанности темы исследования. Вопросы энергетического использования отходов рассматривались в работах Б.И. Левина, А.Н. Тугова, М.Н. Бернадинера, А.П. Шурыгина, D.A. Tillman, N.B. Klinghoffer, M.J. Castaldi и др. Изучению вопросов CFD-моделирования горения твердого топлива и сжигания отходов посвящены работы В.К. Любова, M. Costa, M.A. Gómez, R. Mehrabian, C. Yin, Y.B. Yang, J. Porteiro, H. Zhou, E. Girgis, J. Collazo, S.K. Kær, N.T.M. Duffy, J.Silva, J.Teixeira и др. Вопросам анализа и снижения выбросов при сжигании ТКО посвящены работы A. Roffman, J.D. Kilgroe, U.Arena, P.M. Lemieux, Y. Menard, H. Zhou, L.A.Ruth, L. Lombardi и др. Несмотря на решение комплекса задач в этой области, остается ряд вопросов, связанных со сжиганием коммунальных отходов в установках малой мощности, что определяет актуальность данной работы и необходимость дальнейших исследований.

Цель работы: повышение эффективности горения, обеспечение полного сгорания горючих веществ в газовой фазе и снижение объема вредных выбросов при сжигании неоднородного твердого топлива в топках печей и котлов малой мощности за счет организации рациональной структуры газового потока в топке и дожига несгоревших соединений и загрязняющих веществ после нее.

Достижение цели осуществляется путем решения следующих задач:

- проведение промышленных испытаний сжигания топлива из отходов в твердотопливном котле для исследования его эффективности и количественных характеристик выбросов;
- разработка численной 3-D модели горения твердого топлива в неподвижном слое в топках печей и котлов малой мощности с процедурой верификацией по результатам промышленных испытаний и вычислительных экспериментов;
- разработка метода расчета времени течения газового потока после завершения горения по данным линий тока для оценки границ области горения и полноты разложения загрязняющих веществ в продуктах горения;
- исследование условий полноты сгорания топлива и численная оценка образования вредных веществ при сжигании ТКО с использованием разработанной модели, определение условий и режимов обеспечения полного сгорания и дожига загрязняющих веществ.

Научная новизна

1. Методами вычислительной гидродинамики проведены исследования горения твердого топлива в неподвижном слое на колосниковой решетке, отличающиеся тем, что исследовался котел малой мощности (1МВт), на основании полученных результатов установлены закономерности влияния режима сжигания на эффективность горения и образование вредных веществ, это позволило выявить, что на эффективность горения твердого топлива и отходов оказывает влияние только значение коэффициента избытка воздуха и равномерность газового потока в топке. На основании результатов исследования предложен способ осуществления полного сгорания топлива и дожига загрязняющих веществ, заключающийся в обеспечении равномерности скоростей по поперечному сечению потока газа.

2. Для оценки эффективности горения топлива в топке предложены критерии, отличающиеся тем, что включают параметры газового потока на выходе из нее: доля несгоревших горючих веществ топлива, представляющая отношение теплоты

сгорания горючих компонентов, находящихся в газовом потоке, к теплоте, подводимой к топке, и КПД топки, учитывающий потери теплоты в окружающую среду и полноту сгорания топлива, что позволяет применять результаты при проектировании котлов малой мощности, проводить наладку и рационализацию их работы.

3. Разработана методика расчета времени течения газового потока после завершения горения по данным линий тока газовой среды, сгенерированным в результате моделирования твердотопливного котла в ANSYS Fluent, отличающаяся тем, что позволяет оценить границы области горения и полноту разложения загрязняющих веществ в продуктах горения и дает возможность определять условия сжигания с наименьшим содержанием вредных веществ после топки котла.

4. Предложен обобщенный критерий выбросов, включающий сумму массовых выбросов, нормируемых с учетом коэффициентов, определяемых по ПДК соединений, который отличается от имеющихся тем, что масса выбросов отнесена к единице теплоты сгорания топлива, что позволяет сравнивать выбросы топлив различного состава и качества.

Теоретическая значимость

1. В проведенном исследовании рассмотрен подход к численному моделированию процесса горения твердого топлива в неподвижном слое на колосниковой решетке с помощью системы CFD-моделирования ANSYS Fluent. Разработанная модель позволяет с требуемой точностью и приемлемыми временными затратами получить локальные характеристики процесса горения, которые невозможно определить прямыми измерениями, а также производить экологическую оценку сжигания топлив на основе моделирования.

2. Методика определения времени нахождения продуктов горения в расчетной области после завершения горения позволяет выполнять расчеты выбросов с целью их снижения при конструировании и анализе работы котлов, сжигающих твердое топливо или отходы.

Практическая значимость

1. Результаты работы доказывают возможность использования отходов в качестве топлива при использовании предложенных режимов горения.

2. Сравнение величины выбросов при сжигании ТКО различной влажности с выбросами при сжигании других видов твердого топлива различного качества показало, что ТКО не имеет отличий от природных твердых топлив и при низкой влажности по показателям образования загрязняющих веществ даже лучше них.

3. Предложен способ обеспечения эффективности горения и дожига вредных веществ, заключающийся в обеспечении равномерного газового потока после топки без резкого изменения направления движения газового потока до поступления газов в конвективную часть котла (газоводяный теплообменник). Результаты работы позволяют оценить необходимые размеры топки и дополнительного газохода, обеспечивающие условия полного сгорания топлива и дожига вредных веществ. Обеспечение необходимых условий позволяет повысить КПД топки с 83,7% до 89,4% и снизить выбросы с 0,325 до 0,304 г/МВт.

4. Установлено, что обеспечить полное сгорание топлива и последующее нахождение продуктов горения при температурах более 850°C более 2 секунд возможно при коэффициенте избытка воздуха (1,4–1,8) и влажности 10-30%.

5. Результаты диссертационной работы внедрены в ООО «ТК «Экотранс», г. Белгород, и могут быть рекомендованы для утилизации отходов в границах полигонов ТКО.

6. Результаты внедрены в учебный процесс кафедры «Энергетика теплотехнологии» при проведении занятий по дисциплине «Математическое и компьютерное моделирование теплотехнологических процессов» для студентов направления 13.04.01 «Теплоэнергетика и теплотехника» и в Университет Тикрита (Республика Ирак).

Методология и методы исследований. Основой исследования являлось использование фундаментальных законов тепломассопереноса, гидрогазодинамики, химического взаимодействия и горения. Для решения поставленных задач использовалось специализированное программное обеспечение ANSYS Fluent (лицензия БГТУ им. В.Г. Шухова Academic Research CFD 1 task, бессрочная). Для измерения необходимых параметров в промышленных испытаниях применялись современные контрольно-измерительные приборы: газоанализатор «Testo 330-1 LL», «MPU Vario Plus» и ГАНК-4; дифманометр Testo 512/2 с трубками Пито Testo 1000 и 350 мм; пирометр Testo-845; ультразвуковой расходомер Panametrics PT878, внесенные в Государственный реестр средств измерений и прошедшие поверку.

Положения, выносимые на защиту:

1. Результаты проведения промышленных испытаний сжигания топлива из отходов в твердотопливном котле.

2. Результаты исследования горения твердого топлива в неподвижном слое на колосниковой решетке в топках печей и котлов малой мощности и установленные закономерности влияния режима сжигания на эффективность горения и образование вредных веществ.

3. Расчетная CFD-модель горения твердого топлива в неподвижном слое.

4. Методика расчета времени течения газового потока после завершения горения.

5. Способ организации рациональной структуры газового потока в топке котла и дожига загрязняющих веществ после нее для повышения эффективности горения, обеспечения полного сгорания горючих веществ в газовой фазе и снижения объема вредных выбросов.

Степень достоверности научных положений подтверждается применением методов численного моделирования с использованием современных программных комплексов; подтверждением статистическими методами адекватности разработанной модели данным промышленных испытаний и результатам расчета выбросов нормативным методикам.

Апробация работы. Основные положения и результаты работы докладывались и получили положительную оценку на следующих конференциях:

1. XXII Бенардосовские чтения: межд. научно-техн. конф., посвященной 75-летию теплоэнергетического факультета ИГЭУ, Иваново, 31 мая – 2 июня 2023 г.

2. Межд. научно-практ. конф. «Наукоемкие технологии и инновации» (XXV научные чтения), посв. 170-летию со дня рождения В.Г. Шухова, Белгород, БГТУ им. В.Г. Шухова, 23 ноября 2023 г.

3. Int. Scientific-Practical Conf. «Agriculture and Food Security: Technology, Innovation, Markets, Human Resources» (FIES 2023), Казань, 23-24 ноября, 2023 г.

4. Прикладные задачи энергетики, электротехники и автоматики: Всерос. научно-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, Воронеж, ВГТУ, 12-13 ноября 2024 г.

5. Энергетические системы (ICES-2024В): X Межд. научно-техн. конф., Белгород, БГТУ им. В.Г. Шухова, 22 ноября 2024 г.

Публикации. По теме диссертационной работы опубликовано 12 работ, в том числе 3 статьи в журналах, входящих в перечень рецензируемых научных изданий, рекомендованных ВАК РФ (кат. К2), 3 публикации в изданиях, индексируемых в базе данных Scopus (Q2 – Белый список, Q3, без квартиля), а так же свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Личный вклад автора состоит в формулировании цели и постановке задач диссертационных исследований, проведении литературного обзора, выборе объектов и методов исследований, разработке теоретических положений работы, проведении численных и натурных экспериментов, анализе и обобщении полученных результатов, подготовке и публикации материалов работы.

Объем и структура диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, библиографического списка литературы и приложений. Материал изложен на 130 страницах машинописного текста, включая 57 таблиц и 67 рисунков, диссертация содержит список использованной литературы из 222 наименований, в т.ч. 203 на иностранных языках, четырех приложений.

Соответствие паспорту научной специальности

Диссертационные исследования соответствуют паспорту специальности 2.4.6. Теоретическая и прикладная теплотехника (технические науки): п. 9. Системы обеспечения теплового режима теплоэнергетических объектов, методы их совершенствования; п. 10. Теоретические основы создания малоотходных тепловых технологических установок, способствующих защите окружающей среды.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и задачи работы и дана ее общая характеристика.

В первой главе проведен анализ существующих способов и средств термической утилизации твердых коммунальных отходов и методов моделирования слоевого горения твердого топлива. Анализ литературных источников показал, что фактическое содержание загрязняющих веществ при сжигании отходов, измеренное для газов, не проходящих очистку, во многих случаях не превышает предельно допустимые, установленные после систем газоочистки, и напрямую зависят от температуры после топки. Проблемой является контроль режимов сжигания для проверки температуры и времени пребывания продуктов сгорания в установке.

Основными факторами образования выбросов в малых установках по сжиганию отходов является тип топлива и метод сжигания. В ряде работ показано, что решение проблем выбросов может быть достигнуто необходимой конструкцией установки для сжигания и организацией требуемого режима ее работы. В повышении эффективности систем переработки отходов в энергию применение нашли системы CFD-моделирования, которые показали свою надежность и эффективность.

Во второй главе рассмотрено построение расчетной модели горения твердого топлива в неподвижном слое в топках печей и котлов малой мощности.

Слой топлива по объему значительно меньше газовой фазы, поэтому для обеспечения приемлемых временных и вычислительных затрат расчетная область содержит только газовую часть, а слой топлива представлен в виде границы, через которую в газовую часть поступают летучие вещества и влага. Границы были представлены следующими областями (Рисунок 1): 1) Air inlet – входное окно для воздуха; 2) Outlet – выходное окно для продуктов горения; 3) Fuel – область, ограничивающее твердое топливо; 4) Wall Surface – стенки топки/котла с граничными условиями третьего рода; 5) Symmetric – сечение, делящее объект на две симметричные части для снижения объема расчетов.

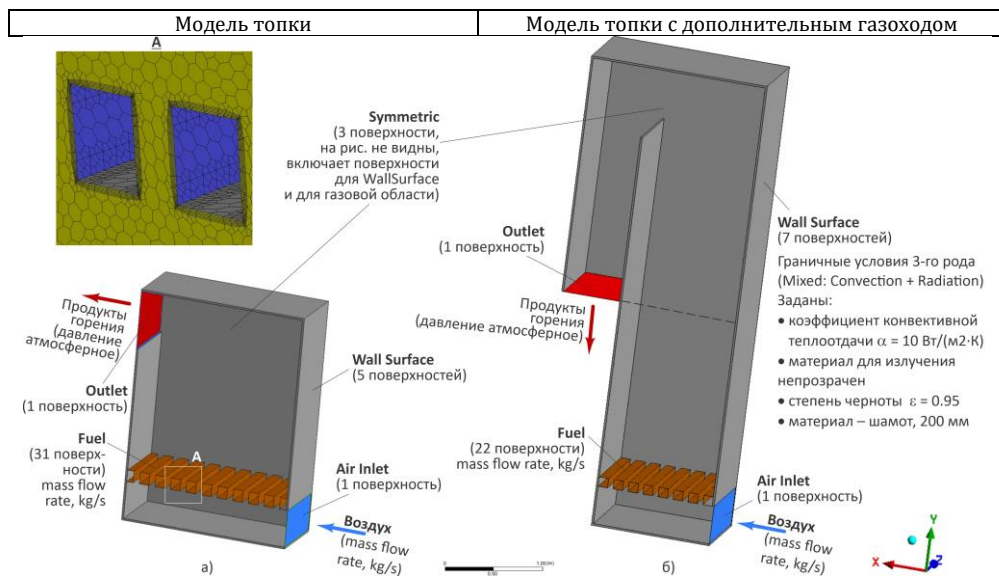


Рисунок 1 – Граничные условия расчетной модели при моделировании топки:
 а) модель топки; б) модель топки с дополнительным газоходом для дожига загрязняющих веществ

В разработанной в ANSYS FLUENT численной модели включены уравнения законов сохранения массы и импульса, модель k - ε турбулентности, излучения (Radiation-DO), образования NO_x (Pollutant), переноса компонентов (Species Transport). Расчет горения производился на основе модели дискретной фазы (Discrete Phase), химический двухступенчатый механизм задавался с использованием окна CoalCalculator. Произведен выбор расчетной сетки, обеспечивающей сеточную устойчивость и сходимости при наименьшем времени расчетов. Был выбран вариант сетки «Multizone + tetrahedron», состоящей из многогранных компонентов, которая для уменьшения размера преобразовывалась в адаптивную структуру из многогранников (Polyhedral). Чтобы обеспечить сходимость в вычислительной модели были скорректированы коэффициенты релаксации. Форма расчетной области топлива выбрана прямоугольная, так как круглая форма из-за особенностей построения сетки не обеспечила сходимость решения.

Для решения задач работы (организовать дожиг загрязняющих веществ после топки) была разработана **методика определения времени нахождения продуктов горения в расчетной области после завершения горения**.

Алгоритм методики:

1. Экспорт из Ansys Fluent набор данных линий тока (Рисунок 2).



Рисунок 2 – Графическое изображение линий тока (StreamLines) и представление результатов расчета – значений переменных в узлах сетки

2. Исключение некорректных данных (линий тока, которые начинались не во входном окне или заканчивались не в выходном).

3. Расчет времени прохождения потока между точками τ_{ki} и общего времени прохождения τ_k .

4. Определение номера точки $p_k CO$, $p_k Vol$, в которой заканчивалось горение (Рисунок 3): $CO_{kiCO} \leq CO_{min}(0,0002)$; $Vol_{kiVol} \leq Vol_{min}(0,0001)$, $k = 1 \dots N_{sl}$.

5. Определение времени прохождения среды по линии тока после завершения горения $\tau_k CO$, $\tau_k vol$.

6. После расчета времени для всех линий тока производилось исключение выпадающих значений $\tau_k CO$, $\tau_k vol$ по критическому критерию Граббса.

7. Поиск линии с минимальным временем: $\tau_{CO min}$, $\tau_{vol min}$.

8. Результаты расчета: а) средние значения параметров в выходном окне; б) точки завершения горения для всех линий тока, изображенные на вертикальном сечении расчетной области (Рисунок 3Б, область «а») и графическое изображение линии с заданным номером (Рисунок 3Б, линия «б», номер «в»); в) графики изменения значений T , CO , Vol , O_2 по линии тока и точка завершения горения (Рисунок 3В); г) гистограммы распределения времени прохождения среды после завершения горения всех линий тока; д) среднее по всем линиям тока и минимальное времени нахождения продуктов горения в расчетной области после завершения горения.

Критерии оценки эффективности горения топлива в топках

КПД котла не в полной мере характеризует горения. Для оценки эффективности горения и величины выбросов предлагается использовать следующие критерии:

1. Доля несгоревших горючих веществ топлива F_{uf} , %, представляющая собой часть топлива, эквивалентное теплоте сгорания горючих соединений, находящихся в продуктах горения. При испытаниях она определяется по величине потерь с недожогом q_3 , %:

$$F_{uf} = q_3 = Q_{нед} h/p \cdot 100\% = 12\,640 CO\ h/p, \quad (1)$$

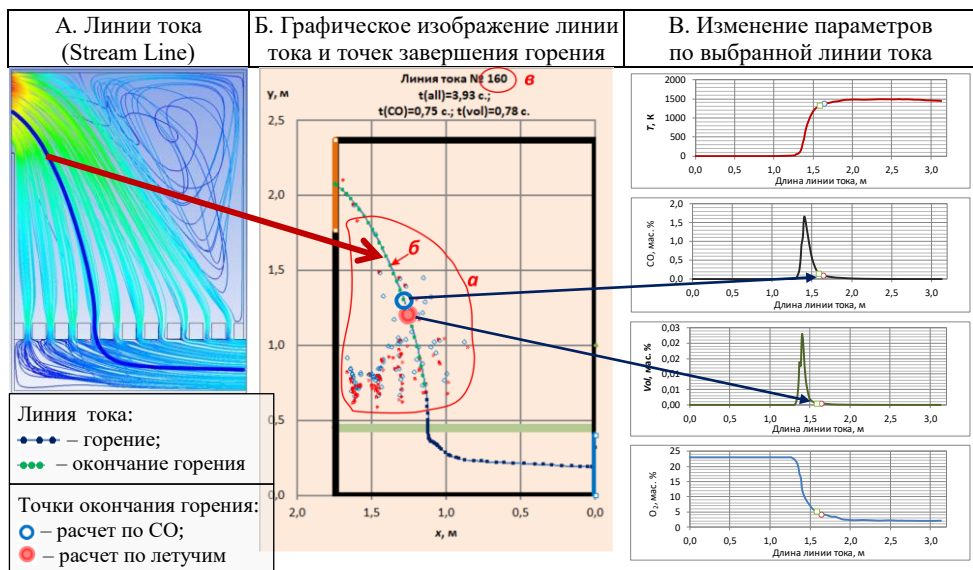


Рисунок 3 – Связь между линиями тока и графическими изображениями результатов расчета

где $Q_{нед}$ – потери от неполноты сгорания топлива, кДж/м^3 ; h – изменение объема сухих продуктов горения по сравнению с теоретическим вследствие разбавления их воздухом, безразмерный коэффициент; p – низшая рабочая теплота сгорания топлива, отнесенная к 1 м^3 сухих продуктов горения, образующихся при сжигании в теоретических условиях (при $\alpha = 1$), кДж/м^3 ; 12 640 – теплота сгорания CO, кДж/м^3 ; CO – содержание оксида углерода в отходящих газах, об. %.

В Ansys Fluent доля несгоревших горючих веществ определяется в виде:

$$F_{uf} = (15,8 d_{CO} + q_{vol} d_{vol}) \cdot g_{пг} / (Q_p g_{гт}) \cdot 100\%, \quad (2)$$

где d_{CO} , d_{vol} – массовая доля CO и летучих в газах («Mass fraction on CO, volatiles»); 15,8 – теплота сгорания CO, МДж/кг; q_{vol} – теплота сгорания летучих, МДж/кг; Q_p – низшая теплота сгорания топлива, МДж/кг; $g_{пг}$ – массовый расход газов, кг/с; $g_{гт}$ – расход топлива, кг/с.

2. КПД топки η_t , %, учитывает полноту сгорания топлива q_3 и потери в топке через стенки печи q_5 (которые при увеличении топки будут возрастать).

При испытаниях котла КПД топки определяется по соотношению теплосодержания газов после топки и теплоте, поступившей в топку, с учетом потерь q_3 от неполноты сгорания топлива (расход топлива $g_{гт}$ определяется при испытаниях по данным измерений и расчета теплового баланса):

$$\eta_t = \frac{Q_{гт}}{Q_{гт} (1 - 0,01 q_3) + Q_{в}} \cdot 100\% - q_3 = \frac{0,1 c_{пг} g_{пг} t_{пг}}{Q_{гт} g_{гт} (1 - 0,01 F_{uf}^t) + c_{вг} g_{вг} t_{вг}} - F_{uf}^t \quad (3)$$

где $Q_{гт}$ – теплота газового потока после топки, МВт; $Q_{в}$ – теплота воздуха, поступающего на горение, МВт; $c_{пг}$ – массовая теплоемкость газов, $\text{кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$; $g_{пг}$ – массовый расход газов, кг/с; $t_{пг}$ – температура в выходном окне топки, $^{\circ}\text{C}$.

В Ansys Fluent КПД топки определяется по исходным данным (задаваемым массовому расходу топлива g_T) и результатам моделирования (средним значениям параметров в выходном окне):

$$\eta_T = \frac{0,001 \cdot c_{\text{гг}} \cdot t_{\text{гг}} \cdot g_{\text{гг}}}{Q_{\text{г}}^{\text{p}} (1 - 0,01 F_{\text{гг}}^{\text{m}}) g_T} \cdot 100\% - F_{\text{гг}}^{\text{m}}, \quad (4)$$

где $c_{\text{гг}}$ – массовая теплоемкость газов, кДж/(кг·К); $g_{\text{гг}}$ – средний массовый расход газов в выходном окне, кг/с; $t_{\text{гг}}$ – средняя температура в выходном окне топки, °С.

3. Обобщенный критерий выбросов применяется для оценки совокупности выбросов (массы выбросов, приведенной к нормируемому значению) и включает сумму выбросов g_i и коэффициент нормирования k_i :

$$E = \sum g_i k_i = \sum \frac{\text{ПДК}_{\text{NOx}}}{\text{ПДК}_i} g_i, \quad (5)$$

где g_i – концентрация выбросов г/с; k_i – коэффициент нормирования (отношение ПДК NO_x к ПДК вещества, использовались ПДК разовых выбросов в атмосферном воздухе городских и сельских поселений).

Для сравнения различных котлов и топлив предлагается использовать величину выбросов, отнесенную к 1 МВт теплоты сгорания топлива:

$$e = \frac{E}{g_T \cdot Q_{\text{г}}^{\text{p}}}, \text{ г/МВт}. \quad (6)$$

В третьей главе приведены данные промышленных испытаний сжигания RDF-топлива в твердотопливном котле и проведена проверка адекватности разработанной модели.

Испытания проводились с 4 по 11 декабря 2023 г. на полигоне ТКО «Стрелецкий» (г. Белгород, ул. Зареченская, 85). Сжигалась изготовленная на линии производства древесных пеллет партия брикетированного RDF-топлива, высушенного до 10%. Цель испытаний: измерение показаний режимов работы котла и выбросов при разном избытке воздуха (1,4; 1,6; 2,0). Характеристики топлива приняты по среднему составу отходов, определяемому путем отбора проб отходов, вывозимых на полигон ТКО, проводимого АО «Белгородский институт альтернативной энергетики». Элементарный состав рассчитан по среднему составу компонентов ТКО и составил: $\text{C}^{\text{p}} = 34,33\%$; $\text{H}^{\text{p}} = 4,61$; $\text{O}^{\text{p}} = 23,03$; $\text{N}^{\text{p}} = 0,25$; $\text{S}^{\text{p}} = 0,25$; $\text{A}^{\text{p}} = 26,90$; $\text{W}^{\text{p}} = 10,00$.

Измеряемые параметры: а) температура и состав уходящих газов (O_2 , CO) после котла для контроля недожога и расчета коэффициента избытка воздуха; б) скорость отходящих газов для определения объемного расхода; в) содержание выбросов (SO_2 , NO_x , H_2S); г) температура и расход нагреваемой воды для определения теплопроизводительности котла; д) температура газов после топки.

Обработка результатов проводилась по ГОСТ Р 8.736-2011 и включала: расчет среднего и СКО; проверку наличия грубых погрешностей; проверку гипотезы о принадлежности нормальному распределению; расчет доверительных интервалов.

Путем проведения расчетов с различными параметрами были выбраны параметры моделей Ansys Fluent, коэффициенты релаксации, размер и вид сетки.

Средние результаты испытаний приведены в Таблице 1.

Таблица 1 – Результаты испытаний

Режим		Коэффициент избытка воздуха		
		$\alpha = 1,4$	$\alpha = 1,6$	$\alpha = 2,0$
Параметры газового потока на выходе из топки/котла				
Температура, °C		1450 ± 27	1248 ± 28	994 ± 26
O ₂ , об. %		5,50 ± 0,25	7,75 ± 0,28	10,70 ± 0,22
NO _x , ppm		64,1 ± 6,7	137,4 ± 8,7	156,3 ± 9,2
SO ₂ , ppm		531 ± 27	494 ± 26	439 ± 23
CO, ppm		1734 ± 90	1136 ± 60	0*
H ₂ S, ppm		13,0 ± 5,1	12,9 ± 5,0	10,9 ± 5,0
Эффективность горения				
КПД топки η_t (КПД котла)		81,8% (73,6%)	80,3% (72,0%)	79,6% (70,3%)
Доля несгоревших горючих веществ топлива F_{uf}		0,77%	0,55%	0,03%
Критерий выбросов e , г/МВт	все выбросы	0,399	0,453	0,443
	без H ₂ S	0,223	0,256	0,239

* Среднее значение меньше погрешности измерений

Адекватность разработанной модели проводилась путем сравнения:

а) соответствия данных испытаний результатам моделирования;

в) усредненного содержания CO, SO₂, NO_x в выходном окне (outlet) и расчетов выбросов загрязняющих веществ в атмосферу при сжигании различного твердого топлива по нормативным методикам.

Адекватность расчетных данным эксперименту проводилась по критерию Фишера (Таблица 2).

Таблица 2 – Результаты моделирования и проверка адекватности модели

Параметр	Результаты моделирования (среднее значение в выходном окне топки)			Коэффициент детерминации R^2	MAPE (средние относительные отклонения)	Критерий Фишера ($F_{кр} = 9$ при $\alpha=0,1$ и $F_{кр} = 19$ при $\alpha=0,05$)
	$\alpha = 1,4$	$\alpha = 1,6$	$\alpha = 2,0$			
Температура, °C	1457	1267	1006	0,99	1,1%	1,2
O ₂ , об. %	5,37	7,58	10,50	0,99	2,1%	1,5
NO _x , ppm	69,3	132,8	152,2	0,98	4,7%	1,4
SO ₂ , ppm	534,4	505,2	447,6	0,95	1,6%	2,2
CO, ppm	1784	1114	39	0,99	3,0%	1,4

Вторым этапом проверки адекватности модели являлось сравнение величины выбросов, определенных по результатам CFD-моделирования, с результатами расчета по нормативным методикам: «Методика определения выбросов при сжигании топлива в котлах производительностью менее 30 т пара или 20 Гкал»; «Расчет выбросов загрязняющих веществ в атмосферу от установок малой производительности по термической переработке твердых бытовых отходов и промотходов» (данные расчета по этим методикам усреднялись).

Сравнивались выбросы при сжигании твердых коммунальных отходов различной влажности с выбросами при сжигании других видов твердого топлива различного качества (древесина, антрацит, каменный и бурый уголь, торф).

Проверка адекватности результатов моделирования проводилась по критерию Фишера. Сравнение результатов моделирования и расчетов по методикам показало количественное совпадение основных параметров и качественное совпадение соотношения обобщенного критерия выбросов для различных топлив (Рисунок 4).

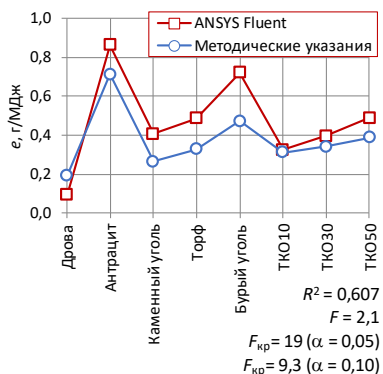


Рисунок 4 – Обобщенный критерий выбросов

Проведенные расчеты показали, допустимое совпадение с результатами измерений на промышленном котле при разных режимах его работы и с расчетами выбросов по нормативным методикам, что позволяет считать разработанную модель адекватной. Полученные результаты показывают возможность производить экологическую оценку сжигания твердых топлив в неподвижном слое на основе моделирования.

В четвертой главе проведено исследование горения твердого топлива в неподвижном слое на колосниковой решетке и установлены общие закономерности влияния режима сжигания на эффективность горения и образование вредных веществ.

Для практически полного разрушения находящихся в продуктах сгорания отходов органических загрязняющих веществ необходимо обеспечить нахождение продуктов сгорания не менее 2 с при температуре не менее 850°C (1100°C для опасных отходов с галогенными органическими соединениями). В качестве топлива использовалось RDF топливо с влажностью 10%.

Первоначально оценивалось влияние различных ключевых параметров на эффективность горения: а) коэффициента избытка воздуха α , от 1,2 до 3 (Таблица 3); б) высоты топки, расположения и размера выходного окна (Рисунок 5, Таблица 4); в) температуры воздуха $t_{air} = 0, 200$ и 400°C, подаваемого на горение (Таблица 5).

Таблица 3 – Показатели эффективности горения и величины выбросов при изменении α

Коэффициент избытка воздуха α	Температура после топки	КПД топки η_t , %	Доля несгоревших горючих веществ топлива F_{uf} , %	e, г/МВт
1,20	1548°C (1821 K)	66,9%	16,71%	0,312
1,30	1496°C (1769K)	75,3%	13,34%	0,316
1,40	1457°C (1730K)	83,7%	8,49%	0,325
1,60	1267°C (1540K)	85,2%	4,28%	0,375
1,80	1097°C (1370K)	85,8%	0,17%	0,408
2,00	1006°C (1279K)	85,9%	0,02%	0,407
2,50	840°C (1113K)	86,1%	0,00%	0,401
3,00	722°C (995K)	86,3%	0,00%	0,361

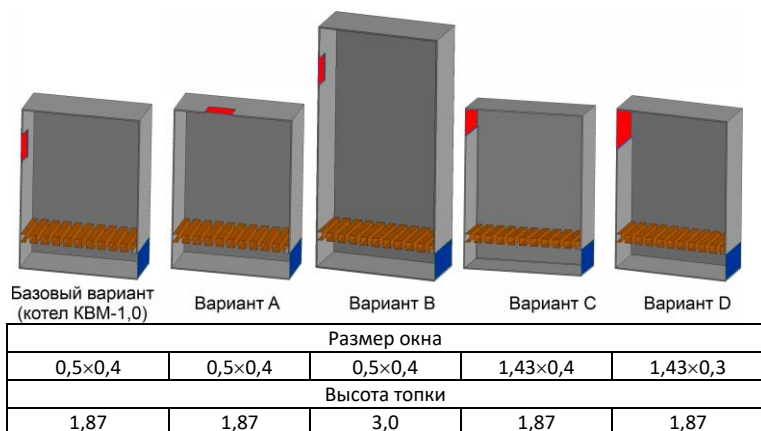


Рисунок 5 – Схемы геометрии топки котла

Установлено, что на эффективность сгорания определяющее влияние оказывает только величина коэффициента избытка воздуха α . Определен диапазон значений коэффициента избытка воздуха, равный $\alpha = 1,8 \dots 2,35$, обеспечивающий полное сгорания топлива (Таблица 3) при температуре газов, выходящих из печи, выше 850°C , но при этом наблюдается наибольшие выбросы NO_x , SO_2 .

Таблица 4 – Показатели эффективности горения и величины выбросов для разной геометрии топки

Наименование	η_t , %	F_{uf} , %	e , г/МВт
Базовый вариант	85,6%	6,90%	0,324
Вариант А	83,8%	7,73%	0,323
Вариант В	82,1%	7,88%	0,325
Вариант С	82,3%	7,65%	0,324
Вариант D	80,6%	6,90%	0,324

Таблица 5 – Показатели эффективности горения и величины выбросов при изменении t_{air}

Наименование	η_t , %	F_{uf} , %	e , г/МВт
Базовый вариант ($t_b = 0^\circ\text{C}$)	80,6%	6,90%	0,324
$t_b = 200^\circ\text{C}$	79,9%	9,02%	0,356
$t_b = 400^\circ\text{C}$	79,0%	8,60%	0,433

Увеличение размеров топки, изменение размеров и положения выходного окна, увеличение температуры воздуха, подаваемого на горение, на эффективность горения не влияют. Но увеличение температуры воздуха позволяет увеличить температуру горения.

Таким образом, имеется противоречие – одновременно достичь низких значений выбросов и полного сгорания топлива, изменяя коэффициент избытка воздуха, невозможно. Поэтому предлагается сжигать отходы с минимально возможным количеством воздуха и обеспечить дожиг несгоревшего топлива и загрязняющих веществ после топки. Предлагаются производить дожиг загрязняющих веществ в газоходе, расположенном между топкой и конвективной частью котла. Рассматриваемые схемы организации горения представлены на Рисунке 6.

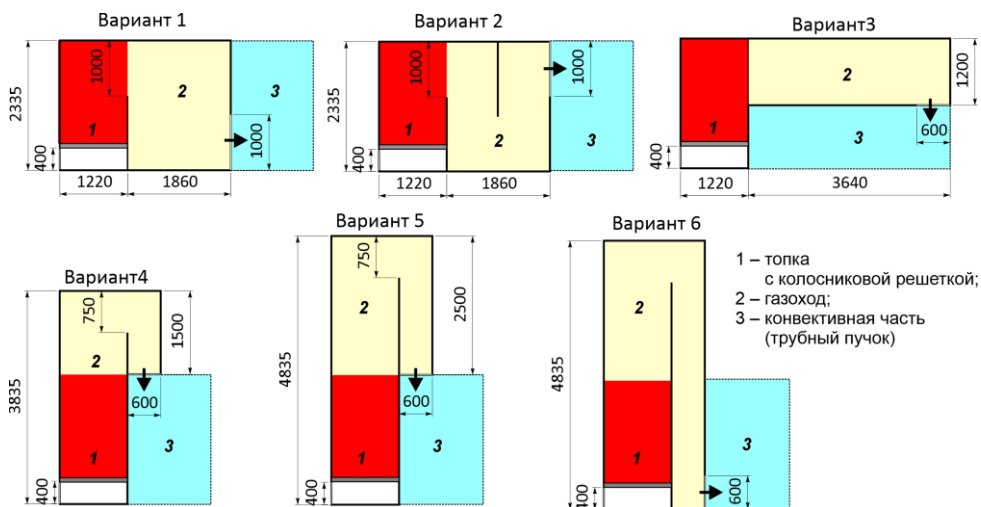


Рисунок 6 – Исследуемые варианты расположения дополнительного газохода

Первоначально рассматривалась схема с дополнительным газоходом, расположенным между топкой и трубным пучком (конвективным блоком) с нижним выходом газов (Рисунок 6, вар. 1). Для увеличения времени пребывания в газоходе он был разделен перегородкой на две части с верхним выходом газов (вар. 2). Дальнейшие исследования проводились для горизонтального газохода (вар. 3), конвективный блок при этом предполагалось располагать под газоходом, что приводит к изменению размеров и необходимости конструкторской разработки нового блока. Рассмотренные варианты характеризовались большим размером конструкции и не обеспечивали необходимые условия дожига, что было связано с неоптимальным неравномерным потоком газов из-за резкого поворота после топки. Поэтому для продолжения исследований был выбран вертикальный газоход над топкой с разной высотой (вар. 4-6). Предполагалось использовать конвективный блок от существующего котла с изменением места входа газов (сверху или снизу).

В Таблице 6 приведены сводные данные рассмотренных вариантов.

Таблица 6 – Сравнение вариантов расчета для разных схем сжигания

Номер варианта	КПД топки η_t , %	Доля несгоревших горючих веществ топлива F_{uf} , %	Критерий выбросов e , г/МВт	Время прохождения после завершения горения, с	
				среднее	минимальное
1	85,6%	0,03%	0,549	1,88	0,65
2	86,3%	0,00%	0,373	2,43	0,69
3	87,1%	0,03%	0,330	2,37	0,55
4	88,3%	0,09%	0,313	1,91	0,58
5	89,4%	0,00%	0,304	3,24	2,12
6	88,9%	0,00%	0,348	3,65	2,16

Дожиг загрязняющих веществ обеспечивали только два последних варианта – 5 (Рисунок 7) и 6. Но в связи с небольшими отличиями в результатах был выбран вариант № 5, который предусматривает организацию над котлом дополнительного газохода высотой 2,5 м с поворотом потока на 180° и опускной частью 2,5 м с отводом газов в трубный пучок. При этом время прохождения от 2 до 2,5 с имеет всего 1% от газового потока (Рисунок 7).

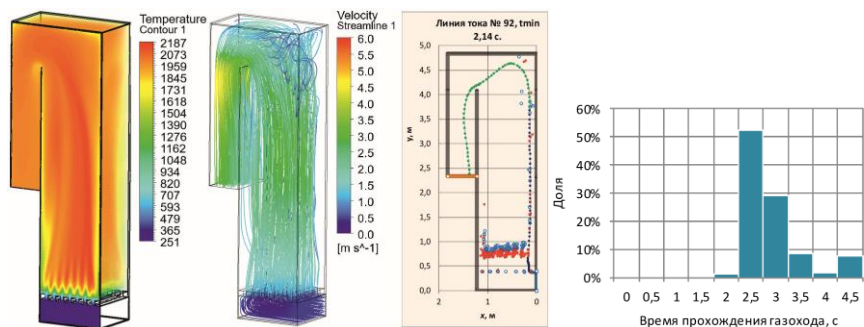


Рисунок 7 – Результаты моделирования выбранной схемы (вариант 5)

В заключение для выбранного варианта с дополнительным газоходом выявления особенностей изменения режима горения и влияния варьирования влажности топлива на характер горения было проведено моделирование в рамках компьютерной CFD-симуляции в Ansys Fluent (Таблица 7).

Таблица 7 – Сравнение вариантов расчета для выбранной схемы (вариант 5)

Коэффициент избытка воздуха α	Влажность, %	КПД топки η_t , %	Доля несгоревших горючих веществ топлива F_{uf} , %	Критерий выбросов e , г/МВт	Время прохождения после завершения горения, с	
					среднее	минимальное
1,4	10	89,4%	0,00%	0,304	3,06	2,11
	30	81,1%	0,00%	0,308	3,48	2,19
	50	74,0%	0,00%	0,318	4,83	1,70
1,4	10	89,4%	0,00%	0,304	3,06	2,11
1,8		81,9%	0,00%	0,393	2,94	2,00
2,2		72,1%	0,00%	0,534	2,84	1,88

При изменении влажности от 10 до 30% и коэффициента избытка воздуха от 1,4 до 1,8 условия дожига загрязняющих веществ (нахождение продуктов сгорания более 2 с. при температурах 850°С) соблюдается. Но при дальнейшем увеличении параметров данное условие уже нарушается.

Таким образом, чтобы обеспечить полное сгорание топлива и последующее нахождение продуктов горения при температурах более 850 более 2 с., необходимо соблюдать режим горения при рекомендуемом значении коэффициента избытка воздуха (1,4–1,8) без превышения этого значения. Так же недопустимо подавать на сжигание материал с высокой влажностью.

ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

1. Рассмотрен подход к применению CFD-моделирования для процесса горения твердого топлива в неподвижном слое на колосниковой решетке с помощью программного комплекса ANSYS Fluent. Модель верифицирована с использованием данных промышленных испытаний сжигания RDF-топлива в твердотопливном котле путем сравнения экспериментальных данных с результатами численного моделирования процесса горения. Расчет выбросов верифицирован сравнением результатов численного моделирования горения шести различных твердых топлив с результатами расчета количества выбросов по двум нормативным методикам. Разработанная модель позволяет получить локальные характеристики процесса горения, которые невозможно определить прямыми измерениями, а также производить экологическую оценку сжигания топлив на основе моделирования.

2. Предложен способ построения расчетной модели для сжигания твердого топлива в неподвижном слое в топках печей и котлов малой мощности. С целью упрощения модели слой топлива в отдельную расчетную область не выделялся и был заменен граничными условиями, а расчетная область содержала только газовую часть. В модели топливо поступает в расчетную область, соответствующую газовой части, через поверхность, ограничивающую твердое топливо. Горение происходит на границе твердой и газовой областях в форме гетерогенной реакции горения твердого углерода и в газовой области в виде газозависимых реакций окисления CO и углеводородов выделившихся летучих веществ.

3. Разработан метод расчета времени течения газового потока после завершения горения по данным линий тока, сгенерированным при моделировании твердотопливного котла в ANSYS Fluent, который позволяет при конструировании и анализе работы котлов, сжигающих твердое топливо или отходы, оценить границы области горения и полноту разложения загрязняющих веществ в продуктах горения.

4. Произведено сравнение величины выбросов при сжигании твердых коммунальных отходов различной влажности с выбросами при сжигании других видов твердого топлива различного качества (древесина, антрацит, каменный и бурый уголь, торф). Для оценки совокупности выбросов предложен обобщенный критерий выбросов, включающий сумму массовых выбросов, нормируемых с учетом коэффициентов, определяемых по ПДК соединений, в котором масса выбросов отнесена к единице теплоты сгорания топлива. Расчет образования загрязняющих веществ показал, что сжигание отходов с влажностью 10-50% в 1,5 раза ниже выбросов торфа, сопоставимы с выбросами при сжигании бурого и каменного угля. Наибольший вклад на суммарную величину образования загрязняющих веществ оказывают NO_x , HF и SO_2 для сернистых топлив.

Исходя из результатов можно заключить, что в качестве топлива ТКО не имеет отличий от природных твердых топлив, и при низкой влажности по показателям образования загрязняющих веществ даже лучше них. Это показывает возможность использования отходов в качестве топлива при условии организации необходимого режима горения.

5. Проведено сравнение эффективности горения при изменении основных параметров: коэффициента избытка воздуха α и температуры воздуха, подаваемого на горение, высоты топочного пространства, расположения и размеров выходного

окна. Установлено, что на эффективность горения влияет только значение α . Определен диапазон значений $\alpha = 1,8 \dots 2,35$, обеспечивающий полное сгорание топлива при температуре газов, выходящих из топки, не ниже 850°C . Но при $\alpha = 1,8 \dots 2,0$ образование оксидов азота максимально, его низкие значения обеспечиваются только при низких α . Таким образом достичь низких значений выбросов и полного сгорания топлива только рационализацией горения в топке невозможно.

6. Предлагается сжигать отходы при низких коэффициентах избытка воздуха ($\alpha = 1,4$) и производить дожиг загрязняющих веществ в дополнительном газоходе, расположенном между топкой и конвективной частью (газоводяным теплообменником). Условиями дожига считается пребывание продуктов горения не менее 2 с. при температуре не ниже 850°C . Рассмотрено шесть вариантов схем организации горения и движения газов. Сделан вывод, что полное сгорание топлива и дожиг загрязняющих веществ возможен только при вертикальном потоке газа, позволяющем избежать резкого изменения направления движения газового потока.

7. В результате моделирования процесса горения при изменении влажности от 10 до 50% и коэффициента избытка воздуха от 1,4 до 2,2 установлено, что для обеспечения полного сгорания топлива и последующего нахождения продуктов горения при температурах более 850°C более 2 с., необходимо соблюдать режим горения при рекомендуемом значении коэффициента избытка воздуха (1,4–1,8) без превышения этого значения. Так же недопустимо подавать на сжигание материал с влажностью более 30%.

8. Результаты работы позволяют оценить необходимые размеры топки и дополнительного газохода, обеспечивающие условия полного сгорания топлива и дожига вредных веществ. Обеспечение необходимых условий позволяет повысить КПД топки с 83,7% до 89,4% и снизить выбросы с 0,325 до 0,304 г/МВт.

Перспективы дальнейших исследований направлены на изучение горения топлива в более мощных котлах, в которых выгорание топлива по длине решетки неравномерно; учет и управление процессом горения регулированием теплоотбора в топке топочными экранами; моделирование образования других загрязняющих веществ, в т.ч. диоксинов и фуранов.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

В журналах, входящих в перечень рецензируемых научных изданий, рекомендованных ВАК РФ по спец. 2.4.6

1. **Ахмед, А.А.** Выбор конструкции газохода для дожига вредных веществ в котлах малой мощности, сжигающих RDF-топливо / А.А. Ахмед, П.А. Трубаев // Энергобезопасность и энергосбережение. – 2025. – № 2. С. 17-26. (K2)

2. **Ахмед, А.А.** Сравнительный анализ образования загрязняющих веществ при сжигании твердых бытовых отходов в неподвижном слое на колосниковой решетке в топке малой мощности / А.А. Ахмед, П.А. Трубаев, Р.С. Рамазанов // Промышленная энергетика. – 2025. – № 2. С. 37-44. (K2)

3. **Ахмед, А.А.** Исследование режимов горения RDF-топлива в котле малой мощности при изменении влажности топлива и коэффициента избытка воздуха / А.А. Ахмед, П.А. Трубаев // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. – 2025 – № 3. – С. 13-21. (K2)

4. **Ahmed, A.A.** Combustion of Granulated Solid Fuels and Wood and Domestic Waste Processing: A Comprehensive Review / A.A. Ahmed, P.A. Trubaev, I.T. Nazzal // International Journal of Energy Production and Management. – 2025. – Vol. 10(2). – P. 207-221. DOI: 10.18280/ijepm.100205 (Q2, Белый список).

5. **Ahmed, A.A.,** Trubaev P.A., Ramazanov R.S. CFD Modelling and Optimization of Solid Waste Combustion in a1 MW Fixed Bed Combustion Chamber / A.A. Ahmed, P.A. Trubaev, R.S. Ramazanov // Journal of Advanced Research in Numerical Heat Transfer. – 2024. – Vol. 23, Issue 1. – P. 66-87. DOI: 10.37934/arnht.23.1.6687 (Q3).

6. **Ahmed, A.A.** Use of granulated wood waste and municipal solid waste as fuel: review / A.A. Ahmed, P.A. Trubaev // BIO Web of Conferences. – 2024. – Vol. 103. – P. 00038. DOI: 10.1051/bioconf/202410300038 (без квортила)

В сборниках трудов конференций и других изданиях

7. **Ахмед, А.А.** Моделирование горения твердого топлива на колосниковой решетке в программном комплексе ANSYS FLUENT / А.А. Ахмед, Р.С., Рамазанов П.А. Трубаев // Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии (XXII Бенардосовские чтения). – Иваново: ИГЭУ, 2023. – С. 259-264.

8. **Ахмед, А.А.** Исследование эффективности сжигания RDF-топлива в неподвижном слое на колосниковой решетке / А.А. Ахмед, Р.С. Рамазанов, П.А. Трубаев // Межд. научно-практ. конф. «Наукоемкие технологии и инновации» (XXV научные чтения). – Белгород: БГТУ им. В.Г. Шухова, 2023. – С. 880-884.

9. **Ахмед, А.А.** Анализ технических решений для повышения эффективности работы водогрейных котлов для сжигания отходов в неподвижном слое и выбор конструкции газохода для разрушения вредных веществ в продуктах сгорания / А.А. Ахмед, П.А. Трубаев, Р.С. Рамазанов // Энергетические системы. – 2023. – № 4. – С. 107-121. DOI: 10.3403 /ES.2023.4.008.

10. **Ахмед, А.А.** Сравнение эффективности сжигания твердых отходов / А.А. Ахмед // Прикладные задачи энергетики, электротехники и автоматики: труды Всерос. научно-техн. конф. ст., асп. и мол. уч. – Воронеж: ВГТУ, 2024. – С. 204-207.

11. **Ахмед, А.А.** Выбор модели горения неподвижного слоя твердого топлива в ANSYS FLUENT / А.А. Ахмед // Энергетические системы. – 2024. – № 2. – С. 19-34. DOI: 10.3403 /ES.2024.2.002.

12. **Ахмед, А.А.** Выбор способа построения расчетной сетки при моделировании горения неподвижного слоя твердого топлива в ANSYS FLUENT / А.А. Ахмед // Энергетические системы. – 2024. – № 3. – С. 7-23. DOI: 10.3403 /ES.2024.3.001.

13. **Ахмед, А.А.** Выбор геометрической модели неподвижного слоя твердого топлива при моделировании горения в ANSYS FLUENT / А.А. Ахмед // Энергетические системы. – 2024. – № 4. – С. 27-40. DOI: 10.3403 /ES.2024.4.003.

14. **Ахмед, А.А.** Оценка эффективности горения твердых коммунальных отходов в топке котла мощностью 1 МВт с колосниковой решеткой / А.А. Ахмед, П.А. Трубаев, // Энергетические системы. – 2025. – № 2. – С. 17-33. DOI: 10.34031/ES.2025.2.01.

Объекты интеллектуальной собственности

15. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ RU 2025612097 «Расчет времени течения газового потока после окончания горения по данным 3D-StreamLine, сгенерированным в ANSYS FLUENT» / **Ахмед А.А.,** Трубаев П.А. Заявка: 2024690608 05.12.2024. Дата регистрации: 27.01.2025.

Подписано в печать 24 октября 2025 г.

Формат 60х84/16. Усл. печ. л. 1. Тираж 100 экз. Заказ №

Отпечатано в БГТУ им. В.Г. Шухова
308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46