

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Белгородский государственный технологический университет
им. В.Г. Шухова» (БГТУ им. В.Г. Шухова)

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

Диссертация

на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Научный руководитель

доктор технических наук, доцент

Трубаев Павел Алексеевич

Белгород 2025

Содержание

Введение.....	6
1 ТЕХНОЛОГИИ И МЕТОДЫ СЖИГАНИЯ ТВЕРДЫХ КОММУНАЛЬНЫХ ОТХОДОВ И МОДЕЛИРОВАНИЯ ГОРЕНИЯ ТВЕРДОГО ТОПЛИВА.....	14
1.1 Особенности организации сжигания твердых коммунальных отходов....	14
1.2 Образование выбросов при сжигании отходов.....	17
1.3 Технические проблемы при сжигании древесных и бытовых отходов	22
1.4 Математическое моделирование процессов горения твердого топлива...	25
1.5 CFD-моделирование горения слоевого твердого топлива в печах и котлах	27
1.6 Математические модели газодинамики, горения и теплообмена, используемые при моделировании в Ansys Fluent	30
1.6.1 Общие принципы численного моделирования в CFD-системах	30
1.6.2 Общий вид дифференциальных уравнений, используемых в Ansys Fluent	31
1.6.3 Уравнения, описывающие движение газовой фазы и горение	33
1.6.4 Моделирование турбулентности в CFD	35
1.6.5 Моделирование химических реакций в CFD	37
1.6.6 Химические реакции горения твердого топлива.....	38
1.7 Выводы по главе.....	41
2 РАЗРАБОТКА РАСЧЕТНОЙ CFD МОДЕЛИ ГОРЕНИЯ ТВЕРДОГО ТОПЛИВА В НЕПОДВИЖНОМ СЛОЕ	43

2.1	Параметры численной модели в ANSYS FLUENT	43
2.1.1	Уравнения, используемые в CFD -модели	43
2.1.2	Учет влажности воздуха, подаваемого на горение	47
2.1.3	Определение расчетной области	49
2.1.4	Используемые расчетные модели	50
2.1.5	Выбор способа построения расчетной сетки	51
2.2	Расчет времени течения газового потока после завершения горения по данным 3D-streamline, сгенерированным в ANSYS Fluent.....	59
2.3	Критерии оценки эффективности горения топлива в топках.....	62
2.4	Выводы по главе.....	66
3	ПРОМЫШЛЕННЫЕ ИСПЫТАНИЯ И ВЕРИФИКАЦИЯ МОДЕЛИ	68
3.1	Проведение промышленных испытаний сжигания RDF-топлива в твердотопливном котле	68
3.2	Расчет выбросов при сжигании различных видов твердых топлив и отходов	73
3.3	Выводы по главе.....	82
4	АНАЛИЗ РЕЖИМА ГОРЕНИЯ В ТОПКАХ КОТЛОВ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЕГО ЭФФЕКТИВНОСТИ И ОБЕСПЕЧЕНИЯ РАЗРУШЕНИЯ ВРЕДНЫХ ОРГАНИЧЕСКИХ ВЕЩЕСТВ.....	83
4.1	Исследование влияние параметров горения в топке на выбросы вредных веществ	83
4.1.1	Исследование горения при изменении коэффициента избытка воздуха	84

4.1.2 Исследование горения при изменении геометрии топки (высоты печи и расположения выходного окна)	88
4.1.1 Исследование горения при изменении температуры воздуха	91
4.1.2 Анализ результатов моделирования горения	94
4.2 Выбор условий для обеспечения полного сгорания топлива и дожига вредных выбросов	97
4.2.1 Условия полного разрушения находящихся в продуктах сгорания отходов органических вредных веществ	97
4.2.1 Рассматриваемые схемы горения	100
4.2.2 Вариант 1. Газоход в виде дополнительной камеры между топкой и теплообменником	102
4.2.3 Вариант 2. Газоход в виде дополнительной камеры между топкой и теплообменником, разделенный перегородкой на две секции	104
4.2.4 Вариант 3. Горизонтальный газоход	106
4.2.5 Вариант 4. Вертикальный газоход над котлом высотой 1,5 м с поворотом газов на 180°	107
4.2.6 Вариант 5. Вертикальный газоход над котлом высотой 2,5 м с поворотом газов на 180°	109
4.2.7 Вариант 6. Вертикальный газоход над котлом высотой 2,5 м с поворотом газов на 180° и удлиненной второй секцией	111
4.2.8 Основные результаты и выводы по подразделу	112

4.3 Исследование режимов горения при изменении влажности топлива и	
коэффициента избытка воздуха.....	114
4.3.1 Изменение влажности топлива.....	114
4.3.2 Изменение коэффициента избытка воздуха.....	117
4.3.3 Основные результаты и выводы по подразделу	119
4.4 Оценка воздействия сжигания отходов на окружающую среду	120
4.4.1 Система очистки дымовых газов	120
4.4.2 Определение приземной концентрации загрязняющих веществ ..	124
4.5 Выводы по главе.....	127
Выводы по работе	128
Библиографический список	131
Приложение 1. Акты внедрения работы	155
Приложение 2. Протокол промышленных испытаний	162
Приложение 3. Статистическая обработка данных испытаний и	
 расчет теплового баланса	169
Приложение 4. Текст программы расчета времени течения	
 газового потока после окончания горения по данным 3D-	
 STREAMLINE, сгенерированным в ANSYS FLUENT	185

ВВЕДЕНИЕ

Работа направлена на область теплотехники и теплоэнергетики – повышение эффективности и снижение выбросов загрязняющих веществ при термической утилизации твердых коммунальных отходов (ТКО) в установках малой мощности. В работе рассматриваются котлы мощностью 1 МВт для теплоснабжения промышленных площадок по переработке отходов, расположенных вблизи полигонов ТКО.

Актуальность темы исследования

В настоящее время в мире ежегодно образуется более двух миллиардов тонн твердых коммунальных (или бытовых) отходов, являющихся продуктами жизнедеятельности человека, в том числе в России – около 560 млн тонн. Даже после отделения путем раздельного сбора или сортировки перерабатываемых частей (вторичного сырья), остаётся около 30% органических отходов и загрязнённых ими перерабатываемых фракций (пластика, текстиля, бумаги). Существуют три возможных способа их утилизации:

- захоронение на полигонах, что экономически малозатратно, но приводит к загрязнению окружающей среды и требует значительных площадей, что в районах крупных городских агломераций уже является проблемой;

- биопереработка, которая связана с большими затратами и предъявляет высокие требования к чистоте органических отходов;

- сжигание (или термическая утилизация), в том числе с получением тепловой и электроэнергии, но вопрос о возможности сжигания ТКО остаётся в обществе крайне дискуссионным.

В настоящее время по данным Евростата (статистической службы Европейского союза) в Европе следующая структура утилизации ТКО:

- 30% – захоронение на полигонах;

- 26% – промышленное сжигание на мусоросжигательных заводах (МСЗ);

- 16% – компостирование (биопереработка);

- 28% – вторичная переработка.

При этом в части стран захоронение ТКО на полигонах превышает 80% (в т.ч. в Турции, Кипре, Греции), наибольшая доля термической утилизации ТКО – 60% (Швеция)

В настоящее время в России термическая утилизация отходов осуществляется в крупных установках мощностью 60...300 МВт (0,7...3,5 млн т ТКО в год). Это связано с высокой стоимостью МСЗ, целесообразно размещать только около средних и крупных городов. В работе рассматривается сжигание ТКО в установках малой мощности с целью обеспечения местного энергоснабжения, расположенных на территории полигонов ТКО, что актуально небольших городов. Процесс горения твердого топлива в небольших котлах плохо формализован и поэтому трудно прогнозируем, особенно в условиях неоднородности топлива.

Одна из главных проблем сжигания ТКО – образование загрязняющих (вредных) веществ. 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 промышленных МСЗ, сжигание отходов в пределах полигонов ТКО, имеет ряд преимуществ:

а) на полигонах ТКО, которые уже являются территориями с неблагоприятными санитарно-экологическими условиями, выделена санитарно-защитная зона, в пределах которой будут распространяться выбросы от установки, и которая после закрытия полигона будет рекультивирована с герметизацией слоя отходов;

б) для мусоросортировочных линиях небольшой производительности проведение сортировка с отбором образующих вредные выбросы фракций (в том числе деталей, содержащих тяжелые металлы), производится более качественно.

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 области энергетического использования ТКО, остается ряд вопросов, связанных с термической утилизацией отходов в установках малой мощности, что определяет необходимость дальнейших исследований. Поэтому исследование является актуальным.

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 дожигания несгоревших соединений и загрязняющих веществ после нее.

Достижение цели осуществляется путем решения следующих задач:

- проведение промышленных испытаний сжигания RDF-топлива в твердо-топливном котле для исследования его эффективности и величины выбросов;
- разработка численной трехмерной модели горения слоя твердого топлива в неподвижном слое в топках печей и котлов малой мощности с верификацией модели по результатам промышленных испытаний и по результатам моделирования выбросов при горении различных твердых топлив;

– 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 твердых коммунальных отходов с использованием разработанной модели, определение условий и режимов для 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 F_{uf} , представляющая отношение теплоты сгорания горючих компонентов, находящихся в газовом потоке, к теплоте, подводимой к топке, и КПД топки η_t , учитывающий потери в окружающую среду и полноту сгорания топлива, которые позволяют проводить оптимальное проектирование котлов малой мощности и проводить наладку и оптимизацию их работы.

3. Разработана методика расчета времени течения газового потока после завершения горения по данным линий тока, сгенерированным в результате моделирования твердотопливного котла в ANSYS Fluent, отличающаяся тем, что поз-

воляет оценить границы области горения и полноту разложения загрязняющих веществ в продуктах горения, что 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 так же 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 твердых коммунальных отходов различной влажности с выбросами при сжигании других видов твердого топлив 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 по-

сле топки без резкого изменения направления движения газового потока до поступления газов в конвективную часть котла (газоводяной теплообменник). Результаты работы позволяют оценить необходимые размеры топки и дополнительного газохода, обеспечивающие условия полного сгорания топлива и дожигания 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 с. 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 RDF-топлива 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 оптимальной 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), посвященная 170-летию со дня рождения В.Г. Шухова, Белгород, 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-2024B): 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), 2 публикации в изданиях, индексируемых в базе данных Scopus (в т.ч. одна Q1), а так же свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Личный вклад автора состоит в выполнении обзора научной литературы, поиске методов исследования и решения сформулированных задач, проведении промышленных испытаний сжигания RDF-топлива в твердотопливном котле (приготовление и исследование образцов осуществлялось на предприятии), статистической обработке полученных экспериментальных результатов, разработке численной трехмерной модели горения слоя твердого топлива в неподвижном слое в топках печей и котлов малой мощности, верификации модели по результатам промышленных испытаний и по результатам моделирования выбросов при горении различных твердых топлив, разработке метода расчета времени течения газового потока после завершения горения и полноты разложения загрязняющих веществ в продуктах горения, исследовании условий полноты сгорания топлива и численной оценке образования вредных веществ, определение условий и режимов для обеспечения полного сгорания и дожига загрязняющих веществ, написание текста диссертации.

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.

1 ТЕХНОЛОГИИ И МЕТОДЫ СЖИГАНИЯ ТВЕРДЫХ КОММУНАЛЬНЫХ ОТХОДОВ И МОДЕЛИРОВАНИЯ ГОРЕНИЯ ТВЕРДОГО ТОПЛИВА

1.1 ОСОБЕННОСТИ ОРГАНИЗАЦИИ СЖИГАНИЯ ТВЕРДЫХ КОММУНАЛЬНЫХ ОТХОДОВ

В настоящее время мировое энергопотребление постоянно возрастает, что определяет необходимость использовать все возможные источники энергии [1, 2]. Другой крайне актуальной проблемой для мировой экономики является утилизация твердых коммунальных (бытовых) отходов (ТКО), которые включают органические отходы, картон, пластиковую упаковку, древесину и другие органические и неорганические фракции [3], часть из которых невозможно использовать для вторичной переработки [4]. Таким образом термическая утилизация твердой биомассы и бытовых отходов может вносить значительный вклад в производство энергии [5, 6] и играть роль в производстве возобновляемой энергии [7], хотя оно одновременно порождает и серьезные экологические проблемы [8], связанные как с загрязнением воздуха, но и проникновению загрязняющих веществ после их осаждения на поверхность земли в поверхностные водные пути, создавая риск для водных экосистем [9, 10].

Известен ряд технологий термической утилизации отходов: пиролиз [11], газификация [12, 13], низкотемпературная термолиз [14] и др., но все они связаны с образованием большого количества смол [15, 16], и поэтому прямое сжигание остается наиболее простым и эффективным способом. Недостатком сжигания биомассы и отходов является образование загрязняющих веществ и выделение вредных газов [17, 18]. Сжигание отходов возможно как в виде RDF-топлива, представляющего собой высушенный и измельченный материал [19], так и в виде прессованных брикетов или пеллет [20].

Сжигание ТКО с получением тепловой и электрической энергии (Waste-to-Energy – WTE) в настоящее время широко распространено в Европе и Северной

Америке [21]. По данным агентства Eurostat в среднем в Европе 29% ТКО утилизируется путем сжигания, причем в отдельных странах (Швейцария, Дания, скандинавские страны), эта величина превышает 50%.

Одним из основных методов использования энергии биотоплива и горючих отходов является сжигание на механических колосниковых решетках разного типа [22], которое характеризуется адаптивностью по сравнению с другими технологиями тепловой конверсии твердого топлива и рассматривается как преобладающий выбор для сжигания биомассы [23]. Основным способом сжигания твердого топлива в котлах малой и средней мощности является сжигание с использованием только первичного воздуха, при котором топливо подается на колосниковую решетку и продувается воздухом, подаваемым снизу.

В Европейских МСЗ 92,5% котлов и печей используют колосниковую решетку, в США эта величина близка к 100% [4]. Мощность единичных агрегатов МСЗ составляет 4-300 МВт, удельное выделение для колосниковой решетки может достигать 4 МВт/м² [22]. Теплотехнические агрегаты с колосниковой решеткой позволяют сжигать топлива разнообразного состава и качества и требуют его минимальной подготовки [24]. Термическое обезвреживание отходов способствует почти полному разрушению органических вредных веществ под воздействием высоких температур, как было показано в нескольких исследованиях [25].

Тепловые котлы с колосниковой решеткой, сжигающие древесных и твердых бытовых отходов используются для выработки электроэнергии, в централизованном теплоснабжении [26, 27, 28], в производстве теплоты для технологии и производства [29].

Отмечается, что при сжигании твердой биомассы в колосниковых котлах образуется меньше загрязняющих веществ, вредных для окружающей среды [30, 31]. Кроме обеспечения энергией в крупных масштабах для удовлетворения потребностей печей и обрабатывающей промышленности, отходы могут обеспечить энергией и бытовых потребителей [32]. Например, в Финляндии более 40% домохозяйств сжигают мусор периодически, в то время как в Эстонии более 30%

делают это периодически и 2% регулярно [33]. Твердые бытовые отходы часто сжигают вместе с древесиной с целью управление отходами, улучшение сгорания или просто минимизация расходов на топливо [34]. Для научных исследований актуально исследование факторов, влияющих на сжигание древесных отходов и бытовых отходов, а также на образование загрязняющих веществ [35].

Внутреннее распределение массы и теплоты в камере сгорания является ключевым фактором успешного процесса сгорания [36]. Для повышения эффективности сгорания очень важно обеспечить полное сгорание топлива, для чего необходимо обеспечить определенное соотношение топлива и воздуха, турбулентность, температуру и время [37] при минимизации выбросов загрязняющих веществ [38]. Повышение эффективности сжигания топлива, полученного из отходов (RDF), часто достигается противоречивыми способами – за счет увеличения количества воздуха или использования кислородного дутья [39].

Эффективность работы котла зависит от коэффициента избытка воздуха, который является важным техническим параметром и требует постоянного мониторинга [40]. Обычно процесс горения, используемый в высокотемпературных технологических котлах и печах, обычно требует небольшого количества избыточного воздуха [41]. Недостаточная подача воздуха приводит к увеличению выбросов монооксида углерода (CO) и снижению энергоэффективности в результате неполного сгорания углерода [42]. Увеличение избытка воздуха приводит к заметному росту выбросов диоксида углерода (CO₂) из-за снижения КПД котла и оксидов азота (NO_x) [43].

Скорость сгорания твердого топлива угля сильно зависит от плотности подачи воздуха [44]. Присутствие водяного пара в среде кислородного топлива приводит к повышению температуры частиц во время горения угольных частиц [45]. Исследование совместного сжигания биомассы и угля в тангенциальном котле с использованием кислородного дутья показало, что это приводит к повышению температуры пламени и снижению выбросов [46].

Исследования повышения эффективности горения проводятся с использованием многочисленных вычислительных инструментов [47]. Например, метод

численного моделирования был использован для исследования распределения температуры и образования NOx в котле при сжигании различного топлива [48]. Известны работы, посвященные созданию отдельных зон взаимодействия были исследованы процессы и системы горения с использованием различных вычислительных методов [49].

Можно заключить, что сжигание биомассы и отходов в котлах с колосниковой решеткой является достаточно разработанной темой научных исследований и имеет большое количество практических применений.

1.2 ОБРАЗОВАНИЕ ВЫБРОСОВ ПРИ СЖИГАНИИ ОТХОДОВ

Сложное взаимодействие многих компонентов определяет отличия сгорания различных видов топлива и отходов и способы контроля и снижения выбросов загрязняющих веществ [50, 51].

На величину и состав выбросов загрязняющих веществ влияют следующие факторы [4, 52]:

- состав и свойства отходов;
- конструкция котла и режим эксплуатации;
- газоочистное оборудование.

На объем выделяемых загрязняющих веществ значительно влияет температура процесса, которая должна быть не менее 1300°C [53].

Наиболее важными характеристики состава, влияющие на содержание выбросов, согласно работе [52], являются: зольность; теплота сгорания; содержание серы, фосфора, азота, металлов; температура плавления; гранулометрический состав. Влажность влияет на температуру горения и теплоту сгорания, так как энергия тратится на испарение воды.

Вредные выбросы при сжигании ТКО разделяются на образующиеся в процессе горения любого топлива, и характерные только для сжигания ТКО. Их можно объединить в следующие группы [52]:

- парниковые газы (CO₂ и продукт недожога CH₄);

- органические соединения, такие как углеводороды, диоксины и фураны, сажа и летучие органические соединения;
- неорганические газы, такие как NO_x , SO_2 и HCl ;
- тяжелые металлы;
- зола и несгоревшие частицы топлива.

Выход парниковых газов – неизбежное последствие сжигания любого вида топлива и для заданного состава изменить парниковые выбросы невозможно.

Образование угарного газа (CO) напрямую связано с режимом сгорания и является показателем его эффективности [54]. В котлах с колосниковой решеткой неполное сгорание проявляется наиболее сильно [4]. В результате образуются продукты неполного сгорания, так же оно может привести к увеличению образования других загрязняющих веществ. Например, неполное твердых частиц биотоплива при большом избытке воздуха, определяющем низкую температуру горения, приводит к высоким выбросам ПХДД/ПХДФ [4]. Так же продукты сгорания отходов содержат летучие углеводороды, которые представляют существенный риск возникновения рака [55, 56], неорганические ионы (хлориды и сульфаты) [57].

Выбросы загрязняющих веществ из-за неполного сгорания в котлах с колосниковыми решетками можно эффективно снижать за счет оптимизации процесса сжигания, включающей необходимого перемешивания слоя топлива, достаточного времени пребывания и обеспечение требуемой температуры путем достижения оптимального коэффициента избытка воздуха [22, 58, 59]

Механизмы образования NO_x изучены достаточно полно [60]. Основным источником образования оксида азота является азот, содержащийся в топливе, а термические оксиды азота при сжигании на колосниковой решетке могут считаться незначительными [61]. При сжигании отходов концентрация NO_x достигает значений, в три раза превышающих установленные нормы [62].

Содержащиеся в горючей массе хлор и сера образуют неорганические соединения (соляную кислоту HCl , хлориды щелочных металлов KCl и NaCl , газообразный оксид серы SO_2 , щелочи, сульфаты щелочноземельных металлов [63]),

которые являются наиболее устойчивыми продуктами сгорания [58]. При охлаждении большая часть этих газообразных выбросов конденсируется на поверхностях котлов и печей, вызывая коррозию оборудования, и на частицах золы и несгоревшего топлива [64]. Так же, как и неполное сгорание, образование HCl влияет на образование ПХДД/ ПХДФ соединений [65]. Образование неорганических соединений хлора и серы зависят от состава и структуры биотоплива и его золы, температуры горения [4, 66], их уменьшение возможно только путем очистки отходящих газов [33].

В работе [67] исследование и уменьшение выбросов проводилось с помощью моделирования в системах вычислительной гидродинамики и было показано, что к уменьшению выбросов приводит гомогенизация биотоплива.

Одними из наиболее опасных веществ являются полихлорированные дибензопарадиоксины (PCDD/ПХДД) и дибензолфураны (PCDF/ПХДФ), называемых так же диоксинами и фуранами, являющихся сильными канцерогенами [52, 68]. Они образуются в небольших количествах из топлива, содержащих хлор, в диапазонах температур до 800°C [69]. Можно выделить два пути их образования: первичное в процессе горения температурах 300-600°C и вторичное на стадии охлаждения продуктов сгорания, содержащих HCl, и несгоревшие частицы топлива, при 250-450°C [58]. Минимизировать выбросы диоксина возможно путем оптимизация условий сгорания [70]. Снижение выбросов этих соединений осуществляется за счет [68]:

- поддержание необходимых режимов горения (температуры, времени);
- обеспечение полного сжигания и выгорания частиц топлива;
- уменьшение уноса;
- поддержание низкого коэффициента избытка воздуха.

В Таблице 1.1 по данным работ [4, 54, 71-74] приведены значения выбросов из мусоросжигающих установок для газов, не подвергавшихся очистке, и произведено сравнение с нормируемыми значениями.

Таблица 1.1 – Результаты измерений количества выбросов после установок сжигания отходов

№	Химические соединения	Массовая концентрация загрязняющих веществ, мг/м ³							
		Нормируемые концентрации загрязняющих соединений после системы очистки газов согласно ИТС НДТ 9-2020 (РФ), директиве ЕС 2000/76 (Европа) [4]		Предельные выбросы при сжигании ТКО до газоочистки согласно Директивы 2010/75/EU [73]	Продукты горения ТКО после выносной камеры сгорания котла [71]	Выбросы из трубы малогабортной установки термической утилизации ТКО «ЭКО-Форсаж» [54]	Неочищенные продукты горения ТКО [72]	Отходящие газы мусоросжигательной печи производительностью 30 т/ч до системы газоочистки [74]	
		Предельные	Достижимые					при сжигании ТКО	при сжигании RDF
	Оксид углерода CO	50	10 ÷ 50	5 ÷ 50	40 ÷ 100	65 ÷ 661	–	254	401
2	Диоксид серы SO ₂	50	5 ÷ 40	–	20 ÷ 200	2,5 ÷ 8,9	100 ÷ 500	41	40
3	Оксиды азота NO _x	200	50 ÷ 150	150 ÷ 500	150 ÷ 500	63 ÷ 237	200 ÷ 400	18	36
4	Хлороводород (газ) HCl	10	2 ÷ 8	500 ÷ 2000	800 ÷ 2000	–	300 ÷ 1000	8,8	16,4
5	Фторводород HF	1	Менее 1	5 ÷ 20	0,5 ÷ 2	–	2 ÷ 10	–	–
6	Полихлорированные дибензопарадиоксины (диоксины, ПХДД, CDD) и дибензофураны (ПХДФ, CDF, фураны)	0,1·10 ⁻³	0,01·10 ⁻³ ÷ 0,08·10 ⁻³	0,5·10 ⁻³ ÷ 10 ⁻²	0,1·10 ⁻³	–	–	–	–
7	Тяжелые металлы свинец Pb, ртуть Hg, кадмий Cd, хром Cr, никель Ni, мышьяк As (в сумме)	0,6	0,02 ÷ 0,34	Менее 53	5 ÷ 0	0,07 ÷ 0,17	–	0,60	0,49
8	Взвешенные частицы (летучая зола, пыль)	10	2 ÷ 5	1000 ÷ 5000	1500 ÷ 7000	40 ÷ 65	–	5,7	3,15

Данные приведенной таблицы показывают, что выбросы при сжигании ТКО во многих случаях удовлетворяют предельным требованиям даже без систем газоочистки.

В работе [74] сделан вывод, что сжигания отходов является эффективным способ их утилизации при недостаточном месте для полигонов, и выбросы не превышают установленные нормативы. В работе [75] указано, что при высоте трубы 80-120 м канцерогенные и не канцерогенные выбросы на несколько порядков ниже величин, установленных Агентством по охране окружающей среды США.

Проблемой является контроль режимов сжигания для проверки температуры и времени пребывания продуктов сгорания в установке [76]. В работе [77] отмечается, что выброс загрязняющих веществ в атмосферу с полигонов ТКО в 10...20 раз превышают выбросы при сжигании аналогичного количества отходов, и многократно возрастают в случае неконтролируемого возгорания в теле полигона ТКО.

Из проведенного обзора можно сделать вывод, что сжигание твердых коммунальных отходов характеризуется объемом выбросов, сопоставимых с нормативами, и в ряде случаев менее их значений. Но следует отметить, что выбросы определяются для газов, выходящих из установок, тогда как предельно-допустимые концентрации выбросов установлены для приземных концентрации и концентраций воздуха рабочих зон, то есть после рассеивания загрязняющих веществ в атмосфере. На величину выбросов наибольшее влияние оказывают температура сгорания и наличие в отходах хлорсодержащих веществ, при этом состав органических отходов на величину выбросы практически не влияет. Таким образом, для смягчения пагубных последствий необходимо совершенствования методов управления отходами, минимизирующих экологические проблемы [10, 78].

1.3 ТЕХНИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ПРИ СЖИГАНИИ ДРЕВЕСНЫХ И БЫТОВЫХ ОТХОДОВ

Термические мусоросжигательные установки широко используются для уменьшения количества отходов и защиты экосистемы [79]. Эффективное сжигание требует понимания основных принципов горения, которое можно условно разделить на четыре основные фазы: подогрев и испарение влаги, выход летучих, горение летучих, выгорание коксового остатка [80, 81]. Эти этапы характеризуются выбросами, основными из которых являются оксида углерода, диоксид углерода и твердые частицы, которые служат индикаторами эффективности сгорания и экологических последствий. На выбросы твердых частиц наибольшее влияние оказывает выгорание коксового остатка, на образование загрязняющих веществ – горение летучих [82, 83]. Различия в выбросах зависят не только от условий сгорания, но и от свойств сжигаемого топлива или отходов, поэтому подготовка топлива и эффективное управление горением играют решающую роль в снижении выбросов [55, 80].

Даже при сжигании древесины, считающейся «чистым» топливом образуется значительное количество загрязняющих веществ, ТКО дополнительно может содержать различные пластмассы и пластик, синтетический текстиль, тяжелые металлы. Горение органических отходов при низких температурах приводит к образованию большого количества полихлорированных ди-бензопарадиоксинов (диоксинов, ПХДД, CDD) и дибензолфуранов (ПХДФ, CDF, фуранов) [55, 84]. Недостаток кислорода, недостаточный забор воздуха и его плохое смешение с топливом, мощное пламя в нижней части котла, могут привести к выбросу продуктов недожога – оксида углерода, кислых газов, органических соединений (ароматических и алифатических) [85]. При сжигании могут образовываться нано частицы с различными свойствами и количествами в зависимости от вида топлива. Но интенсивное сжигание твердых отходов при высоких температурах создает препятствия образованию диоксинов и фуранов в золе и дымовых газах [80].

В настоящее время эксплуатируется небольшое количество систем сжигания отходов небольшой мощности, что затрудняет оценку горения на реальных объектах.

При сгорании на неподвижной колосниковой решетке (Рисунок 1.1) решетчатая система используется для подачи снизу первичного воздуха. Высокотемпературное излучение воспламеняет частицы на поверхности, и фронт пламени распространяется через слой к противоположной стороне. Такой способ технологически затруднителен, так как требует организации конвекции газов и перемешивания твердых частиц. Поэтому для более крупных камер используют подвижную решетку. На Рисунке 1.2 представлено схематичное движение топлива [86].

При сжигании твердых отходов технические проблемы вызывают их разнообразный состав и неоднородность [87]. В частности, зоны обедненного сгорания приводят к неравномерному и неполному сгоранию и образованию загрязняющих веществ [88].

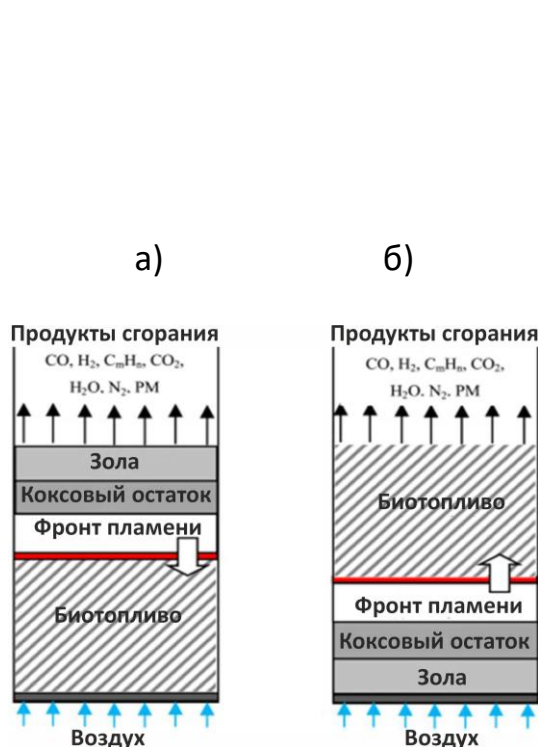


Рисунок 1.1 – Термическое преобразование в двух конструкциях с неподвижным слоем [89]

а) противоточное; б) прямоточное



Рисунок 1.2 – Представление горения на движущейся колосниковой решетке [90]

Необходимость стабилизации горения требует усложнения установок, чем часто пренебрегают, поэтому снижение выбросов при сжигании отходов требует баланса между инновациями и прагматизмом [91]. Но технологических препятствий для их полной и эффективной термической утилизации ТКО в настоящее время нет [92].

По данным ряда патентов на изобретения основные недостатки котлов малой мощности с колосниковой решеткой:

1) низкая температура, что снижает коэффициент теплообмена от газов к теплоносителю, вследствие чего значительно уменьшается КПД котла и увеличиваются загрязняющие выбросы;

2) шлакование (загрязнение) поверхностей котла из-за налипания золы, содержащей смолы;

3) из-за неравномерного расположения топлива и наличия мелких фракций и пыли смешение топлива с воздухом неэффективно, что вызывает неполное сгорание и снижает температуру горения.

Для повышения эффективности горения твердое топливо и ТКО в топках и котлах с колосниковыми решетками, предлагается:

- исключение или уменьшение теплоотбора в топке котла удаления или уменьшения топочных экранов или уменьшения их площади;

- увеличение времени нахождения газов в котлах, что осуществляется увеличением объема топок, устройства дополнительных каналов, установку в топку и или конвективную часть с трубным пучком перегородок;

- дожиг продуктов горения в отдельной хоне или камере после топки, с применением газообразного топлива (природного газа или биогаза);

- использование в топках и котлах вторичного подогретого воздуха, для крупных установок применение технологий многоступенчатого сжигания;

- для обеспечения равномерного горения предварительное брикетирование ТКО и RDF в кусковый продукт одинаковых размеров и свойств.

1.4 МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ГОРЕНИЯ ТВЕРДОГО ТОПЛИВА

Горение твердого топлива включает в себя гетерогенные реакции, тепломассоперенос и химическую кинетику [93, 94, 95]. Анализ и прогнозирование сложных процессов сгорания твердого топлива возможно проводить с использованием математических моделей [96, 97], которые позволяют оценить выбросы загрязняющих веществ и CO_2 , температуру сгорания и тепловую эффективность процессов и установок [98] и является экономически эффективным способом улучшения конструкции тепловых агрегатов и эффективности системы сгорания [99]. В двухфазных системах, таких как сжигание пылевидного угля, доминирующее значение имеет нелинейное взаимодействие газа и частиц [99]. Существенной особенностью моделей горения в слое является учет горения летучих веществ, включающего химические взаимодействия с кислородом в газовой фазе, что оказывает существенное влияние на общую эффективность горения и выбросы [100]. В сочетании с моделированием процессов внутри слоя твердого топлива это обеспечивает учет множества взаимодействий, происходящих при горении [101], что приводит к более надежным прогнозам в фактических условиях эксплуатации [102].

В математическом и компьютерном моделировании горения твердого топлива используются ряд различных подходов [103].

1. Метод конечных элементов (МКЭ, Finite Difference Method, FDM)

Метод заключается в разбиении области, в которой ищется решение, разбивается на конечное количество элементов, дифференциальные уравнений в частных производных заменяются системой алгебраических уравнений, включающих разность значений величин в соседних узлах, и полученная система уравнений решается специализированными методами.

Метод позволяет учесть физику горения, его взаимодействие с другими физическими явлениями, такими как турбулентность, и успешно применяется для численного моделирования установок, связанных с горением [104], в том числе

для процессов смешения, воспламенения и горения в струях горючих смесей [105], решения задач ламинарного и турбулентного пламени с предварительным смешением [106], в том числе с учетом детального химического состава [107]. Кроме того, метод конечных элементов в сочетании с методами подвижной сетки используется для оптимизации распределения узлов сетки и достижения необходимой точности химически взаимодействующих потоков с чрезвычайно тонкими пограничными слоями [108].

2. Метод дискретных элементов (МДЭ Discrete Element Method, DEM)

Метод дискретных элементов (DEM) — это метод, основанный на взаимодействии частицах, который в том числе используется для моделирования процесса сжигания твердых бытовых отходов на решетках [109, 110] и сжигания биомассы [111]. Эта методология позволяет отслеживать отдельные частицы, их взаимодействия с другими частицами, соседними стенками и газовой фазой, существующей между частицами. Кроме того, это позволяет описать метаморфозу частиц, изменение размера и возникновение сил сцепления, связанных с термической обработкой [112]. Моделирование CFD может дать ценное представление о динамике потоков частиц в системах с реактивными частицами и газом, таких как процессы горения, оценивать траекторию горения частицы топлива [113].

3. Моделирование химической кинетики (Chemical Kinetics Modeling)

Химико-кинетическое моделирование необходимо для прогнозирования химических реакций процессов при сгорании биомассы и твердого топлива и учитывает кинетические, термодинамические и термохимические модели [114].

Сгорание твердого топлива состоит из четырех этапов: сушка, удаление летучих веществ, сжигание летучих веществ и окисление кокосового остатка. Для воспроизведения физических и химических процессов горения твердого топлива используются кинетические модели, в которых для упрощения применяются упрощенные стратегии декомпозиции [115, 116], и сложность химико-кинетической системы определяются доступными компьютерными ресурсами [102]. Эти модели часто используют реакции первого порядка для оценки пре-

вращения биомассы или ее основных компонентов в продукты первичного распада. Важным компонентом этих моделей является эмпирическая константа скорости реакции « k », представленная как функция температуры в соответствии с уравнением Аррениуса, что позволяет учитывать температурно-зависимое поведение кинетики реакции [117, 118].

Процесс газификации описывается уравнением термохимического равновесия, в частности конверсии водяного газа, метана, которые сбалансированы. Для учета количества молей каждого химического элемента (C, H, O, N) используются уравнения сохранения [119, 120]. Моделирование так же позволяет прогнозировать выход загрязняющих веществ, в частности, NO_x [121, 122].

1.5 CFD-МОДЕЛИРОВАНИЕ ГОРЕНИЯ СЛОЕВОГО ТВЕРДОГО ТОПЛИВА В ПЕЧАХ И КОТЛАХ

В настоящее время распространенным методом анализа и оптимизации тепловой работы и эффективности работы теплоэнергетических агрегатов является математическое моделирование, особенно в крупных котлах, работающих на пылевидном топливе, где точный тепловой мониторинг необходим для оптимизации эксплуатационной эффективности [123]. Для этого используется ряд математических методов, включая как традиционные методы, основанные на численном моделировании, так и моделирование в CFD-системах [124]. Компьютерные модели (цифровые двойники) котлов, основанные на фундаментальных законах и дополненные экспериментальными данными, учитывающие особенности котлов, позволяют разрабатывать улучшенные модели котлов и улучшать работу существующих агрегатов [125]. Модели используются как для прогнозирования и повышения энергоэффективности, так и для мониторинга состояния элементов котлов для обеспечения долгосрочного обслуживания и надежности [126]. Динамические модели обеспечивают более полное понимание и моделирование работы котла в различных режимах [127].

Исследование эффективности эксплуатации котлов и печей, сжигающих твердое топливо, возможно проводить с использованием математического и компьютерного моделирования, в частности с использованием вычислительной гидродинамики (CFD) [128, 129]. Одной из таких систем является Ansys FLUENT, в который включены специализированные алгоритмы для корректного численного моделирования процесса горения угля и твердого топлива [99].

Имеется ряд примеров исследования процесса горения твердого топлива и термической утилизации ТКО с использованием CFD-моделирования, для определения в результате исследования модели оптимального режима горения [129].

При разработке CFD-моделей горения на колосниковой решетке используются три подхода [130]:

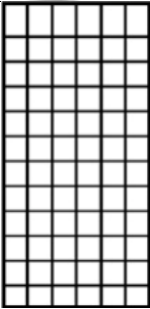
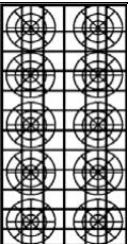
а) модель включает газовую часть, скорости и температуры продуктов сгорания топлива задаются в виде граничных условий;

б) разрабатываются две модели для твердой и газовой областей, первая включает процессы в твердом слое (обычно в виде горения совокупности отдельных частиц топлива), результаты расчета являются граничными условиями модели газовой области;

в) в одну модель входит твердая и газовая области, слой топлива представляется в виде включен в модель в виде одной сплошной среды или совокупности отдельных частиц топлива (дискретной среды), при этом масштаб модели может быть как микро-, так и макро [131, 132, 133] (Таблица 1.2).

Макромасштабные модели для точной корреляции количества частиц топлива со слоем используют граничные условия. В соответствии с критерием Био макромасштабных моделей делят на «термически толстые частицы» (при размере частицы более 35 мм и $Bi \gg 1$), когда разницу температур на фронте реакции достигает 400°C , и испарение влаги, выход летучих веществ и окисление коксового остатка происходит вертикально вверх или вниз по слою пласту, и на «термически тонкие частицы» ($Bi < 2$), когда внутри частичный разницы процессов отсутствует [134, 135].

Таблица 1.2 – Способы описания слоя твердого топлива [130, 133]

Название способа	Расчетная геометрическая сетка	Описание
Отдельная топливная частица (нестационарная модель)		Позволяет детально учесть тепло- и массоперенос, химические реакции внутри частицы. При учете большого числа частиц требует значительных вычислительных мощностей.
Непрерывная пористая среда (стационарная модель)		Слой считается сплошной пористой средой, и эффекты внутри частиц не учитываются, поэтому эту модель легче применить для больших установок с движущимися колосниковыми решетками и стандартных горелок для пеллет. Поскольку при термически тонком моделировании не учитывается взаимодействие подпроцессов, CFD-моделирование и численное моделирование упрощается. Способ требует приемлимых для инженерных расчетов вычислительных мощностей.
Моделирование дискретных частиц		Сочетает модели пористой среды и отдельных топливных частиц, выделенных в виде областей в этой среде.

В работе [129] показано, что адекватные результаты моделирования возможно получить в том числе при ряде упрощений – уменьшения числа узлов расчетной сетки и упрощении геометрии и применение приближений для граничных условий. Вид сжигаемого топлива и его теплофизические свойства заметного влияния на результаты моделирования не оказывают, наиболее значимыми параметрами является теплотворная способность (теплота сгорания) [136], аэродинамический режим топк и условия подачи воздуха [129, 137], влажность топлива, влияющая на теплотворную способность и условия горения [138, 139].

Как правило, для адекватного моделирования необходимо использовать трехмерные модели, что позволит исследовать скорость продвижения границы горения и аэродинамические условия взаимодействия фаз в гетерогенных системах, влияние температуры на газовой фазы аэродинамику и химические реакции [140, 141]..

1.6 МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ГАЗОДИНАМИКИ, ГОРЕНИЯ И ТЕПЛООБМЕНА, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ В ANSYS FLUENT

1.6.1 Общие принципы численного моделирования в CFD-системах

В основе численных моделей используются дифференциальные уравнения Навье–Стокса [142, 143], для их дискретизации (преобразовании в системы уравнений с неизвестными) используются одно, двух и трехмерные сетки [144-146].

В AnsysFluent для дискретизации используется метод конечных объемов (МКО или FVM), который позволяет строить сетки для сложных форм и создавать неструктурированные сетки [145, 147] (Рисунок 1.3).

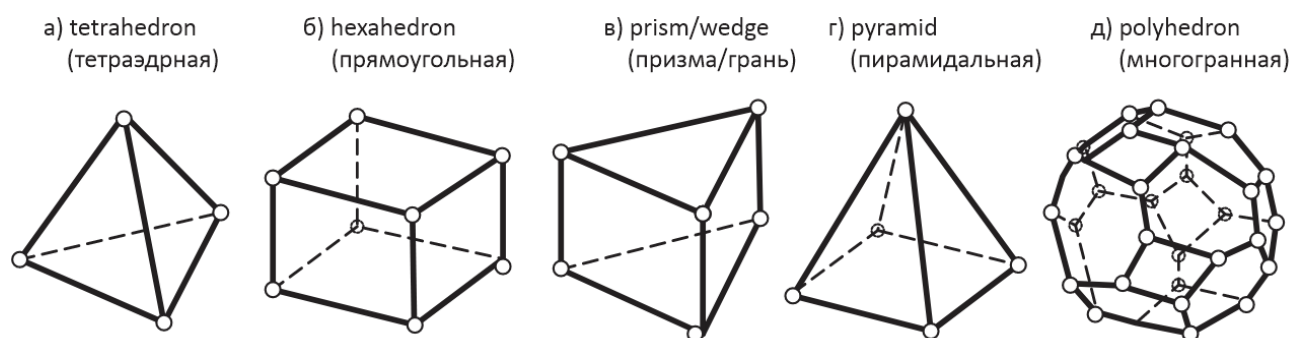


Рисунок 1.3 – Расчетные ячейки, которые возможно создавать в AnsysFluent

Качество сетки определяет сходимость и адекватность получаемых результатов [148-150], но сетки с большим количеством ячеек требуют значительных вычислительных мощностей [151].

Решение задач методом вычислительной гидродинамики можно отнести к экспериментальным исследованиям, то есть как и в физическом эксперименте необходимо разработать модель, позволяющую получать необходимые результаты, и провести проверку ее адекватности [152]. При моделировании горения кроме расчета движения среды крайне важно так же получения адекватного распределения температур, от которых зависят как скорость движения газовой среды, так и скорость химических реакций [153].

1.6.2 Общий вид дифференциальных уравнений, используемых в Ansys Fluent

В Fluent Theory Guide [154] используются следующие нотации трехмерного векторного исчисления [154]:

– дивергенция

$$\text{div}(f) = \nabla f = \left[\frac{\partial f}{\partial x} \frac{\partial f}{\partial y} \frac{\partial f}{\partial z} \right]^T \quad (1.1)$$

– градиент

$$\text{grad}(\vec{F}) = \nabla \cdot \vec{F} = \frac{\partial F_x}{\partial x} \frac{\partial F_y}{\partial y} \frac{\partial F_z}{\partial z} \quad (1.2)$$

– завихрение

$$\text{curl}(\vec{F}) = \nabla \times \vec{F} = \left[\frac{\partial F_z}{\partial y} \frac{\partial F_y}{\partial z} \frac{\partial F_x}{\partial z} \frac{\partial F_z}{\partial x} \frac{\partial F_y}{\partial x} \frac{\partial F_x}{\partial y} \right]^T \quad (1.3)$$

Уравнение сохранения массы имеет вид:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u}) = S_m \quad (1.4)$$

и устанавливает, что объемный источник массы эквивалентен скорости изменения массовой концентрации, а также массовой конвекции из ячейки. Уравнение включает скорость жидкости $\vec{u}$, м/с, член источника массы, S_m , кг/(м³·с), плотность жидкости ρ , кг/м³ и время, t , с. Термин «источник массы» используется для определения изменения массы среды в контрольном объеме, которое является результатом переноса массы между внешними источниками и средой. Уравнение сохранения массы также обычно называют уравнением неразрывности, поскольку оно обеспечивает условие непрерывности жидкости.

Уравнение сохранения импульса

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{u}) + \nabla \cdot (\rho \vec{u}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\vec{\tau}) + \rho \vec{g} + \vec{F} \quad (1.5)$$

показывает скорость изменения концентрации импульса, которая включает конвекцию импульса из ячейки, эквивалентной противодействующей силе концентрации импульса из-за градиента давления, расхождения напряжений, гравитации и объемных сил. Уравнение включает давление p [Па], Па, гравитационное ускорение $\vec{g}$, м/с^2 , массовые силы $\vec{F}$, Н/м^3 , тензор напряжений $\bar{\tau}$, Па. Примерами массовой силы являются сила сопротивления, возникающая в результате взаимодействия с погруженными частицами, и результирующая магнитная сила. Она представляет собой сумму всех объемных сил.

Уравнение сохранения энергии имеет вид

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \nabla \cdot (\vec{u}(\rho E + p)) = \nabla \cdot \left(k_{\text{eff}} \nabla T - \sum_j H_j J_j + (\bar{\tau}_{\text{eff}} \cdot \vec{u}) \right) + S_h \quad (1.6)$$

где E – полная удельная энтальпия, Дж; K_{eff} – коэффициент теплопроводности, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$; T – температура среды, К; удельную энтальпию компонентов H_j , Дж; J_j – удельный диффузионный поток компонентов, $1/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$; $\bar{\tau}_{\text{eff}}$ – эффективный тензор напряжений, Па; S_h – объемный источник мощности, $\text{Вт}/\text{м}^3$. Полная удельная энтальпия имеет вид:

$$E = h - \frac{p}{\rho} + \frac{|\vec{u}|^2}{2} \quad (1.7)$$

где h – удельная энтальпия, Дж/кг.

Для несжимаемых потоков, в которых работа, совершаемая давлением, кинетической энергией и при трении пренебрежимо мала, уравнение энергии принимает следующий вид:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \nabla \cdot (\rho \vec{u} e) = \nabla \cdot \left(k_{\text{eff}} \nabla T - \sum_j H_j \vec{J}_j \right) + S_h \quad (1.8)$$

где e – удельная внутренняя энергия, Дж/кг. Концентрация энергии за счет проводимости, минус концентрация энергии за счет диффузии, плюс объемный источник мощности, эквивалентна скорости изменения концентрации энтальпии и

удельной явной энергии конвекции из ячейки. В этот источник включены тепло реакции и теплота излучения. Для изотермических потоков уравнение сохранения энергии не используется.

1.6.3 Уравнения, описывающие движение газовой фазы и горение

CFD-модель включает семь уравнений импульса и неразрывности. Уравнение неразрывности обеспечивает выполнение закона сохранения, уравнения Навье-Стокса описывают энергию газовой и твердой фаз, и могут включать источники выделения теплоты и массы для горящего топливного слоя.

Предоставлен перечень семи уравнений сохранения, описывающих взаимодействие твердой и газовой фазы.

Уравнение неразрывности

$$\frac{\partial}{\partial t}(\varepsilon \rho_g) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\varepsilon \rho_g u_i) = S_m \quad (1.9)$$

Уравнение сохранения импульса

$$\frac{\partial}{\partial t}(\varepsilon \rho_g u_i) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\varepsilon \rho_g u_i u_j) = -\varepsilon \frac{\partial}{\partial x_i}(\varepsilon \tau_{ij}) + \varepsilon \rho_g g + S_{p,i} \quad (1.10)$$

Уравнение сохранения химических соединений

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\varepsilon Y_k \rho_g) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\varepsilon Y_k \rho_g u_i) \\ = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\varepsilon \rho_g D_{eff,k} \frac{\partial Y_k}{\partial x_i} \right) + S_{m,k} + S_{V,k} + S_{C,k} + S_{g,k} \end{aligned} \quad (1.11)$$

Уравнение сохранения энергии

$$\begin{aligned}
& \frac{\partial}{\partial t} (\varepsilon \rho_g C_{p,g} T_g) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\varepsilon \rho_g u_i C_{p,g} T_g) \\
& = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\varepsilon \lambda_{g,eff} \frac{\partial T_g}{\partial x_i} \right) + S_{Q,ht} + S_{Q,gr} + S_{Q,sr2}
\end{aligned} \tag{1.12}$$

Уравнение сохранения энергии в твердой фазе

$$\frac{\partial}{\partial t} ((1 - \varepsilon) \rho_s C_{p,s} T_s) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left((1 - \varepsilon) \lambda_{s,eff} \frac{\partial T_s}{\partial x_i} \right) - S_{Q,ht} + S_{Q,sr1} - S_{Q,sr2} \tag{1.13}$$

Уравнение сохранения турбулентной энергии

$$\frac{\partial}{\partial t} (\varepsilon \rho_g k) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\varepsilon \rho_g u_i k) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\varepsilon \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + G_k + G_b - \rho_g \varepsilon_d + S_k \tag{1.14}$$

Турбулентное рассеивание

$$\begin{aligned}
& \frac{\partial}{\partial t} (\varepsilon \rho_g \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\varepsilon \rho_g u_i \epsilon) \\
& = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\varepsilon \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} \right) + C_1 \frac{\epsilon}{k} (G_k + C_3 G_b) - C_2 \rho_g \frac{\epsilon^2}{k} + S_\epsilon
\end{aligned} \tag{1.15}$$

$$C_1 = 1.44, C_2 = 1.92, C_3 = 0.09, \sigma_k = 1.0, \sigma_\epsilon = 1.3$$

В работе расчеты в Fluent проводились с использованием метода на основе разделенного давления (pressure-based method) (ANSYS, 2021 R2). Другие скалярные уравнения переноса, такие как энергия и турбулентные свойства, итерируются последовательно после того, как метод на основе разделенного давления решает направленные компоненты уравнения импульса и формулирует поправку давления, которая автоматически удовлетворяет непрерывности. Сходимость уравнений переноса замедляется последовательным (разделенным) решением, что приводит к увеличению числа итераций из-за взаимозависимости уравнений. В методе требования к первичной памяти снижены, и это преимущество было

использовано в полной мере, поскольку при полномасштабном моделировании печи используются миллионы ячеек.

Уменьшение давления при прохождении газового потока через слой топлива происходит из-за снижения уравнения импульса газовой фазы, которое учитывает сопротивление потоку газа. Для определения сопротивления используется уравнение Эргуна [155]:

$$S_{p,i} = -\left(\frac{\mu}{\alpha}u_i + \beta\rho_g|u|u_i\right) \quad (1.16)$$

где u – скорость газа, ρ – плотность газа, μ – вязкость.

Уравнение (1.16) изменено для учета нерегулярных частиц путем изменения обычных корреляций для проницаемости и постоянной Форхгеймера [156]:

$$\alpha = \frac{\varepsilon^3 d_p^2}{180(1 - \varepsilon)^2}, \quad \beta = \frac{4(1 - \varepsilon)}{\varepsilon^3 d_p}, \quad (1.17)$$

которые представляют собой пористость и диаметр частиц. Сопротивление потоку газа через решетку рассчитывается с использованием [157]:

$$S_{p,i} = -\beta_{gt}\rho_g|u|u_i \quad (1.18)$$

Постоянная Форхгеймера для топливного слоя аналогична коэффициенту инерционного сопротивления решетки.

1.6.4 Моделирование турбулентности в CFD

Поток газа в фиксированном слое можно классифицировать как ламинарный или турбулентный [158]. Турбулентный поток характеризуют вихри различных частот и размеров. Моделирование турбулентных потоков в CFD выполняется численным решением уравнений Навье-Стокса, усредненных по критерию Рейнольдса [159]. Это достигается с помощью дополнительных транспортных уравнений, регулирующих турбулентную непрерывность и учитывающих пространственные и временные изменения и естественные флуктуации.

Модели турбулентности, используемые при моделировании сжигания твердого топлива, во многом определяют точность результатов, так как процессы во многом зависят от интенсивности локального горения. Помимо своего несколько нестабильного состава, твердые гранулированные топлива имеют высокую концентрацию горючих элементов, таких как углерод, водород и сера [160].

Различные подходы к моделированию используются в вычислительной гидродинамике для моделирования турбулентности в тепловых котлах, где модели включают прямое численное моделирование (DNS), моделирование больших вихрей (LES) и усредненное по Рейнольдсу моделирование Навье-Стокса (RANS). По мере уменьшения степени приближения требуемая степень точности увеличивается. Некоторые модели LES используют подходы LES-RANS или гибридные подходы LES для обработки больших объемов. Каждый подход имеет свои преимущества и недостатки и выбирается с учетом различных условий. Для адекватного моделирования турбулентности в каждом методе требуются различные размеры сетки.

Стандартная модель турбулентности k - ϵ используется для моделирования турбулентности, при этом эффекты уплотненного слоя учитываются через исходные члены для производства энергии, k , и диссипации с использованием стандартных корреляций для ϵ . Накаяма и Кувахара [161] постулировали турбулентные исходные члены на основе уравнения Эргуна (1.16). Они заметили, что исходные члены могут быть адаптированы к более конкретным сценариям путем корректировки корреляций для ϵ , которые представлены в ур. (1.17) в нашем исследовании. Тем не менее, исходные члены используются без более точных корреляций. Следовательно, принимается:

$$S_k = \frac{1.75(1 - \epsilon)}{\epsilon d_p} |u_g|^3 \quad (1.19)$$

$$S_\epsilon = \frac{4.55c_2(1 - \epsilon)^2}{\epsilon^2 d_p^2} |u_g|^4 \quad (1.20)$$

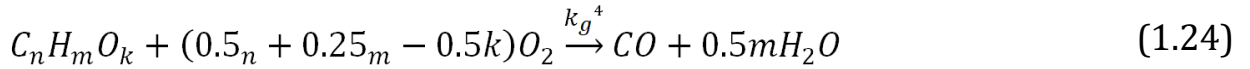
Чтобы понять связь между уравнением Эргуна и моделированием турбулентности, необходимо проанализировать турбулентные исходные члены. Уравнение Эргуна часто используется в конститутивных моделях для описания потока газа или жидкостей в производственных процессах. Для различных режимов потока в модели исходных членов для упакованных матрасов необходимо рассматривать различные уравнения [162]. Важно признать, что турбулентный исходный член, полученный из уравнения Эргуна, может неточно описывать структуры низшего масштаба, которые должны быть адекватно представлены экспериментальными данными. Применение законов масштабирования оправдывает выбор констант турбулентной модели [163].

1.6.5 Моделирование химических реакций в CFD

В Ansys Fluent предусмотрены несколько способов моделирования химических реакций [154]. Для реакций в газовых потоках качественные результаты получаются с использованием модели вихревого рассеяния (EDM) [164], отслеживающая крупные турбулентные вихри потока, ускоряющие смешение горючих веществ с воздухом [165, 166]. Для адекватного моделирования горения необходимо выбрать Эмпирические коэффициенты k уравнения (1.19), и ε уравнения (1.20) [68] устанавливаются в значения, обеспечивающие адекватность результатов [167, 168]. Для горения используется двухстадийный механизм К. Уэстбрука и Ф. Драйера (Westbrook C. K. & Dryer F. L.) [169].

Приблизительная последовательность химических реакций горения следующая:

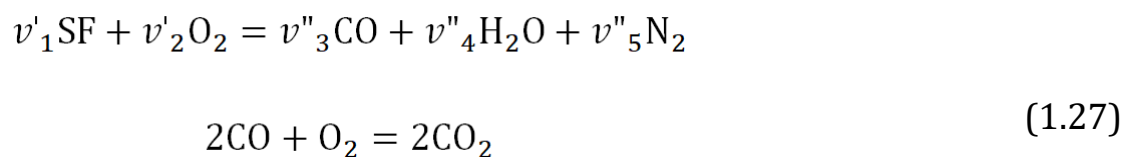




В Ansys Fluent скорость этих реакций определяет источник массы S_g (уравнение (1.11), и источник энергии S_{qgr} (уравнение (1.12) [170]. Коэффициенты K_{g1} , K_{g2} , K_{g3} , K_{g4} , K_{g5a} , K_{g5b} уравнений (1.21-1.26) представлены в работах [115, 166, 171-175].

1.6.6 Химические реакции горения твердого топлива

Реализованные в Ansys Fluent модели горения твердого топлива (рис. 1.13) позволяют их использовать при сжигании биомассы и ТКО [176, 177]. Химические уравнения горения имеют следующий вид:



где v –стехиометрические коэффициенты; SF – горючая масса; O_2 – окислитель (кислород); CO, CO_2, H_2O, N_2 – химические соединения, входящие в продукты сгорания.

Скорость реакций горения ограничена смешением горючих веществ и окислителя, учитываемом уравнениями транспорта, при этом выход летучих веществ уменьшает диффузию реагентов к поверхности топлива [178]. Теплоты твердофазных реакций представлены в работах [115, 182, 183]. Для обеспечения урав-

нения сохранения массы используется подход Тунмана и др. [184], заключающийся в разделении топлива на летучие vol и фиксированный углерод FC (кокосовый остаток):

$$X_{j,fuel} = Y_V X_{j,Vol} + Y_{FC} X_{j,FC} \quad (1.28)$$

Материальный баланс химических соединений:

$$X_{C,fuel} = Y_V \left(\frac{\gamma_{CO}}{M_{CO}} + \frac{\gamma_{CO2}}{M_{CO2}} \right) M_C + Y_{FC} X_{C,FC} \quad (1.29)$$

$$X_{H2,fuel} = Y_V \left(\frac{\gamma_{H2}}{M_{H2}} + \frac{\gamma_{H2O}}{M_{H2O}} \right) M_{H2} + Y_{FC} X_{H2,FC} \quad (1.30)$$

$$X_{O2,fuel} = Y_V \left(\frac{1}{2} \frac{\gamma_{CO}}{M_{CO}} + \frac{\gamma_{CO2}}{M_{CO2}} + \frac{1}{2} \frac{\gamma_{H2O}}{M_{H2O}} \right) M_{O2} + Y_{FC} X_{O2,FC}, \quad (1.31)$$

где Y_{FC} – массовая доля топлива; γ_i – массовая доля летучих:

$$\begin{bmatrix} \gamma_{H2O} \\ \gamma_{H2} \\ \gamma_{CO} \\ \gamma_{CO2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1/M_{CO2} & 1/M_{CO2} \\ 1/M_{H2O} & 1/M_{H2} & 0 & 0 \\ 1/2M_{H2O} & 0 & 1/2M_{CO} & 1/2M_{CO2} \\ \xi_{H2O} & \xi_{H2} & \xi_{CO} & \xi_{CO2} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} X_{C,Vol}/M_C \\ X_{H2,Vol}/M_{H2} \\ X_{O2,Vol}/M_{O2} \\ k \end{bmatrix} \quad (1.32)$$

Соотношение Ω_2 зависит от температуры и является эмпирическим, значения CO/CO_2 и Ω_1 , для большинства твердых топлив равны 3 [185].

Результирующий источник энергии для уравнений газовой фазы [170]:

$$S_{Q,dr2} = \sum_k \left(S_{s,k,prod} \int_{T_{ref}}^{T_s} C_{p,k} dT - S_{s,k,react} \int_{T_{ref}}^{T_g} C_{p,k} dT \right) \quad (1.33)$$

где $S_{s,k}$ – масса соединений; T_{ref} – температура соединений.

Коэффициент теплопередачи, α_{ht} определяется по критериальным уравнениям [186]:

$$\alpha_{ht} = \frac{\lambda_{g,eff} N_u}{d_{p,s}}; \quad N_u = 2 + 1.1 Pr^{1/3} Re^{0.6}; \quad Re = \frac{\rho_g u_g d_p}{\mu_g}; \quad Pr = \frac{c_{p,g} \mu_g}{\lambda_{g,eff}}. \quad (1.34)$$

Аналогично рассчитывается коэффициент межфазного массопереноса $\alpha_{m,k}$ [186]:

$$\alpha_{m,k} = \frac{D_{eff,k} Sh}{d_{p,s}}; \quad Sh = 2 + 1.1 Sc^{1/3} Re^{0.6}; \quad Sc = \frac{\mu_g}{\rho_g D_{eff,k}}. \quad (1.35)$$

Состав твердого топлива в Ansys Fluent задается в специальном диалоговом окне «Coal Calculator» (Рисунок 1.4).

Coal Properties

Proximate Analysis	Ultimate Analysis (DAF)
Volatile 0.491	C 0.544
Fixed Carbon 0.14	H 0.073
Ash 0.269	O 0.365
Moisture 0.1	N 0.014
	S 0.004

Mechanism	Options
☐ One-step Reaction ☒ Two-Step Reaction ☒ Include SO2	☒ Wet Combustion

Settings

Coal Particle Material Name	coal-particle
Coal As-Received HCV [J/kg]	1.5e+07
Volatile Molecular Weight [kg/kmol]	30
CO/CO2 Split in Reaction 1 Products	1
High Temperature Volatile Yield	1
Fraction of N in Char (DAF)	0.7
Coal Dry Density [kg/m³]	1400

Gas Phase Reaction

```

C1.03 H2.79 O0.87 N0.0385 S0.0048 + 0.78 O2 =>
1.03 CO + 1.39 H2O + 0.0192 N2 + 0.0048 SO2
CO + 0.5 O2 => CO2
  
```

Рисунок 1.4 – Определение в Ansys Fluent состава и свойств твердого топлива и параметров моделирования горения
(на примере топлива «ТКО10», используемого в работе при моделировании)

Задаются результаты лабораторного технического анализа (Proximate Analysis) [187]:

$$W \text{ (влажность)} + Vol \text{ (выход летучих)} + A \text{ (зольность)} + \\ + FC \text{ (кокосовый остаток)} = 1, \text{ масс. доли,} \quad (1.36)$$

и элементарный массовый состав на горючую массу (Ultimate Analys, DAF):

$$C + H + O + N + S = 1, \text{ масс. доли} \quad (1.37)$$

Важными характеристиками топлива является влажность W , влияющая на теплоту сгорания и время воспламенения и выход летучих vol , влияющий скорость горения [188]. Летучие вещества участвуют в гомогенных химических реакциях, а коксовый остаток – в гетерогенных [189]. Результаты лабораторного технического анализа (Proximate Analysis) связан следующими соотношениями [190, 191].

$$FC = 1 - W - Vol; \quad Vol = \frac{M_T - M_H}{M_T} - W; \quad (1.38)$$

$$A = \frac{M_P}{M_T}; \quad W = \frac{M_T - M_C}{M_T};$$

где M_T , M_C , M_P – масса влажного, высушенного, прокаленного без доступа воздуха топлива.

1.7 ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ

Анализ литературных источников показал, что фактическое содержание загрязняющих веществ при сжигании отходов, измеренное для газов, не проходящих очистку, во многих случаях не превышают предельно допустимые, установленные после систем газоочистки и напрямую зависят от температуры после топki. Проблемой является контроль режимов сжигания для проверки температуры и времени пребывания продуктов сгорания в установке.

В ряде работ отмечено, что решение проблем выбросов может быть достигнуто необходимой конструкцией установки для сжигания и организацией требуемого режима ее работы и основными факторами образования выбросов в малых установках по сжиганию отходов является тип топлива и метод сжигания.

Для установок термической переработки отходов большой мощности имеется большое количество исследований. Но, несмотря на успешное решение комплекса задач в этой области, остается ряд вопросов, связанных со сжиганием коммунальных отходов в установках малой мощности, что определяет необходимость дальнейших исследований.

Широкое применение в повышении эффективности крупномасштабных систем переработки отходов в энергию, связанные с их сжиганием, нашли системы CFD-моделирования, которые используются не только для прогнозирования работы установок, но и для оптимизации и повышения эксплуатационной эффективности. Результаты показывают надежность и эффективность методов CFD-моделирования в решении проблем, связанных с термической обработкой твердых бытовых отходов.

2 РАЗРАБОТКА РАСЧЕТНОЙ CFD МОДЕЛИ ГОРЕНИЯ ТВЕРДОГО ТОПЛИВА В НЕПОДВИЖНОМ СЛОЕ

2.1 ПАРАМЕТРЫ ЧИСЛЕННОЙ МОДЕЛИ В ANSYS FLUENT

2.1.1 Уравнения, используемые в CFD -модели

Исследуемая CFD-модель включает в себя активацию мультифизики, которая помогает исследуемой модели достичь реальности. Таким образом, поток воздуха и движение пламени регулируются уравнениями импульса и непрерывности, которые можно выразить следующим образом.

Уравнение непрерывности

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \vec{u}) = s_m \quad (2.1)$$

где ρ - плотность, кг/м³; t - время, с; u - скорость, м/с; s_m - источники выделения массы, кг/(м³·с).

Уравнения импульса для трехмерных координат выражаются следующим образом

$$-\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u_x}{\partial z^2} \right) + \rho(s_u)_x = \rho \left(\frac{\partial u_x}{\partial t} + u_x \frac{\partial u_x}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_x}{\partial y} + u_z \frac{\partial u_x}{\partial z} \right) \quad (2.2)$$

$$-\frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 u_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u_y}{\partial z^2} \right) + \rho(s_u)_y = \rho \left(\frac{\partial u_y}{\partial t} + u_x \frac{\partial u_y}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_y}{\partial y} + u_z \frac{\partial u_y}{\partial z} \right) \quad (2.3)$$

$$-\frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 u_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u_z}{\partial z^2} \right) + \rho(s_u)_z = \rho \left(\frac{\partial u_z}{\partial t} + u_x \frac{\partial u_z}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_z}{\partial y} + u_z \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) \quad (2.4)$$

где x, y, z - координаты, м; μ - динамическая вязкость, Па·с; s_u - источник выделения импульса.

Распределение температуры определяется согласно закону сохранения энергии

$$\frac{\partial(\rho e)}{\partial t} + \text{div}(\rho e \vec{u}) = \text{div}(\lambda \text{grad} T - P \vec{u}) + s_e, \quad (2.5)$$

где e - полная удельная энергия, Дж; λ - коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К); s_e - источник выделения теплоты.

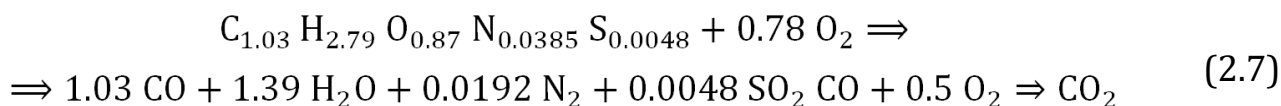
Уравнения переноса были решены с использованием модели переноса веществ, а турбулентное горение в газовой фазе было смоделировано с помощью модели конечной скорости/диссипации вихрей. Сжижение и гомогенная реакция пылевидного угля рассчитываются с помощью двухступенчатых реакций, основанных на свойствах угля.

Оценка среднего химического источника, возникающего в результате реакции, обозначенного как $\overline{\omega_k}$, проводится с использованием модели рассеивания вихрей (EDM). В этой модели предполагается, что реакции происходят мгновенно, и поэтому скорость реакции определяется турбулентным перемешиванием реагентов. Таким образом, модель проводит минимальное значение скоростей, определяемых реагентами или продуктами, чтобы оценить происхождение k -вида как:

$$\overline{\omega_{k,r}} = v'_{kr} W_K A \bar{\rho} \frac{\varepsilon}{k} \min \left(\frac{\widetilde{Y_R}}{v'_{R,r} W_R}, B \frac{\sum_{\bar{P}} \widetilde{Y_P}}{\sum_j v'_{j,r} W_j} \right) \quad (2.6)$$

где v — стехиометрические коэффициенты; W — молекулярные массы, а индексы R и P обозначают реагенты и продукты; $A = 4$ и $B = 0,5$ эмпирические константы.

Окисление летучих веществ характеризовалось двухступенчатой схемой реакции и рассматривается как псевдокомпонент следующим образом (реакция в газовой фазе):



Энергетическая модель была первой моделью, которая активировалась в начале фазы моделирования после инициализации расчета котла. Из-за характеристик таких потоков в качестве основной модели турбулентности использовалась модель K-epsilon. Кроме того, ее эффективность была ограничена при применении к сценариям с большими обратными градиентами давления. Модель со-

стояла из трех различных моделей (стандартная модель k-ε, реализуемая модель k-ε и RNG k-ε).

Реализуемая модель k-ε оказалась более точной, чем стандартная модель k-ε и RNG k-ε, при прогнозировании распределения скорости рассеивания плоских и сферических струй. Кроме того, реализуемая модель k-ε обеспечивает более точное прогнозирование свойств пограничного слоя в потоках с высоким градиентом давления, которые были разделены и рециркулированы.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \nabla \cdot \left(k_{eff} \nabla T - \sum_j h_j \bar{J}_j + (\bar{\tau} eff. \bar{v}) \right) + S_h \quad (2.8)$$

$$E = h - \frac{p}{\rho} + \frac{v^2}{2} \quad (2.9)$$

Моделируемые уравнения переноса для k и ε в реализуемой модели k-ε имеют вид

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k, \quad (2.10)$$

и

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \varepsilon u_j) = \\ & = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma \varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_1 S_\varepsilon - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu \varepsilon}} + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} C_{3\varepsilon} G_b + S_\varepsilon \end{aligned} \quad (2.11)$$

где

$$C_1 = \max \left[0.43 \frac{\eta}{\eta + 5} \right], \quad \eta = S \frac{k}{\varepsilon}, \quad S = \sqrt{2 S_{ij} S_{ij}}, \quad (2.12)$$

G_k представляют собой производство кинетической энергии турбулентности в результате средней скорости; G_b генерировали кинетическую энергию от турбулентности, вызванной плавучестью; Y_M представляли вклад колебательной

дилатации в сжимаемой турбулентности в общую скорость рассеивания. Между тем, C_1 и C_ϵ были константами, σ_k и σ_ϵ турбулентными числами Прандтля для k и ϵ соответственно.

Был выполнен расчет турбулентной вязкости:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (2.13)$$

Постоянная C_μ имела значение 0,09, а переменные k и ϵ представляли турбулентную кинетическую энергию и ее рассеивание соответственно. Эти величины были определены путем решения двух дополнительных уравнений переноса:

$$\nabla(\bar{\rho} \tilde{u} k) = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + \mu_t (\nabla \tilde{u} + \nabla \tilde{u}^T) : (\nabla \tilde{u} + \nabla \tilde{u}^T) - \bar{\rho} \epsilon \quad (2.14)$$

$$\nabla(\bar{\rho} \tilde{u} \epsilon) = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \nabla \epsilon \right] + \bar{C}_{\epsilon 1} \frac{\epsilon}{k} (\nabla \tilde{u} + \nabla \tilde{u}^T) : (\nabla \tilde{u} + \nabla \tilde{u}^T) - \bar{\rho} C_{\epsilon 2} \frac{\epsilon^2}{k} \quad (2.15)$$

где $C_{1\epsilon}=1.44$; $C_{2\epsilon}=1.92$; $C_\mu=0.09$; $\sigma_\epsilon=1.0$; $\sigma_k=1.3$.

В реализуемой модели k-epsilon вязкость турбулентности обозначалась как C_μ , поэтому она не была фиксированной константой, как в стандартной модели k-epsilon. Вместо этого она определялась различными факторами, включая среднюю деформацию и скорость вращения, угловую скорость вращения системы и поля турбулентности, представленные k и epsilon.

Расчет вязкости турбулентности может быть выполнен с помощью следующего уравнения:

$$C_\mu = \frac{1}{A_0 + A_s \frac{KU^*}{\epsilon}} \quad (2.16)$$

При разработке моделей сделаны следующие предположения:

1. Унос твердых частиц с поверхности слоя топлива не учитывается, так как для скоростей газового потока, характерных для котлов с колосниковой решет-

кой, унос, рассчитанный с использованием данных работы [31], начинается для частиц размером менее 45 мкм, которые согласно данным работы [32] будут сгорать за время менее 0,1 с.

2. Гетерогенная реакция горения твердого углерода и газификация происходит в слое топлива, выделившиеся летучие вещества сгорают в газовой фазе в виде газофазных реакций окисления оксида углерода CO и углеводородов.

2.1.2 Учет влажности воздуха, подаваемого на горение

В расчете горения одним из факторов, влияющих на результаты, является влажность воздуха, подаваемого на горение. В Таблице 2.1 представлены результаты расчета горения ТКО с влажностью 10, 30, 50% для абсолютного сухого воздуха и воздуха, насыщенного влагой.

Таблица 2.1 – Расчет горения топлива*

Наименование	ТКО влажностью					
	10%		30%		50%	
Относительная влажность воздуха ϕ , %	100	0	100	0	100	0
Состав топлива, мас. %						
углерод C^p	34,30		26,7		19,1	
кислород O^p	23,00		17,9		12,8	
водород H^p	4,60		3,6		2,5	
азот N^p	0,90		0,7		0,5	
сера S^p	0,30		0,2		0,1	
зольность A^p	26,90		20,9		15	
влажность W^p	10		30		50	
Сумма	100		100		100	
Теплота сгорания, кДж/кг (низшая)	13 640		10 077		6 411	
Теплота сгорания, кДж/кг (высшая)	14 931		11 644		8 231	
Относительная влажность воздуха ϕ , %	100	0	100	0	100	0
Расход воздуха, м ³ /кг						
теоретический	3,56	3,54	3,56	2,76	1,96	1,95
действительный	4,98	4,95	4,98	3,86	2,75	2,73

Окончание Таблицы 2.1

Наименование	ТКО влажностью					
	50%		30%		10%	
Состав продуктов горения, м ³ /кг	5,52	5,49	5,52	4,55	3,58	3,56
CO ₂	0,64	0,64	0,64	0,50	0,36	0,36
SO ₂	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
H ₂ O	0,66	0,63	0,66	0,76	0,89	0,88
N ₂	3,92	3,92	3,92	3,06	2,16	2,16
O ₂	0,30	0,30	0,30	0,23	0,16	0,16
Объем продуктов горения						
м ³ /кг	5,52	5,49	5,52	4,55	3,58	3,56
м ³ /МДж	0,40	0,40	0,40	0,45		
Температура горения, °С						
калориметрическая	1 538	1 546	1 538	1 387	1 132	1 137
теоретическая	1 529	1 537	1 529	1 387	1 132	1 137

* температура воздуха 0°С.

Как видно из результатов, отличие в объеме отходящих газов и температуры горения составляют не более 0,5%.

На Рисунке 2.1 представлены результаты расчета температуры горения при различной влажности и температуре воздуха для ТКО влажности W^p 50, 30 и 10%.

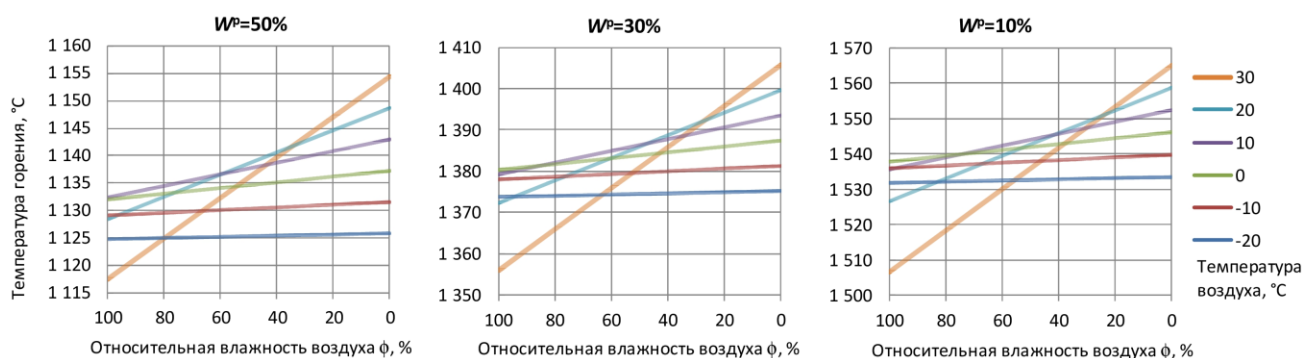


Рисунок 2.1 – Температура горения при различной влажности и температуре воздуха

Наибольшее различие в температуре (до 4%) – для воздуха с температурой 20°С, причем температура становится ниже, чем при подаче воздуха с более низ-

кой температурой. Можно заключить, что в практических условиях сжигания отходов в зимних и осенне/весенних условиях влажность воздуха не будет оказывать влияние на горение, поэтому в расчетах решено ее не учитывать.

2.1.3 Определение расчетной области

При разработке CFD-модели использован следующий подход. Для упрощения модели расчетная область содержит только газовую область топки, а слой топлива представлен граничными условиями (Рисунок 2.2).

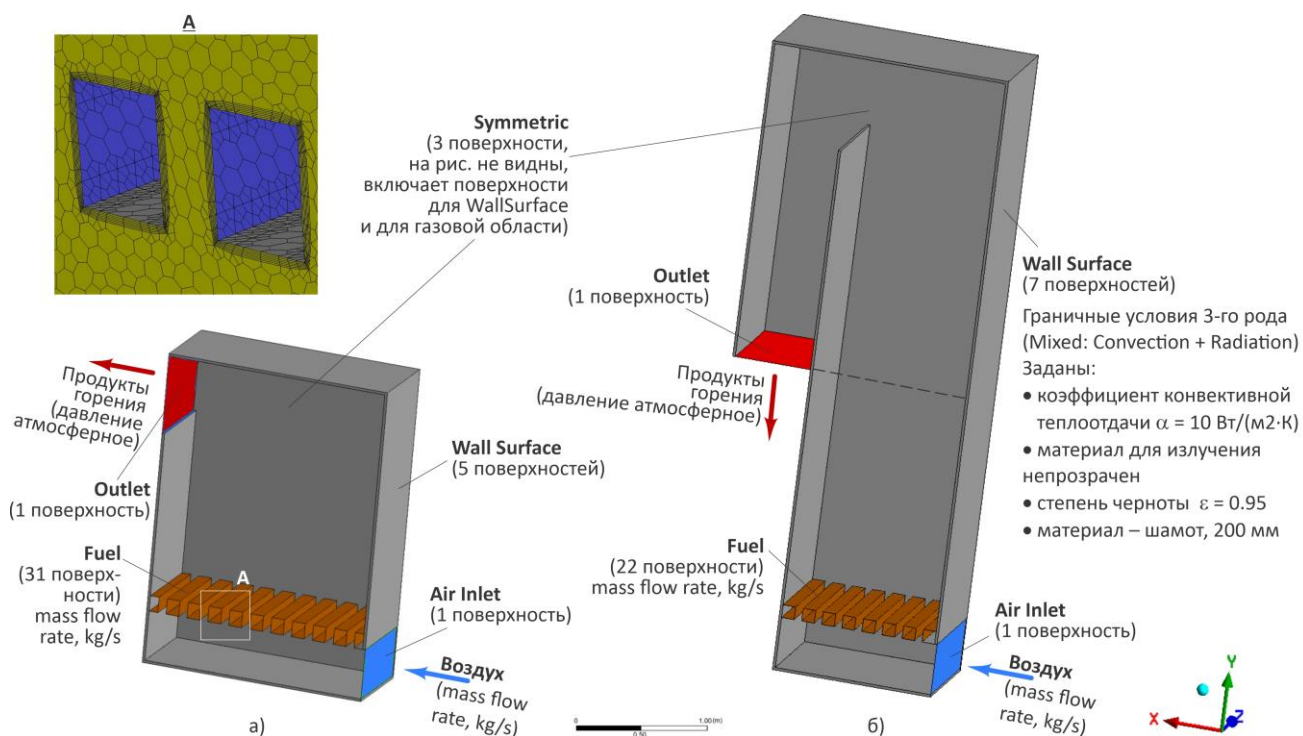


Рисунок 2.2 – Области (границы) расчетной модели:
а) топка котла KB-1,2; б) топка котла KBM-1,0 с дополнительным газоходом

Поверхность «Fuel», заданная в виде областей с промежутками, через который проходит окислитель, ограничивает слой топлива (Рисунок 2.3). Горение состоит из: гетерогенных реакций газификации на поверхности «Fuel», гомогенных реакций окисления летучих веществ в газовой части.

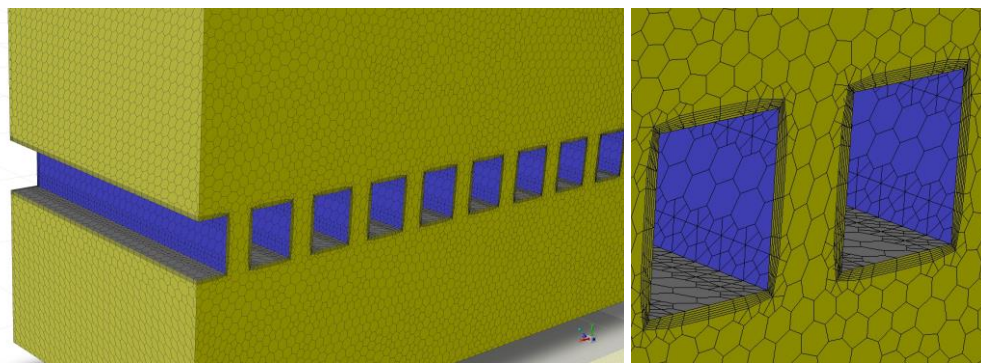


Рисунок 2.3 – Расчетная область с поверхностью «Fuel» – граничными условиями поступления топлива

Были исследованы различные способы задания областей и поверхности «Fuel». Круглая и закругленные формы областей не обеспечили сходимость решения, что связано формой сетки газовой области, прилегающей к поверхности «Fuel». Так же были рассмотрены различные варианты размеров (соотношения размеров участков топливного слоя и промежутков для воздуха, применение топливных участков различных размеров). В результате выбрана прямоугольная форма расчетной области топлива с равномерными участками.

2.1.4 Используемые расчетные модели

Модели физических процессов, включенные в разработанную CFD-модель, представлены на Рисунке 2.4 и в Таблице 2.2.

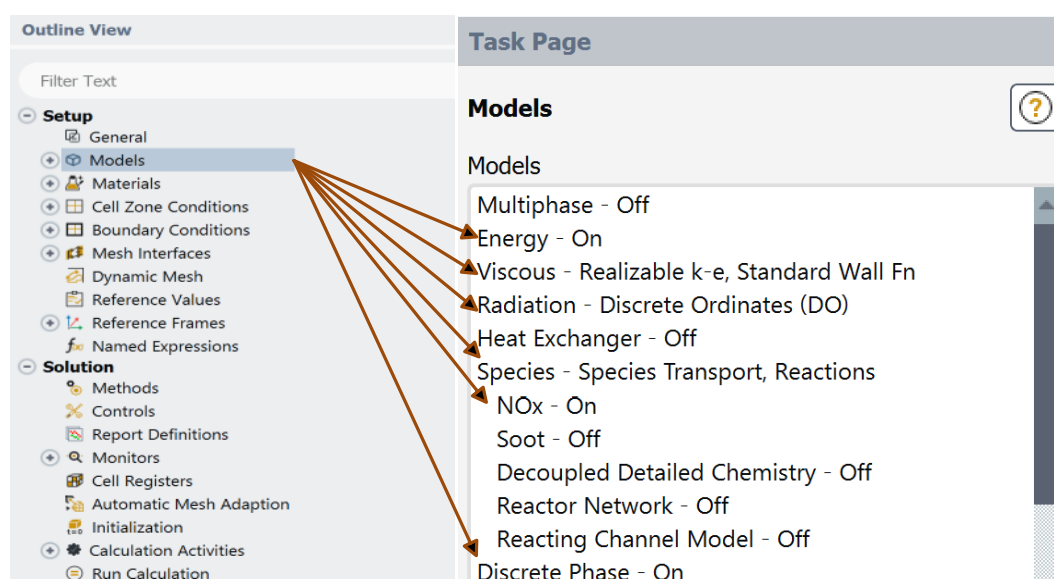


Рисунок 2.4 – Настройки CFD-модели

Таблица 2.2 – Параметры моделей физических процессов

Наименование моделей	Параметр	Значение
1. Тепловой баланс и теплообмен конвекцией и теплопроводностью (Energy)	–	–
2. Теплообмен излучением (Radiation)	Дискретные координаты (Discrete Ordinates)	Солнечная нагрузка = выключена (Solar Load = off)
3. Турбулентное течение (Viscous)	Тип модель (Model)	k-ε
	Тип k-ε модели	Realizable
	Пограничный слой (Near-War Treatment)	Стандартный (Standard Wall Function)
4. Дискретная фаза: газ + иная фаза (Discrete Phase)	–	–
5. Массообмен и химические реакции (Species Transport)	Химические реакции (Reactions)	Объемные (Volumetric)
	Способ расчета химических реакций (Chemistry Solver)	Непрямой (None-Direct Source)
	Реагенты (Mixture Material)	Уголь – Летучие – Воздух (Coal-volatiles-air)
	Взаимодействие турбулентности и химических реакций (Turbulence-Chemistry Interaction)	Скорость химических реакций определяется смешением (EDDY-Dissipation)
6. Образование оксидов азота (NO _x), сероводорода, H ₂ S, сернистого газа SO ₂ (Pollutant)	Типы образования (Pathways)	Топливные, быстрые, термические Thermal NO _x , Prompt NO _x , Fuel NO _x
	Источник топлива (Fuel Streams)	Летучие (Vol)

Используемые материалы и граничные условия представлены на Рисунках 2.5, 2.6.

2.1.5 Выбор способа построения расчетной сетки

Выбор сетки состоял из следующих этапов:

- анализ чувствительности сетки;
- выбор способа построения сетки;
- сравнение результатов расчета при использовании различных типов сеток

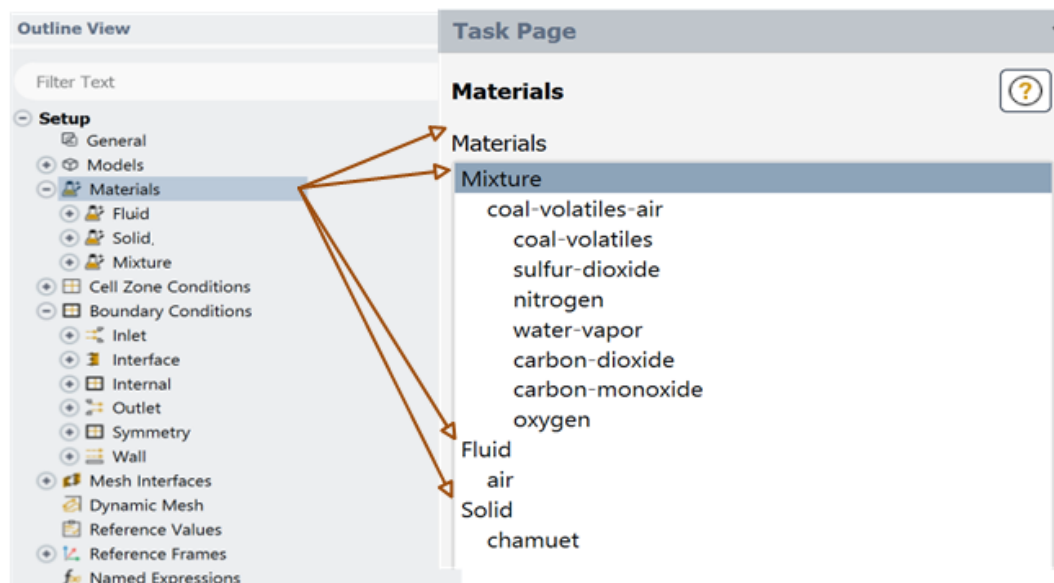


Рисунок 2.5 – Материалы модели

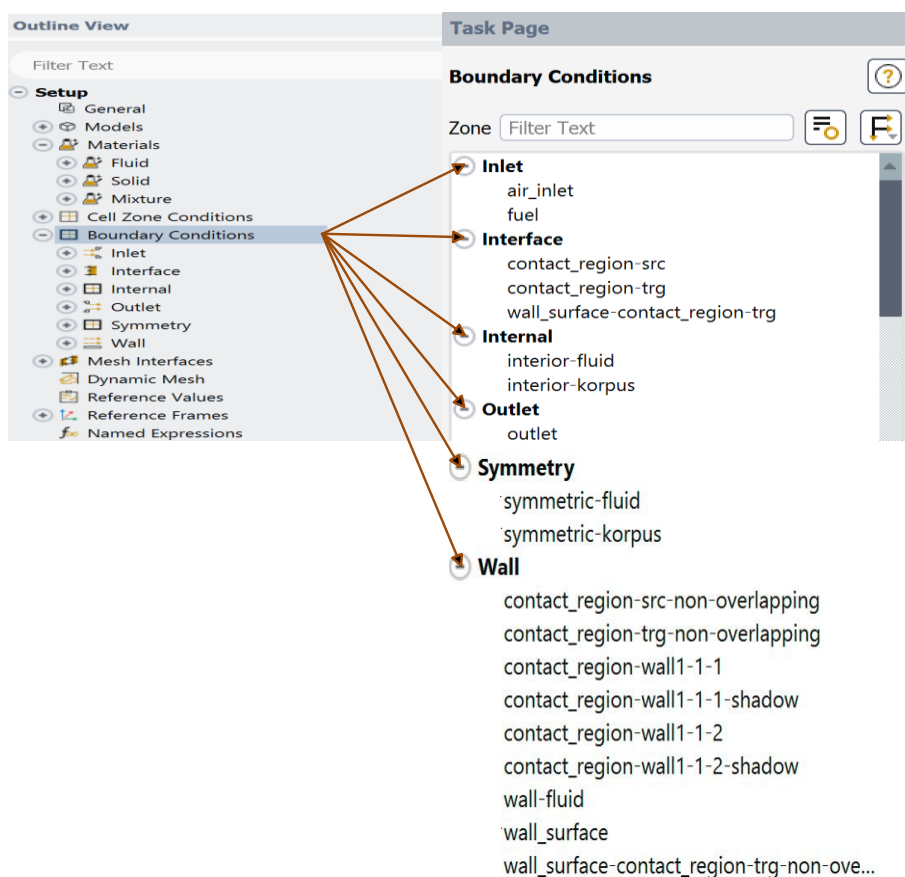


Рисунок 2.6 – Граничные условия модели

В Таблице 2.3 показано результаты расчета для определения оптимального количества ячеек сетки. Критерием адекватности являлось среднее содержание продукта горения – CO_2 в выходном окне топки, который в расчете горения топлива при коэффициенте избытка воздуха 1,6 был равен 11,5. Адекватность расчетов обеспечило число ячеек 1,060,269.

Таблица 2.3 – Размер сетки

№	Число ячеек расчетной сетки	Значение CO_2 в выходном окне
1	765 876	7,65
2	799 800	10,23
3	865 390	10,98
4	976 543	11,10
5	1 060 269	11,51
6	1 100 653	11,50

Рассмотрены три различных способа построения сеток (Рисунок 2.7), особенности которых рассмотрены в работах [192-194].

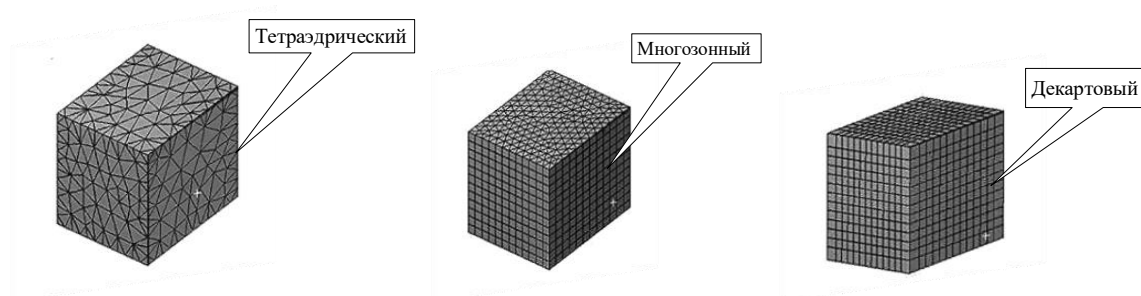


Рисунок 2.7 – Способы построения сеток

Для генерации использован ANSYS Workbench (Рисунок 2.8). Различные конфигурации сетки имеют значительные различия в результатах моделирования (Таблица 2.4). Выбран третий вариант «Многозонная тетраэдрическая (Multizone + Tetrahedron)», которая была преобразована в сетчатую структуру из многогранников (Polyhedral).

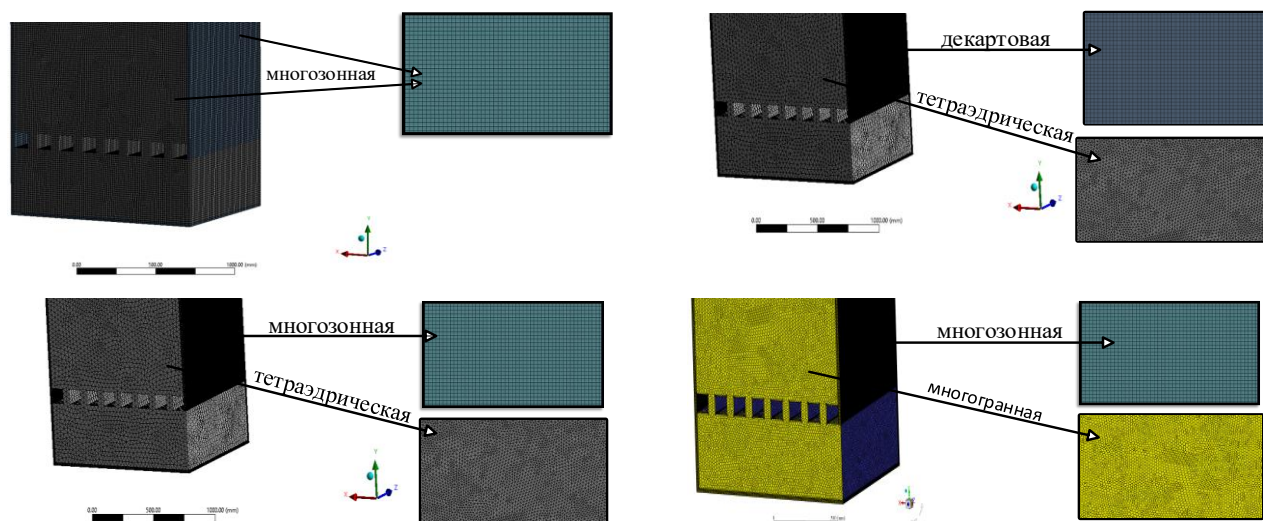


Рисунок 2.8 – Варианты сочетаний сеток для газовой области и границ

Таблица 2.4 – Размеры и качественные показатели расчетных сеток

№	Тип сетки	Размеры		Средние значения		
		Количество узлов	Количество ячеек	Соотношение сторон (Aspect ratio)	Коэффициент асимметрии (Skewness)	Ортогональное качество (Orthogonal Quality)
1	Многозонная (Multizone)	11 840 000	2 822 000	2,49	0,51	1,0
2	Декартова и тетраэдрическая (Cartesian + Tetrahedron)	23 570 000	5 395 000	4,73	0,61	1,0
3	Многозонная тетраэдрическая (Multizone + Tetrahedron)	19 710 000	4 674 000	4,87	0,60	1,0
4	Polyhedral (Multizone + Tetrahedron)	12 630 000	3 702 000	—	—	—

Сравнение результатов расчета при использовании различных типов сеток произведено на двух расчетных моделях (рис. 2.9, 2.10).

1. Вертикальный газоход над топкой высотой 1,5 м с поворотом на 180° (Рисунок 2.9).

Сравнение параметров рассматриваемых сеток приведены в Таблице 2.5, результаты моделирования – в Таблице 2.6 и на рис. 2.11, 2.12.

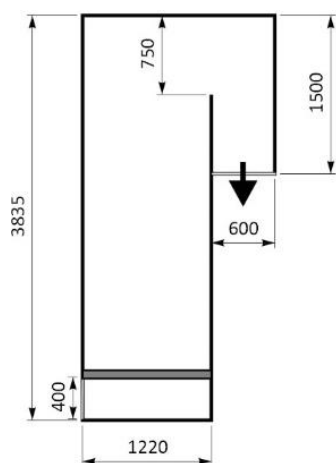


Рисунок 2.9 – Вертикальный газоход над топкой высотой 1,5 м с поворотом на 180°

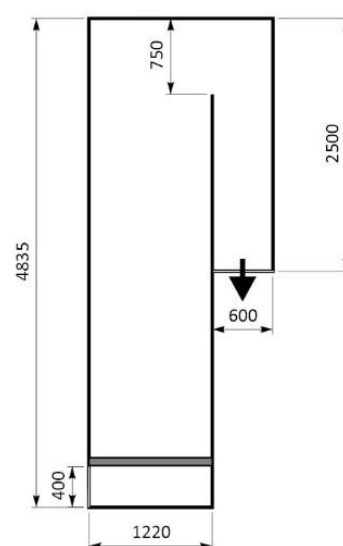


Рисунок 2.10 – Вертикальный газоход над топкой высотой 1,5 м с поворотом на 180°

Таблица 2.5 – Параметры и качественные показатели расчетных сеток

№	Тип сетки	Размеры		Соотношение сторон (Aspect ratio)	Коэффициент асимметрии (Skewness)	Ортогональное качество (Orthogonal Quality)
		Количество ячеек	Количество узлов			
1	Multizone	2 822 000	11 840 000	1,067	0,0243	0,998
2	Tetrahedron + Cartesian	5 171 000	20 020 000	1,323	0,0583	0,942

Таблица 2.6 – Результаты моделирования ($\alpha = 1,6$)

Вид стеки	Multizone	Tetrahedron+ Cartesian
Температура газового потока, К		
максимальная	2 185	2 104
средняя	1 579	1 709
расчетная	1588	1588
Средняя концентрация соединений в выходном сечении, мас. доли		
O ₂	0,0526	0,0385
CO	0,00028	0
CO ₂	0,1663	0,1802
NO	0,0006	0,0003
N ₂	0,6875	0,6805
H ₂ O	0,0922	0,0996
SO ₂	0,0011	0,0012
Летучие	0,0001	0

В первом варианте время расчета было значительно больше (соответственно 25 и 8 часов), но имелась физическая адекватность расчета (Таблица 2.6, Рисунок 2.10), так как средняя температура продуктов горения в выходном сечении (1579 К) была близка к результатам расчета горения топлива с учетом потерь в окружающую среду (1588К), а область завершения горения имелась для всех линий тока (Рисунок 2.11).

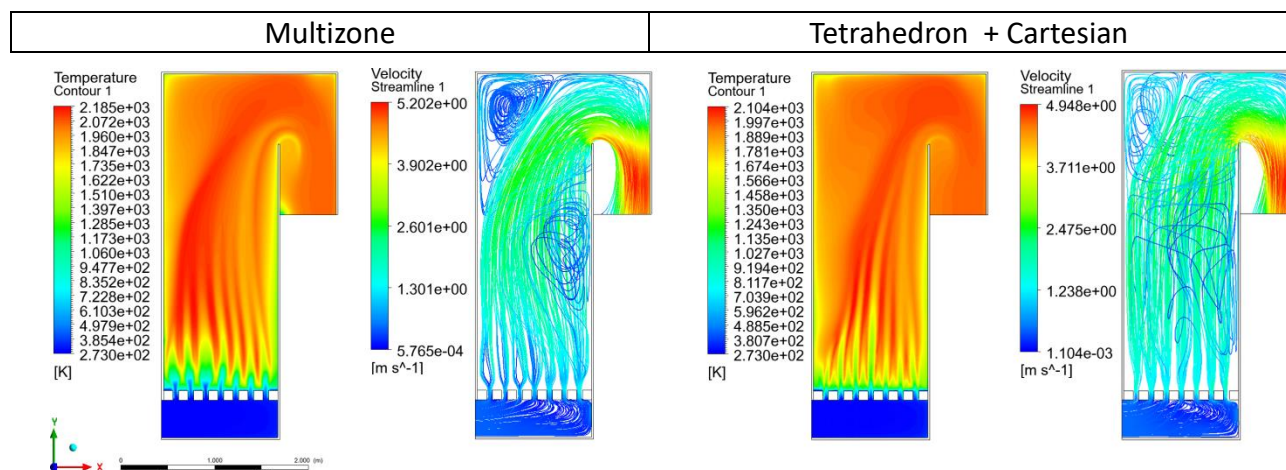


Рисунок 2.11 – Поля температур и скоростей

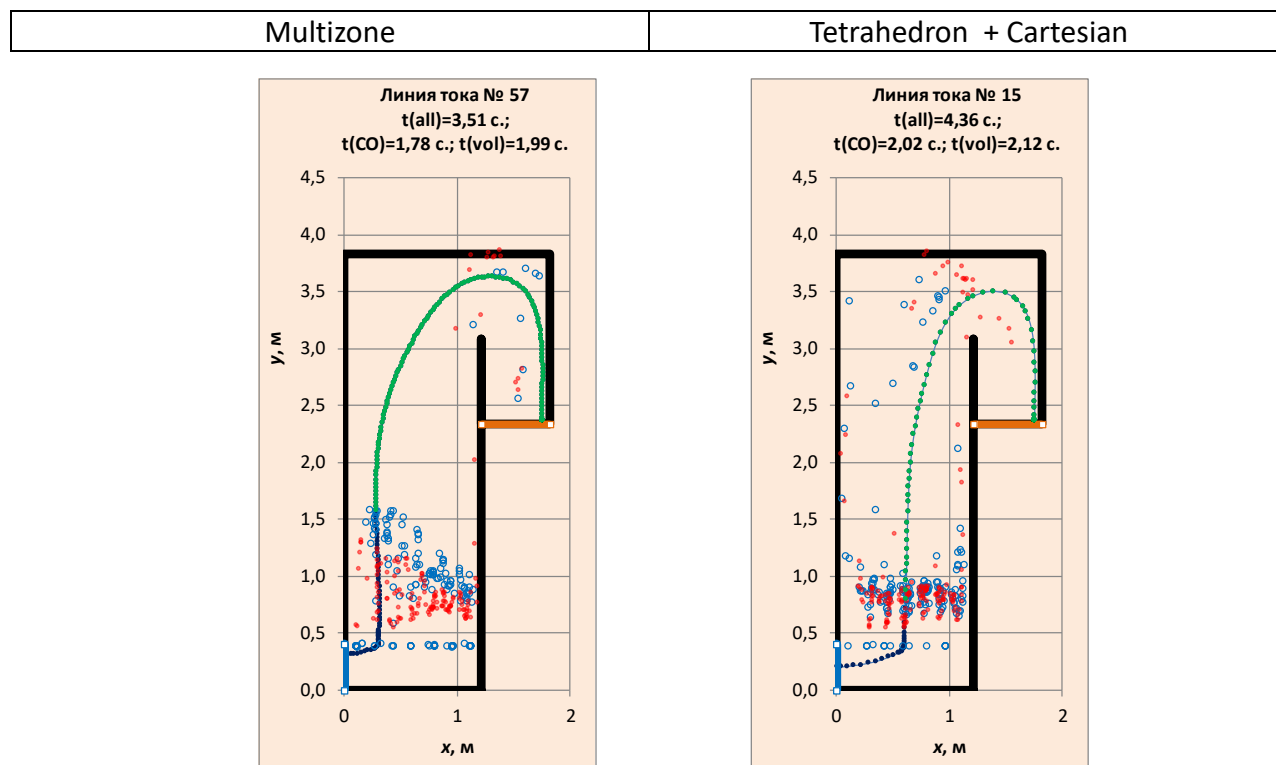


Рисунок 2.11 – Линии тока и область завершения горения
 (o – расчет по концентрации CO; • – расчет по содержанию летучих)

2) Вертикальный газоход высотой 2,5 м над топкой с поворотом на 180° (Рисунок 2.10). Физические параметры рассматриваемых расчетных сеток приведены в Таблице 2.7, результаты моделирования – в Таблице 2.8, на Рисунках 2.13, 2.14.

Таблица 2.7 – Параметры сеток

№	Тип сетки	Количество, млн.		Соотношение сторон (Aspect ratio)	Ортогональное качество (Orthogonal Quality)	Коэффициент асимметрии (Skewness)
		ячеек	узлов			
1	Multizone+ Tetrahedron	4 386 000	17 980 000	1,169	0,0466	0,954
2	Cartesian Tetrahedron	5 395 000	23 580 000	1,213	0,0256	0,975

Таблица 2.8 – Результаты моделирования ($\alpha = 1,4$)

Вид стеки	Multizone	Tetrahedron+ Cartesian
Температура газового потока, К		
максимальная	2 156	2 156
средняя	1 969	1 986
расчетная	1960	1960
Средняя концентрация соединений в выходном сечении, мас. доли		
O ₂	0,0122	0,0122
CO	0	0
CO ₂	0,2047	0,2048
NO	0,0012	0,0013
N ₂	0,6685	0,6685
H ₂ O	0,1132	0,1132
SO ₂	0,00139	0,00139
Летучие	0	0
	2 156	2 156

Расчетные сетки имели одинаковое качество (Таблица 2.7), сопоставимые результаты (Таблица 2.8), время расчетов в обоих случаях составило около 8 часов.

Первый вариант сетки имел меньше элементов и лучшие результаты горения по линиям тока (рис 2.14).

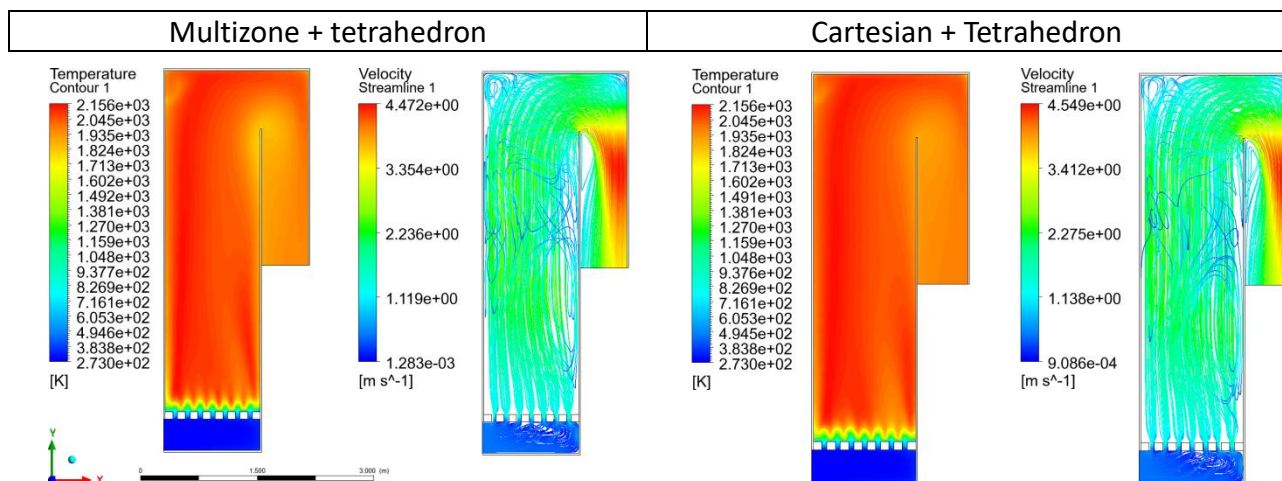


Рисунок 2.13 – Поле температур скоростей

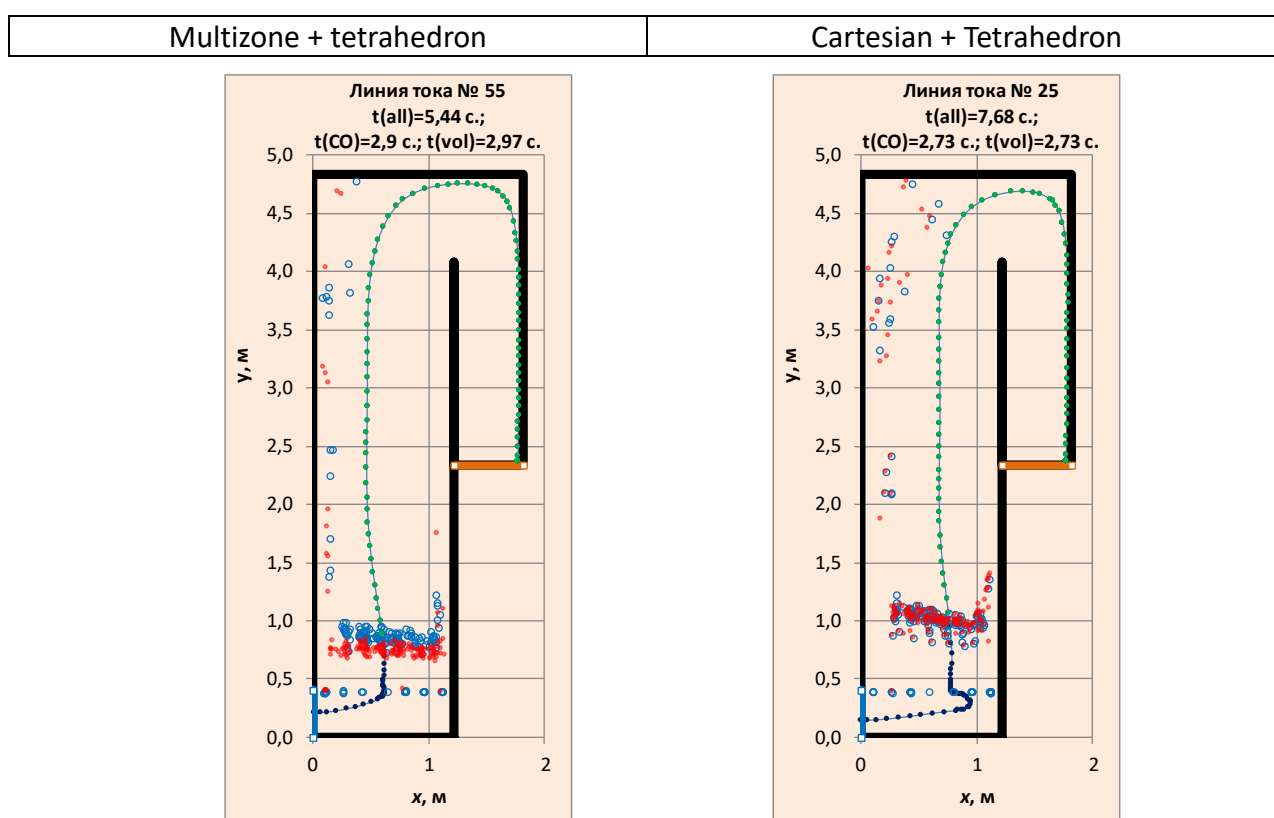


Рисунок 2.14 – Расчет времени завершения горения
(○ – расчет по концентрации CO; ● – расчет по содержанию летучих)

В результате в разрабатываемой CFD-модели использован вариант сочетания сеток «Multizone» для газовой части и «Tetrahedron» для границ расчетной области, которые затем преобразовались в адаптивную структуру из многогранников (Polyhedral).

2.2 РАСЧЕТ ВРЕМЕНИ ТЕЧЕНИЯ ГАЗОВОГО ПОТОКА ПОСЛЕ ЗАВЕРШЕНИЯ ГОРЕНИЯ ПО ДАННЫМ 3D-STREAMLINE, СГЕНЕРИРОВАННЫМ В ANSYS FLUENT

Условия эффективного горения топлива следующие [195]:

- отсутствие продуктов неполного горения (в основном CO, так же CH_4 , H_2);
- образование загрязняющих соединений не выше установленных норм.

Завершением процесса горения можно считать участок, в которой нет продуктов неполного горения.

Численные решения дифференциальных уравнений, в т.ч. и в Ansys Fluent, имеют вид набором значений искомым переменных (температуры, давления, векторов скоростей, содержания химических соединений) в узлах расчетной сетки. С использованием поля скоростей, определяя по касательной в кадем узле стеки направление движений среды, возможно построение линий тока, показывающих движение среды. В Ansys Fluent линии тока (streamline) представлены набором точек, в каждой из которых известны координаты и значения рассчитываемых переменных (Рисунок 2.15). При генерации линий тока возможно задавать их число, а количество точек в каждой линии тока будет определяться расчетной сеткой.

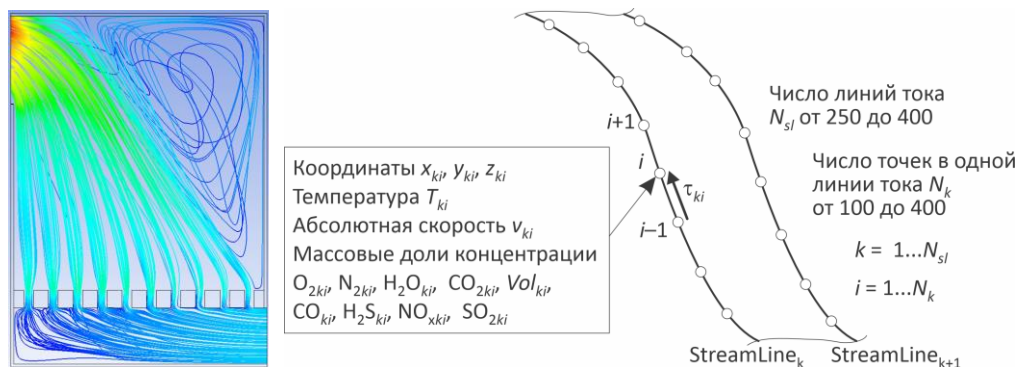


Рисунок 2.15 – Графическое изображение линий тока (StreamLines) и представление результатов расчета – значений переменных в узлах сетки

В работе предложено на основании экспортированных данных линий тока определять зоны конца горения и производить расчет времени течения газового потока после завершения горения. Методика и алгоритм расчета, реализованный в MS Excel с помощью VBA-программы и расчетных и графических средств электронных таблиц, представлен на Рисунке 2.16.

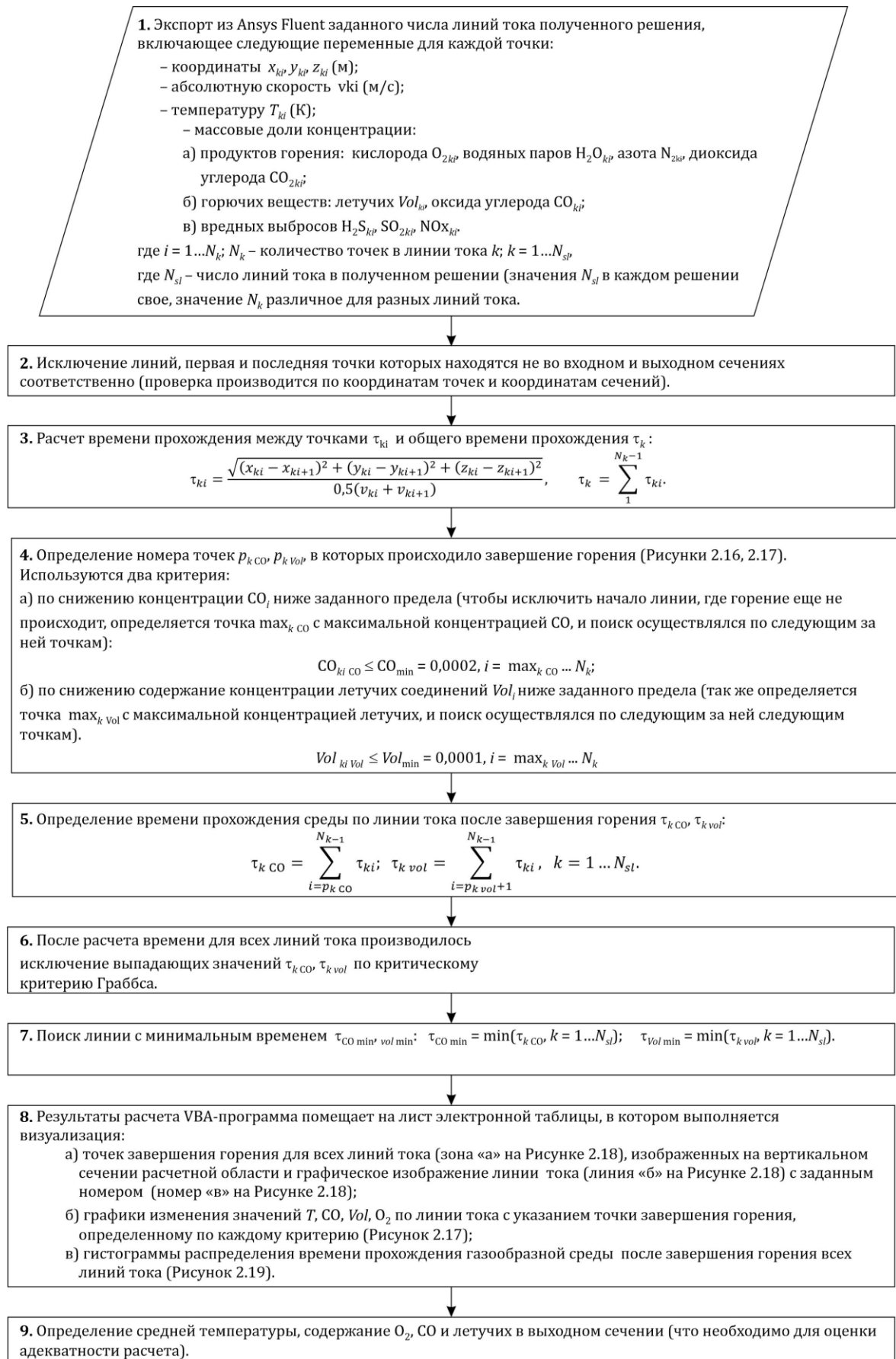


Рисунок 2.16 – Алгоритм расчета

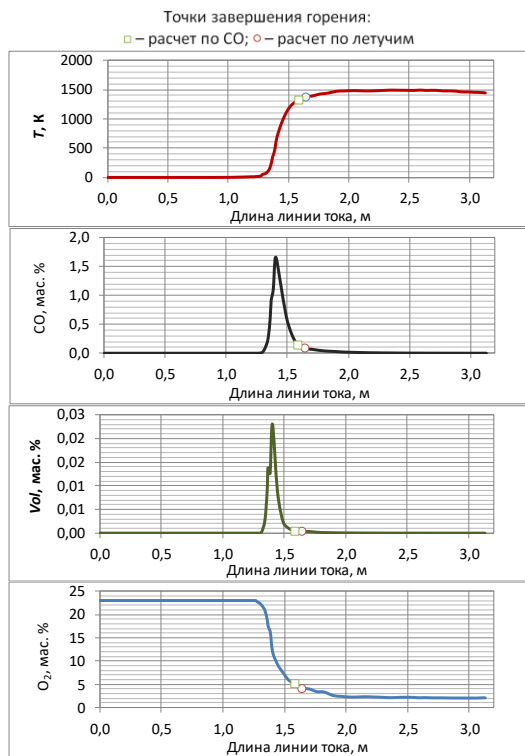


Рисунок 2.17 – Изменение содержания компонентов и температуры по линии тока

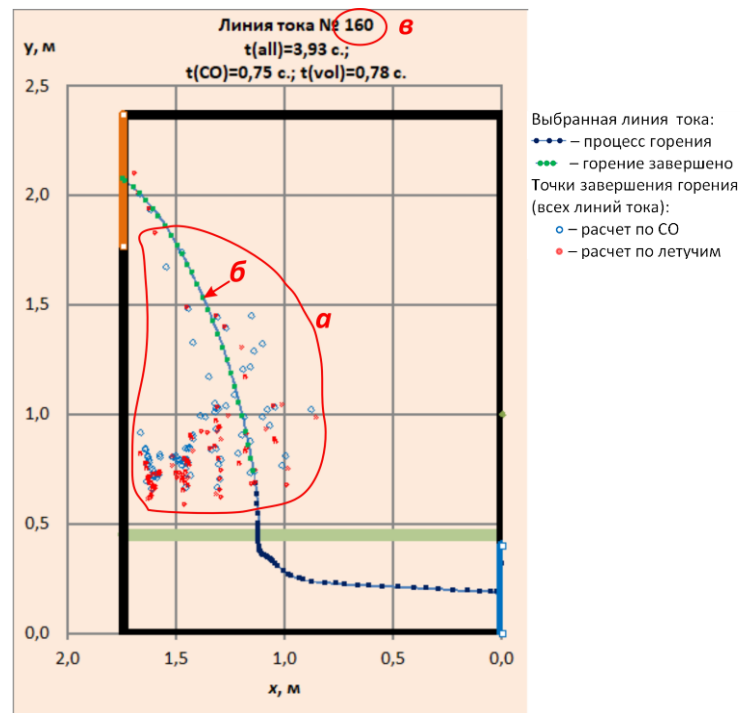


Рисунок 2.18 – Пример графического изображение выбранной линии тока и точек завершения горения

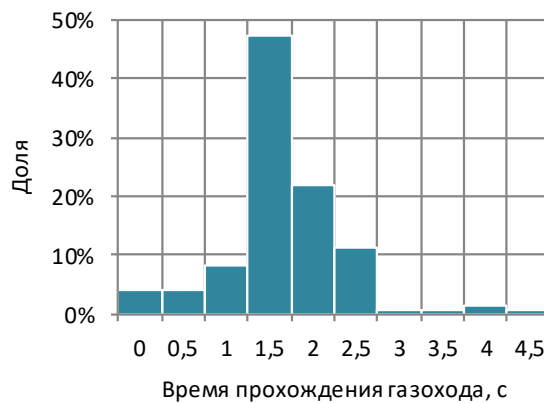


Рисунок 2.19 – Распределение линий тока по времени прохождения в них газообразной среды после завершения горения

Связь между графическими изображениями результатов расчета, генерируемым в Ansys Fluent и полученными в разработанной методике представлена на Рисунке 2.20.

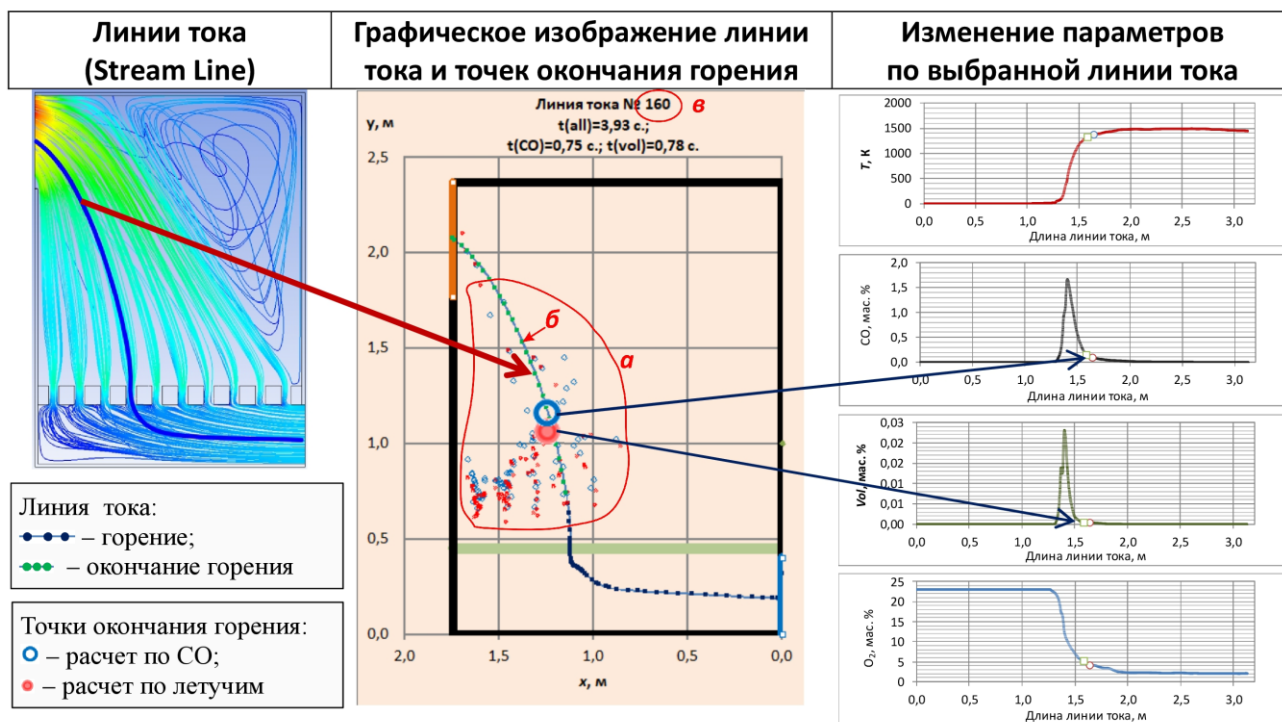


Рисунок 2.20 – Связь между линиями тока и графическими изображениями результатов расчета

Предложенная методика позволяет решать следующие задачи:

- оценивать границы области горения;
- определять и полноту разложения загрязняющих соединений.

2.3 КРИТЕРИИ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ГОРЕНИЯ ТОПЛИВА В ТОПКАХ

В работе рассматривается горение в топке котла, поэтому величина КПД котла не будет характеризовать эффективность этого процесса. Для оценки эффективности процесса горения и величины выбросов предлагается использовать следующие критерии.

1. Доля несгоревших горючих веществ топлива F_{uf} , %, представляет собой часть топлива, эквивалентное теплоте сгорания горючих соединений в продуктах горения.

При испытаниях она определяется по величине потерь q_3 :

$$F_{uf} = q_3 = 100 Q_{\text{нед}} h / p = 12\,640 \text{ CO } h / p, \quad (2.21)$$

где $Q_{\text{нед}}$ – потери от неполноты сгорания топлива, кДж/м³; 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 м³ сухих продуктов горения, образующихся при сжигании в теоретических условиях (при $\alpha = 1$), кДж/м³; 12 640 – теплота сгорания CO, кДж/м³; CO – содержание оксида углерода в отходящих газах, об. %.

В Ansys Fluent доля несгоревших горючих веществ определяется следующим образом:

$$F_{uf} = (15,8 d_{\text{CO}} + q_{\text{vol}} d_{\text{vol}}) \cdot g_{\text{пг}} / (Q_{\text{н}}^p g_{\text{т}}), \quad (2.22)$$

где d_{CO} , d_{vol} – массовая доля CO и летучих в газах («Mass fraction on CO, volatiles»); q_{vol} – теплота сгорания летучих, МДж/кг; $Q_{\text{н}}^p$ – низшая теплота сгорания топлива, МДж/кг; $g_{\text{пг}}$ – массовый расход газов, кг/с; $g_{\text{т}}$ – расход топлива, кг/с.

2. КПД топки $\eta_{\text{т}}$, %, учитывает полноту сгорания топлива и потери в топке через стенки печи (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:

$$\eta_{\text{т}} = \frac{100\% Q_{\text{г}}}{Q_{\text{н}}^p g_{\text{т}} (1 - 0,01 q_3) + Q_{\text{в}}} - q_3, \quad (2.23)$$

где $Q_{\text{г}}$ – энтальпия газового потока на выходе из топки, МДж; $g_{\text{т}}$ – расход твердого топлива, кг/с, который при испытаниях определяется расчетным путем по измеренным тепловой производительности котла и КПД котла, определенному по данным измерений и обратному тепловому балансу расчета теплового баланса, (методика и результаты приведены в прил. 3); $Q_{\text{в}}$ – физическая теплота

(теплосодержание) воздуха, поступающего на горение, МВт; q_3 – потери с недо-
жогом, %.

Теплота газового потока после топки:

$$Q_{\Gamma} = 0,001 c_{\text{пг}} g_{\text{пг}} t_{\text{пг}}, \quad (2.24)$$

где $t_{\text{пг}}$ – температура продуктов горения после топки (результаты измерения вы-
сокотемпературной термопарой), °С; $c_{\text{пг}}$ – теплоемкость, кДж/(кг·К).

Теплота воздуха, поступающего на горение: газового потока после топки:

$$Q_{\Gamma} = 0,001 c_{\text{в}} g_{\text{в}} t_{\text{в}}, \quad (2.25)$$

где $t_{\text{в}}$ – температура воздуха (температура окружающей среды), °С; $c_{\text{в}}$ –
теплоемкость воздуха, кДж/(кг·К); $g_{\text{в}}$ – массовый расход воздуха, кг/с.

Расход воздуха и продуктов горения определяется по величине $g_{\text{т}}$ и расчету
горения топлива при α , рассчитанном по результатам газового анализа.

Потери от неполноты сгорания топлива определяются по величине продук-
тов недожога [196] с использованием упрощенной методики теплотехнических
расчетов М.Б. Равича [197]. При испытаниях из продуктов недожога фиксирова-
лось только содержание оксида углерода, поэтому q_3 имеет вид

$$q_3 = 12\,640 \text{ CO} \frac{h}{p}, \% \quad (2.26)$$

Таким образом КПД топки при испытаниях имеет вид:

$$\eta_{\text{т}} = 0,1 \frac{c_{\text{пг}} g_{\text{пг}} t_{\text{пг}}}{Q_{\text{н}} g_{\text{т}} (1 - 0,01 F_{\text{uf}}^t) + c_{\text{в}} g_{\text{в}} t_{\text{в}}} - F_{\text{uf}}^t, \% \quad (2.27)$$

В Ansys Fluent КПД топки определяется по исходным данным (задаваемым
массовому расходу топлива $g_{\text{т}}$) и результатам моделирования – среднему массо-

вому расходу газов в выходном окне $g_{\text{пг}}$, средней массовой доли соединений в выходном окне, средней температуре в выходном окне топки $t_{\text{пг}}$:

$$\eta_{\text{т}} = \frac{0,1 \cdot c_{\text{пг}} t_{\text{пг}} \cdot g_{\text{пг}}}{Q_{\text{н}}^{\text{р}} (1 - 0,01 F_{\text{уф}}^{\text{м}}) g_{\text{т}}} \cdot 100\% - F_{\text{уф}}^{\text{м}}, \quad (2.28)$$

где 15,8 –теплота сгорания СО, МДж/кг; q_{vol} – теплота сгорания летучих, МДж/кг, для RDF топлива, торфа, бурого угля данные приведены в ГОСТ 55128..

По сути КПД топки $\eta_{\text{т}}$ включает потери в окружающую среду q_5 и потери с несгоревшим топливом q_5 :

$$\eta_{\text{т}} = q_3 + q_5. \quad (2.29)$$

3. Обобщенный критерий выбросов представляет массовый расход загрязняющих соединений g_i , приведенных к единому нормализованному значению:

$$E = \sum g_i k_i = \sum \frac{\text{ПДК}_{\text{NOx}}}{\text{ПДК}_i} g_i, \quad (2.30)$$

где g_i – массовый расход концентрация выбросов г/с; k_i – коэффициент нормирования (отношение ПДК NO_x к ПДК вещества).

Коэффициенты нормирования k_i определялся по значению ПДК, устанорвлоенных в СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания» (Таблица 2.9). В качестве базовой концентрации принята величина ПДК NO_x , и коэффициент рассчитывался как отношение величины 0,2 мг/м³ к максимально разовой ПДК соединения. Для бензопирена, у которого максимально разовая ПДК не установлена, коэффициент определялся через среднесуточные ПДК.

Например, $\text{ПДК}_{\text{NO}_x}^{\text{м.р}} = 0,2 \text{ мг/м}^3$; $\text{ПДК}_{\text{SO}_2}^{\text{м.р}} = 0,5 \text{ мг/м}^3$; $k_{\text{NO}_x} = 0,2/0,5 = 0,4$.

Таблица 2.9 – Предельно допустимые концентрации загрязняющих веществ и коэффициент нормирования

Соединение	Класс опасности	ПДК, мг/м ³		Коэффициент нормирования k_i
		максимально разовая ПДК _{м.р}	среднесуточная ПДК _{с.с}	
SO ₂	3	0,5	0,05	0,4
NO _x	3	0,2	0,04	1
CO	4	5	3	0,04
Бензопирен	1	–	10 ⁻⁶	40000
HCl	3	0,2	0,10	1
HF	2	0,02	0,005	10

Для величины вредных веществ, оцениваемых в работе, коэффициент E имеет вид:

$$E = 0,4g_{\text{SO}_2} + g_{\text{NO}_x} + 0,04g_{\text{CO}} + 25g_{\text{H}_2\text{S}}, \text{ г/с} \quad (2.31)$$

Величина E позволяет количественно сравнить массу выбросов при сжигании топлив при одинаковой мощности котла или печи. Для сравнения сжигания различных котлов и топлив предлагается использовать величину выбросов, отнесенную к 1 МВт теплоты сгорания топлива:

$$e = \frac{E}{g_{\text{T}} \cdot Q_{\text{H}}^{\text{p}}}, \text{ г/МВт.} \quad (2.32)$$

Это позволит оценивать разные котлы. В работе оценивались котлы мощностью 1 МВт, поэтому $e = E$.

2.4 ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ

В разделе предложен способ построения расчетной модели для сжигания твердого топлива в неподвижном слое в топках печей и котлов малой мощности. Так как горение характеризуется большой сложностью в моделировании, с целью упрощения модели слой топлива в отдельную расчетную область не выделяется.

лялся и был заменен граничными условиями, а расчетная область содержала только газовую часть. Топливо поступает в расчетную область, соответствующую газовой части, через поверхность области, ограничивающее твердое топливо.

Принятые упрощения модели:

- горение включает гетерогенные реакции газификации на поверхности «Fuel», ограничивающей слой топлива, и гомогенных реакций окисления летучих веществ в газовой части. Унос твердых частиц топлива не учитывается.

Предложен 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.

Для оценки эффективности горения топлива в топке предложены критерии, включающие параметры газового потока на выходе из нее: доля несгоревших горючих веществ топлива F_{uf} , представляющие собой отношение теплоты сгорания горючих компонентов, находящихся в газовом потоке, к теплоте, подводимой к топке, и КПД топки, учитывающая потери в окружающую среду и полноту сгорания топлива, которые позволяют проводить оптимальное проектирование котлов малой мощности и проводить наладку и оценку их работы.

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.

3 ПРОМЫШЛЕННЫЕ ИСПЫТАНИЯ И ВЕРИФИКАЦИЯ МОДЕЛИ

3.1 ПРОВЕДЕНИЕ ПРОМЫШЛЕННЫХ ИСПЫТАНИЙ СЖИГАНИЯ RDF- ТОПЛИВА В ТВЕРДОТОПЛИВНОМ КОТЛЕ

Для оценки адекватности модели проведены теплотехнические испытания промышленного водогрейного котла КВМ-1,0, мощность которого составляет 1,2 Гкал/ч (1 МВт), схема которого представлена на Рисунке 3.1), Котел эксплуатируется на полигоне твердых коммунальных отходов «Стрелецкое» (адреспромышленной площадки город Белгород, ул. Зареченская, 85) и обеспечивает отопления трех объектов (2 производственных цеха и административное здание). В основном режиме работы в качестве топлива в котле используются древесные отходы.

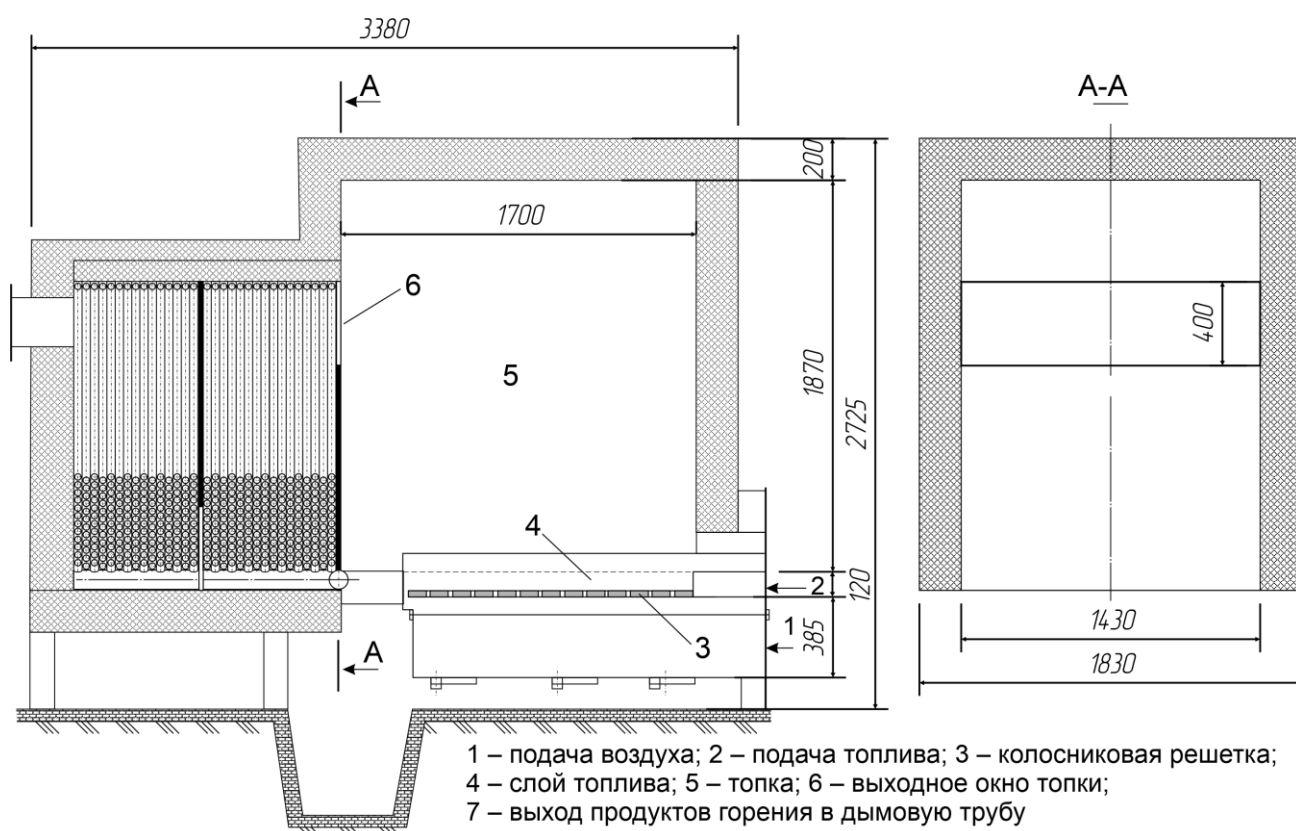


Рисунок 3.1 – Твердотопливный котел КВМ-1,0

На производственной площадке функционирует линия измельчения, сушки сырья и брикетирования древесных пеллет. Для проведения теплотехнических испытаний на ней из ТКО, размещаемых на полигоне, была изготовлена партия RDF-топлива. Топливо высушивалось до 10%. Состав топлива рассчитан по среднему составу отходов, который определен АО «Белгородский институт альтернативной энергетики» при исследовании энергетического потенциала полигона, проводимого (отчет от 25.08.2023 г.). Морфологический состав (Таблица 3.1) определялся путем систематического отбора проб отходов, вывозимых на полигон ТКО «Стрелецкое», разделения их на фракции и взвешивания. Элементарный состав (Таблица 3.2) рассчитан по среднему составу компонентов ТКО, приведенному в работе [198].

Таблица 3.1 – Морфологический состав ТКО

Наименование фракции	Содержание, масс. %
Бумага, картон	21,48
Пищевые отходы	36,80
Стекло	8,98
Текстиль	3,20
Пластмасса, полимеры	16,60
Металлы	2,10
Древесные и растительные отходы	6,82
Песок, почва, камни, смет и т.д.	4,02
Всего	100,00

Таблица 3.2 – Элементарный состав ТКО на рабочую массу

Компоненты	Рабочая масса, мас. % (Б.И. Левин)								Доля, %
	C ^p	H ^p	O ^p	N ^p	S ^p	A ^p	W ^p	Сумма	
Бумага	34,65	4,63	35,40	0,20	0,18	18,76	6,2	100	21,48
Пищевые отходы	29,84	4,26	18,95	2,25	0,36	10,66	33,7	100	36,8
Текстиль	46,93	5,84	27,64	4,05	1,31	9,53	4,7	100	3,2
Древесина	48,24	5,72	40,26	0,12	0,00	0,95	4,7	100	6,82
Кожа, резина	68,42	5,26	13,26	0,21	0,63	12,21	0,0	100	–
Пластмасса	58,88	8,12	18,70	0,96	0,32	11,33	1,7	100	16,6
Отсев	16,56	2,26	16,80	0,00	0,12	59,56	4,7	100	–
Негорючая масса	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	0,0	100	15,1
Расчетный состав ТКО									
при естественной влажности	23,26	3,12	15,60	0,60	0,17	22,05	35,20	100	–
при влажности 10%	34,33	4,61	23,03	0,88	0,25	26,90	10,00	100	–
на горючую массу	54,4	7,3	36,5	1,4	0,4	–	–	100	–

Из отобранных предварительно подсушенных отходов на линии производства древесных пеллет приготовлена опытная партия брикетов массой 12 500 кг (12,5 т, объемом около 10 м³) диаметром 50 мм длиной до 400 мм (Рисунок 3.2).

Влажность образца определялась в лаборатории 408 УК2 в БГТУ им. В.Г. Шухова в камерной сушилке, оборудованной весами для взвешивания образцов, влажность составила $10,4 \pm 0,6\%$ и принята 10%.

Испытания проводились в течение 6-х дней в период с 4 по 14 декабря 2023 г. (Рисунок 3.3).



Рисунок 3.2 – Партия брикетированных отходов ТКО (RDF-топливо)



Измерение состава и параметров отходящих газов



Измерение пирометром температуры поверхности слоя горящего топлива

Измерение размеров котла

Тепловизионная съемка

Рисунок 3.3 – Теплотехнические испытания котла

Методика проведения испытаний, используемые приборы, первичные данные приведены в прил. 2, статистическая обработка результатов – в прил. 3.

Полученные средние значения измеряемых параметров приведены в Таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Параметры газового потока на выходе из топки/котла

Режим	$\alpha = 1,4$	$\alpha = 1,6$	$\alpha = 2,0$
Температура, °C	1450 ± 27	1248 ± 28	994 ± 26
O ₂ , об. %	$5,50 \pm 0,25$	$7,75 \pm 0,28$	$10,70 \pm 0,22$
NO _x , ppm	$64,1 \pm 6,7$	$137,4 \pm 8,7$	$156,3 \pm 9,2$
SO ₂ , ppm	531 ± 27	494 ± 26	439 ± 23
CO, ppm	1734 ± 90	1136 ± 60	0*

* Среднее значение меньше погрешности измерений

В Таблице 3.4 приведены данные об эффективности работы котла, полученные в ходе испытаний.

Таблица 3.4 – Эффективность горения и величина вредных выбросов

Режим		$\alpha = 1,4$	$\alpha = 1,6$	$\alpha = 2,0$
Массовый расход, г/с	CO	$0,0346 \pm 0,0036$	$0,0837 \pm 0,0053$	$0,1169 \pm 0,0069$
	NO _x	$0,2672 \pm 0,0136$	$0,2806 \pm 0,0148$	$0,3063 \pm 0,0160$
	SO ₂	$2,0426 \pm 0,1060$	$1,5106 \pm 0,0798$	0
	H ₂ S	$0,0070 \pm 0,0028$	$0,0079 \pm 0,0030$	$0,0082 \pm 0,0037$
Критерии эффективности				
КПД топки η_t		81,8%	80,3%	79,6%
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

Так же в ходе испытаний был рассчитан тепловой баланс котла, который представлен в прил. 3.

Сопоставление средних данных измерений с результатами моделирования приведены в Таблице 3.5.

Таблица 3.5 – Сравнение результатов промышленных испытаний (П) и моделирования (М)

Наименование	Коэффициент избытка воздуха α					
	1,4		1,6		2,0	
	П	М	П	М	П	М
Температура, °C	1450±27	1457	1248±28	1267	994±26	1006
O ₂ , об. %	5,50±0,25	5,37	7,75±0,28	7,58	10,70±0,22	10,50
NO _x , ppm	64,1±6,7	69,3	137,4±8,7	132,8	156,3±9,2	152,2
SO ₂ , ppm	531±27	534,4	494±26	505,2	439±23	447,6
CO, ppm	1734±90	1784	1136±60	1114	0*	39
H ₂ S, ppm	1450±27	1457	1248±28	1267	994±26	1006

* Среднее значение меньше погрешности измерений

В Таблице 3.6 приведена статистическая оценка отклонения результатов моделирования от результатов промышленных испытаний. По каждому параметру определялся коэффициент детерминации R^2 , по которому был рассчитан критерий Фишера [199], который сравнивался с критическими значениями.

Таблица 3.6 – Статистическая оценка совпадения результатов моделирования и промышленных испытаний

Наименование	Коэффициент детерминации R^2	MAPE (Средние относительные отклонения)	Критерий Фишера (F _{кр} = 9 при $\alpha=0,1$ и F _{кр} = 19 при $\alpha=0,05$)
Температура, °C	0,99	1,1%	1,2
O ₂ , об. %	0,99	2,1%	1,5
NO _x , ppm	0,98	4,7%	1,4
SO ₂ , ppm	0,95	1,6%	2,2
CO, ppm	0,99	3,0%	1,4

* Среднее значение меньше погрешности измерений

Оценка результатов моделирования по данным промышленных испытаний, а так же аналитического анализа результатов, показывает адекватность разработанной CFD-модели.

3.2 РАСЧЕТ ВЫБРОСОВ ПРИ СЖИГАНИИ РАЗЛИЧНЫХ ВИДОВ ТВЕРДЫХ ТОПЛИВ И ОТХОДОВ

Вторым этапом проверки адекватности модели являлось сравнение величины выбросов, определенных по результатам CF -моделирования, с результатами расчета по нормативным методикам. 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).

Выбросы тяжелых металлов не рассматривалась по следующим причинам. Концентрация тяжелых металлов (меди, цинка, свинца, кадмия, олова, ртути) в отходящих газах при сжигании топлива определяется не режимом сгорания, а содержанием тяжелых металлов в топливе. В несортированных ТКО их содержание в 10-100 раз выше, чем в твердом топливе. Основными источниками кадмия и ртути в ТКО являются отработанные сухие гальванические элементов, аккумуляторы, ламп накаливания, люминесцентных ламп и т.п., то есть выбросы от режима не зависят.

В Таблице 3.7 приведен состав исследуемых твердых топлив и отходов различной влажности.

Состав антрацита, каменного и бурого угля взят как средний состав соответствующих топлив, приведенных в работе [66]. ТКО с влажностью 50% представляют собой отходы с естественной влажностью, с влажностью 30% – частично высушенные, с влажностью 10% – RDF-топливо. Так же в таблицах приведены результаты расчета горения этих топлив, для сравнения результаты приведены не только на 1 кг топлива, но и на единицу выделяемой теплоты (МДж).

ТКО 30% по параметрам горения сопоставимы с бурым углем, ТКО 10% – с древесиной и каменным углем.

Таблица 3.7 – Состав и характеристики горения твердых топлив и отходов

Величина	ТКО [152], с влажностью			Древеси- на [198]	Торф [200]	Бурый уголь	Камен- ный уголь	Антра- цит
	10%	30%	50%					
Элементарный состав топлива, массовые % (на рабочую массу)								
C^p	34,30	26,7	19,1	40,5	29,476	34,39	44,3	60,030
O^p	23,00	17,9	12,8	33,8	16,498	10,98	14,4	0,930
H^p	4,60	3,6	2,5	4,8	3,018	2,51	3	1,020
N^p	0,90	0,7	0,5	0,1	1,107	0,55	0,4	0,640
S^p	0,30	0,2	0,1	0	0,201	0,57	0,2	2,020
A^p	26,90	20,9	15	0,8	4,7	17,66	4,7	27,360
W^p	10	30	50	20	45	33,34	33	8,000
Всего	100	100	100	100	100	100	100	100
Теплотворная способность (низшая теплота сгорания), кДж/кг	13 640	10 077	6 411	14 487	10 195	12 272	15 732	21 319
Расход топлива, соответствующий тепловыделению 1 МВт	кг/с	0,0733	0,0992	0,1560	0,0690	0,0981	0,0815	0,0469
	кг/ч	264	357	562	248	353	293	169
Расход воздуха на горение, м ³ /кг (при коэффициенте избытка воздуха $\alpha = 1,4$)	4,34	3,38	2,41	5,06	3,71	4,34	5,56	7,60
Объем продуктов горения топлива (при нормальных условиях)								
удельный, м ³ /кг	4,66	3,91	3,14	5,48	4,34	4,73	5,91	7,27
на единицу выделяемой при сгорании теплоты, м ³ /МДж	0,34	0,39	0,49	0,38	0,43	0,39	0,38	0,34
Температура горения (адиабатическая), °С	1750	1562	1258	1606	1438	1581	1620	1777
Парниковый эквивалент при горении (масса выделяемого CO ₂)								
удельный на массу топлива, кг/кг топлива	1,268	0,987	0,706	1,497	1,090	1,271	1,638	2,219
удельный на единицу выделяющейся теплоты, кг/МДж	0,093	0,098	0,110	0,103	0,107	0,104	0,104	0,104

Для расчетов выбросов загрязняющих веществ использовались следующие нормативные методики:

– в методике НИИАтмосфера [201] приведен расчет выбросов диоксида серы SO_2 , окислов азота NO_x , оксида углерода CO , бензопирена, золы;

– в методике ВНИИГАЗа [202] приведен расчет выбросов диоксида серы SO_2 , окислов азота NO_x , оксида углерода CO , хлороводорода HCl , фторводорода HF .

В обеих методиках величина выбросов загрязняющих (вредных) соединений g определялась с размерностью г/с .

Результаты расчетов величины выбросов и обобщенного критерия выбросов представлены в Таблице 3.8 и на Рисунке 3.4.

Данные расчетов по двум методикам были объединены путем усреднения и представлены на Рисунке 3.4.

Таблица 3.8 – Величина выбросов*

Тип топлива	ТКО, 10%	ТКО, 30%	ТКО, 50%	Древеси- на	Торф	Бурый уголь	Камен- ный уголь	Антра- цит
SO_2 , г/с	0,37 0,31	0,34 0,28	0,27 0,22	0,00 0,00	0,34 0,28	0,74 0,65	0,20 0,18	1,52 1,33
NO_x , г/с	0,170 0,15	0,170 0,15	0,170 0,15	0,170 0,16	0,170 0,16	0,170 0,15	0,190 0,15	0,120 0,15
CO , г/с	0,46 1,08	0,46 1,46	0,46 2,30	0,49 0,95	0,49 1,54	0,46 1,20	0,47 0,41	0,45 0,13
Бензопирен, г/с	$1,28 \cdot 10^{-6}$ –	$1,38 \cdot 10^{-6}$ –	$1,65 \cdot 10^{-6}$ –	$1,43 \cdot 10^{-6}$ –	$1,52 \cdot 10^{-6}$ –	$1,57 \cdot 10^{-6}$ –	$1,64 \cdot 10^{-6}$ –	$1,65 \cdot 10^{-6}$ –
HCl , г/с	– 0,0030	– 0,0108	– 0,0238	– 0,0092	– 0,0150	– 0,0100	– 0,0079	– 0,0015
HF , г/с	– 0,0062	– 0,0226	– 0,0495	– 0,0191	– 0,0312	– 0,0208	– 0,0164	– 0,0032
Выброс золы, г/с	19,72 –	20,74 –	23,40 –	0,55 –	4,61 –	14,39 –	2,99 –	12,83 –
Критерий выбросов E	0,39 0,38	0,38 0,56	0,36 0,85	0,25 0,40	0,38 0,66	0,55 0,67	0,36 0,41	0,81 0,72

*Верхнее значение – методика № 1, нижнее значение – методика № 2

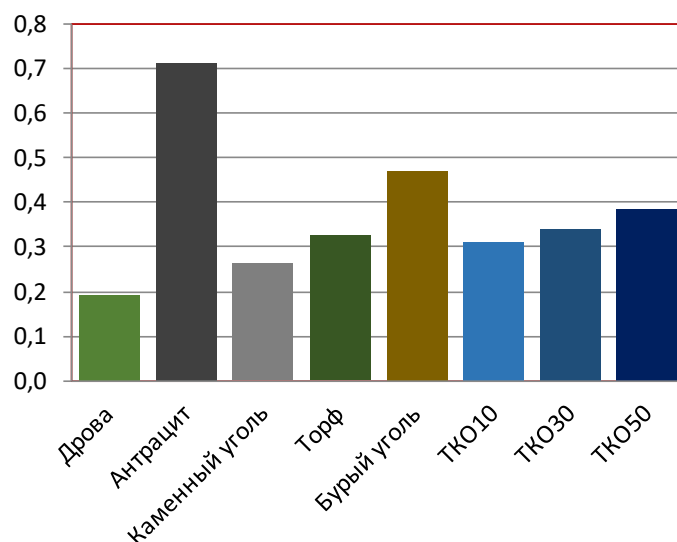


Рисунок 3.4 – Обобщенный критерий выбросов, объединяющий результаты расчетов по двум методикам

Для проверки адекватности разработанной модели для приведенных в табл. 3.7 топлив выполнен расчет их горения в котле с неподвижной колосниковой решеткой мощностью типа КВ-1,2 производства Республики Беларусь (Рисунок 3.5), так же, как и котел КВМ-1, эксплуатируемый ООО «ТК «Экотранс» на промышленной площадке по адресу Белгород, ул. Серафимовича, 72. Его отличие – расположение выходного окна топки под сводом печи и наличие газовых камер над и под конвективным трубным пучком.

Котел имеет топку увеличенного размера, соединенную с конвективной частью окном высотой 600 мм.

Расчетная модель представлена на Рисунке 3.6.

По средней массовой концентрации соединений в сечении выходного окна, полученной в результате моделирования (Таблица 3.9), были определены объемные концентрации химических соединений (Таблица 3.10), расход загрязняющих веществ NO_x , CO и SO_2 (Таблица 3.11) и рассчитаны критерии теплотехнической эффективности и обобщенный критерий выброс включающий три газа – NO_x , CO и SO_2 (Таблица 3.12).

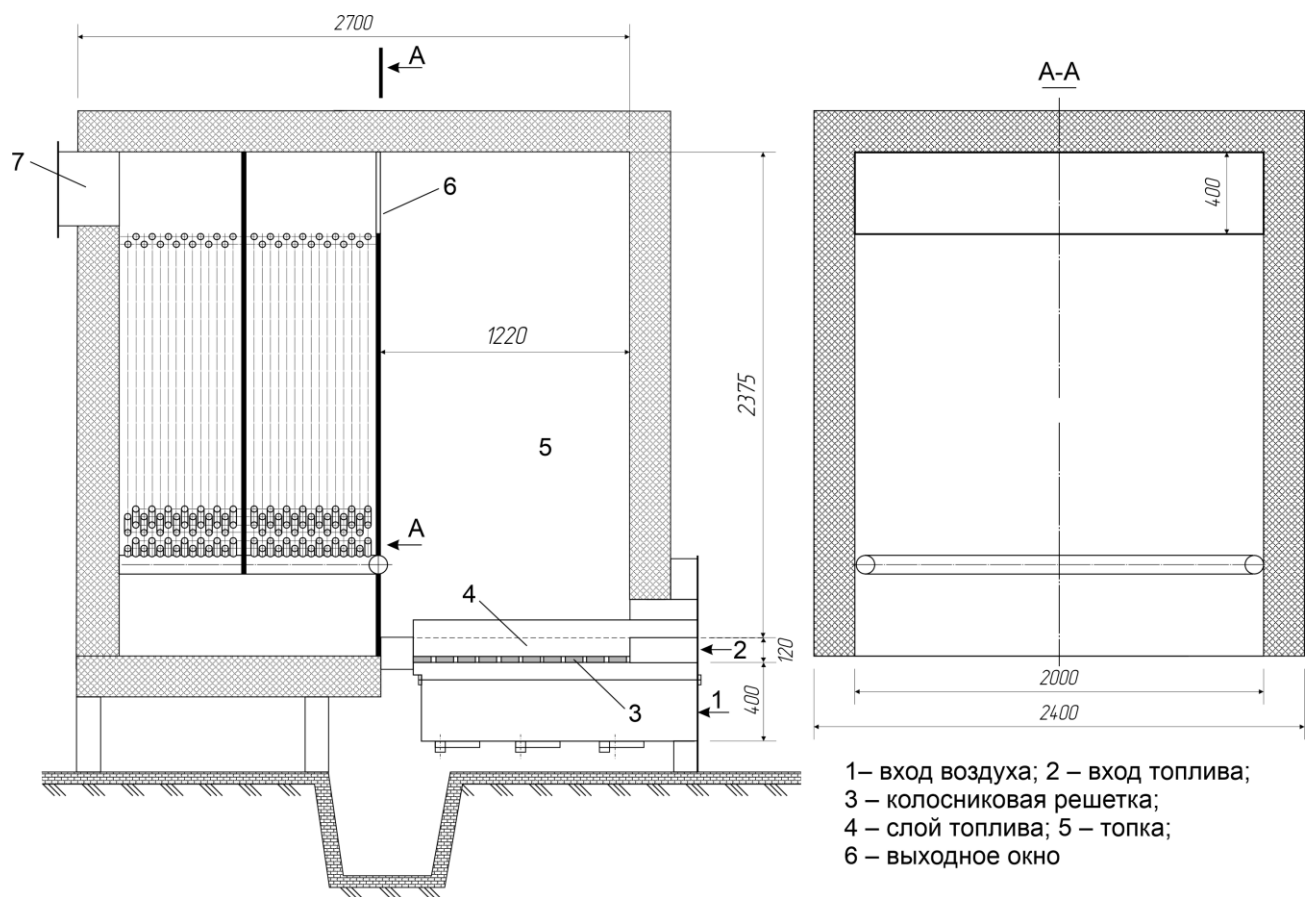


Рисунок 3.5 – Котел KB-1,2

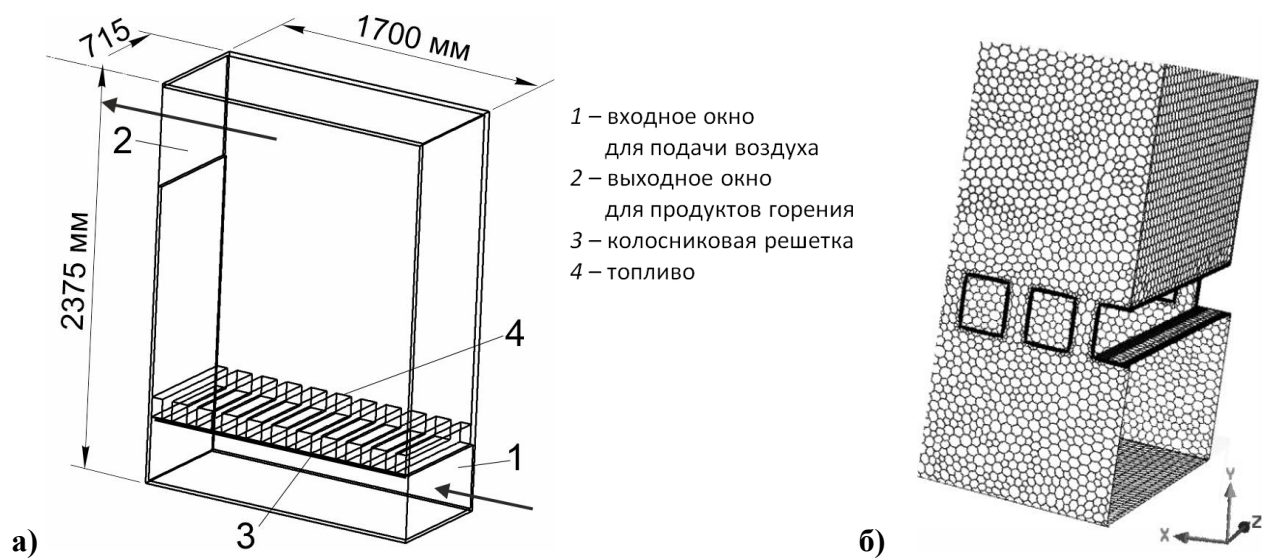


Рисунок 3.6 – Расчетная область (а), 1/2 топки, вертикальная симметрия, и сетка (б):

Таблица 3.9 – Средние температура и состав газов выходном окне
(результаты расчета Ansys Fluent)

Наименование	T, К	Массовая доля, кг/кг								
		O ₂	CO	CO ₂	NO _x	N ₂	H ₂ O	SO ₂	Летучие	Сумма
ТКО10	1730	0,06027	0,00175	0,17869	0,00007	0,64807	0,10034	0,00123	0,01141	1,000
ТКО30	1660	0,05694	0,00420	0,17896	0,00000	0,63847	0,10501	0,00129	0,01513	1,000
ТКО50	1411	0,04994	0,00747	0,17144	0,00000	0,63594	0,10914	0,00098	0,02508	1,000
Дрова	1762	0,06392	0,00208	0,17749	0,00010	0,66326	0,08978	0,00000	0,00337	1,000
Торф	1583	0,05518	0,00424	0,19307	0,00001	0,62649	0,10200	0,00152	0,01748	1,000
Бурый уголь	1702	0,06107	0,00171	0,16727	0,00004	0,64045	0,11530	0,00300	0,01116	1,000
Каменный уголь	1745	0,06690	0,00041	0,16334	0,00018	0,66705	0,09988	0,00140	0,00083	1,000
Антрацит	1886	0,06839	0,00147	0,13911	0,00018	0,64652	0,13966	0,00400	0,00067	1,000

Таблица 3.10 – Средний состав газов в выходном окне, об. %

Наименование	O ₂	CO ₂	H ₂ O	N ₂	CO	NO _x	SO ₂	Летучие	Сумма
ТКО10	5,37	11,50	15,86	65,95	0,1784	0,0069	0,05	1,08	100
ТКО30	5,07	11,51	16,58	64,92	0,4267	0,0004	0,06	1,44	100
ТКО50	4,42	10,96	17,14	64,31	0,7552	0,0005	0,04	2,37	100
Дрова	5,73	11,50	14,28	67,95	0,2134	0,0093	0,00	0,32	100
Торф	4,95	12,50	16,22	64,16	0,4343	0,0014	0,07	1,67	100
Бурый уголь	5,39	10,66	18,04	64,55	0,1723	0,0035	0,13	1,05	100
Каменный уголь	5,94	10,47	15,73	67,66	0,0416	0,0171	0,06	0,08	100
Антрацит	5,90	8,66	21,36	63,69	0,1446	0,0164	0,17	0,06	100

Таблица 3.11 – Среднее содержание вредных веществ в выходном окне

Наименование	NO _x , ppm	CO, ppm	SO ₂ , ppm	NO _x , г/с	CO, г/с	SO ₂ , г/с
ТКО10	69,3	1784	534	0,0374	0,8979	0,6296
ТКО30	4,5	4267	559	0,0027	2,4072	0,7379
ТКО50	4,5	7552	425	0,0034	5,2450	0,6910
Дрова	92,8	2134	0	0,0517	1,1089	0,0000
Торф	13,6	4343	665	0,0087	2,6012	0,9324
Бурый уголь	34,9	1723	1292	0,0205	0,9430	1,6550
Каменный уголь	171,3	416	605	0,0972	0,2202	0,7497
Антрацит	164,2	1446	1683	0,0837	0,6879	1,8750

Таблица 3.12 – Показатели эффективности горения и величины выбросов

Наименование	КПД топки η_t , %	Доля несгоревших горючих веществ топлива F_{uf} , %	Критерий выбросов	
			E , г/с	e , г/МВт
ТКО10	83,7%	8,49%	0,325	0,325
ТКО30	82,8%	9,78%	0,394	0,394
ТКО50	62,8%	12,73%	0,490	0,490
Дрова	95,6%	3,28%	0,096	0,096
Торф	85,7%	12,07%	0,486	0,486
Бурый уголь	94,2%	8,05%	0,720	0,720
Каменный уголь	99,1%	0,85%	0,406	0,406
Антрацит	97,3%	1,29%	0,861	0,861

Температурные поля в вертикальном центральном сечении топки представлены на Рисунке 3.7.

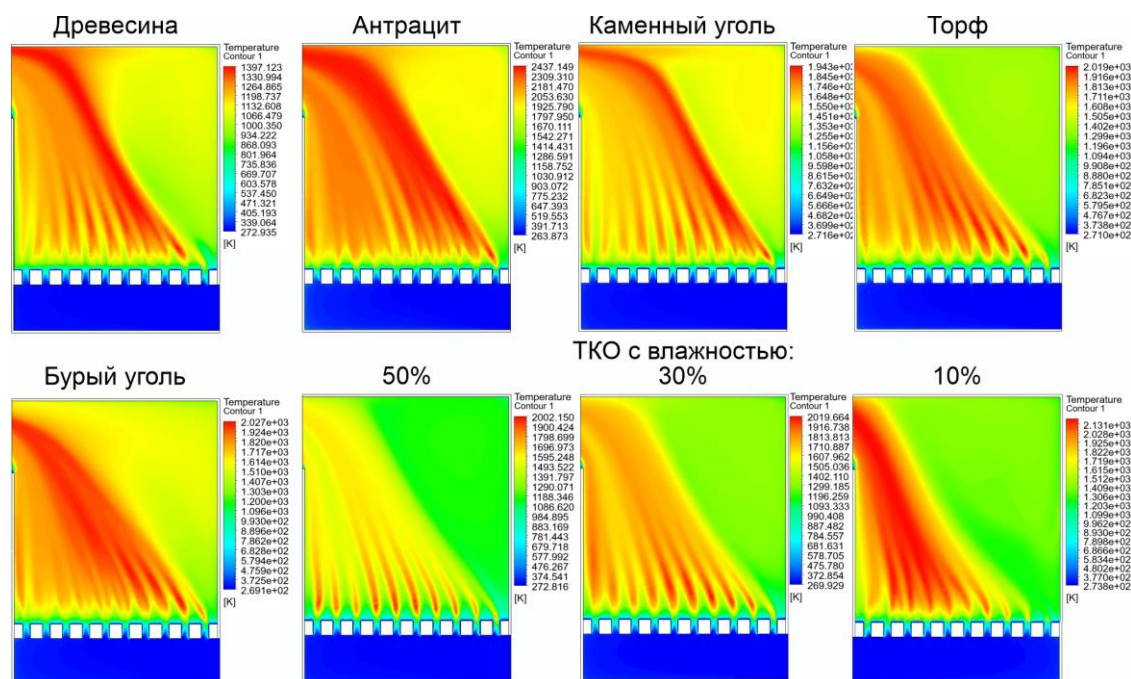
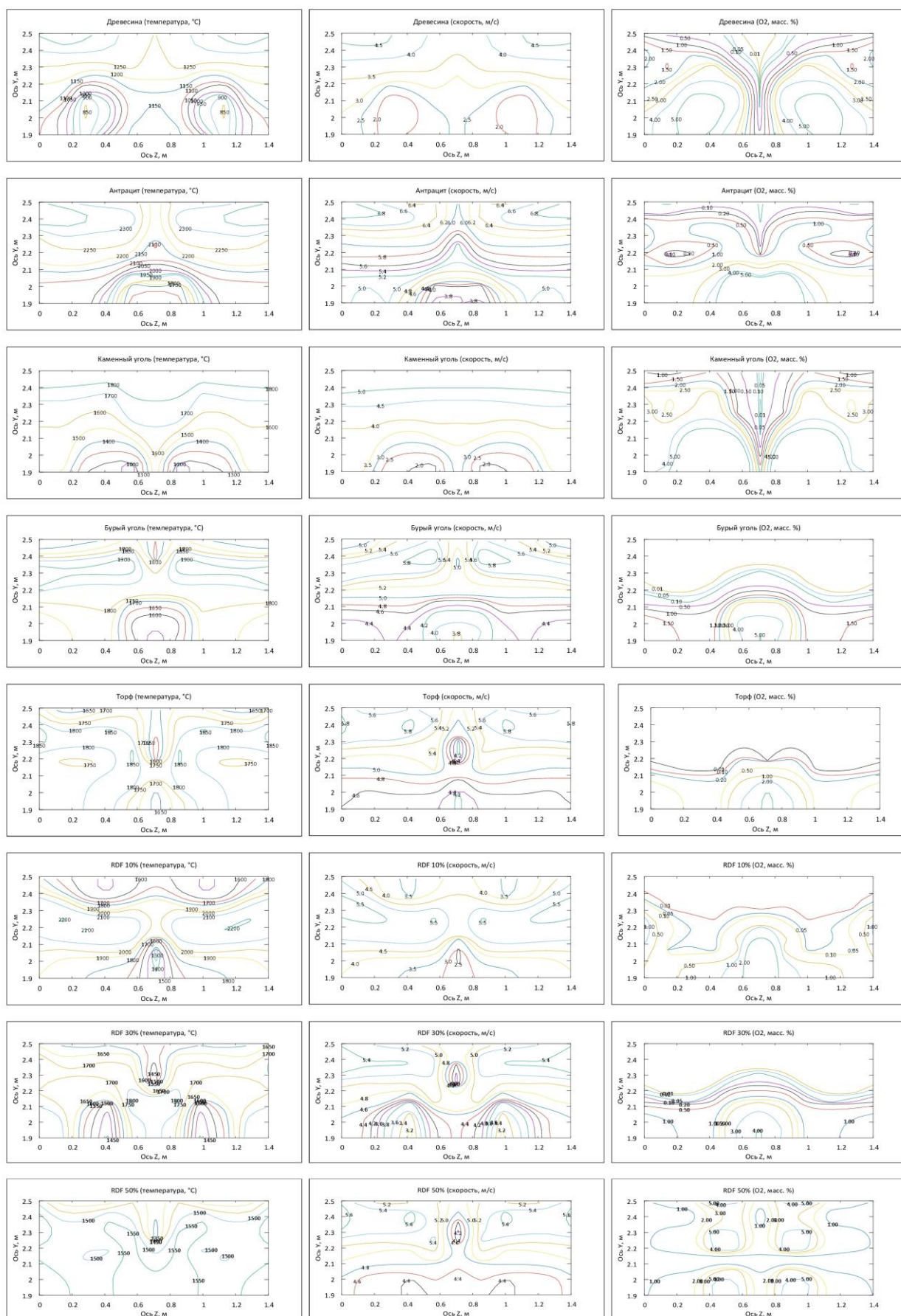


Рисунок 3.7 – Температурные поля в топке

В Таблице 3.12 наибольшее значение F_{uf} у низкосортных топлив, которые в топке сгорают не полностью и в выходном окне содержится значительное количество несгоревших горючих веществ в виде СО и летучих. Для анализа причин рассмотрено распределение скоростей, температур и содержание кислорода в выходном окне (Рисунок 3.8).



**Рисунок 3.8 – Поля температур, скоростей и содержания кислорода
в выходном окне топки**

Сделан вывод, что причина неполноты сгорания низкосортных топлив является неравномерность скоростей газового потока по его поперечному сечению, что в случае более низкой температуры горения приводит к тому, что топливо в отдельных частях потока, имеющих наиболее высокую скорость, не успевает сгорать.

Сравнение результатов, полученных на CFD-модели, и расчетов по нормативным методикам (Рисунок 3.9) показало качественное совпадение соотношения изменения выбросов для различных топлив. При этом результаты моделирования оказались выше результатов расчета по нормативным методикам, то есть моделирование не показывает заниженных результатов, что важно для надежности экологической оценки.

Проверка адекватности результатов моделирования проводилась по критерию Фишера. Число точек $n = 8$. Число факторов в обобщенном критерии выбросов $m = 3$.

Коэффициент детерминации R^2 :

$$R^2 = 1 - \frac{\sum (E_{hi} - E_{mi})^2}{\sum (E_{hi} - E_{н\text{ ср}})^2} = 0,607. \quad (3.1)$$

Критерий Фишера

$$F = \frac{R^2}{1 - R^2} \frac{n - m - 1}{m} = 2,1, \quad (3.2)$$

что меньше критического значения.

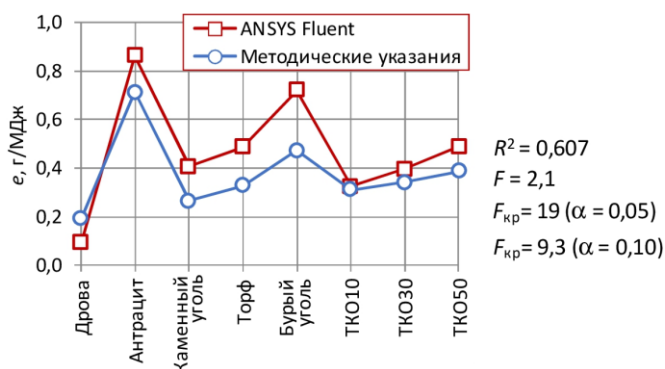


Рисунок 3.9 – Обобщенный критерий выбросов

Таким образом, результаты моделирование образования загрязняющих соединений в CFD-системах соответствуют расчету их образования по нормативным методикам. Это позволяет использовать моделирование для экологической оценки сжигания твердых топлив и ТКО.

3.3 Выводы по главе

Разработанная CFD-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.

Сравнение результатов моделирования и расчетов по методикам показало количественное совпадение основных параметров и качественное совпадение соотношения обобщенного критерия выбросов для различных топлив.

Таким образом оценка результатов моделирования по данным промышленных испытаний, а так же аналитического анализа результатов, показывает адекватность разработанной CFD-модели.

4 АНАЛИЗ РЕЖИМА ГОРЕНИЯ В ТОПКАХ КОТЛОВ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЕГО ЭФФЕКТИВНОСТИ И ОБЕСПЕЧЕНИЯ РАЗРУШЕНИЯ ВРЕДНЫХ ОРГАНИЧЕСКИХ ВЕЩЕСТВ

4.1 ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ГОРЕНИЯ В ТОПКЕ НА ВЫБРОСЫ ВРЕДНЫХ ВЕЩЕСТВ

Целью подраздела является моделирование процесса сжигания твердого топлива в колосниковом котле и определение способов повышения эффективности сжигания твердых бытовых отходов и снижения выбросов загрязняющих веществ с помощью программного обеспечения Ansys Fluent.

В качестве прототипа CFD-модели использован котел КВМ-1,0 с неподвижной колосниковой решеткой мощностью 1 МВт (см. Рисунок 3.1). Особенностью котла является увеличенная топка и смещенное вниз на 500 мм относительно свода топки выхода продуктов горения, имеющее высоту 400 мм. На этом котле проводились промышленные испытания (разд. 3.1) для оценки параметров и проверки адекватности CFD-модели.

Первоначально для исследований рассматривался котел КВ-1,2, который эксплуатируется на базе предприятия в черте города по адресу ул. Серафимовича, 72. Такой же котле предполагалось установить и на загородной на промышленной площадке у полигона ТКО. Поэтому исследование выбросов при сжигании различных топлив (разд. 3.2) было проведено для котла КВ-1,2, который по результатам планировалось доработать. Но в связи с экономической ситуацией предприятие от закупки нового котла отказалось, и поэтому исследования были продолжены на существующем котле, установленном у полигона ТКО, где было возможно проводить теплотехнические испытания.

Целью было определить уровни токсичных химических веществ и температуру газа на выходе из котла. Использовался состав отходов, приведенный в Таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Состав топлива

Физический состав ТКО, масс. %		Элементарный состав на горючую массу, масс. %		Технический анализ, масс. %	
Органические соединения	30	C _г	54,4	Содержание влаги	10,0
Бумага	30	H _г	7,3	Летучие	49,1
Текстиль	5	O _г	36,5	Содержание золы	26,9
Дерево	5	N _г	1,4	Коксовый остаток	14,0
Резина, кожа	1	S _г	0,4		
Пластик	15				
Несгораемый остаток	14				
Всего	100	Всего	100	Всего	100
Теплотворная способность (на рабочую массу топлива), кДж/кг		низшая $Q_{\text{н}}^{\text{p}}$		13 640	
		высшая $Q_{\text{в}}^{\text{p}}$		14 931	

4.1.1 Исследование горения при изменении коэффициента избытка воздуха

В Таблице 4.2 представлены исходные данные вариантов.

В результате моделирования определялись состав газов в выходном окне (включая вредные компоненты) и температура газов (Таблица 4.3 и Рисунок 4.1). Эти результаты соответствуют теоретически рассчитанным значениям.

Таблица 4.2 – Состав продуктов сгорания топлива

Параметры		Коэффициент избытка воздуха α							
		1,2	1,3	1,4	1,6	1,8	2,0	2,5	3,0
Действительный расход воздуха на горение, м³/кг		3,72	4,03	4,34	4,96	5,58	6,20	7,75	9,30
Удельный объем продуктов сгорания, м³/кг		4,35	4,66	4,97	5,59	6,21	6,83	8,38	9,93
Состав продуктов сгорания, об. %	CO ₂	14,7	13,8	12,9	11,5	10,3	9,4	7,7	6,5
	S ₂ O	0,05	0,05	0,04	0,04	0,03	0,03	0,03	0,02
	H ₂ O	14,6	13,6	12,8	11,3	10,2	9,3	7,6	6,4
	N ₂	67,7	68,4	69,1	70,2	71,1	71,8	73,1	74,0
	O ₂	3,0	4,2	5,2	7,0	8,4	9,5	11,6	13,1
Массовый расход, кг/с	топливо $g_{\text{т}}$	0,0733	0,0733	0,0733	0,0733	0,0733	0,0733	0,0733	0,0733
	воздуха $g_{\text{в}}$	0,3526	0,3820	0,4113	0,4701	0,5289	0,5876	0,7345	0,8814
	продукты горения $g_{\text{пг}}$	0,41	0,44	0,47	0,53	0,59	0,65	0,79	0,94
Температура горения, °С		1838	1750	1668	1522	1398	1291	1082	1562

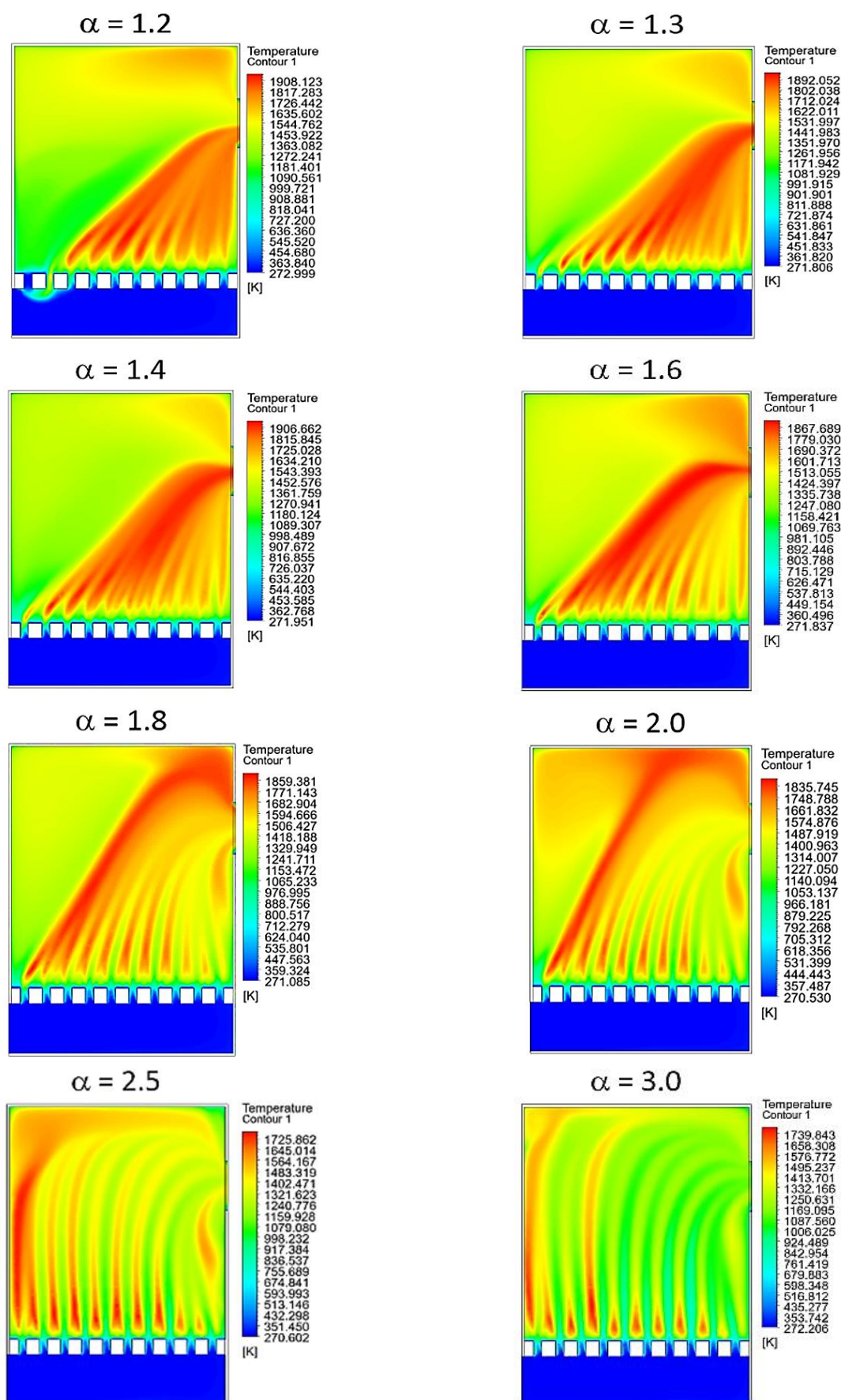


Рисунок 4.1 – Температуры газового потока в топке при различных коэффициентах избытка воздуха

По результатам моделирования (средним значениям рассчитываемых переменных по выходному сечению «Outlet») (Таблица 4.3) были рассчитаны следующие данные: объемные концентрации химических соединений – компонентов продуктов горения (Таблица 4.4) , расход загрязняющих (вредных) веществ NO_x , CO и SO_2 (Таблица 4.5), определены критерии тепловой эффективности работы топки и полноты сгорания и обобщенный критерий выбросов, включающий NO_x , CO и SO_2 (Таблица 4.6).

Таблица 4.3 – Средние температура и состав газов выходном окне (результаты расчета Ansys Fluent)

Коэффициент избытка воздуха α	T, К	Массовая доля, кг/кг								
		O_2	CO	CO_2	NO_x	N_2	H_2O	SO_2	Летучие	Сумма
1,2	1821	0,02314	0,00458	0,17993	0,00001	0,66201	0,10347	0,00127	0,02559	1,000
1,3	1769	0,04239	0,00332	0,17841	0,00003	0,65425	0,10134	0,00124	0,01901	1,000
1,4	1730	0,06027	0,00175	0,17869	0,00007	0,64807	0,10034	0,00123	0,01141	1,000
1,6	1540	0,08477	0,00109	0,16917	0,00014	0,64429	0,09445	0,00116	0,00494	1,000
1,8	1370	0,10383	0,00044	0,16589	0,00016	0,63672	0,09183	0,00112	0,00000	1,000
2	1279	0,11696	0,00004	0,15143	0,00016	0,64699	0,08340	0,00102	0,00000	1,000
2,5	1113	0,14026	0,00000	0,12232	0,00012	0,66886	0,06761	0,00083	0,00000	1,000
3	995	0,15572	0,00000	0,10480	0,00006	0,68079	0,05792	0,00071	0,00000	1,000

Таблица 4.4 – Средний состав газов в выходном окне, об. %

Коэффициент избытка воздуха α	O_2	CO_2	H_2O	N_2	CO	NO_x	SO_2	Летучие	Сумма
1,2	2,06	11,54	16,30	67,16	0,4651	0,0010	0,05	2,42	100
1,3	3,77	11,47	16,01	66,55	0,3380	0,0029	0,05	1,81	100
1,4	5,37	11,50	15,86	65,95	0,1784	0,0069	0,05	1,08	100
1,6	7,58	10,93	14,99	65,85	0,1114	0,0133	0,05	0,47	100
1,8	9,31	10,75	14,61	65,23	0,0451	0,0154	0,05	0,00	100
2	10,50	9,82	13,28	66,34	0,0039	0,0152	0,04	0,00	100
2,5	12,60	7,94	10,77	68,64	0,0001	0,0118	0,04	0,00	100
3	14,00	6,81	9,24	69,92	0,0000	0,0058	0,03	0,00	100

Таблица 4.5 – Среднее содержание вредных веществ в выходном окне

Коэффициент избытка воздуха α	NO _x , ppm	CO, ppm	SO ₂ , ppm	NO _x , г/с	CO, г/с	SO ₂ , г/с
1,2	10,3	4651	549,4	0,0049	2,0389	0,5638
1,3	28,7	3380	539,4	0,0145	1,5913	0,5945
1,4	69,3	1784	534,4	0,0374	0,8979	0,6296
1,6	132,8	1114	505,2	0,0809	0,6329	0,6718
1,8	153,9	451	492,3	0,1044	0,2852	0,7293
2,0	152,2	39	447,6	0,1138	0,0271	0,7310
2,5	118,3	1	363,1	0,1090	0,0010	0,7309
3,0	57,8	0	311,3	0,0633	0,0000	0,7448

Таблица 4.6 – Показатели эффективности горения и величины выбросов

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

Поля скоростей, температур и концентрации кислорода в выходном окне (Рисунок 4.2) показывают крайнюю неравномерность распределения параметров, что определяет неэффективность процесса горения в топке.

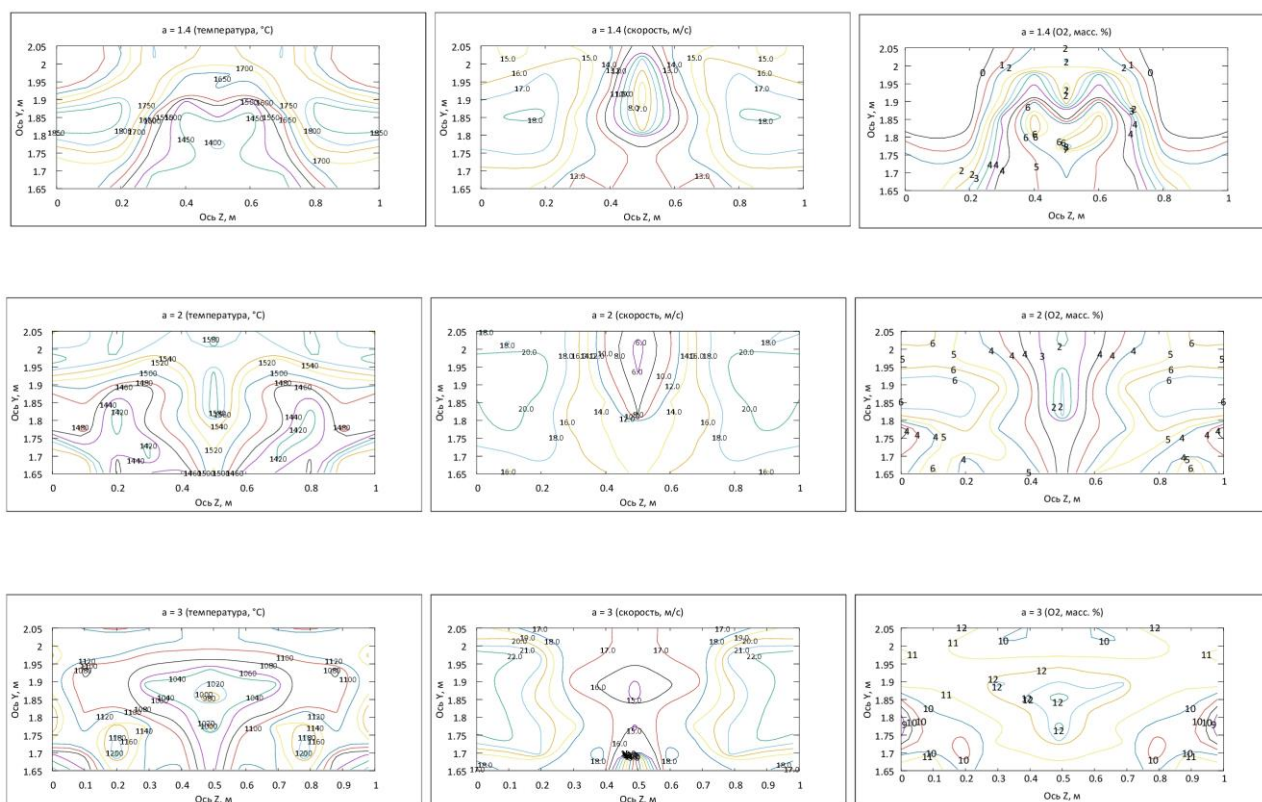


Рисунок 4.2 – Поля температур, скоростей и содержания кислорода в выходном окне топки

Данные Рисунка 4.2 показывают, что в части газового потока на выходе из топки отсутствует кислород, что определяет неполноту сгорания топлива и повышенное содержание вредных веществ.

4.1.2 Исследование горения при изменении геометрии топки (высоты печи и расположения выходного окна)

Сравнивая полученные результаты, можно заключить, что при повышении эффективности горения величина выбросов загрязняющих веществ так же повышается. Практически полное сгорание топлива происходит при $\alpha \geq 1,8$. Поэтому для дальнейших исследований выбран $\alpha = 1,4$, при котором в выходящих из топки газах присутствовало значительное количество несгоревшего топлива и высокая концентрация СО. Был проведен поиск возможности повышения эффективности сжигания не за счет увеличения коэффициента избытка воздуха, при котором температура сгорания снижается, а за счет изменения геометрии печи.

Для исследования геометрических характеристик пространства печи с точки зрения эффективности сгорания было рассмотрено несколько вариантов геометрии топки (Рисунок 4.3).

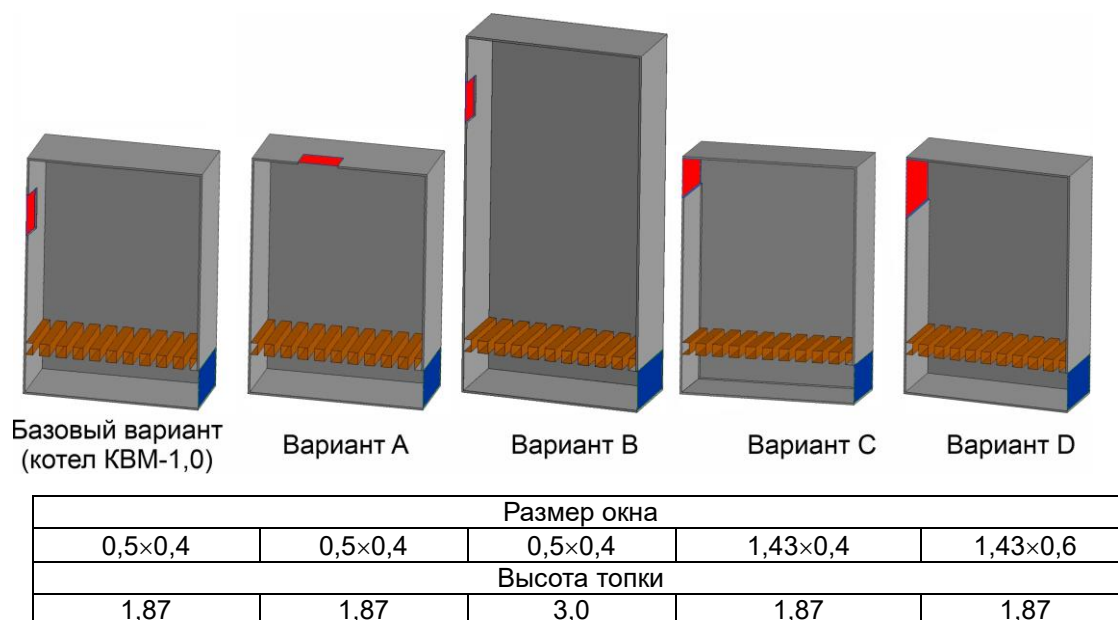


Рисунок 4.3 – Схема топки котла

В вариант «А» выходное окно газов, расположенное в котле КВМ -1.0 ниже свода топки (из-за ее увеличенного размера), перемещено под свод топки с сохранением размеров. В варианте «В» высота топки увеличена на 1,13 м (до трех метров) . В вариантах «С» и «D» увеличен размер выходного окна.

По результатам моделирования (средним значениям рассчитываемых переменных по выходному сечению «Outlet») (Таблица 4.7) были рассчитаны следующие данные: объемные концентрации химических соединений – компонентов продуктов горения (Таблица 4.8) , расход загрязняющих (вредных) веществ NO_x , CO и SO_2 (Таблица 4.9), определены критерии тепловой эффективности работы топки и полноты сгорания и обобщенный критерий выбросов, включающий NO_x , CO и SO_2 (Таблица 4.10).

Рисунок 4.4 иллюстрирует распределение температур в потоке газа.

Таблица 4.7 – Средние температура и состав газов в выходном окне
(результаты расчета Ansys Fluent, $\alpha = 1,4$)

Коэффициент избытка воздуха α	T, K	Массовая доля, кг/кг								
		O ₂	CO	CO ₂	NO _x	N ₂	H ₂ O	SO ₂	Летучие	Сумма
Базовый вариант	1730	0,06135	0,00175	0,17869	0,00007	0,64807	0,09974	0,00122	0,00910	1,000
Вариант А	1703	0,06046	0,00263	0,17911	0,00003	0,64530	0,10130	0,00124	0,00993	1,000
Вариант В	1698	0,06043	0,00229	0,18262	0,00004	0,64026	0,10282	0,00126	0,01028	1,000
Вариант С	1697	0,06072	0,00194	0,18048	0,00006	0,64407	0,10138	0,00124	0,01010	1,000
Вариант D	1662	0,06135	0,00175	0,17869	0,00007	0,64807	0,09974	0,00122	0,00911	1,000

Таблица 4.8 – Средний состав газов в выходном окне, об. %

Наименование	O ₂	CO ₂	H ₂ O	N ₂	CO	NO _x	SO ₂	Летучие	Сумма
Базовый вариант	5,48	11,52	15,80	66,10	0,1788	0,0069	0,05	0,87	100
Вариант А	5,39	11,54	16,03	65,76	0,2680	0,0027	0,05	0,95	100
Вариант В	5,39	11,77	16,28	65,28	0,2337	0,0036	0,05	0,98	100
Вариант С	5,42	11,64	16,05	65,67	0,1979	0,0054	0,05	0,96	100
Вариант D	5,48	11,52	15,80	66,10	0,1788	0,0069	0,05	0,87	100

Таблица 4.9 – Среднее содержание вредных веществ в выходном окне

Наименование	NO _x , ppm	CO, ppm	SO ₂ , ppm	NO _x , г/с	CO, г/с	SO ₂ , г/с
Базовый вариант	69,5	1788	532	0,0375	0,8999	0,6268
Вариант А	27,4	2680	540	0,0148	1,3485	0,6365
Вариант В	35,6	2337	549	0,0192	1,1758	0,6464
Вариант С	54,0	1979	541	0,0291	0,9960	0,6374
Вариант D	69,5	1788	532	0,0375	0,8999	0,6268

Таблица 4.10 – Показатели эффективности горения и величины выбросов

Наименование	КПД топки η_t , %	Доля несгоревших горючих веществ топлива F_{uf} , %	Критерий выбросов	
			E , г/с	e , г/МВт
Базовый вариант	85,6%	6,90%	0,324	0,324
Вариант А	83,8%	7,73%	0,323	0,323
Вариант В	82,1%	7,88%	0,325	0,325
Вариант С	82,3%	7,65%	0,324	0,324
Вариант D	80,6%	6,90%	0,324	0,324

4.1.1 Исследование горения при изменении температуры воздуха

В заключение была изучено влияние на эффективность горения температуры воздуха, подаваемого в топку при расходе воздуха, соответствующем $\alpha = 1,4$. Использовалась схема варианта D, как обеспечивающая наименьший недожог. Температура воздуха, подаваемого в котел, задавалась 200 и 400 °С (473 и 673 К). Результаты вычислений представлены на рис 4.5.

По результатам моделирования (средним значениям рассчитываемых переменных по выходному сечению «Outlet») (Таблица 4.11) были рассчитаны следующие данные: объемные концентрации химических соединений – компонентов продуктов горения (Таблица 4.12), расход загрязняющих (вредных) веществ NO_x , CO и SO_2 (Таблица 4.13), определены критерии тепловой эффективности работы топки и полноты сгорания и обобщенный критерий выбросов, включающий NO_x , CO и SO_2 (Таблица 4.14).

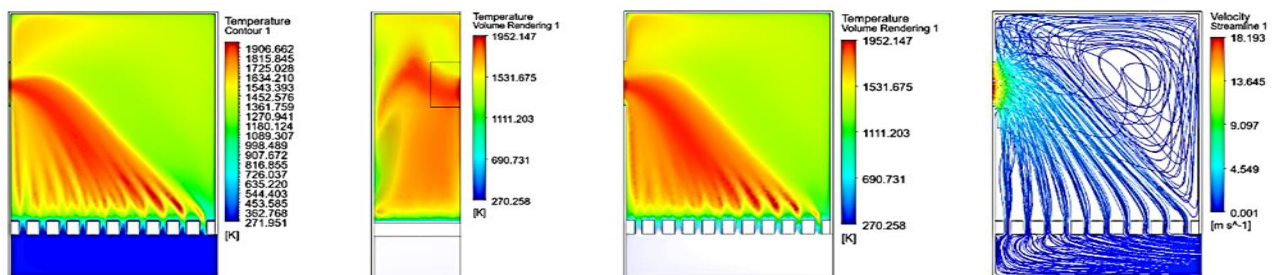
Таблица 4.11 – Средние температура и состав газов выходном окне
(результаты расчета Ansys Fluent)

Наименование	T, K	Массовая доля, кг/кг								
		O ₂	CO	CO ₂	NO _x	N ₂	H ₂ O	SO ₂	Летучие	Сумма
Базовый вариант ($t_b=0^\circ\text{C}$)	1662	0,06135	0,00175	0,17869	0,00007	0,64807	0,09974	0,00122	0,00911	1,000
$t_b=200^\circ\text{C}$	1805	0,05944	0,00268	0,18508	0,00008	0,63520	0,10451	0,00128	0,01174	1,000
$t_b=400^\circ\text{C}$	1902	0,06005	0,00186	0,17810	0,00028	0,64661	0,10038	0,00123	0,01149	1,000

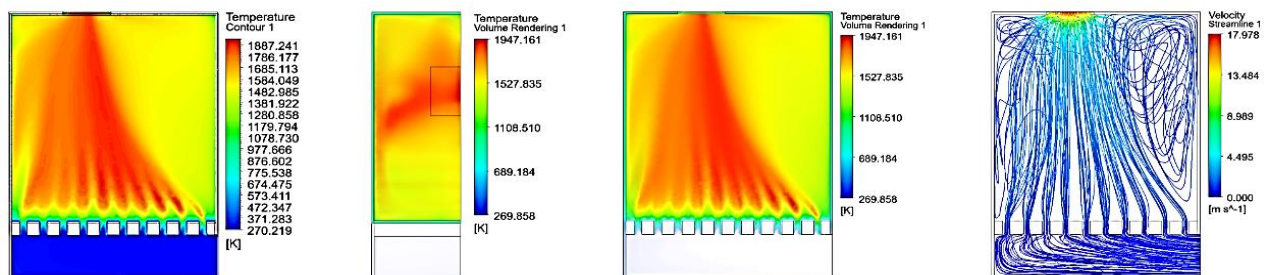
Таблица 4.12 – Средний состав газов в выходном окне, об. %

Наименование	O ₂	CO ₂	H ₂ O	N ₂	CO	NO _x	SO ₂	Летучие	Сумма
Базовый вариант ($t_b=0^\circ\text{C}$)	5,48	11,52	15,80	66,10	0,1788	0,0069	0,05	0,87	100
$t_b=200^\circ\text{C}$	5,30	11,93	16,55	64,76	0,2730	0,0072	0,06	1,12	100
$t_b=400^\circ\text{C}$	5,36	11,48	15,89	65,91	0,1894	0,0264	0,05	1,09	100

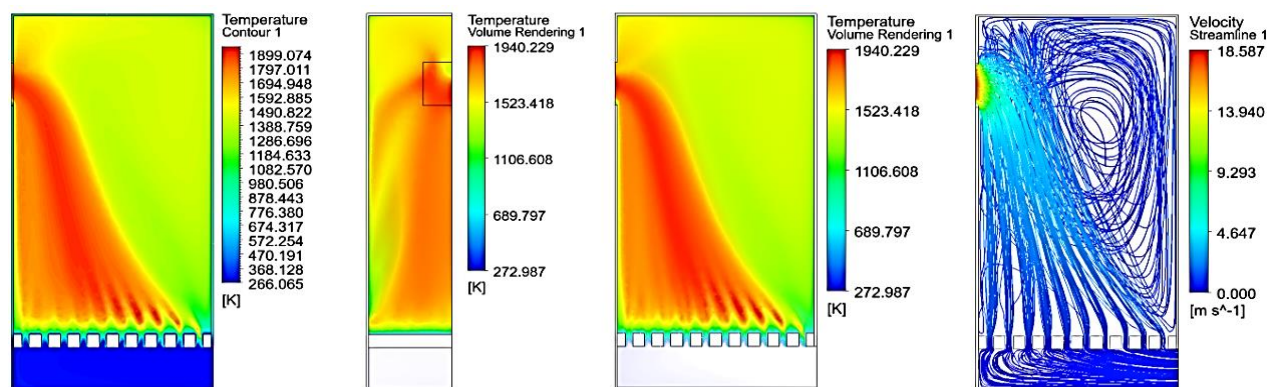
Базовый вариант



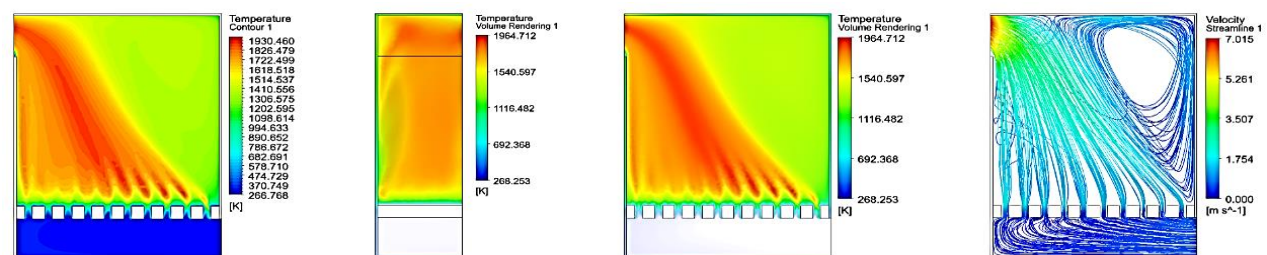
Вариант А



Вариант В



Вариант С



Вариант D

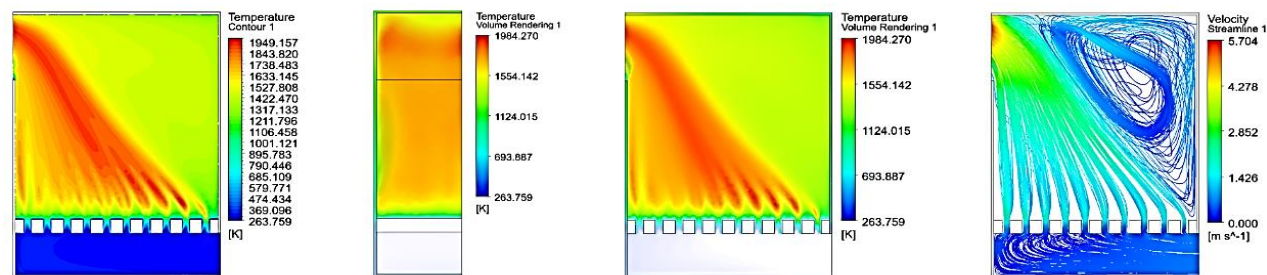


Рисунок 4.4 – Поля температуры и скорости в секции котла

Таблица 4.13 – Среднее содержание вредных веществ в выходном окне

Наименование	NO _x , ppm	CO, ppm	SO ₂ , ppm	NO _x , г/с	CO, г/с	SO ₂ , г/с
Базовый вариант ($t_B=0^\circ\text{C}$)	69,5	1788	532	0,0375	0,8999	0,6268
$t_B=200^\circ\text{C}$	71,7	2730	558	0,0387	1,3739	0,6570
$t_B=400^\circ\text{C}$	264,3	1894	536	0,1426	0,9529	0,6308

Таблица 4.14 – Показатели эффективности горения и величины выбросов

Наименование	КПД топки η_T , %	Доля несгоревших горючих веществ топлива F_{uf} , %	Критерий выбросов	
			E , г/с	e , г/МВт
Базовый вариант ($t_B=0^\circ\text{C}$)	80,6%	6,90%	0,324	0,324
$t_B=200^\circ\text{C}$	79,9%	9,02%	0,356	0,356
$t_B=400^\circ\text{C}$	79,0%	8,60%	0,433	0,433

Рисунок 4.5 иллюстрирует распределение температур в потоке газа.

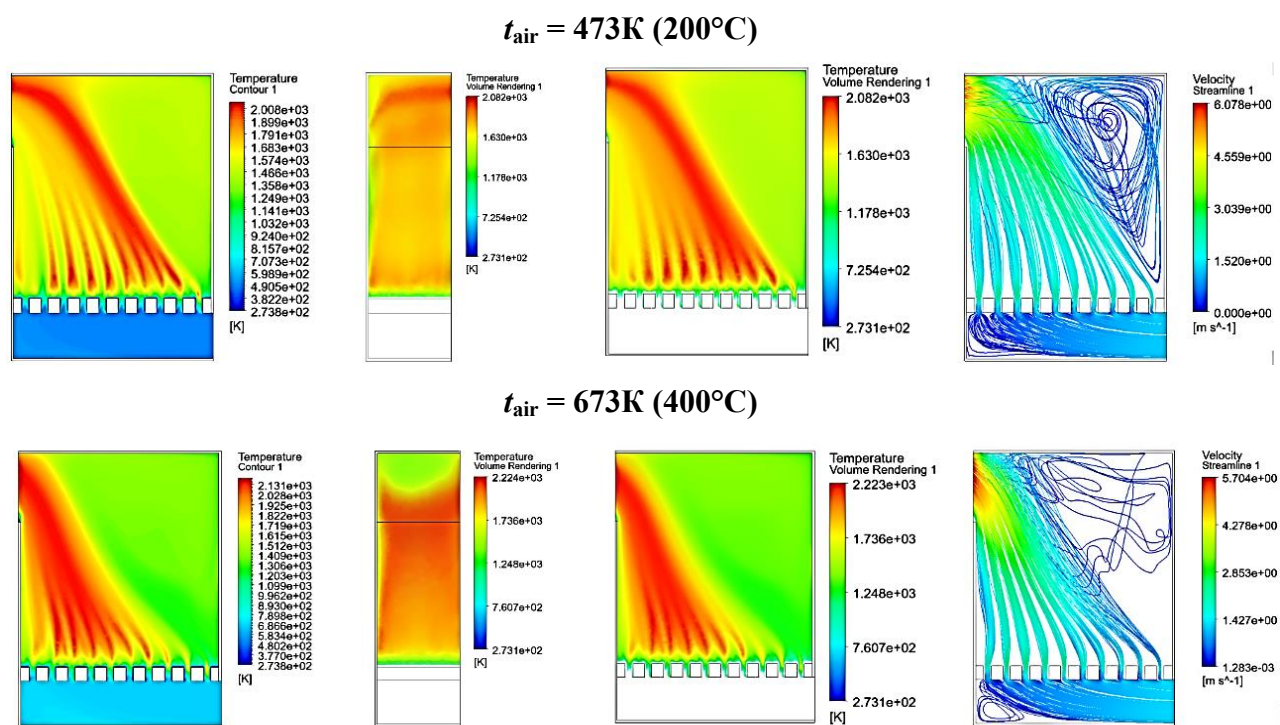


Рисунок 4.5 – Поля температур и скоростей в секции котла
(при изменении температуры воздуха t_{air} , вариант D)

Повышение температуры воздуха не привело к снижению недожога.

4.1.2 Анализ результатов моделирования горения

Основной показатель полноты горения – доля летучих (несгоревших соединений) на выходе из топки. В Ansys Fluent в узлах сетки определяется показатель содержания летучих $d_{\text{нт}}$ – «Mass fraction on volatiles», кг/кг. По этому значению, известному расходу топлива $g_{\text{т}}$ и массовому расходу продуктов горения $g_{\text{пг}}$ (см. Таблицу 4.2) может быть рассчитана доля несгоревшего топлива (разд. 2.4).

Количество несгоревшего топлива на выходе из печи уменьшается по мере увеличения коэффициента избытка воздуха, достигая нуля при коэффициенте избытка воздуха $\alpha = 1,8$, как показано на Рисунке 4.6. Изменение размеров топки, размеров и положения выходного окна, температуры воздуха на долю несгоревшего топлива влияния не оказывает.

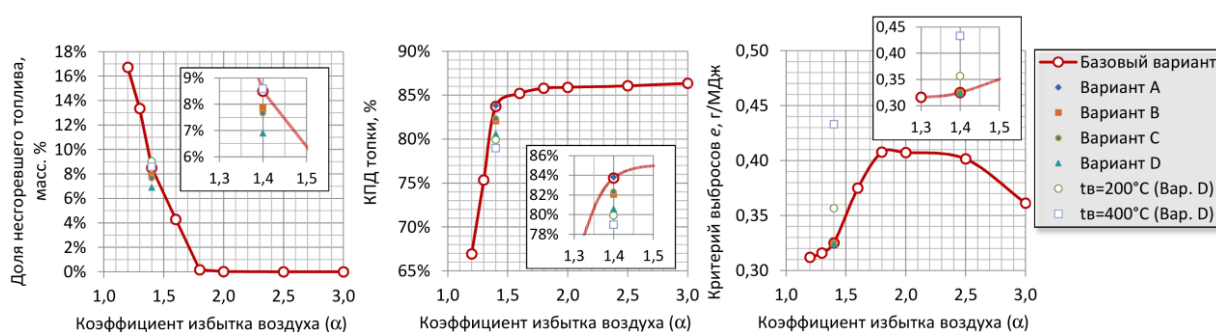


Рисунок 4.6 – Доля несгоревшего топлива F_{uf} и КПД топки при различных коэффициентах избытка воздуха, разной геометрии топок и температуре воздуха

Содержание СО на выходе из топки характеризует полноту сгорания топлива. При увеличении коэффициента избытка воздуха его содержание снижается, что показывает повышение полноты горения (Рисунок 4.7). Значение СО становится равным нулю при $\alpha = 2$.

Содержание SO_2 зависит от состава топлива. Поэтому массовый расход SO_2 , мг/с, зависит только от массового расхода сгоревшего топлива (Рисунок 4.7). При уменьшении доли несгоревшего топлива массовый расход SO_2 увеличивается и после достижения $F_{\text{uf}} = 0\%$ он становится постоянным.

Влияние избытка воздуха на образование оксидов азота описывается экстремальной зависимостью с максимумом при $\alpha = 1,15 \dots 1,25$ для газомазутных котлов и $\alpha = 1,4 \dots 1,5$ для пылеугольных котлов в зависимости от конструкции горелочных устройств и состояния топочной камеры [203, 204]. Можно предположить, что для твердого топлива более низкого качества максимальное значение образования оксидов азота будет еще при более высоком значении α . Наибольшее значение образования оксидов азота при горении ТКО при коэффициенте избытка воздуха $\alpha = 1,8 \dots 2,0$ (Рисунок 4.7). При значениях α больше двух образование оксидов азота начинает снижаться из-за уменьшения температуры горения.

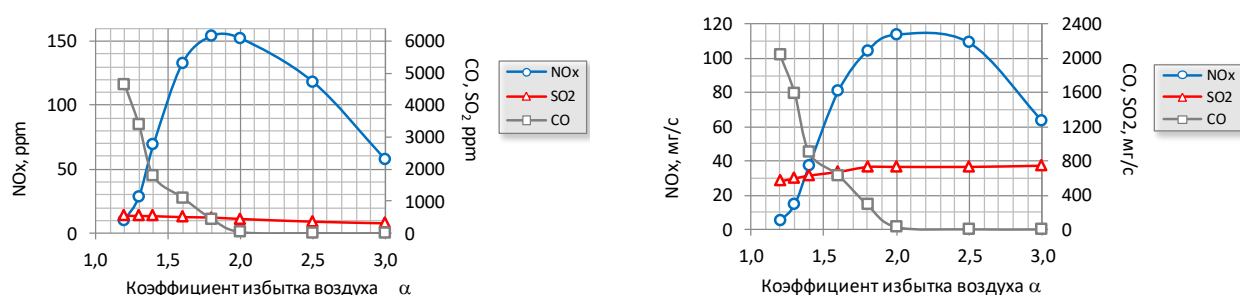


Рисунок 4.7 – Среднее содержание NO_x , CO и SO_2 в окне выхода из печи (базовый вариант)

Можно заключить, что полученные результаты моделирования согласуются с основными теоретическими положениями в области горения топлива.

При моделировании определялись две величины температур:

- средняя температура газов в сечении выходного окна T_{out} ;
- максимальная температура в топке T_{max} .

На Рисунке 4.8 показаны полученные в результате моделирования значения этих температур и приведена расчетная адиабатная температура горения при разном α (Таблица 4.2). При полном сгорании топлива температура продуктов горения (T_{out}) должна уменьшаться, но из-за того, что топливо сгорает не полностью, до значения $\alpha = 1,6$ средняя температура газов на выходе из топки почти не изменяется. После того, как топливо начинает сгорать полностью, температура продук-

тов начинает снижаться с такой же интенсивностью, как и T_{ad} . Разность между значениями T_{ad} и T_{out} объясняется потерями теплоты через стенки топки котла.

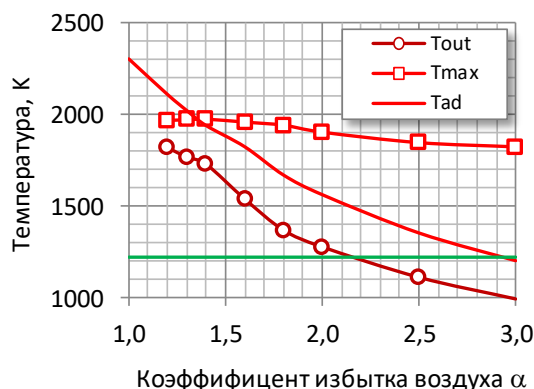


Рисунок 4.8 – Температуры в котле при изменении коэффициента избытка воздуха:
 T_{out} – средняя температура в выходном окне; T_{max} – максимальная температура в топке; T_{ad} – температура горения адиабатная

Максимальная температура в топке находится над слоем топлива в зоне горения (Рисунок 4.9). Она зависит от скорости химической реакции горения, скорости поступления кислорода в зону горения. Поэтому, в отличие от адиабатной температуры горения и средней температуры на выходе из топки она мало зависит от коэффициента избытка воздуха. При увеличении α продукты горения после зоны максимальной температуры разбавляются избыточным воздухом, снижая среднюю температуру газов.

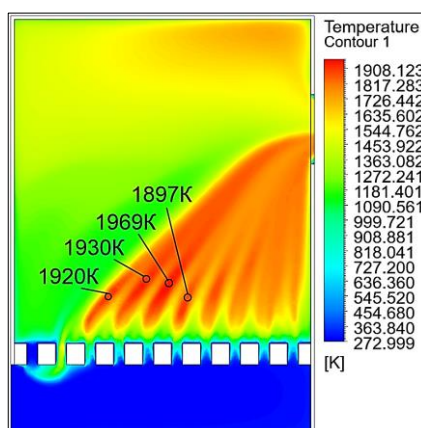


Рисунок 4.9 – Положение максимальных температур в печи ($\alpha = 1,2$)

При повышении температуры вторичного воздуха ожидаемо увеличивается максимальная температура в топке и температура продуктов горения на выходе из нее (Рисунок 4.10) – повышение температуры вторичного воздуха на 200K

приводит к увеличению максимальной температуре и температуре на выходе из топки примерно на 100К. Увеличение T_{out} и T_{ad} имеют аналогичный характер.

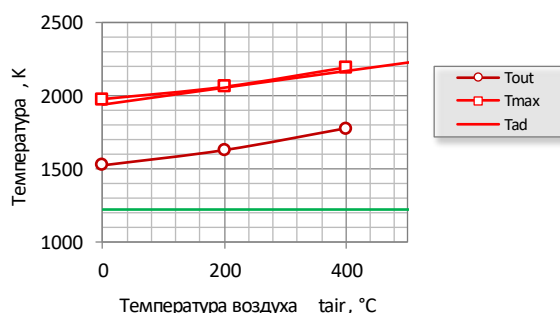


Рисунок 4.10 – Температуры в котле при изменении температуры воздуха:
 T_{out} – средняя температура в выходном окне; T_{max} – максимальная температура в топке;
 T_{ad} – температура горения адиабатная

На рис 3.6. и 4.8 зеленой линией показана температура 850°C (1123K), при которой достигается полное сжигание опасных соединений. Ниже этого значения температура продуктов горения становится при значении коэффициента избытка воздуха α больше, чем 2,35.

В результате получено противоречие – изменение коэффициента избытка воздуха не позволяет одновременно обеспечить низкие значений выбросов загрязняющих веществ и полное сгорания топлива. Поэтому предлагается сжигать отходы с минимально возможным количеством воздуха и обеспечить дожиг несгоревшего топлива и вредных веществ после топки.

4.2 ВЫБОР УСЛОВИЙ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПОЛНОГО СГОРАНИЯ ТОПЛИВА И ДОЖИГА ВРЕДНЫХ ВЫБРОСОВ

4.2.1 Условия полного разрушения находящихся в продуктах сгорания отходов органических вредных веществ

Для разрушение загрязняющих соединений требуются высокие температуры. Согласно европейским и российским нормативным документам, для этого продукты сгорания должны находиться при температурах свыше 850°C (1123 K) не менее двух секунд (далее «Требование 2 сек./850°»). . Если же в отходах со-

держание галогенорганические соединений более 1%, температура должна быть 1100°C и более.

Сжигание твердого топлива начинается с газификации и пиролиза при повышенных температурах в присутствии окисленного воздуха, проходящего через проходы между топливными элементами в неподвижном слое. Также важно обеспечить эффективное горение, которое во многом зависит от соотношения избытка воздуха и топлива [205, 206]. Ряд источников рекомендует избегать резкого изменения направления продуктов горения [207, 208], выделять в установках две зоны – горения и дожига [209], что требует детальных и точных расчетов теплотехнических и аэродинамических процессов в топочной камере. Особенно это касается топок, работающих на твердом топливе [210].

Условия эффективного горения топлива следующие [195]: отсутствие продуктов неполного горения (в основном CO, так же CH_4 , H_2); образование загрязняющих соединений не выше установленных норм. Предлагается для обеспечения «Требования 2 сек./850°» производить дожиг загрязняющих соединений в газоходе, расположенном после топки водогрейного котла перед его конвективной частью.

Известен ряд применений газоходов в различных аппаратах для улучшения тепло- и массообмена [211], в том числе в водогрейных и, отчасти, в паровых котлах [212]. Газоходы должны соответствовать определенным эксплуатационным стандартам, и могут отличаться по размеру, конфигурации и методам сборки, влияя на геометрические характеристики котлов и теплообменников, которые непосредственно влияют на условия протекания процессов горения [213, 214].

В качестве первоначального приближения для котла КВМ -1,0 была рассчитаны необходимые размеры газохода, обеспечивающие «Требование 2 сек./850°» (Таблица 4.15). Но данные результаты соответствуют равномерному движению продуктов сгорания с постоянной скоростью по поперечному сечению. При образовании вихрей, изменении направления потока, часть газов будет иметь более высокую скорость, и, следовательно, меньшее время прохождения.

Таблица 4.15 – Параметры газохода для дожига загрязняющих соединений

Вид топлива	Дрова	Антрацит	Каменный уголь	Торф	Бурый уголь	ТКО, с влажностью		
						50%	30%	10%
Состав топлива, %								
углерод C ^p	40,5	60,030	44,3	29,476	34,39	19,1	26,7	34,30
кислород O ^p	33,8	0,930	14,4	16,498	10,98	12,8	17,9	23,00
водород H ^p	4,8	1,020	3	3,018	2,51	2,5	3,6	4,60
азот N ^p	0,1	0,640	0,4	1,107	0,55	0,5	0,7	0,90
сера S ^p	0	2,020	0,2	0,201	0,57	0,1	0,2	0,30
зольность A ^p	0,8	27,360	4,7	4,7	17,66	15	20,9	26,90
влажность W ^p	20	8,000	33	45	33,34	50	30	10
Теплота сгорания, кДж/кг (низшая)	14 487	21 319	15 732	10 195	12 272	6 411	10 077	13 640
Объем продуктов горения (при нормальных условиях), м ³ /МДж	0,40	0,37	0,40	0,45	0,41	0,52	0,41	0,36
Температуры, °С								
горения теоретическая $t_{\text{теор}}$	1489	1615	1472	1310	1429	1137	1387	1537
горения калориметрическая $t_{\text{кал}}$	1493	1637	1475	1310	1430	1137	1387	1546
действительная в выходном окне топки $t_t = 0,86 \cdot t_{\text{кал}}$	1284	1407	1268	1127	1230	978	1193	1330
Геометрические параметры газохода, обеспечивающие нахождение газов 2 сек (при условии равномерности скорости в поперечном сечении)								
Необходимая площадь вертикального газохода, м ² (при его высоте 2,375 м)								
при действительной температуре горения t_t	1,94	1,90	1,91	1,95	1,90	1,99	1,86	1,80
при $t_t = 850^\circ\text{C}$	1,40	1,27	1,39	1,57	1,42	1,79	1,43	1,26
Необходимая длина горизонтального газохода сечением 2х1 м, м								
при действительной температуре горения t_t	2,30	2,26	2,26	2,32	2,26	2,37	2,21	2,14
при $t_t = 850^\circ\text{C}$	1,66	1,51	1,65	1,86	1,69	2,12	1,69	1,50

4.2.1 Рассматриваемые схемы горения

Основными характеристиками горизонтального газохода для печей, работающих на твердом топливе, являются его геометрия, горизонтальные дымовые трубы, входные и выходные отверстия. Такая схема предполагает оптимизацию конкретных параметров и пространственных ограничений, принципы которой согласуются с возможностью достижения высоких скоростей и больших концентраций углекислого газа и летучих веществ в потоке дымовых газов на выходе из газохода [215, 216]. Геометрическая схема газохода выбирается исходя из предположения, что этот газоход должен обеспечивать благоприятную аэродинамику для внутренних аэродинамических контуров и высокие скорости вращения пламени. Сечения каналов устанавливаются с учетом коэффициента граничного пристенного трения, а также определенного оптимального значения поперечного сечения для газового потока. Проектирование горизонтальных газовых каналов для камеры сгорания твердого топлива зависит от:

- скорости теплопередачи по длине и поперечному сечению должна быть достаточной для отвода необходимого количества тепла, образующегося для предотвращения перегрева материала канала

- влияния коррозии на материал футеровки и воздействие высоких температур, продуктов сгорания и обрастания в пределах допустимого срока службы канала;

- распределения потока продуктов сгорания в многоканальном газоходе, подключенном к помещению/печи, должно быть близким к расчетному состоянию, чтобы снять ограничения по нагрузке и продлить срок службы [217].

Рассмотрены шесть вариантов расположения дополнительного газохода. Первоначально предлагалось его размещение между топкой водогрейного котла и трубчатым теплообменником (конвективным блоком) (Рисунок 4.11, вар. 1).

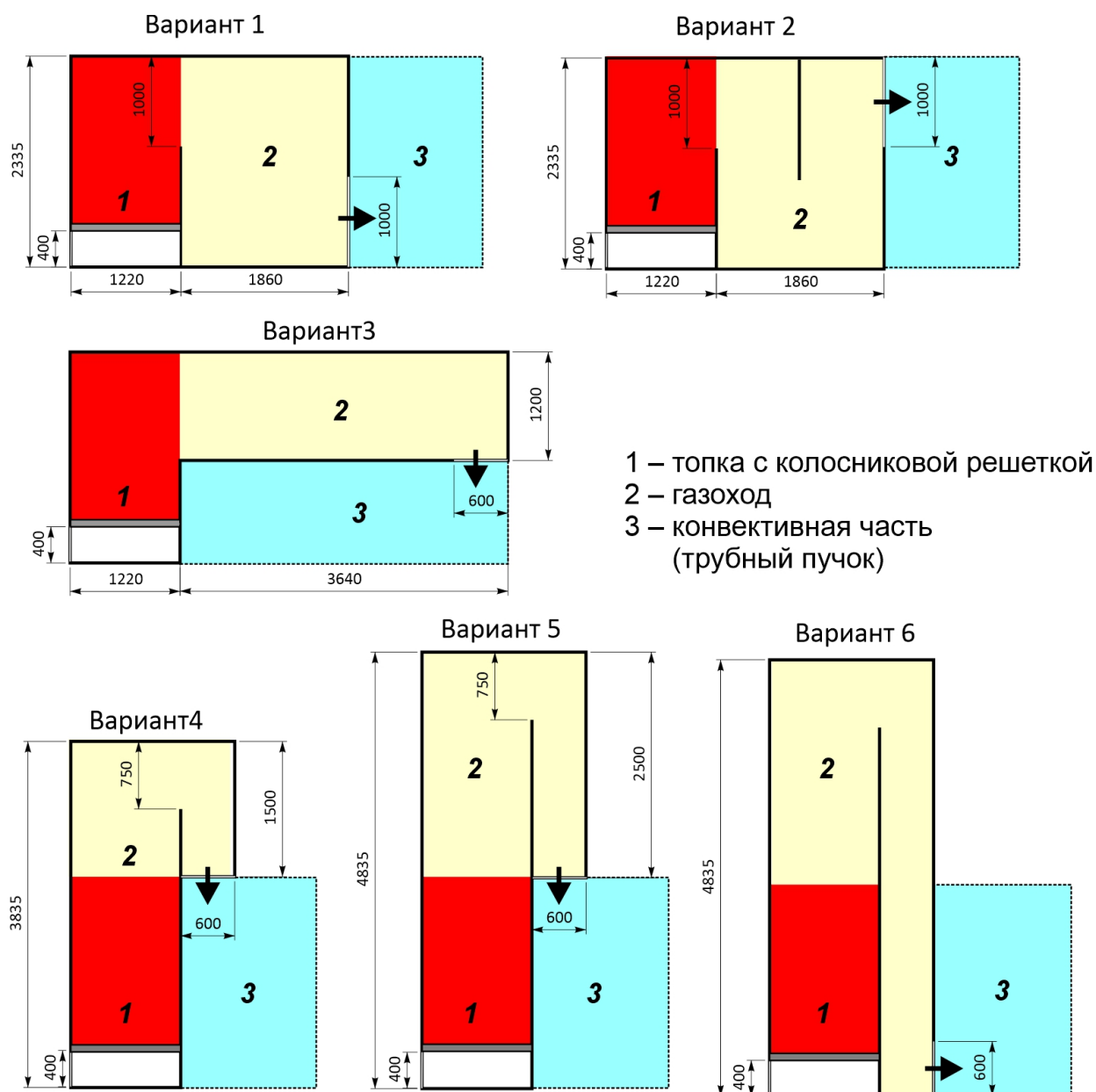


Рисунок 4.11 – Исследуемые варианты организации газохода

По результатам моделирования (приведённым далее) «Требование 2 сек./850°» не выполнялось. Установка в газоходе горизонтальной перегородки (вар. 2) или увеличить время прохождения не позволило, как и выполнение газохода в горизонтальном (вар. 3). Все три варианта приводили к значительному увеличению размеров котла, но из-за поворота после топки движение продуктов горения в газоходе было неравномерным. Поэтому далее был рассмотрен вертикальный газоход с разной высотой, расположенный как продолжение топки над ней (вар. 4-6).

4.2.2 Вариант 1. Газоход в виде дополнительной камеры между топкой и теплообменником

Результаты численного моделирования в ANSYS Fluent представлены на Рисунках 4.12 - 4.14. Гистограмма распределения линий тока продуктов сгорания по времени прохождения (Рисунок 4.14) показала, что требуемое время нахождения (более 2 с.) не достигается.

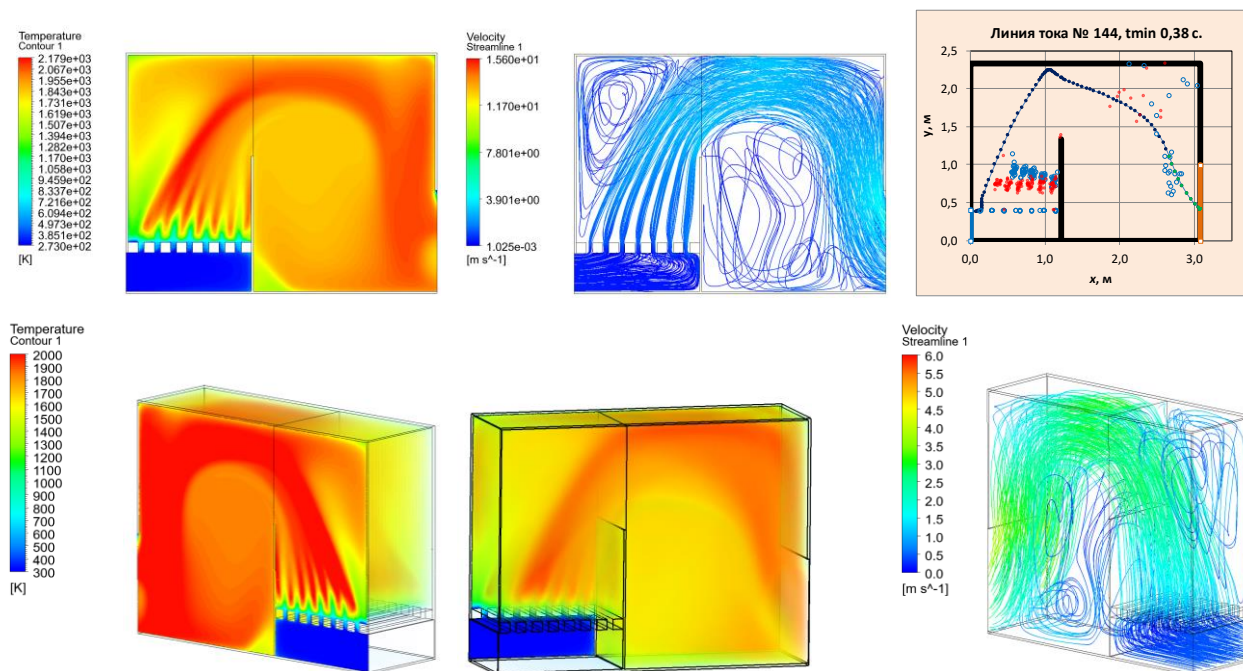


Рисунок 4.12 – Температурные поля и графическое изображение линии тока в котле и газоходе, изображение линии тока с минимальным временем нахождения продуктов горения после его завершения (вар. 1)

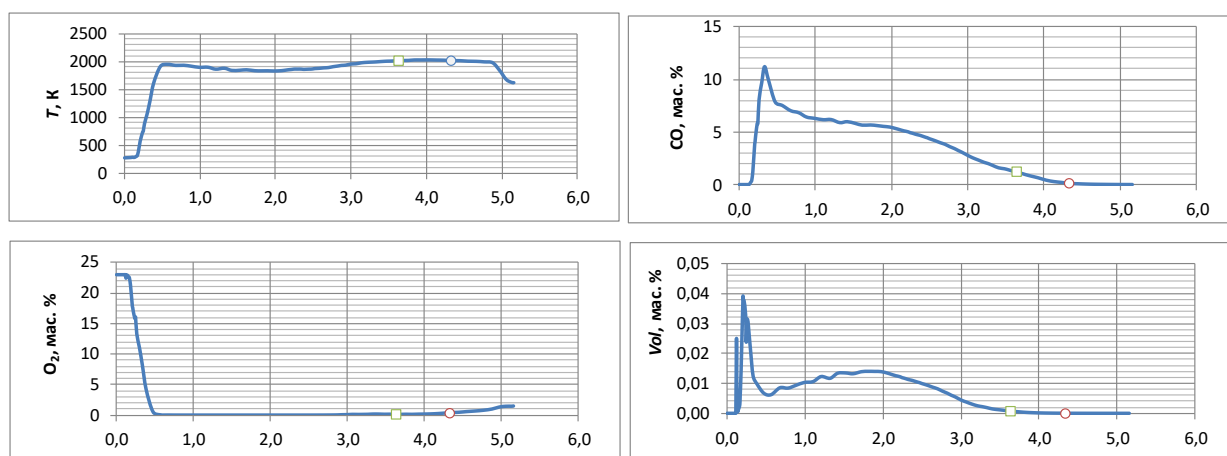


Рисунок 4.13 – Изменение параметров по длине линии тока и точки окончания горения для линии тока с минимальным временем нахождения продуктов горения после его завершения (вар. 1)



Рисунок 4.14 – Минимальное времени нахождения продуктов сгорания после завершения горения по всем линиям тока (вар. 1)

Для стабилизации газового потока рассмотрено уменьшение высоты выходного окна топки с 1000 до 400 мм (Рисунок 4.15). Требуемое время нахождения (более 2 с.) не достигается

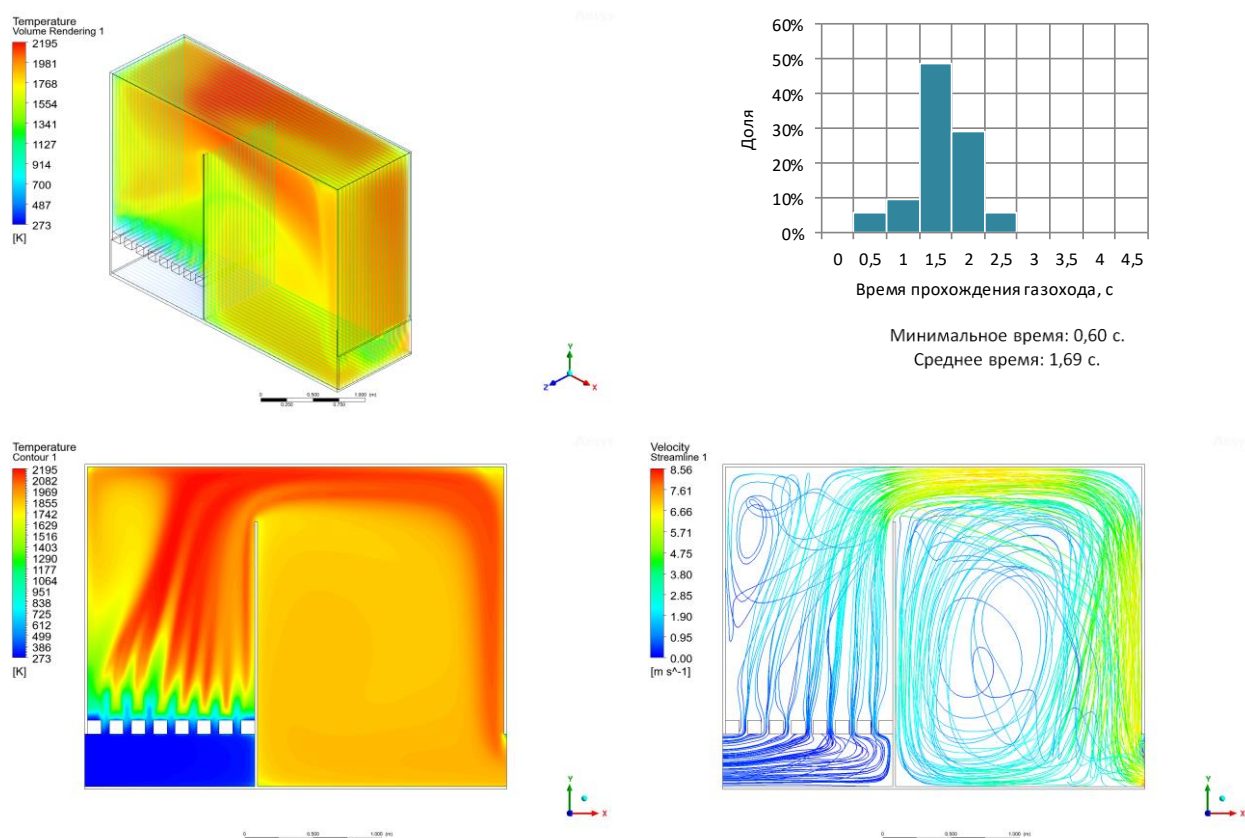


Рисунок 4.15 – Вертикальный газоход сечением 2000×1800 мм (3,6 м²), высота окон между топкой и газоходом и после газохода 400 мм

4.2.3 Вариант 2. Газоход в виде дополнительной камеры между топкой и теплообменником, разделенный перегородкой на две секции

Результаты численного моделирования в ANSYS Fluent для газохода, разделенного вертикальной стенкой высотой 1335 мм (при высоте газохода и топки 2335 мм), образующей вертикальные камеры с внутренним размером 1000 мм, с целью увеличения времени нахождения газов представлены на Рисунках 4.16 - 4.18.

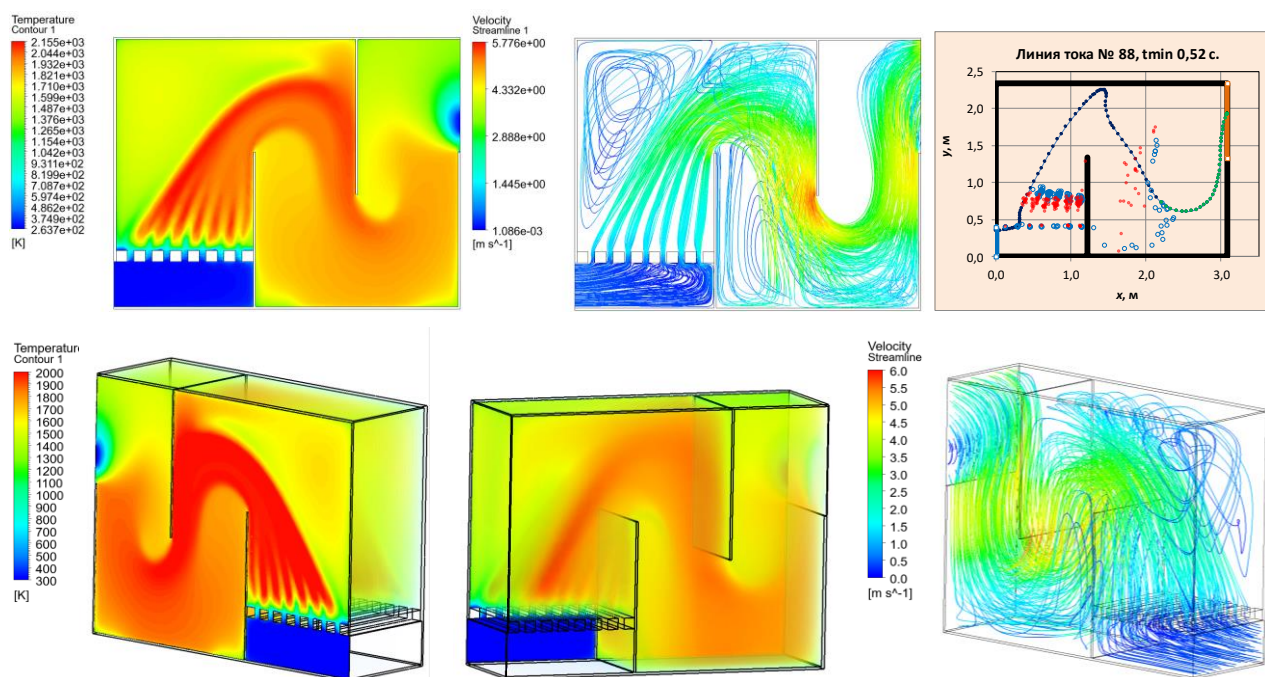


Рисунок 4.16 – Температурные поля и графическое изображение линии тока в котле и газоходе, изображение линии тока с минимальным временем нахождения продуктов горения после его завершения (вар. 2)

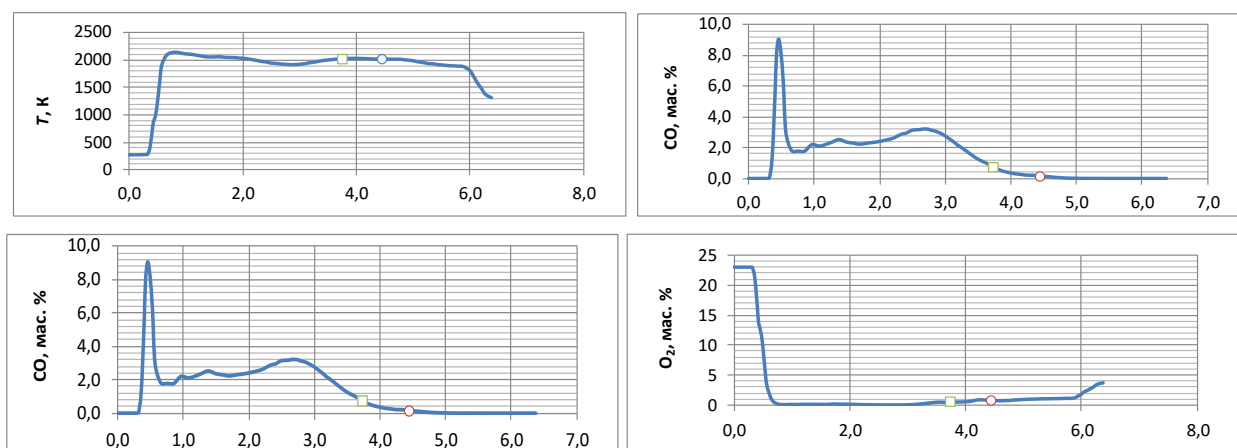


Рисунок 4.17 – Изменение параметров по длине линии тока и точки окончания горения для линии тока с минимальным временем нахождения продуктов горения после его завершения (вар. 2)

Гистограмма распределения линий тока продуктов сгорания по времени прохождения (Рисунок 4.18) показала, что требуемое время нахождения (более 2 с.) не достигается.

Так же было исследовано движение газов при увеличении высоты перегородки (уменьшении окна под ней), результаты представлены на Рисунках 4.19. Требуемого времени нахождения (более 2 с.) газов после окончания горения такое изменение достичь не позволило.

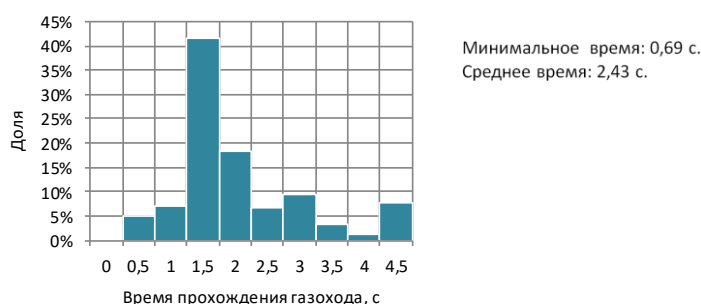


Рисунок 4.18 – Минимальное времени нахождения продуктов сгорания после завершения горения по всем линиям тока (вар. 2)

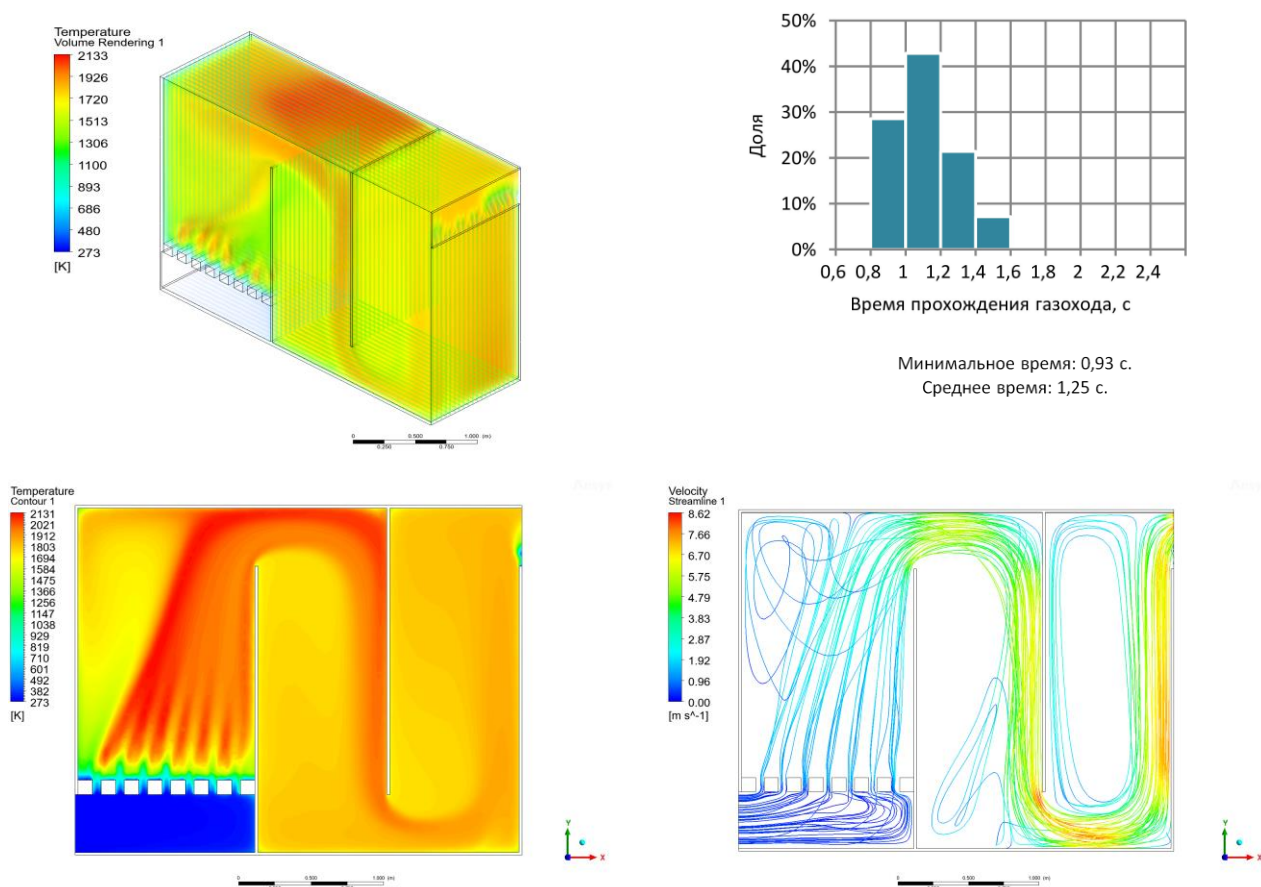


Рисунок 4.19 – Газоход разделен перегородкой, высота окон 400 мм

4.2.4 Вариант 3. Горизонтальный газоход

Результаты численного моделирования в ANSYS Fluent горизонтального газохода представлены на Рисунках 4.20 - 4.22. Гистограмма распределения линий тока продуктов сгорания по времени прохождения (Рисунок 4.12) показала, что требуемое время нахождения (более 2 с.) не достигается.

Время прохождения незначительно увеличилось, но поток газа так же, как и в вар. 1 и 2 в основном проходит вдоль стенок.

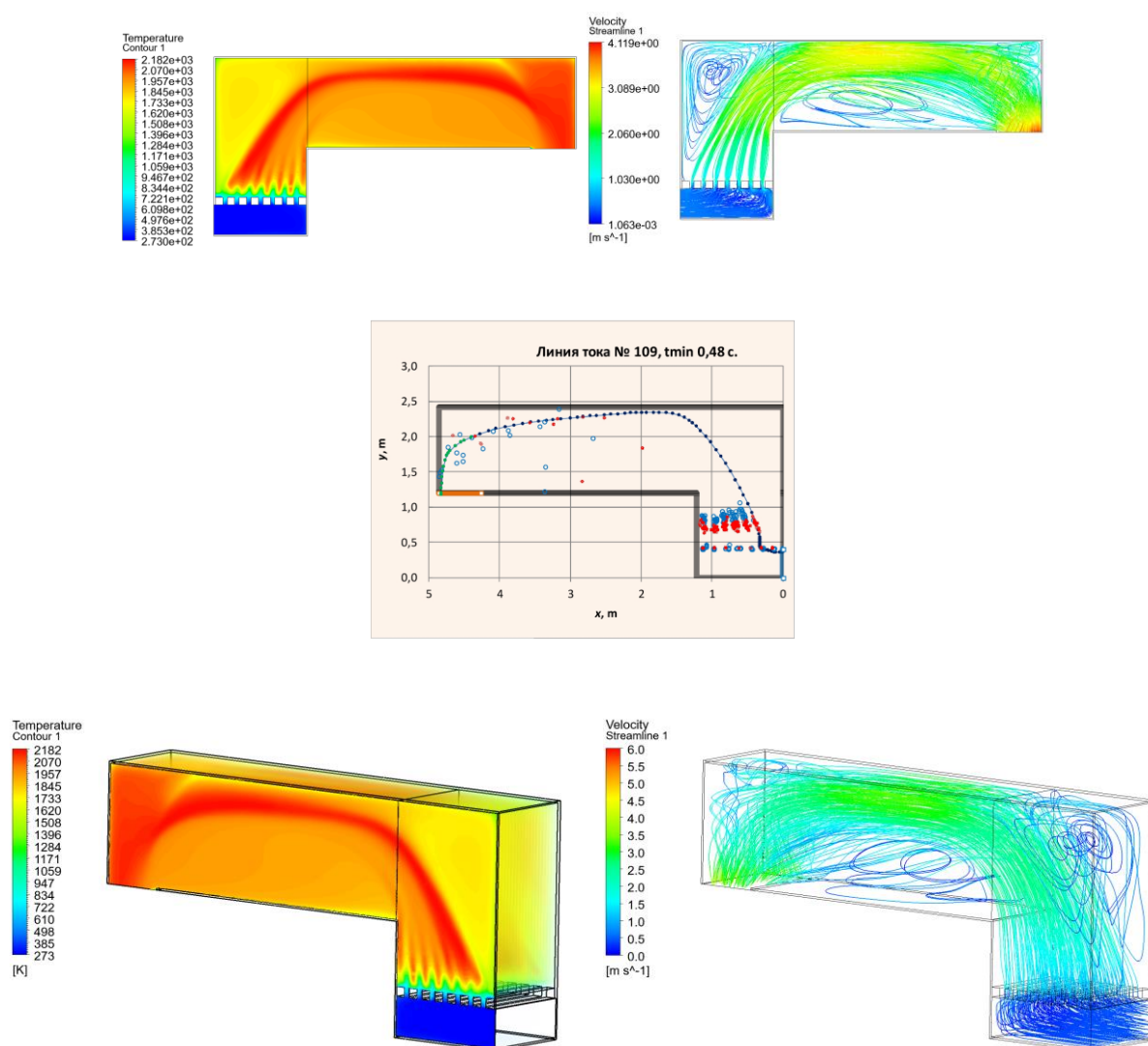


Рисунок 4.20 – Температурные поля и графическое изображение линии тока в котле и газоходе, изображение линии тока с минимальным временем нахождения продуктов горения после его завершения (вар. 3)

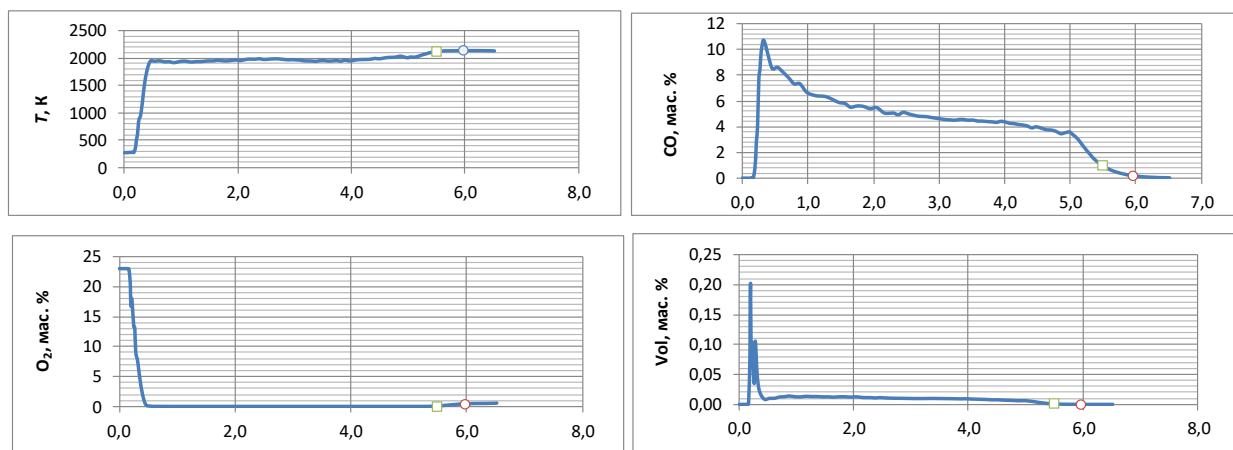


Рисунок 4.21 – Изменение параметров по длине линии тока и точки окончания горения для линии тока с минимальным временем нахождения продуктов горения после его завершения (вар. 3)

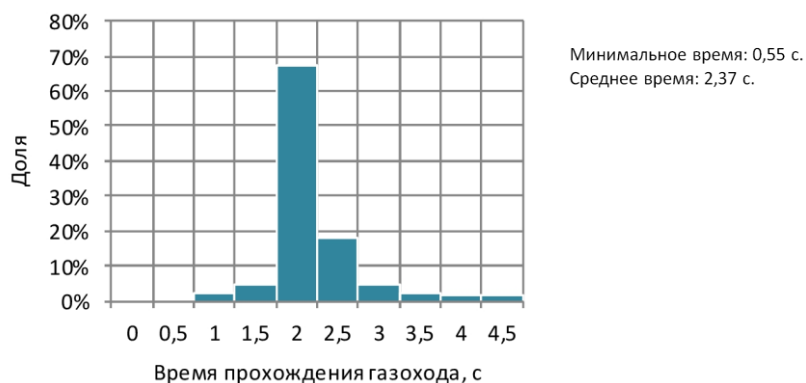


Рисунок 4.22 – Минимальное времени нахождения продуктов сгорания после завершения горения по всем линиям тока (вар. 3)

Рассмотренные вар. 1–3 имеют большой недостаток в виде значительных размеров газохода:

– вар. 1 и 2: объем $2 \text{ м} \times 1,86 \text{ м} \times 2,335 \text{ м} = 8,7 \text{ м}^3$,

– вар. 3: $2 \text{ м} \times 1,2 \text{ м} \times 3,64 \text{ м} = 8,7 \text{ м}^3$.

Объем топки при этом составляет $2 \text{ м} \times 1,22 \text{ м} \times 2,335 \text{ м} = 5,7 \text{ м}^3$.

4.2.5 Вариант 4. Вертикальный газоход над котлом высотой 1,5 м с поворотом газов на 180°

Результаты численного моделирования в ANSYS Fluent горизонтального газохода представлены на Рисунках 4.20 - 4.22. Вертикальные газовые каналы обеспечили равномерность потока газа.

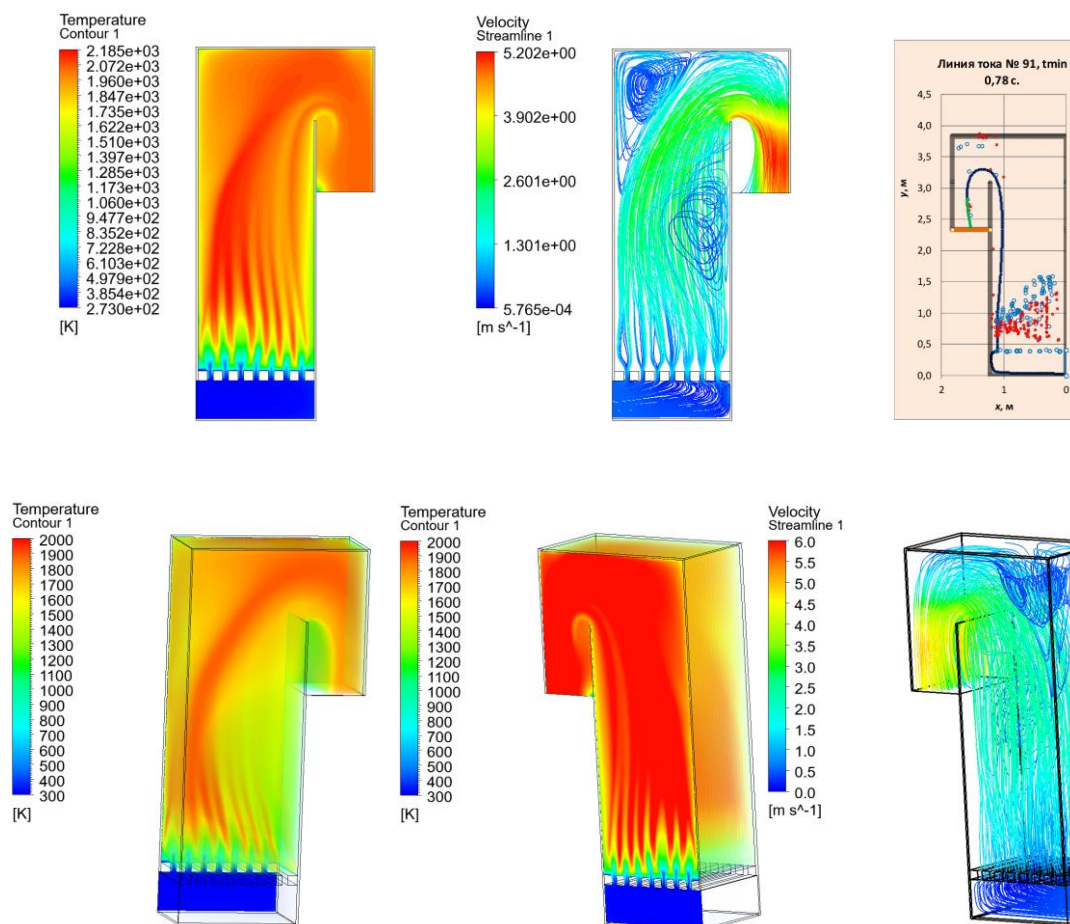


Рисунок 4.23 – Температурные поля и графическое изображение линии тока в котле и газоходе, изображение линии тока с минимальным временем нахождения продуктов горения после его завершения (вар. 4)

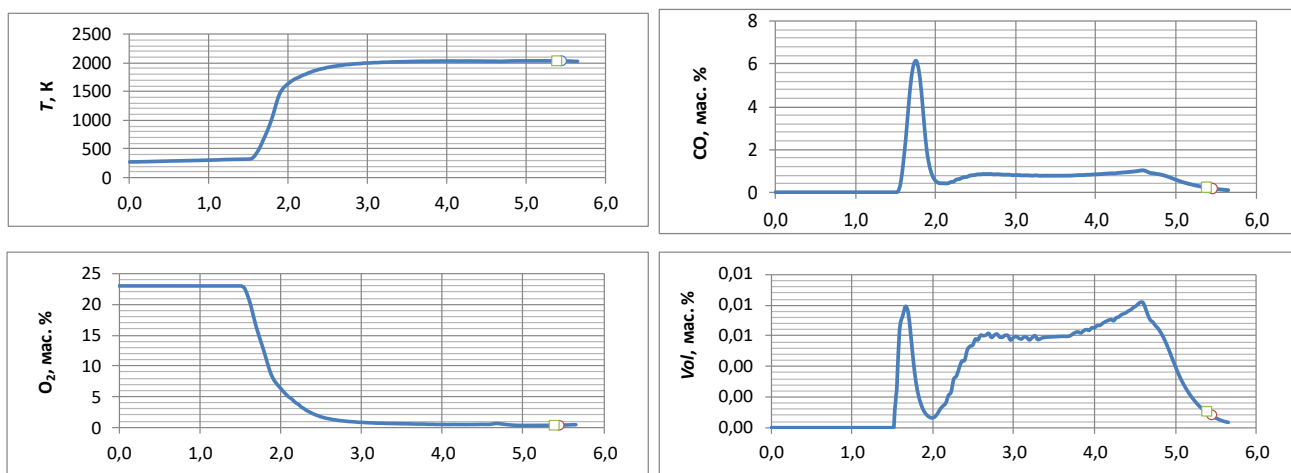


Рисунок 4.24 – Изменение параметров по длине линии тока и точки окончания горения для линии тока с минимальным временем нахождения продуктов горения после его завершения (вар. 4)

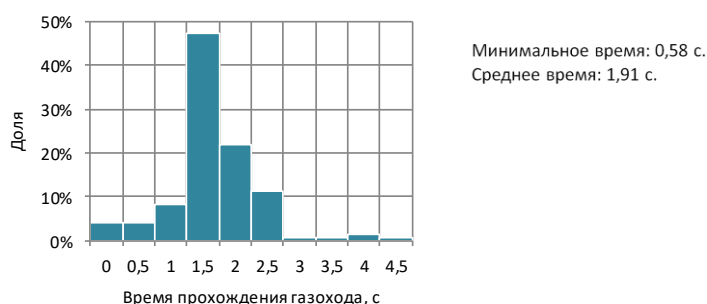


Рисунок 4.25 – Минимальное времени нахождения продуктов сгорания после завершения горения по всем линиям тока (вар. 4)

Гистограмма распределения линий тока продуктов сгорания по времени прохождения (Рисунок 4.12) показала, что требуемое время нахождения хотя и увеличилось, но значение 2 с. в ряде линий тока все равно не достигается.

4.2.6 Вариант 5. Вертикальный газоход над котлом высотой 2,5 м с поворотом газов на 180°

Результаты численного моделирования в ANSYS Fluent горизонтального газохода с увеличенной высотой представлены на Рисунках 4.26 - 4.28. Вертикальные газовые каналы обеспечили равномерность потока газа, что привело к необходимому времени пребывания газа (Рисунок 4.28).

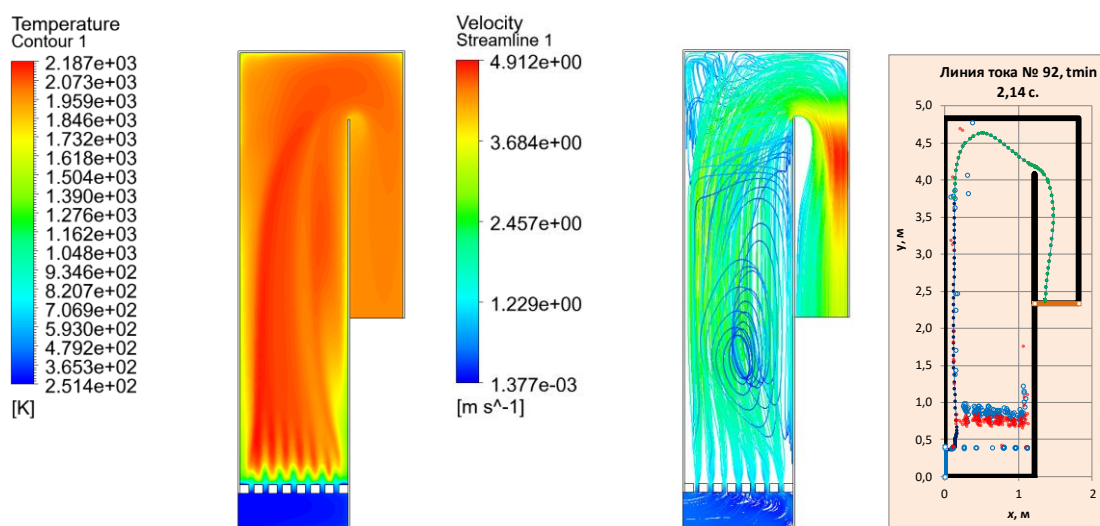


Рисунок 4.26 – Температурные поля и графическое изображение линии тока в котле и газоходе, изображение линии тока с минимальным временем нахождения продуктов горения после его завершения (вар. 5)

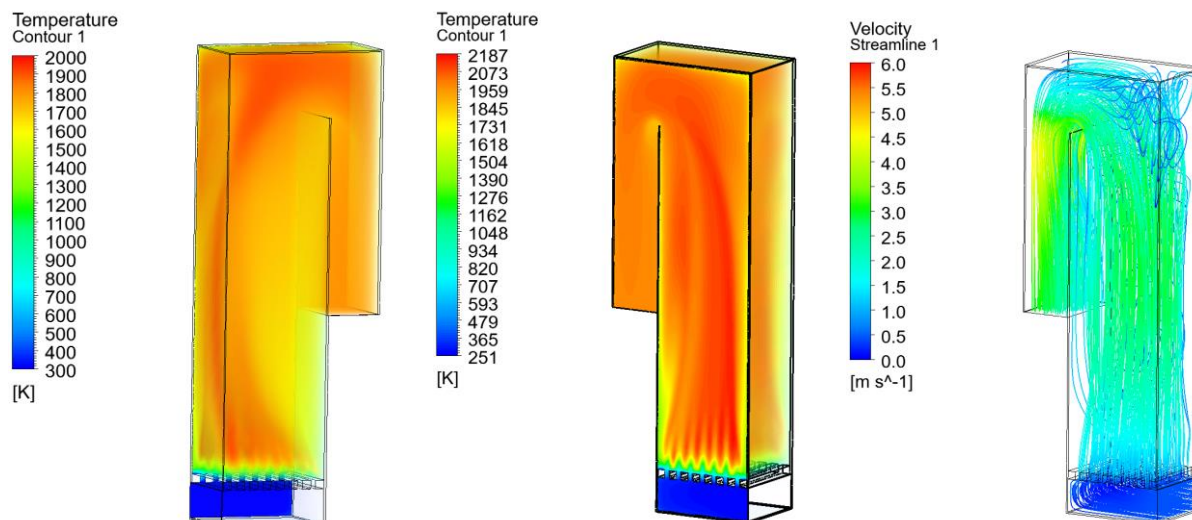


Рисунок 4.26 (продолжение) – Температурные поля и графическое изображение линии тока в котле и газоходе, изображение линии тока с минимальным временем нахождения продуктов горения после его завершения (вар. 5)

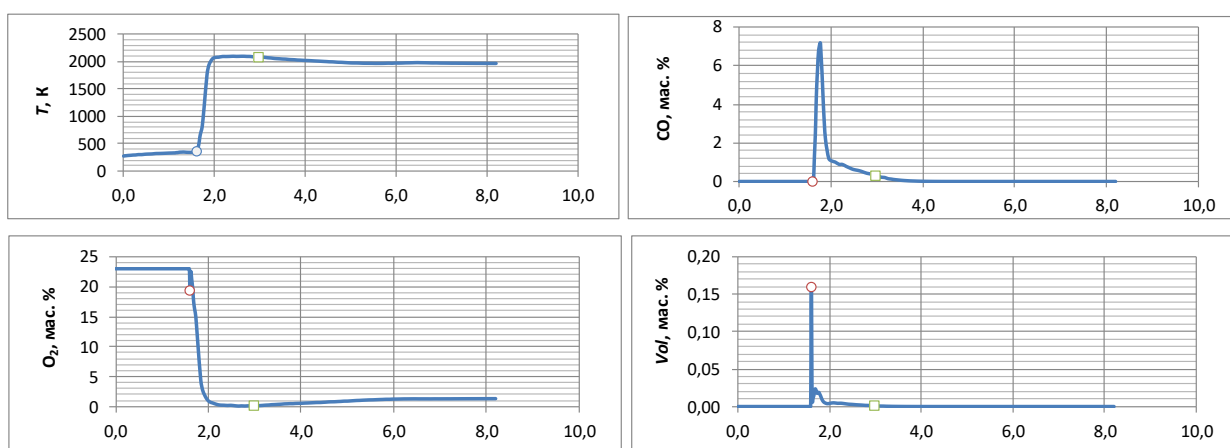


Рисунок 4.27 – Изменение параметров по длине линии тока и точки окончания горения для линии тока с минимальным временем нахождения продуктов горения после его завершения (вар. 5)

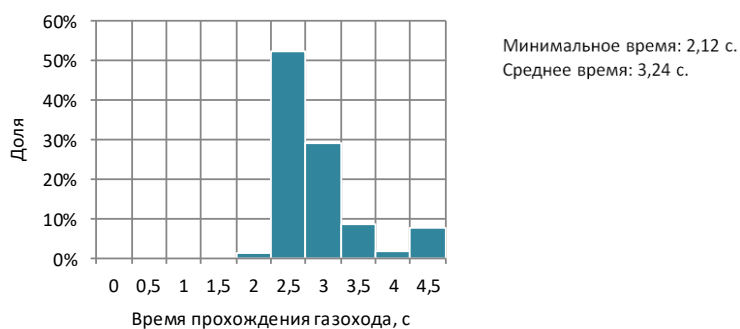


Рисунок 4.28 – Минимальное времени нахождения продуктов сгорания после завершения горения по всем линиям тока (вар. 5)

4.2.7 Вариант 6. Вертикальный газоход над котлом высотой 2,5 м с поворотом газов на 180° и удлиненной второй секцией

Результаты численного моделирования в ANSYS Fluent горизонтального газохода с еще более увеличенной высотой представлены на Рисунках 4.29 - 4.31. Вертикальные газовые каналы обеспечили равномерность потока газа, что привело к необходимому времени пребывания газа (Рисунок 4.31).

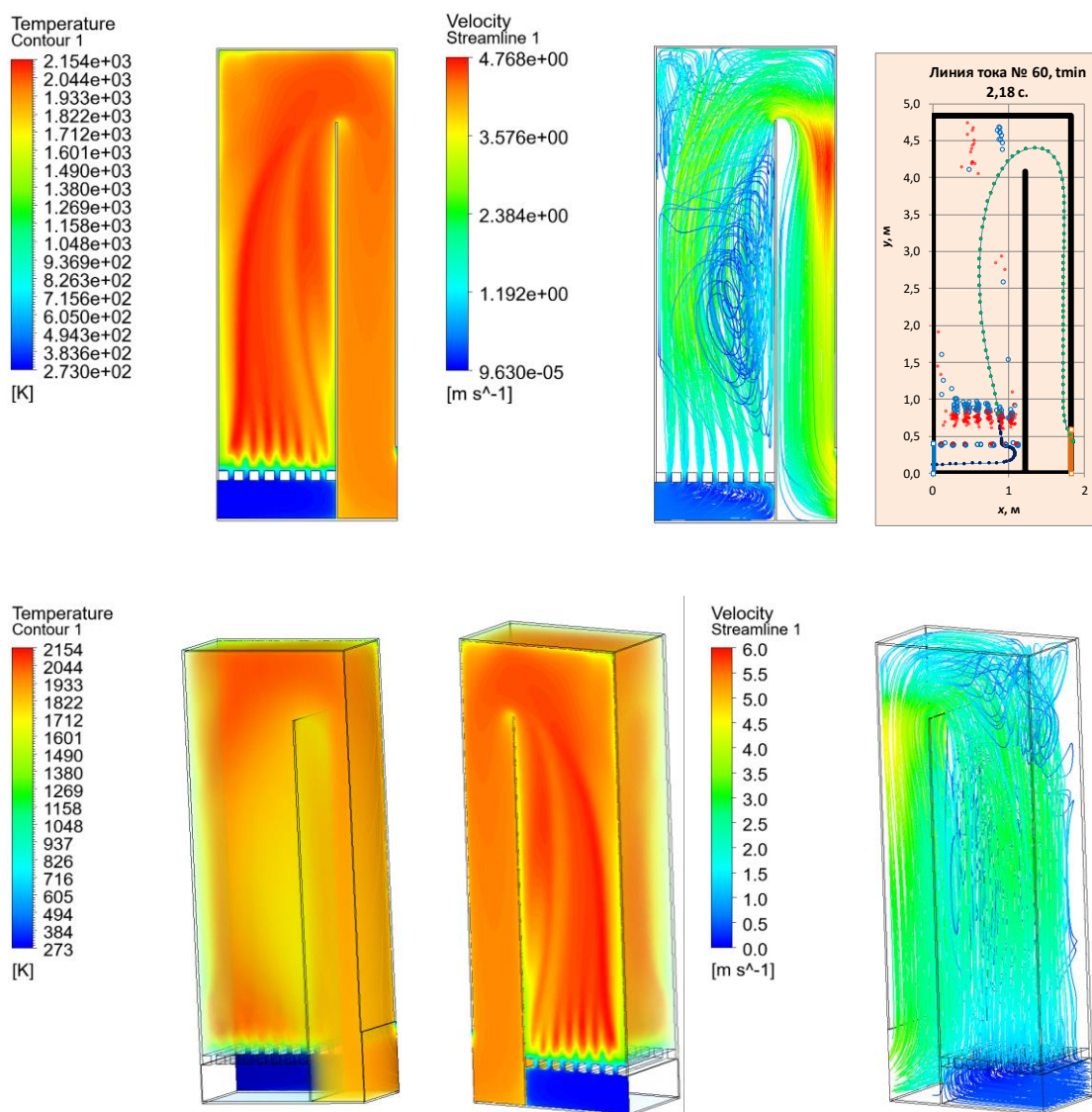


Рисунок 4.29 – Температурные поля и графическое изображение линии тока в котле и газоходе, изображение линии тока с минимальным временем нахождения продуктов горения после его завершения (вар. 6)

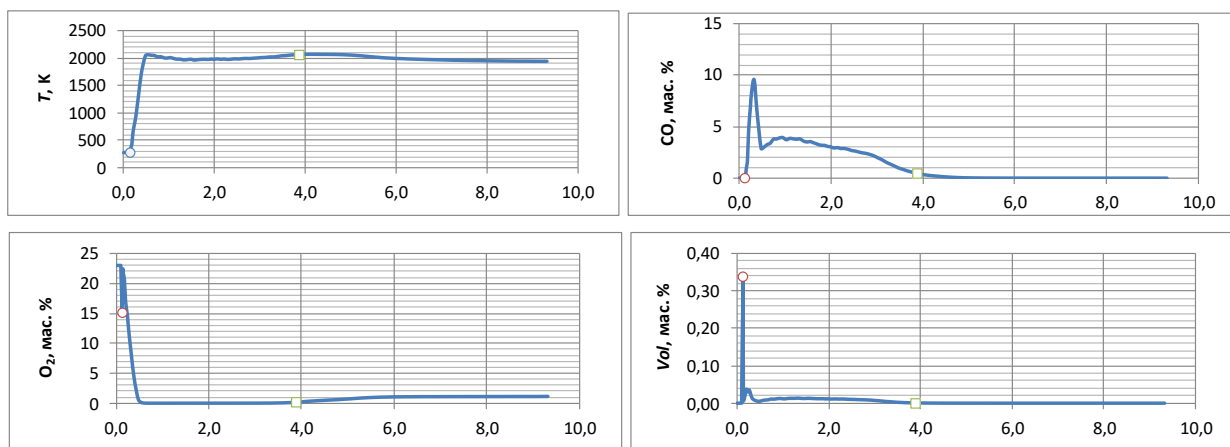


Рисунок 4.30 – Изменение параметров по длине линии тока и точки окончания горения для линии тока с минимальным временем нахождения продуктов горения после его завершения (вар. 6)

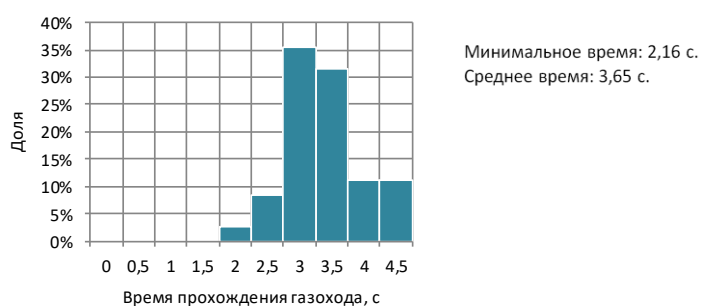


Рисунок 4.31 – Минимальное времени нахождения продуктов сгорания после завершения горения по всем линиям тока (вар. 6)

Результаты (рис. 4.31) не показали заметного преимущества по сравнению с вар. 5 (рис. 4.28), но размеры газотока увеличились.

4.2.8 Основные результаты и выводы по подразделу

По результатам моделирования (средним значениям рассчитываемых переменных по выходному сечению «Outlet») (Таблица 4.16) были рассчитаны следующие данные: объемные концентрации химических соединений – компонентов продуктов горения (Таблица 4.17), расход загрязняющих (вредных) веществ NO_x, CO и SO₂ (Таблица 4.18), определены критерии тепловой эффективности работы топki и полноты сгорания и обобщенный критерий выбросов, включающий NO_x, CO и SO₂ (Таблица 4.19).

Таблица 4.16 – Средние температура и состав газов в выходном окне
(результаты расчета Ansys Fluent)

Номер варианта	T, К	Массовая доля, кг/кг								
		O ₂	CO	CO ₂	NO _x	N ₂	H ₂ O	SO ₂	Летучие	Сумма
1	1618	0,067165	0,00008	0,166990	0,000614	0,671687	0,09233	0,001131	7,1E-06	1,000
2	1657	0,067345	0,00000	0,141487	0,000343	0,711146	0,079	0,000964	0,0000	1,000
3	1620	0,067066	0,00008	0,193634	0,000111	0,630231	0,108	0,001318	0,0000	1,000
4	1658	0,067095	0,00018	0,166272	0,000150	0,672884	0,092	0,00113	0,0001	1,000
5	1659	0,067144	0,00000	0,182265	0,000099	0,648529	0,101	0,001234	0,0000	1,000
6	1637	0,067043	0,00000	0,204738	0,000122	0,613552	0,113	0,001386	0,0000	1,000

Таблица 4.17 – Средний состав газов в выходном окне, об. %

Номер варианта	O ₂	CO ₂	H ₂ O	N ₂	CO	NO _x	SO ₂	Летучие	Сумма
1	6,00	10,77	14,62	68,50	0,0077	0,0584	0,05	0,00	100
2	6,00	9,11	12,44	72,38	0,0000	0,0326	0,04	0,00	100
3	6,00	12,50	17,06	64,37	0,0081	0,0106	0,06	0,00	100
4	5,99	10,72	14,60	68,60	0,0186	0,0143	0,05	0,01	100
5	6,00	11,76	15,97	66,21	0,0000	0,0094	0,05	0,00	100
6	6,00	13,23	17,96	62,73	0,0000	0,0116	0,06	0,00	100

Таблица 4.18 – Среднее содержание вредных веществ в выходном окне

Номер варианта	NO _x , ppm	CO, ppm	SO ₂ , ppm	NO _x , г/с	CO, г/с	SO ₂ , г/с
1	584,0	77	493	0,3151	0,0389	0,5805
2	325,5	0	419	0,1756	0,0001	0,4939
3	105,7	81	575	0,0570	0,0409	0,6772
4	142,7	186	492	0,0770	0,0937	0,5797
5	94,4	0	538	0,0509	0,0000	0,6340
6	116,2	0	605	0,0627	0,0000	0,7133

Таблица 4.19 – Показатели эффективности горения и величины выбросов

Номер варианта	КПД топки η_t , %	Доля несгоревших горючих веществ топлива F_{uf} , %	Критерий выбросов			
			E, г/с	e, г/МВт		
1	85,6%	0,03%	0,549	0,549		
2	86,3%	0,00%	0,373	0,373		
3	87,1%	0,03%	0,330	0,330		
4	88,3%	0,09%	0,313	0,313		
5	89,4%	0,00%	0,304	0,304		
6	88,9%	0,00%	0,348	0,348		

В Таблице 4.20 приведены минимальное и среднее время нахождения продуктов горения после его завершения для всех рассмотренных вариантов.

Таблица 4.20 – Время нахождения продуктов горения после его завершения

Номер варианта			1	2	3	4	5	6	
Время про- хож- дения пото- ка t , с	Общее (от входного сечения до выходного)		t_{cp}	4,89	5,63	5,54	5,28	6,21	6,76
			t_{min}	2,63	2,64	3,13	2,56	4,19	4,42
	Время про- хождения после за- вершения горения	Оценка по $CO \leq CO_{min}$	t_{cp}	1,67	2,36	2,23	1,88	3,12	3,71
			t_{min}	0,29	0,52	0,48	0,78	2,14	2,18
		Оценка по $Vol \leq Vol_{min}$	t_{cp}	1,88	2,43	2,37	1,91	3,24	3,65
			t_{min}	0,65	0,69	0,55	0,58	2,12	2,16

Требования «2 сек./850°C», а так же полное сгорание топлива и наибольшее КПД топки обеспечивали вар. 5 и 6. Но в связи с небольшими отличиями в результатах (среднее время нахождения продуктов горения после его завершения увеличилось на 0,5 с., но минимальное значение заметно не изменилось), был выбран вар. 5.

4.3 ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ ГОРЕНИЯ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ВЛАЖНОСТИ ТОПЛИВА И КОЭФФИЦИЕНТА ИЗБЫТКА ВОЗДУХА

4.3.1 Изменение влажности топлива

Содержание влаги в топливе играет важную роль в экологических характеристиках технологий сжигания, так как основными свойствами топлива, которые в значительной степени определяют процесс его горения, являются теплота сгорания и влажность [218, 219]. Повышенное содержание влаги в топливе из биомассы приводит к неполному горению и образованию загрязняющих соединений [138, 220]. При этом увеличивается количество смол и происходит дополнительное нестабильное воспламенение, что приводит к неустойчивому фронту пламени в зоне горения и чрезмерному образованию монооксида углерода CO, водорода H_2 , метан CH_4 и другие летучи[продуктов неполного горения [139].

Предыдущие исследования проводились при влажности топлива 10%. Для исследования горения при увеличении влажности проведен расчет при влагосодержании 30% и 50% (Рисунок 4.32).

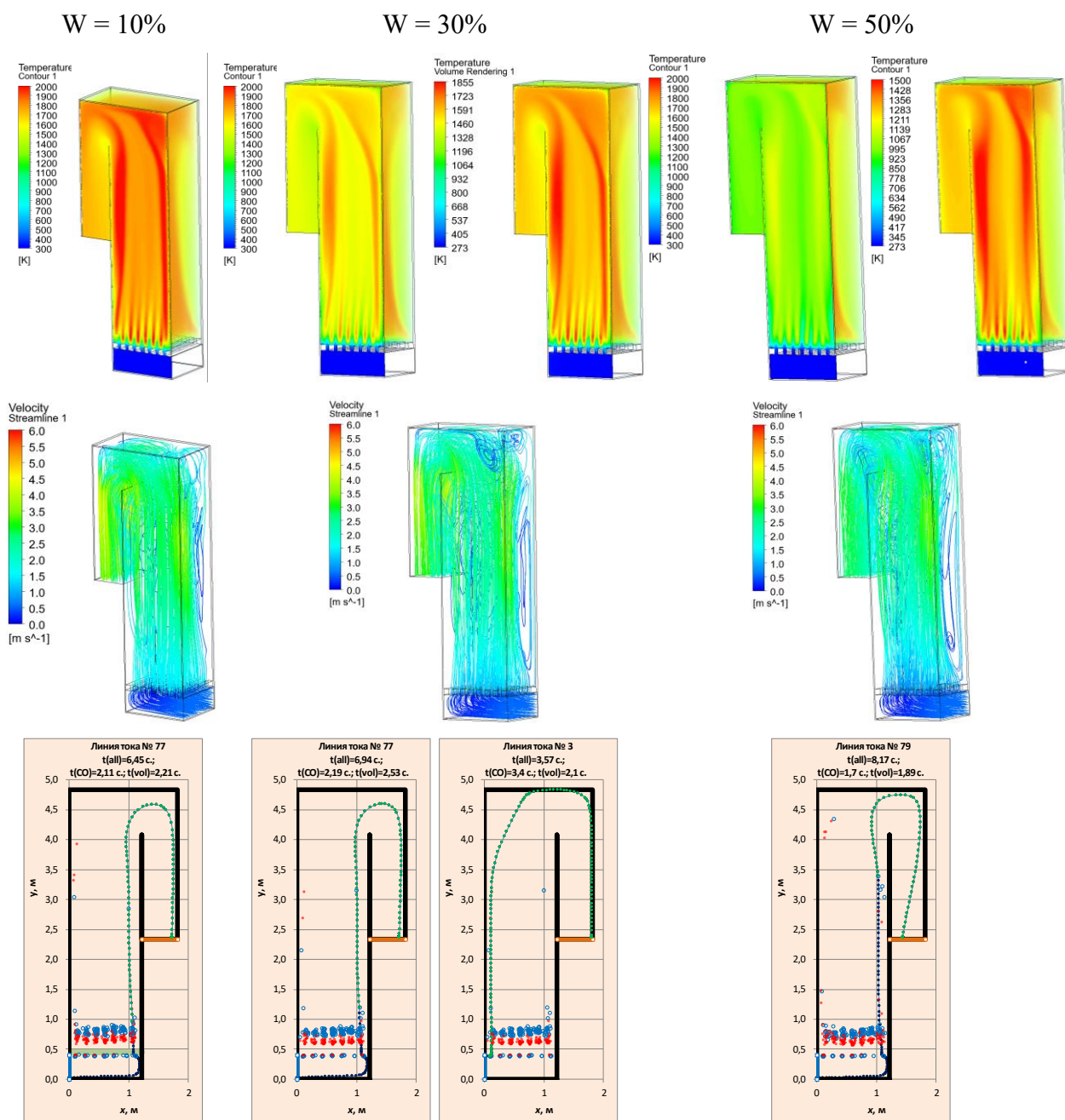


Рисунок 4.32 – Результаты моделирования сгорания топлива с разной влажностью ($\alpha = 1,4$)

По результатам моделирования (средним значениям рассчитываемых переменных по выходному сечению «Outlet») (Таблица 4.21) были рассчитаны сле-

дующие данные: объемные концентрации химических соединений – компонентов продуктов горения (Таблица 4.22) , расход загрязняющих (вредных) веществ NO_x , CO и SO_2 (Таблица 4.23), определены критерии тепловой эффективности работы топki и полноты сгорания и обобщенный критерий выбросов, включающий NO_x , CO и SO_2 (Таблица 4.24).

Таблица 4.21 – Средние температура и состав газов в выходном окне (результаты расчета Ansys Fluent)

Влажность	T, K	Массовая доля, кг/кг								
		O_2	CO	CO_2	NO_x	N_2	H_2O	SO_2	Летучие	Сумма
10%	1659	0,06714	0,00000	0,18226	0,00010	0,64853	0,10073	0,00123	0,00000	1,000
30%	1423	0,06460	0,00000	0,16494	0,00009	0,66415	0,10509	0,00112	0,00000	1,000
50%	1145	0,06439	0,00000	0,16515	0,00001	0,65808	0,11126	0,00112	0,00000	1,000

Таблица 4.22 – Средний состав газов в выходном окне, об. %

Наименование	O_2	CO_2	H_2O	N_2	CO	NO_x	SO_2	Летучие	Сумма
10	6,00	11,76	15,97	66,21	0,0000	0,0094	0,05	0,00	100
30	5,72	10,55	16,50	67,17	0,0000	0,0089	0,05	0,00	100
50	5,68	10,52	17,41	66,33	0,0000	0,0006	0,05	0,00	100

Таблица 4.23 – Среднее содержание вредных веществ в выходном окне

Влажность	NO_x, ppm	CO, ppm	SO_2, ppm	$\text{NO}_x, \text{г/с}$	CO, г/с	$\text{SO}_2, \text{г/с}$
10%	94,4	0	538	0,0509	0,0000	0,6340
30%	88,6	0	482	0,0536	0,0000	0,6368
50%	6,4	0	481	0,0048	0,0000	0,7827

Таблица 4.24 – Показатели эффективности горения и величины выбросов

Влажность	КПД топki $\eta_t, \%$	Доля несгоревших горючих веществ топлива $F_{uf}, \%$	Критерий выбросов	
			$E, \text{г/с}$	$e, \text{г/МВт}$
10%	89,4%	0,00%	0,304	0,304
30%	81,1%	0,00%	0,308	0,308
50%	74,0%	0,00%	0,318	0,318

В результате установлено, что аэродинамический режим топки при увеличении влажности не изменяется, но снижается температура в топке и газоходе, и, соответственно, скорость газов.

4.3.2 Изменение коэффициента избытка воздуха

В заключении для выбранного варианта дожига загрязняющих веществ был исследован режим горения при увеличении подачи воздуха (Рисунок 4.33).

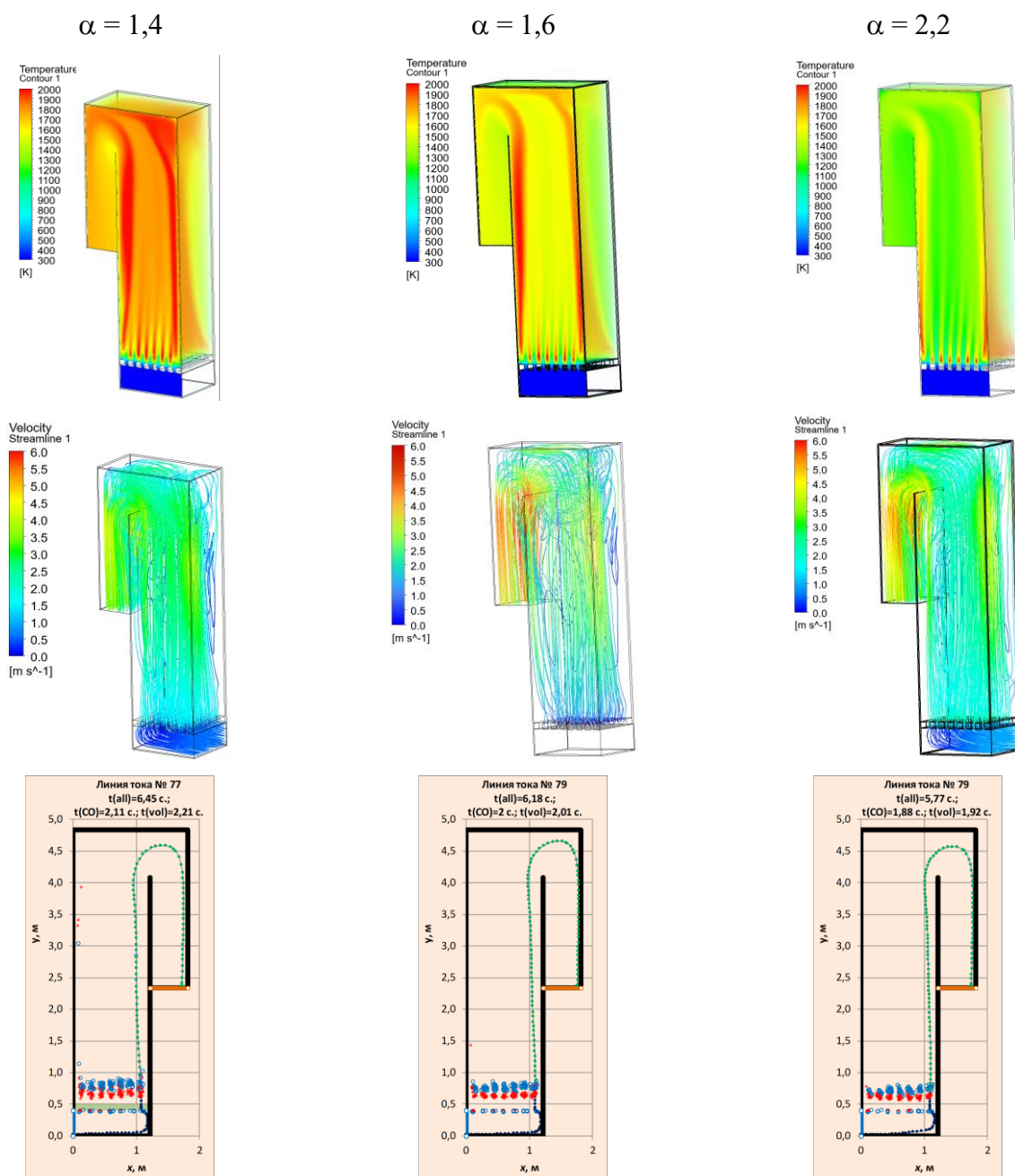


Рисунок 4.33 – Результаты моделирования сгорания топлива с разным избытком воздуха ($W = 10\%$)

По результатам моделирования (средним значениям рассчитываемых переменных по выходному сечению «Outlet») (Таблица 4.25) были рассчитаны следующие данные: объемные концентрации химических соединений – компонентов продуктов горения (Таблица 4.26), расход загрязняющих (вредных) веществ NO_x , CO и SO_2 (Таблица 4.27), определены критерии тепловой эффективности работы топки и полноты сгорания и обобщенный критерий выбросов, включающий NO_x , CO и SO_2 (Таблица 4.28).

Таблица 4.25 – Средние температура и состав газов выходном окне (результаты расчета Ansys Fluent)

Коэффициент избытка воздуха	T, K	Массовая доля, кг/кг								
		O_2	CO	CO_2	NO_x	N_2	H_2O	SO_2	Летучие	Сумма
$\alpha = 1,4$	1659	0,06714	0,00000	0,18226	0,00010	0,64853	0,10073	0,00123	0,00000	1,000
$\alpha = 1,6$	1430	0,08802	0,00000	0,16494	0,00023	0,65460	0,09109	0,00112	0,00000	1,000
$\alpha = 2,2$	1054	0,12739	0,00000	0,16515	0,00023	0,61485	0,09126	0,00112	0,00000	1,000

Таблица 4.26 – Средний состав газов в выходном окне, об. %

Коэффициент избытка воздуха α	O_2	CO_2	H_2O	N_2	CO	NO_x	SO_2	Летучие	Сумма
$\alpha = 1,4$	6,00	11,76	15,97	66,21	0,0000	0,0094	0,05	0,00	100
$\alpha = 1,6$	7,88	10,66	14,46	66,93	0,0000	0,0220	0,05	0,00	100
$\alpha = 2,2$	11,46	10,73	14,56	63,18	0,0000	0,0224	0,05	0,00	100

Таблица 4.27 – Среднее содержание вредных веществ в выходном окне

Коэффициент избытка воздуха α	NO_x , ppm	CO, ppm	SO_2 , ppm	NO_x , г/с	CO, г/с	SO_2 , г/с
$\alpha = 1,4$	94,4	0	538	0,0509	0,0000	0,6340
$\alpha = 1,6$	219,8	0	487	0,1339	0,0000	0,6482
$\alpha = 2,2$	224,2	0	491	0,1833	0,0000	0,8762

Таблица 4.28 – Показатели эффективности горения и величины выбросов

Коэффициент избытка воздуха α	КПД топки η_t , %	Доля несгоревших горючих веществ топлива F_{uf} , %	Критерий выбросов	
			E , г/с	e , г/МВт
$\alpha = 1,4$	89,4%	0,00%	0,304	0,304
$\alpha = 1,6$	81,9%	0,00%	0,393	0,393
$\alpha = 2,2$	72,1%	0,00%	0,534	0,534

При увеличении коэффициента избытка воздуха температура в топке и газоходе снижается и, соответственно, скорость газов та же.

4.3.3 Основные результаты и выводы по подразделу

В Таблице 4.29 приведено сравнение температур, характеризующие процесс горения, при разном коэффициенты избытка воздуха и влажности. Полученные в результате моделирования средние значения температуру продуктов горения в выходном окне газохода ниже расчетной адиабатической (калориметрической) температуры горения на величину около 200°C, что связано с потерями теплоты в окружающую среду через стенки топки и газохода.

Таблица 4.29 – Температуры, характеризующие процесс горения, при разном коэффициенты избытка воздуха и влажности

Коэффициент избытка воздуха		1,4			1,4	1,6	2,2
Влажность, %		10	30	50	10		
Температура, К	Максимальная в топке	2071	1835	1531	2071	2069	2018
	Средняя в выходном окне	1659	1423	1145	1659	1430	1054
	Расчетная (по балансу горения топлива)	1941	1764	1479	1941	1756	1463

Время нахождения в топке и газоходе продуктов горения после его окончания 2 секунды и более для значений влажности, не превышающей 30%, и коэффициента избытка воздуха α , не превышающего 1,8 (Таблица 4.30).

Таблица 4.30 – Время нахождения в топке и газоходе продуктов горения после его окончания

Коэффициент избытка воздуха				1,4			1,4	1,8	2,2
Влажность, %				10	30	50	10		
Время прохождения потока t , с	Общее (от входного сечения до выходного)		t_{cp}	5,76	5,85	7,17	5,76	5,2	4,22
			t_{min}	3,79	4,01	4,15	3,79	3,28	2,82
	Время прохождения после завершения горения	Оценка по $CO \leq CO_{min}$	t_{cp}	3,06	3,48	4,83	3,06	2,94	2,84
			t_{min}	2,11	2,19	1,7	2,11	2	1,88
		Оценка по $Vol \leq Vol_{min}$	t_{cp}	3,13	3,6	4,86	3,13	3,09	2,85
			t_{min}	2,11	2,1	1,89	2,11	2,01	1,92

При значении влажности 50% или коэффициента избытка воздуха 1,6 дальнейшем увеличении параметров данное условие не соблюдается. Это связано с увеличением объема продуктов сгорания (см. табл. 4.2, 4.15), поэтому даже при более низких температурах газового потока его скорость увеличивается.

Таким образом, чтобы обеспечить «Требование 2 сек./850°» необходимо поддерживать режим горения при значении коэффициента избытка воздуха в диапазоне 1,4÷ 1,6 и не подавать на сжигание топливо влажностью более 30%.

4.4 ОЦЕНКА ВОЗДЕЙСТВИЯ СЖИГАНИЯ ОТХОДОВ НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ

4.4.1 Система очистки дымовых газов

Системы очистки отходящих газов (продуктов сгорания) является обязательной составляющей линий по сжиганию твердого топлива и ТКО и предназначенные для снижения содержания выбросов и улавливания их максимального количества [221]. Системы очистки устанавливаются после печи или котла перед дымовой трубой.

Используемые методы очистки:

– физические (механическое улавливание);

– химические (нейтрализация с использованием химических реакций с получением неопасных соединений);

– комплексные методы, сочетающие физические и химические.

По типам газоочистные установки делятся на

- сухие;
- полусухие;
- мокрые.

Как правило, используются многоступенчатые системы, использующие различные методы и установки (Таблица 4.31).

Таблица 4.31 – Способы очистки дымовых газов

Вредные примеси	Применяемые установки
Твердые частицы	• тканевые фильтры • электрофильтры (сухие и мокрые) • циклоны • ротоклоны
Кислые газы	• мокрые газоочистители (скрубберы, скрубберы Вентури, циклон-промыватель СИОТ, ротоклон-промыватель) • полусухие газоочистители (распылительные абсорберы) • системы ввода сухих веществ в потоках газов (химические реагенты или абсорбенты)
ПХДД/Ф и ртутные загрязнения	• кассетные (картриджные) фильтры, с адсорбентами – активированным углем или бурым коксом

Сравнение различных устройств представлено в Таблице 4.32.

Таблица 4.32 – Сравнение устройств для очистки газов

Способ очистки	Эффективность	Затраты	Примечание
Циклон	85–95 %	Низкие	Прост в эксплуатации
Электрофильтр	>99 %	Средние/высокие	Требуется стабильной влажности
Рукавный фильтр	>99 %	Средние	Требуется регулярной замены мешков
Скруббер Вентури	~96 %	Средние	Удаляет SO ₂ и частицы
Полусухая нейтрализация	~90 %	Средние	Подходит для SO ₂

Выбор системы газоочистки при термической утилизации ТКО выполняется с учетом:

- состава отходов и его возможного изменения;
- состава продуктов горения и его возможного изменения;
- температуры очищаемых газов;
- необходимой величина содержания выбросов после очистки;
- наличие образующихся продуктов очистки (загрязненных стоков, уловленных частиц);
- техническая возможность установки системы и отдельных устройств;

Для котлов мощностью 1–2 МВт в ГОСТ 55837-2023 для надежной, эффективной и компактной системы очистки рекомендуется модульная система с комбинированным использованием циклонов, электрофильтров (или тканевых фильтров), при необходимости использование скрубберов и абсорбентов.

Для котлов на твердом топливе средней мощности (1–2 МВт) рациональна многоступенчатая схема, позволяющая произвести комплексную очистку твердых частицы, кислых газов, тяжелых металлов и органических летучих соединений [222]:

1 ступень: циклон/батарея циклонов для удаление крупной пыли (с эффективностью ~85–95 %).

2 ступень: рукавный фильтр или электрофильтр для удаления тонкодисперсных частиц (эффективность >99 %).

3 ступень: скруббер (скруббер Вентури) для удаления кислотных компонентов, если требуется очистка дымовых газов от SO₂.

4 ступень: абсорберы/адсорберы для удавления тяжелых металлов и диоксинов.

Объем продуктов горения согласно расчетам горения топлива и результатам испытаний промышленного котла представлен в Таблице 4.33.

Таблица 4.33 – Объем продуктов горения, м³/ч (при температуре 200°С)

Влажность топлива, %	10	30	50
$\alpha = 1,4$	2 275	2 570	3 220
$\alpha = 1,6$	2 560	2 870	3 555
$\alpha = 2,0$	3 125	3 460	4 225

Таким образом, для выбора системы очистки отходящих газов принимаем расход **3 500 м³/ч** (0,97 м³/с) при температуре 200°С или 2 000 м³/ч (0,56 м³/с) при нормальных условиях.

Предлагаемая конфигурация системы очистки

1. Циклон/циклонная батарея – для удаления крупной пыли.

а) Циклон производительностью 2500–4500 м³/ч производства Botou Xintian (Хэбэй, Китай). Основные размеры: 1500 × 1900 × 2600 мм, диаметр газового канала 280 мм. Обладает простой цилиндрическо-конической конструкцией, оснащен лотком для сбора пыли, эффективность 97,5%.

б) ЦИКЛОН ЦН-11-500Х2УП(СП) производства котельного завода «Энергия» (г. Бийск) или котельного завода РЭП (г. Барнаул). Температура очищаемого газа 400°С. Максимальное давление (разрежение) 5 кПа. Допустимая запыленность газа для слабослипающейся пыли не более 1000 г/м³, для среднеслипающейся пыли не более 250 г/м³. Размеры 1225х825х4225 мм, масса 440 кг.



2. Рукавный фильтр или электрофильтр – для удаления мелких частиц:

а) секционный рукавный фильтр СРФ-4 производства компании Сибэлкон (г. Красноярск). Подходит для условий средней и высокой входной запыленности (максимальная концентрация пыли на входе до 120 г/м³). Эффективность 99...99,8%. Производительность 2 000–4 000 м³/ч. Основные размеры: 1 400 × 1 400 × 4 270 мм, типовое фланцевое подключение 1200×200 мм или Ø 280 мм.

б) Фильтр рукавный ФРИ-45 производства ООО «КДКУ-ЭКО» (г. Санкт-Петербург). Производительность 1 890 ... 5 400 м³/ч. Гидравлическое сопротивление 1500...2000 Па. Концентрация пыли на входе до 80 г/м³. Размер 1120х2120х3260 мм.



3. Скруббер Вентури «Ветрури-4,5» производительностью 2500-4500 м³/ч производства Приволжского завода газоочистного оборудования. Основные размеры: 1500х1870х2625 мм, диаметр газохода 280 мм.

4. Скруббер полый форсуночный – химический абсорбер СПФ-3500 производства РИК «Турмалин» (Рязанская обл., г. Сасово). В одном корпусе одновременно реализованы два принципа очистки газов: механическая и химическая. Возможность использования при высоких (до 1200°С) температурах газов. Производительность: 2 500–4 000 м³/ч. Основные размеры: 1500×1600×3200 мм, масса 670 кг. Гидравлическое сопротивление 100...300 Па. Степень очистки: механическая 80%; химическая 60%.

4.4.2 Определение приземной концентрации загрязняющих веществ

Негативное воздействие на окружающую среду образующиеся при горении загрязняющие вещества оказывают после их рассеивания в атмосфере. Приземная концентрация из-за рассеивания ниже, чем их концентрация после топливосжигающей установки и в устье дымовой трубы, и зависит от следующих факторов:

- высоты источника выброса над уровнем земли (высоты трубы) H ;
- разности между температурой выбрасываемой газовой воздушной смеси t_{Γ} и температурой окружающего атмосферного воздуха $t_{\text{в}}$ (которая принимается как средняя температура самого жаркого месяца);

– средней скорости выхода газовой смеси из устья источника выброса w и диаметра устья источника выброса d (то есть объема выбрасываемых газов).

Для расчета максимального значения приземной концентрации вредного вещества c_m , мг/м³, при выбросе газовой смеси из одиночного точечного источника с круглым устьем, использовалась методика, утвержденная приказом Минприроды России от 06.06.2017 N 273.

Выбросы различных веществ объединялись в одном значении безразмерной концентрации q_k :

$$q_k = \frac{c_{mi}}{ПДК_{м.р\ i}}, \quad (4.1)$$

где ПДК_{м.р i} – максимально разовая концентрация загрязняющих веществ в атмосферном воздухе (Таблица 2.11).

Диаметр устья подбирался для условий горения, приведенных в Таблице 3.7, 3.8, из значения скорости вылета газов из устья трубы 8-12 м/с. Расчет проводился для дымовой трубы, установленной для котла КВМ-1,0 (диаметр устья трубы 300 мм, высота трубы 15 м), так же был рассмотрен вариант увеличения трубы до 20 м. Климатические параметры принимались для условий г. Белгорода. Полученные результаты представлены на Рисунке 4.34 и показывают, что значения приземной концентрации при сжигании всех видов топлив ниже значений ПДК.

В Таблице 4.34 показан вклад соотношения концентрации каждого из загрязняющих веществ к их ПДК в суммарный безразмерный критерий. Наибольший вклад оказывают SO₂ для сернистых топлив, NO_x и HF.

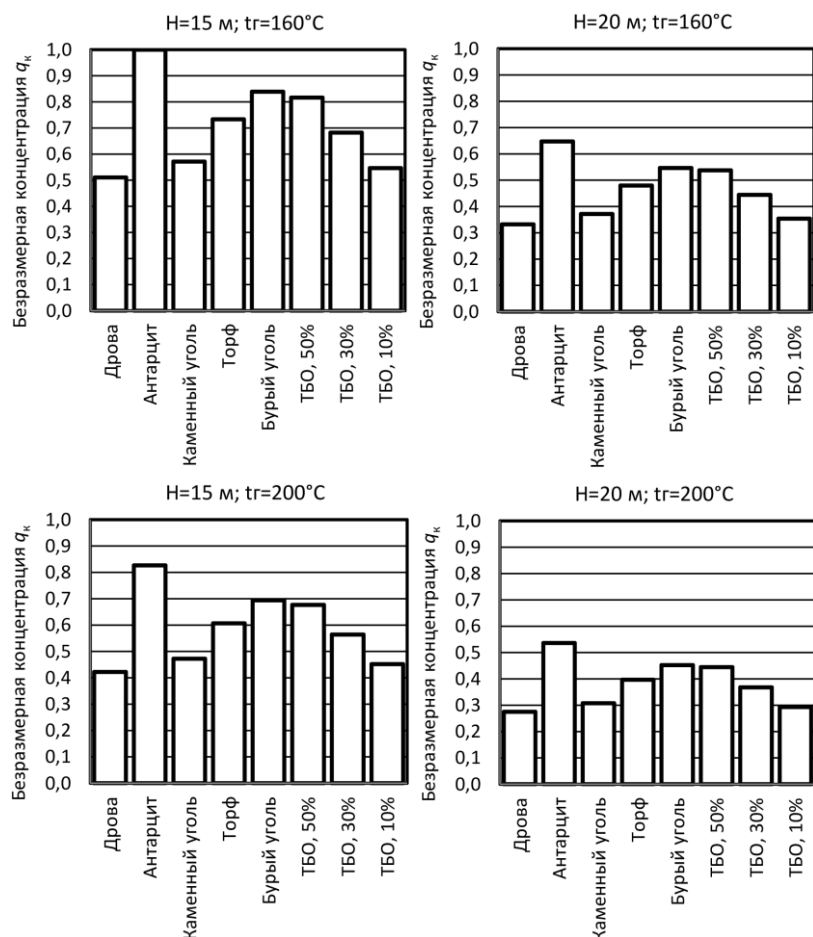


Рисунок 4. 34 – Безразмерная приземная концентрация загрязняющих веществ при сжигании разных топлив

Таблица 4.34 – Вклад загрязняющих веществ в безразмерную приземную концентрацию

Наименование загрязняющего вещества	Древесина	Антрацит	Каменный уголь	Торф	Бурый уголь	ТКО, 50%	ТКО, 30%	ТКО, 10%
SO ₂	0%	70%	15%	17%	37%	11%	20%	31%
NO _x	36%	16%	34%	23%	21%	18%	26%	36%
CO	6%	1%	4%	6%	4%	6%	6%	7%
HCl	2%	0%	2%	2%	1%	3%	2%	1%
HF	42%	4%	33%	44%	28%	55%	37%	14%
Бензопирен	13%	8%	13%	9%	8%	7%	9%	12%

Исходя из проведенных в данном подразделе расчетов, а так же результатов сравнения выбросов, приведенных в разд. 3.2 можно заключить, что в сжигание ТКО по своим режимам и образованию загрязняющих веществ не имеет отличий

от природных твердых топлив, а при влажности 10% показатели горения и выбросы даже лучше низкосортных углей.

4.5 ВЫВОДЫ ПРО ГЛАВЕ

В результате моделирования горения в котле КВМ-1,0 с неподвижной колосниковой решеткой мощностью 1 МВт установлено, что поля скоростей, температур и концентрации кислорода в выходном окне показывают крайнюю неравномерность распределения параметров, что определяет неэффективность процесса горения в топке. Практически полное сгорание топлива происходит при $\alpha \geq 1,8$, но при повышении эффективности горения величина выбросов загрязняющих веществ так же повышается. В результате получено противоречие – изменение коэффициента избытка воздуха не позволяет одновременно обеспечить низкие значения выбросов загрязняющих веществ и полное сгорание топлива. Поэтому предлагается сжигать отходы с минимально возможным количеством воздуха и обеспечить дожиг несгоревшего топлива и вредных веществ после топки.

Для обеспечения нахождения продуктов горения после его окончания при температурах выше 850°C (1123 K) не менее двух секунд рассмотрены шесть вариантов расположения дополнительного газохода.

Установлено, что необходимый режим движения газов может быть обеспечен только в вертикальном газоходе, установленным над топкой. При этом необходимо поддерживать режим горения при значении коэффициента избытка воздуха в диапазоне 1,4÷ 1,6 и не подавать на сжигание топливо влажностью более 30%.

Можно заключить, что в сжигание ТКО по своим режимам и образованию загрязняющих веществ не имеет отличий от природных твердых топлив, а при влажности 10% показатели горения и выбросы даже лучше низкосортных углей.

ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

Основные итоги выполненного исследования заключаются в следующем:

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 так же 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, ограничивающее твердое топливо. Горение происходит на границе твердой и газовой областях в форме гетерогенной реакции горения твердого углерода и в газовой области в виде газофазных реакций окисления СО 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 тепло-

обменником). Условиями дожига считается пребывание продуктов горения не менее 2 с. при температуре не ниже 850 °С. Рассмотрено шесть вариантов конструкции газохода. Сделан вывод, что дожиг загрязняющих веществ возможен только при вертикальном потоке газа, позволяющем избегать 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°С более 2 с., необходимо соблюдать режим горения при оптимальном коэффициенте 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.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Estimation of excess air coefficient on coal combustion processes via gauss model and artificial neural network / S. Golgiyaz, M. F. Talu, M. Daşkın, C. Onat // Alexandria Engineering Journal. – 2022. – Vol. 61. – № 2. – P. 1079-1089.
2. Effect of Holes System Designing for Low Energy Stove Using Coffee Husk Bio-Pellet as Solid Fuel / S. S. Harsono, B. Prayogo, M. Mel, F. Ridha // Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences. – 2018. – Vol. 51. – № 2. – P. 215-226.
3. Household solid waste combustion with wood increases particulate trace metal and lung deposited surface area emissions / H. Timonen, F. Mylläri, P. Simonen [et al.] // Journal of Environmental Management. – 2021. – Vol. 293. – P. 112793.
4. Тугов, А. Н. Энергетическая утилизация ТКО: Мировой и отечественный опыт (обзор) / А. Н. Тугов // Теплоэнергетика. – 2022. – Vol. 12. – № 12. – С. 5-22.
5. Dewangan, S. K. Parametric Study Of The Non-Premixed Coal Combustion In Furnace For Heat Transfer And Emission Characteristics / S. K. Dewangan, M. P. K. Naik, V. Deshmukh // Journal of Thermal Engineering. – 2020. – Vol. 6. – № 6. – P. 323-353.
6. The Effect of Different Waste Material Binders in Relation to Khaya Senegalensis Solid Fuel Pellet Quality / R. I. Ismail, K. C. Yee, A. R. Mohamed [et al.] // Journal of Advanced Research in Applied Sciences and Engineering Technology. – 2023. – Vol. 32. – № 3. – P. 151-164.
7. Investigating the effect of integrated CO₂ and H₂O on the reactivity and kinetics of biomass pellets oxy-steam combustion using new double parallel volumetric model (DVM) / M. E. Mostafa, L. He, J. Xu [et al.] // Energy. – 2019. – Vol. 179 (15). – P. 343-357.
8. Kinobe, J. R. Reverse logistics related to waste management with emphasis on developing countries - a review paper / J. R. Kinobe, G. Gebresenbet, B. Vinnerås // Environmental Science and Engineering. – 2012. – Vol. 1. – P. 1104-1118.

9. Abbasi, T. Biomass energy and the environmental impacts associated with its production and utilization / T. Abbasi, S. A. Abbasi // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2010. – Vol. 14. – № 3. – P. 919-937.
10. Lemieux, P. M. Emissions of organic air toxics from open burning: A comprehensive review / P. M. Lemieux, C. C. Lutes, D. A. Santoianni // *Progress in Energy and Combustion Science*. – 2004. – Vol. 30. – № 1. – P. 1-32.
11. Pyrolysis technologies for municipal solid waste: A review / D. Chen, L. Yin, H. Wang, P. He // *Waste Management*. – 2014. – Vol. 34. – № 12. – P. 2466-2486.
12. Safarian, S. A review of biomass gasification modelling / S. Safarian, R. Unnþórsson, C. Richter // *Energy Reviews*. – 2019. – Vol. 110. – P. 378-391.
13. Effects of cofiring coal and biomass fuel on the pulverized coal injection combustion zone in blast furnaces / G.-M. Kim, J. H. Choi, C.-H. Jeon, D.-H. Lim // *Energies*. – 2022. – Vol. 15. – № 2. – P. 655.
14. Технологии комплексной переработки твердых коммунальных отходов / С. Н. Глаголев, Н. Т. Шеин, В. С. Севостьянов [et al.] // *Экология и промышленность России*. – 2020. – Vol. 24. – № 12. – P. 11-15.
15. Milne, T. A. Biomass gasifier "Tars": their nature, formation, and conversion / T. A. Milne, R. J. Evans, N. Abatzaglou. – Colorado: NREL, 1998. – 204 p.
16. Simulation of combustion of municipal solid waste and coal in an industrial-scale circulating fluidized bed boiler / J. Xie, W. Zhong, Y. Shao [et al.] // *Energy & fuels*. – 2017. – Vol. 31. – № 12. – P. 14248-14261.
17. Reduction of sulfur dioxide emissions by burning coal blends / E. Rokni, A. Panahi, X. Ren, Y. A. Levendis // *Journal of Energy Resources Technology*. – 2016. – Vol. 138. – № 3. – P. 32204.
18. The Catalytic Impact of MnO Additive on the Selected Municipal Solid Waste Combustion Behavior Determined by Thermogravimetric Analysis / S. Sukarni, S. Sumarli, T. A. Firdaus, A. Prasetyo // *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*. – 2020. – Vol. 71. – № 1. – P. 50-59.

19. Kulkarni, B. N. Solid Waste to Energy: A Prognostic for Sound Waste Management / B. N. Kulkarni, V. Anantharama // Handbook of Solid Waste Management: Sustainability through Circular Economy. – Singapore: Springer, 2021. – P. 1-33.
20. Production modules for combined reprocessing of technogenic materials / S. N. Glagolev, V. S. Sevostyanov, T. N. Ilyina, V. I. Uralskii // Chemical and Petroleum Engineering. – 2011. – Vol. 46. – P. 556-559.
21. Emissions from landfill / J. Schmid, A. Elser, R. Ströbel [et al.] // Dangerous substances in waste. – Copenhagen: European Environment Agency, 2000. – P. 9-12.
22. Chungen, Y. Grate-firing of biomass for heat and power production / C. Yin, L. A. Rosendahl, S. K. Kær // Progress in Energy and combustion Science. – 2008. – Vol. 34. – № 6. – P. 725-754.
23. Pollutants from the combustion of solid biomass fuels / A. Williams, J.M. Jones, L. Ma, M. Pourkashanian // Progress in Energy and Combustion Science. – 2012. – Vol. 38, № 2. –P. 113-137.
24. Modeling of the biomass combustion on a forward acting grate using XDEM. / X. B. Amir Houshang Mahmoudi, F. Hoffmann, M. Markovic [et al.] // Chemical Engineering Science. – 2016. – Vol. 142. – P. 32-41.
25. Kasakura, T. Pilot plant study on sewage sludge pyrolysis—II / T. Kasakura, M. Hiraoka // Water research. – 1982. – Vol. 16. – № 12. – P. 1569-1575.
26. Synergetic effects of firing gases/coal blends and adopting deep air staging on combustion characteristics / Z. Liang, H. Chen, B. Zhao [et al.] // Applied Energy. – 2018. – Vol. 228. – P. 499-511.
27. Influence of simulated MSW sizes on the combustion process in a fixed bed - CFD and experimental approaches.pdf / R. Sun, T. M. Ismail, X. Ren, M. A. El-Salam // Waste Management. – 2016. – Vol. 49. – P. 272-286.
28. Thermal Energy Storage System from Household Wastes Combustion: System Design and Parameter Study / J. P. Simanjuntak, S. Anis, M. Syamsiro [et al.]

// Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences. – 2021. – Vol. 80. – № 2. – P. 115-126.

29. Modelling fuel flexibility in fixed-bed biomass conversion with a low primary air ratio in an updraft configuration / A. Anca-Couce, G. Archan, M. Buchmayr [et al.] // Fuel. – 2021. – Vol. 296. – P. 120-687.

30. Effect of excess air ratio and temperature on NO_x emission from grate combustion of biomass in the staged air combustion scenario / E. Houshfar, Ø. Skreiberg, T. Løvås [et al.] // Energy & Fuels. – 2011. – Vol. 25. – № 10. – P. 4643-4654.

31. Rahman, N. K. M. N. A. Waste Heat Recovery of Biomass Based Industrial Boilers by Using Stirling Engine / N. K. M. N. A. Rahman, S. Saadon, M. H. C. Man // Journal of Advanced Research in Applied Mechanics. – 2021. – Vol. 81. – № 1. – P. 1-10.

32. Holkar, R. CFD Anlysis of Pulverised-Coal Combustion of Burner Used In Furnace with Different Radiation Models / R. Holkar, O. D. Hebbal // IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering. – 2013. – Vol. 5. – № 2. – P. 25-34.

33. Maasikmets, M. Determination of emission factors from anthropogenic particle sources for air emission and health impact assessment / M. Maasikmets. – Tartu: Eesti Maaülikool, 2019. – 200 p.

34. Meallem, I. Environmental hazards of waste disposal patterns - A multimethod study in an unrecognized Bedouin village in the Negev area of Israel / I. Meallem, Y. Garb, J. Cwikel // Archives of Environmental and Occupational Health. – 2010. – Vol. 65. – № 4. – P. 230-237.

35. de Jong, W. Biomass composition, properties, and characterization / W. de Jong // Biomass as a sustainable energy source for the future: Fundamentals of conversion processes. – Hoboken: Wiley, 2014. – P. 36-68.

36. Tora, E. CFD Ansys-fluent simulation of prevention of dioxins formation via controlling homogeneous mass and heat transfer within circulated fluidized bed combustor / E. Tora, E. Dahlquist // Energy Procedia. – 2015. – Vol. 75. – P. 130-136.

37. Prediction of equivalence ratio in pulse combustor from ion current amplitude spectrum / F. Li, Zhang Cao, Lijun Xu, Yixin Xie // *Fuel*. – 2018. – Vol. 218. – P. 179-187.
38. Thermochemical and combustion behaviors of coals of different ranks and their blends for pulverized-coal combustion / C. Moon, Y. Sung, S. Ahn [et al.] // *Applied Thermal Engineering*. – 2013. – Vol. 54. – № 1. – P. 111-119.
39. Сжигание RDF-топлива с использование кислородного дутья / В. М. Коновалов, А. А. Гончаров, А. С. Федоров [et al.] // *Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова*. – 2022. – № 10. – С. 79-86.
40. Parsa, M. Combustion efficiency optimization by adjusting the amount of excess air / M. Parsa, A. V. Kamyad, M. B. N. Sistani // 2014 5th Conference on Thermal Power Plants (CTPP). – Tehran: IEEE, 2014. – P. 103-108.
41. Purvis, M. R. I. NO_x control by air staging in a small biomass fuelled underfeed stoker / M. R. I. Purvis, E. L. Tadulan, A. S. Tariq // *International journal of energy research*. – 2000. – Vol. 24. – № 10. – P. 917-933.
42. Exploring switchgrass and hardwood combustion on excess air and ash fouling/slagging potential: Laboratory combustion test and thermogravimetric kinetic analysis / Y. Wang, Y. Shao, M. D. Matovic, J. K. Whalen // *Energy conversion and management*. – 2015. – Vol. 97. – P. 409-419.
43. Numerical modeling of the co-firing process of an in situ steam-torrefied biomass with coal in a 230 MW industrial-scale boiler / S. Szufa, P. Piersa, R. Junga [et al.] // *Energy*. – 2023. – Vol. 263. – P. 125918.
44. Organization of vortex smoke gaz movement over the fuel layer to increase the efficiency of the work boiler unit KVM-2,5 in the village of Mishelevka, Usolsky district, Irkutsk region. / V. A. Bochkarev, I. V. Dykus, A. G. Frolov, V. V. Khan // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. – 2021. – Vol. 751. – № 1. – P. 012003.

45. Bhuiyan, A. A. CFD modelling of co-firing of biomass with coal under oxy-fuel combustion in a large scale power plant / A. A. Bhuiyan, J. Naser // *Fuel*. – 2015. – Vol. 159. – P. 150-168.
46. CFD simulation of confined non-premixed jet flames in rotary kilns for gaseous fuels / H. F. Elattar, R. Stanev, E. Specht [et al.] // *Computers & Fluids*. – 2014. – Vol. 102. – P. 62-73.
47. Karyeyen, S. Experimental and numerical analysis of turbulent premixed combustion of low calorific value coal gases in a generated premixed burner / S. Karyeyen, M. Ilbas // *Fuel*. – 2018. – Vol. 220. – P. 586-598.
48. Mechanism modeling of optimal excess air coefficient for operating in coal fired boiler / Y. Wang, X. Li, T. Mao [et al.] // *Energy*. – 2022. – Vol. 261. – P. 125-128.
49. Kaltschmitt M. *Energie aus Biomasse: Grundlagen, Techniken und Verfahren* / M. Kaltschmitt, H. Hartmann, H. Hofbauer. – Verlag: Springer, 2009. – 1030 p.
50. Emissions from burning municipal solid waste and wood in domestic heaters / M. Maasikmets, H. L. Kupri, E. Teinemaa [et al.] // *Atmospheric Pollution Research*. – 2016. – Vol. 7. – № 3. – P. 438-446.
51. Demirbas, A. Combustion characteristics of different biomass fuels / A. Demirbas // *Progress in Energy and Combustion Science*. – 2004. – Vol. 30. – № 2. – P. 219-230.
52. Schmid, J. Dangerous substances in waste: Technical report No 38 / J. Schmid, A. Elser, R. Strobel, M. Crowe // Copenhagen: European Environment, 2000. – 50 p.
53. Власов, О. А. Анализ работы печей сжигания отходов / О. А. Власов, В. В. Мечев // *Твердые бытовые отходы*. – 2017. – № 8. – С. 38-41.
54. Ламзина, И. В. Моделирование натуральных топочных условий для оценки экологической безопасности выбросов в атмосферу при сжигании ТБО / И. В. Ламзина, В. Ф. Желтобрюхов, И. Г. Шайхиев // *Вестник Казанского технологического университета*. – 2016. – Vol. 19. – № 11. – С. 190-193.

55. Demirbas, A. Potential applications of renewable energy sources, biomass combustion problems in boiler power systems and combustion related environmental issues / A. Demirbas // Progress in Energy and Combustion Science. – 2005. – Vol. 31. – № 2. – P. 171-192.

56. A scoping review of interventions targeting small-scale, individual-initiated burning practices / S. M. Ryan, H. C. Marker, K. van Wickle, P. J. Winch // Environmental Research. – 2021. – Vol. 195. – P. 110-794.

57. Theoretical framework for plastic waste management in ghana through extended producer responsibility: Case of sachet water waste / E. T. Quartey, H. Tosefa, K. A. B. Danquah, I. Obrsalova // International Journal of Environmental Research and Public Health. – 2015. – Vol. 12. – № 8. – P. 9907-9919.

58. Сибгатулина, О. С. Оценка потенциально опасных компонентов, влияющих на газовые выбросы при термической переработке ТБО / О. С. Сибгатулина, Г. И. Гумерова, Э. В. Гоголь // Химия и инженерная экология-XVIII. – Казань: КНИТУ-КАИ, 2018. – С. 335-341.

59. Obernberger, I. Chemical properties of solid biofuels—significance and impact / I. Obernberger, T. Brunner, G. Bärnthaler // Biomass and bioenergy. – 2006. – Vol. 30. – № 11. – P. 973-982.

60. Hill, S. C. Modeling of nitrogen oxides formation and destruction in combustion systems / S. C. Hill, L. D. Smoot // Progress in energy and combustion science. – 2000. – Vol. 26. – № 4-6. – P. 417-458.

61. Glarborg, P. Fuel nitrogen conversion in solid fuel fired systems / P. Glarborg, A. D. Jensen, J. E. Johnsson // Progress in energy and combustion science. – 2003. – Vol. 29. – № 2. – P. 89-113.

62. Сокращение выбросов оксидов азота при сжигании отходов / О. Н. Кулиш, С. А. Кужеватов, М. Н. Орлова [et al.] // Твердые бытовые отходы. – 2010. – № 2. – С. 45-47.

63. Knudsen, J. N. Transformation and release to the gas phase of Cl, K, and S during combustion of annual biomass / J. N. Knudsen, P. A. Jensen, K. Dam-Johansen // *Energy & Fuels*. – 2004. – Vol. 18. – № 5. – P. 1385-1399.
64. The implications of chlorine-associated corrosion on the operation of biomass-fired boilers / H. P. Nielsen, F. J. Frandsen, K. Dam-Johansen, L. L. Baxter // *Progress in energy and combustion science*. – 2000. – Vol. 26. – № 3. – P. 283-298.
65. Leclerc, D. Effects of combustion and operating conditions on PCDD/PCDF emissions from power boilers burning salt-laden wood waste / D. Leclerc, W. L. Duo, M. Vessey // *Chemosphere*. – 2006. – Vol. 63. – № 4. – P. 676-689.
66. Quantification of the release of inorganic elements from biofuels / F. J. Frandsen, S. C. van Lith, R. Korbee [et al.] // *Fuel Processing Technology*. – 2007. – Vol. 88. – № 11-12. – P. 1118-1128.
67. Impact of Biomass Fuel Feeding Ratio in Co-firing Circulating Fluidized Bed Boiler: A Computational Fluid Dynamics Study / S. Tanprasert, N. Rangton, W. Nukkhong [et al.] // *Journal of Advanced Research in Numerical Heat Transfer*. – 2024. – Vol. 17. – № 1. – P. 44-54.
68. Yin, C. Grate-firing of biomass for heat and power production / C. Yin, L. A. Rosendahl, S. K. Kær // *Progress in Energy and combustion Science*. – 2008. – Vol. 34. – № 6. – P. 725-754.
69. Zhang, J. Degradation technologies and mechanisms of dioxins in municipal solid waste incineration fly ash: A review / J. Zhang, S. Zhang, B. Liu // *Journal of Cleaner Production*. – 2020. – Vol. 250. – P. 119-507.
70. Hasselriis, F. Optimization of combustion conditions to minimize dioxin emissions / F. Hasselriis // *Waste Management & Research*. – 1987. – Vol. 5. – № 3. – P. 311-326.
71. Goux, J.-Y. Le. L'incinération des déchets ménagers / J.-Y. Le Goux, C. Le Douce. – Paris: Economica, 1995. – 226 p.
72. Menard, Y. Modelisation de l'incinération sur grille d'ordures ménagères et approche thermodynamique du comportement des métaux lourds: These Pour obtenir

le grade de Docteur / Y. Menard. – Lorraine: Institut National Polytechnique de Lorraine, 2008. – 224 p.

73. Best available techniques (BAT) reference document for waste treatment / A. Pinasseau, B. Zerger, J. Roth [et al.] // Industrial Emissions Directive. – 2010. – Vol. 75. – P. 2011-2019.

74. Chang, Y.-H. Comparative evaluation of RDF and MSW incineration / Y.-H. Chang, W. C. Chen, N.-B. Chang // Journal of hazardous materials. – 1998. – Vol. 58. – № 1-3. – P. 33-45.

75. Roffman, A. Air emissions from municipal waste combustion and their environmental effects / A. Roffman, H. K. Roffman // Science of the total environment. – 1991. – Vol. 104. – № 1-2. – P. 87-96.

76. Costa, M. Temperature and residence time of the combustion products in a waste-to-energy plant / M. Costa, M. Dell'Isola, N. Massarotti // Fuel. – 2012. – Vol. 102. – P. 92-105.

77. Ключихина, О. С. Воздействие на атмосферный воздух выбросов загрязняющих веществ от объектов захоронения и термического обезвреживания (сжигания) твердых коммунальных отходов / О. С. Ключихина // Проблемы антропогенной трансформация природной среды. – Пермь: ПГНИУ, 2019. – С. 164-166.

78. Influence of Torrefaction on Single Particle Combustion of Wood / Z. Lu, J. Jian, P. A. Jensen [et al.] // Energy and Fuels. – 2016. – Vol. 30. – № 7. – P. 5772-5778.

79. A review on municipal solid waste as a renewable source for waste-to-energy project in India: Current practices, challenges, and future opportunities / L. Chand Malav, K. K. Yadav, N. Gupta [et al.] // Journal of Cleaner Production. – 2020. – Vol. 277. – P. 123227.

80. Trojanowski, R. Nanoparticle emissions from residential wood combustion: A critical literature review, characterization, and recommendations / R. Trojanowski, V. Fthenakis // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2019. – Vol. 103. – P. 515-528.

81. Kumar, A. A review on technological options of waste to energy for effective management of municipal solid waste / A. Kumar, S. R. Samadder // *Waste Management*. – 2017. – Vol. 69. – P. 407-422.
82. Fires in Waste Treatment Facilities: Challenges and Solutions from a Fire Investigation Perspective / W.-Y. Juan, C.-L. Wu, F.-W. Liu, W.-S. Chen // *Sustainability*. – 2023. – Vol. 15. – № 12. – P. 9756.
83. Hugony, F. Nanoparticles size distribution in wood combustion. / F. Hugony, S. Ozgen, C. Morreale // *ETH-Conference on Combustion Generated Nanoparticles*. – Zurich: ETH Zentrum, 2012. – P. 1-5.
84. Zhang, M. Dioxins from Biomass Combustion: An Overview / M. Zhang, A. Buekens, X. Li // *Waste and Biomass Valorization*. – 2017. – Vol. 8. – P. 1-20.
85. Teke, G. Open waste burning in Cameroonian cities : an environmental impact analysis / G. Teke, F. Julius, N. Ghogomu // *Environmentalist*. – 2011. – Vol. 31. – № 3. – P. 254-262.
86. Ignition and burning rates of segregated waste combustion in packed beds / C. Ryu, A. N. Phan, Y. Yang [et al.] // *Waste management*. – 2007. – Vol. 27. – № 6. – P. 802-810.
87. Donghoon, S. The combustion of simulated waste particles in a fixed bed / S. Donghoon, C. Sangmin // *Combustion and Flame*. – 2000. – Vol. 121. – P. 167-180.
88. Beér, J. M. Combustion technology developments in power generation in response to environmental challenges / J. M. Beér // *Progress in Energy and Combustion Science*. – 2000. – Vol. 26. – № 4-6. – P. 301-327.
89. Challenges and opportunities in biomass ash management and its utilization in novel applications / M. A. Munawar, A. H. Khoja, S. R. Naqvi [et al.] // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2021. – Vol. 150. – P. 111451.
90. An overview of processes and considerations in the modelling of fixed-bed biomass combustion / H. Khodaei, Y. M. Al-Abdeli, F. Guzzomi, G. H. Yeoh // *Energy*. – 2015. – Vol. 88. – P. 946-972.

91. Fundamental and Technical Challenges for a Compatible Design Scheme of Oxyfuel Combustion Technology / C. Zheng, Z. Liu, J. Xiang [et al.] // Engineering. – 2015. – Vol. 1. – № 1. – P. 139-149.
92. Masri, A. R. Challenges for turbulent combustion. / A. R. Masri // Proceedings of the Combustion Institute. – 2021. – Vol. 38. – № 1. – P. 121-155.
93. Kausley, S. B. Modelling of solid fuel stoves / S. B. Kausley, A. B. Pandit // Fuel. – 2010. – Vol. 89. – № 3. – P. 782-791.
94. Grid-independent Eulerian-Lagrangian approaches for simulations of solid. / J. Zhang, T. Li, H. Ström, T. Løvås // Chemical Engineering Journal. – 2020. – Vol. 387. – P. 123-964.
95. Deb, S. A novel two-grid formulation for fluid–particle systems using the discrete element method / S. Deb, D. K. Tafti // Powder technology. – 2013. – Vol. 246. – P. 601-616.
96. Models for the combustion of single solid fuel particles in fluidized beds: A review / X. Jiang, D. Chen, Z. Ma, J. Yan // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2017. – Vol. 68. – P. 410-431.
97. Comparative analysis of typical mathematical modelling methods through model updating of a real-life bridge structure with measured data / Z. Xia, A. Li, D. Feng [et al.] // Measurement. – 2021. – Vol. 174. – P. 108987.
98. A Critical Analysis of the Oxy-Combustion Process: From Mathematical Models to Combustion Product Analysis / B. Raho, G. Colangelo, M. Milanese, A. de Risi // Energies. – 2022. – Vol. 15. – № 18. – P. 65–14.
99. Mathematical modeling of MILD combustion of pulverized coal / N. Schaffel, M. Mancini, A. Szlęk, R. Weber // Combustion and Flame. – 2009. – Vol. 156. – № 9. – P. 1771-1784.
100. A Mathematical Model of Biomass Combustion Physical and Chemical Processes / F. Popescu, R. Mahu, I. V. Ion, E. Rusu // Energies. – 2020. – Vol. 13. – № 23. – P. 62-32.

101. A two-layer mesh method for discrete element simulation of gas-particle systems with arbitrarily polyhedral mesh / S. Junwei, G. Zhaolin, C. Chungang, X. Xiao Yun // *International Journal for Numerical Methods in Engineering*. – 2015. – Vol. 103. – № 1. – P. 759-780.
102. Mathematical modeling of the thermochemical processes of nitrogen oxides sequestration during combustion of wood-coal mixture particles / G. V. Kuznetsov, S. V. Syrodoy, N. Y. Gutareva, N. A. Nigay // *Journal of the Energy Institute*. – 2021. – Vol. 96. – P. 280-293.
103. Investigation of turbulence characteristics of burning process of the solid fuel in BKZ 420 combustion chamber / A. S. Askarova, S. Bolegenova, A. Bekmukhamet [et al.] // *WSEAS Transactions on Heat and Mass Transfer*. – 2014. – Vol. 9. – № 1. – P. 39-50.
104. Dias, D. M. A Review on Micro-Combustion Flame Dynamics and Micro-Propulsion Systems / D. M. Dias, P. R. Resende, A. M. Afonso // *Energies*. – 2024. – Vol. 17. – № 6. – P. 1327.
105. Ayoobi, M. Numerical Investigations of Combustion—An Overview. / M. Ayoobi, P. R. Resende, A. M. Afonso // *Energies*. – 2022. – Vol. 15. – № 9. – P. 29-75.
106. Flame emission tomography based on finite element basis and adjustable mask / H. Liu, Q. Wang, F. Peng [et al.] // *Optics Express*. – 2021. – Vol. 29. – № 25. – P. 40841-40853.
107. Khujaev, I. K. Numerical Solution of the Combustion Process Using the Computer Package Ansys Fluent / I. K. Khujaev, R. A. Fayziev, M. M. Hamdamov // *Internet of Things, Smart Spaces, and Next Generation Networks and Systems*. – Tashkent: Springer, 2022. – P. 26-37.
108. Sun, Z. An adaptive moving finite element method for steady low Mach number compressible combustion problems. / Z. Sun, M. Braack, J. Lang // *International Journal for Numerical Methods in Fluids*. – 2020. – Vol. 92. – № 9. – P. 1081-1095.

109. Scherer, V. DEM/CFD Simulation in Process Engineering / V. Scherer, D. Thévenin // *Sign.* – 2023. – Vol. 78. – P. 1-2.
110. Wissing, F. Simulating municipal solid waste incineration with a DEM-CFD method – Influences of waste properties, grate and furnace design. / F. Wissing, S. Wirtz, V. S. Department // *Fuel.* – 2017. – Vol. 206. – P. 638-656.
111. Modelling of Catalytic Combustion in a Deformable Porous Burner Using a Fluid–Solid Interaction (FSI) Framework / T. Ochrymiuk, M. Froissart, P. Madejski, J. Badur // *Materials.* – 2023. – Vol. 16. – № 5. – P. 2093.
112. Solid Digestate—Mathematical Modeling of Combustion Process / K. Dziedzic, B. Łapczyńska-Kordon, M. Jurczyk [et al.] // *Energies.* – 2022. – Vol. 15. – № 12. – P. 4402.
113. Biomass combustion modeling using openFOAM: development of a simple computational model and study of the combustion performance of *Lippia origanoides* bagasse / G. F. García Sánchez, J. L. Chacón Velasco, D. A. Fuentes Díaz [et al.] // *Energies.* – 2023. – Vol. 16. – № 6. – P. 2932.
114. Selecting Catalysts for Pyrolysis of Lignocellulosic Biomass / M. do C. Rangel, F. M. Mayer, M. da S. Carvalho [et al.] // *Biomass.* – 2023. – Vol. 3. – № 1. – P. 31-63.
115. Blasi, C. Di. Combustion and gasification rates of lignocellulosic chars / C. Di Blasi // *Progress in energy and combustion science.* – 2009. – Vol. 35. – № 2. – P. 121-140.
116. Impact of the lignocellulosic material on fast pyrolysis yields and product quality / M. Carrier, J.-E. Joubert, S. Danje [et al.] // *Bioresource technology.* – 2013. – Vol. 150. – P. 129-138.
117. Rostami, A. A. A biomass pyrolysis sub-model for CFD applications / A. A. Rostami, M. R. Hajaligol, S. E. Wrenn // *Fuel.* – 2004. – Vol. 83. – № 11-12. – P. 1519-1525.
118. An algorithm for determining the kinetics of devolatilisation of complex solid fuels from thermogravimetric experiments / S. A. Scott, J. S. Dennis, J. F.

Davidson, A. N. Hayhurst // Chemical Engineering Science. – 2006. – Vol. 61. – № 8. – P. 2339-2348.

119. Machine learned compact kinetic models for methane combustion / M. Kelly, M. Fortune, G. Bourque, S. Dooley // Combustion and Flame. – 2023. – Vol. 253. – P. 112755.

120. Autonomous Kinetic Modeling of Biomass Pyrolysis using.pdf / W. Ji, F. Richter, M. J. Gollner, S. Deng // Combustion and Flame. – 2022. – Vol. 240. – P. 111-992.

121. Alganash, B. Numerical investigation of the heterogeneous combustion processes of solid fuels / B. Alganash, M. C. Paul, I. A. Watson // Fuel. – 2015. – Vol. 141. – № 2015. – P. 236-249.

122. Agarwal, P. K. Transfer processes local to the coal particle: a review of drying, devolatilization and mass transfer in fluidized bed combustion / P. K. Agarwal // Chemical Engineering Research and Design;(UK). – 1989. – Vol. 67. – № 5. – P. 457-480.

123. Díez, L. I. Modelling of pulverized coal boilers: Review and validation of on-line simulation techniques / L. I. Díez, C. Cortés, A. Campo // Applied Thermal Engineering. – 2005. – Vol. 25. – № 10. – P. 1516-1533.

124. Niu, Z. Adaptive simulation of boiler unit performance / Z. Niu, K. F. V. Wong // Energy Conversion and Management. – 1998. – Vol. 39. – № 13. – P. 1383-1394.

125. Artificial intelligence for control and optimization of boilers' performance and emissions: A review / M. A. Nemitallah, M. A. Nabhan, M. Alowaifeer [et al.] // Journal of Cleaner Production. – 2023. – Vol. 417. – № 10. – P. 138109.

126. Sunil, P. U. Mathematical modeling, simulation and validation of a boiler drum: Some investigations / P. U. Sunil, J. Barve, P. S. V. Nataraj // Energy. – 2017. – Vol. 126. – P. 312-325.

127. Failure case studies of SA213-T22 steel tubes of boiler through computer simulations / J. Purbolaksono, J. Ahmad, A. Khinani [et al.] // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. – 2010. – Vol. 23. – № 1. – P. 98-105.

128. Numerical analysis of fuel regression rate and flow. / L. Xuancheng, Z. Changsheng, W. Luhao, Z. Min // Journal of physics. – 2023. – Vol. 2472. – № 1. – P. 012011.

129. The impact of secondary air boundary conditions on CFD results in small-scale wood pellet combustion / T. Zadravec, B. Rajh, F. Kokalj, N. Samec // Fuel. – 2022. – Vol. 324. – P. 124451.

130. Chaney, J. An overview of CFD modelling of small-scale fixed-bed biomass pellet boilers with preliminary results from a simplified approach / J. Chaney, H. Liu, J. Li // Energy Conversion and Management. – 2012. – Vol. 63. – P. 149-156.

131. Measurements and particle resolved modelling of heat-up and drying of a packed bed / B. Peters, E. Schröder, C. Bruch, T. Nussbaumer // Biomass and Bioenergy. – 2002. – Vol. 23. – № 4. – P. 291-306.

132. Thermal conversion of biomass: Comprehensive reactor and particle modeling / J. C. Wurzenberger, S. Wallner, H. Raupenstrauch, J. G. Khinast // AIChE Journal. – 2002. – Vol. 48. – № 10. – P. 2398-2411.

133. An overview of processes and considerations in the modelling of fixed-bed biomass combustion / H. Khodaei, M. A.-A. Yasir, F. Guzzomi, G.H. Yeoh // Energy. – 2015. – Vol. 88. – P. 946-972.

134. Optimisation study of a large waste-to-energy plant using computational modelling and experimental measurements / C. D. Goddard, Y. B. Yang, J. Goodfellow [et al.] // Journal of the Energy Institute. – 2005. – Vol. 78. – № 3. – P. 106-116.

135. Yang, Y. B. Numerical simulation of the burning characteristics of thermally-thick biomass fuels in packed-beds / Y. B. Yang, V. N. Sharifi, J. Swithenbank // Process Safety and Environmental Protection. – 2005. – Vol. 83. – № 6. – P. 549-558.

136. Judt, W. Numerical and experimental analysis of heat transfer for solid fuels combustion in fixed bed conditions / W. Judt // *Energies*. – 2020. – Vol. 13. – № 22. – P. 6141.

137. Junejo, A. Role of air staging in a batch-type fixed bed biomass combustor under constant primary air / A. Junejo, Y. M. Al-Abdeli, J. Porteiro // *Journal of Thermal Science*. – 2024. – Vol. 33. – № 1. – P. 284-299.

138. Performance and boiler efficiency using low-grade coal on 400 MWe coal-fired power plant: case study of Suralaya Power Plant Unit 2 / E. Supriyanto, N. Cahyo, R. Sitanggang [et al.] // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. – IOP Publishing, 2021. – Vol. 882. – P. 12033.

139. Combustion and mass loss behavior and characteristics of a single biomass pellet positioning at different orientations in a fixed bed reactor / S. A. El-Sayed, M. E. Mostafa, T. M. Khass [et al.] // *Biomass Conversion and Biorefinery*. – 2024. – Vol. 14. – № 14. – P. 15373-15393.

140. Time-dependent combustion of solid fuels in a fixed-bed: Measurements and mathematical modeling / R. Buczyński, R. Weber, A. Szlek, R. Nosek // *Energy and Fuels*. – 2012. – Vol. 26. – № 8. – P. 4767-4774.

141. Akyuzlu, K. M. A physics based mathematical model to predict the regression rate in an ablating hybrid rocket solid fuel / K. M. Akyuzlu, R. Kagoo, A. Antoniou // *37th Joint Propulsion Conference and Exhibit*. – Salt Lake: AIAA 2001. – P. 32-42.

142. Theories and applications of CFD–DEM coupling approach for granular flow: A review / M. A. El-Emam, L. Zhou, W. Shi [et al.] // *Archives of Computational Methods in Engineering*. – 2021. – Vol. 28. – P. 4979–5020.

143. Massey, B. S. *Mechanics of fluids*. Vol. 1 / B. S. Massey, J. Ward-Smith. – London: Chapman, 1998. – 427 p.

144. Versteeg, H. K. *The finite volume method* / H. K. Versteeg, W. Malalasekera // *An Introduction to Computational Fluid Dynamics*. – Essex: Pearson Education, 2001. – 503 p.

145. Versteeg, H. K. An introduction to computational fluid dynamics: the finite volume method / H. K. Versteeg, W. Malalasekera. – London: Pearson Education, 2007. – 517 p.
146. Donea, J. Finite element methods for flow problems / J. Donea, A. Huerta. – Chichester: John Wiley & Sons, 2003. – 350 p.
147. Singh, R. I. CFD modeling to study fluidized bed combustion and gasification / R. I. Singh, A. Brink, M. Hupa // Applied Thermal Engineering. – 2013. – Vol. 52. – № 2. – P. 585-614.
148. Alfarawi, S. S. Exploring discontinuous meshing for cfd modelling of counter flow heat exchanger / S. S. Alfarawi, A. El-Sawi, H. Omar // J. Adv. Res. Numer. Heat Transf. – 2021. – Vol. 5. – P. 26-34.
149. Charlesworth, D. J. Solution of the incompressible Navier-Stokes equations on unstructured meshes / D. J. Charlesworth. – London: ProQuest, 2003. – 197 p.
150. Application of polyhedral meshing strategy in indoor environment simulation: Model accuracy and computing time / H. Chen, X. Zhou, Z. Feng, S.-J. Cao // Indoor and Built Environment. – 2022. – Vol. 31. – № 3. – P. 719-731.
151. Shrivastava, D. CFD Modelling of Underground Coal Gasification using ANSYS Fluent Simulator / D. Shrivastava // International Journal of Scientific & Engineering Research. – 2021. – Vol. 12. – № 07. – P. 505-519.
152. Корнилова, Н. В. Расчет совместного сжигания биогаза и RDF топлива / Н. В. Корнилова, П. А. Трубаев // Энергетические системы. – 2020. – №. 1. – С. 173-182.
153. Visconcini, A. R. Fluid flow simulation of industrial fixed bed mixed-flow grain dryer using k- ω SST turbulence model / A. R. Visconcini, C. M. G. Andrade, A. M. de Souza Costa // International Journal of Agricultural and Biological Engineering. – 2021. – Vol. 14. – № 2. – P. 226-230.
154. Ansys fluent theory guide. Release 2021 R2. – Canonsburg: ANSYS, 2021. – 1024 p.

155. Comparison of three different CFD methods for dense fluidized beds and validation by a cold flow experiment / A. Stroh, F. Alobaid, M. T. Hasenzahl [et al.] // *Particuology*. – 2016. – Vol. 29. – P. 34-47.
156. Dullien, F. A. L. *Porous media: fluid transport and pore structure* / F. A. L. Dullien. – London: Academic Press, 2012. – 416 p.
157. Investigation of channel formation due to random packing in a burning waste bed / Y. B. Yang, J. Goodfellow, Y. R. Goh [et al.] // *Process Safety and Environmental Protection*. – 2001. – Vol. 79. – № 5. – P. 267-277.
158. Multiscale modelling of wall-to-bed heat transfer in fixed beds with non-spherical pellets: From particle-resolved CFD to pseudo-homogenous models / E. M. Moghaddam, E. A. Foumeny, A. I. Stankiewicz, J. T. Padding // *Chemical Engineering Science*. – 2021. – Vol. 236. – P. 116532.
159. Koehler, F. APEBench: A Benchmark for Autoregressive Neural Emulators of PDEs / F. Koehler, S. Niedermayr, N. Thuerey // *Advances in Neural Information Processing Systems*. – 2025. – Vol. 37. – P. 120252-120310.
160. Yakovenko, I. Computational fluid dynamics model for analysis of the turbulent limits of hydrogen combustion / I. Yakovenko, A. Kiverin, K. Melnikova // *Fluids*. – 2022. – Vol. 7. – № 11. – P. 343.
161. Nakayama, A. A general macroscopic turbulence model for flows in packed beds, channels, pipes, and rod bundles / A. Nakayama, F. Kuwahara // *Journal of Fluids Engineering*. – 2008. – Vol. 130. – P. 101205.
162. Skartlien, R. A generalized k-epsilon model for turbulence modulation in fluid-particle flows / R. Skartlien, T. L. Palmer, O. Skjæraasen // *arXiv:2211.04516*. – 2022. URL: <http://dx.doi.org/10.48550/arXiv.2211.04516>
163. Zhu, Y. A data-driven approach for turbulence modeling / Y. Zhu, N. Dinh. // *arXiv:2005.00426*. – 2005. URL: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2005.00426>
164. Mularski, J. Impact of Chemistry–Turbulence Interaction Modeling Approach on the CFD Simulations of Entrained Flow Coal Gasification / J. Mularski, N. Modliński // *Energies*. – 2020. – Vol. 13. – № 23. – P. 6467.

165. Mathematical modelling of MSW incineration on a travelling bed / Y. B. Yang, Y. R. Goh, R. Zakaria [et al.] // Waste management. – 2002. – Vol. 22. – № 4. – P. 369-380.
166. Estimation of gas phase mixing in packed beds / S. Frigerio, H. Thunman, B. Leckner, S. Hermansson // Combustion and Flame. – 2008. – Vol. 153. – № 1-2. – P. 137-148.
167. Mathematical modeling and experimental study of biomass combustion in a thermal 108 MW grate-fired boiler / C. Yin, L. Rosendahl, S. K. Kær [et al.] // Energy & Fuels. – 2008. – Vol. 22. – № 2. – P. 1380-1390.
168. Mathematical modelling of straw combustion in a 38 MWe power plant furnace and effect of operating conditions / Y. Bin Yang, R. Newman, V. Sharifi [et al.] // Fuel. – 2007. – Vol. 86. – № 1-2. – P. 129-142.
169. Westbrook, C. K. Chemical kinetic modeling of hydrocarbon combustion / C. K. Westbrook, F. L. Dryer // Progress in energy and combustion science. – 1984. – Vol. 10. – № 1. – P. 1-57.
170. Ansys Fluent R14 Theory Guide. – Canonsburg: ANSYS, 2011. – 1130 p.
171. Howard, J. B. Kinetics of carbon monoxide oxidation in postflame gases / J. B. Howard, G. C. Williams, D. H. Fine // Symposium (International) on Combustion. – 1973. – Vol. 14(1). – P. 975-986.
172. Blasi, C. Di. Modeling wood gasification in a countercurrent fixed-bed reactor / C. Di Blasi // AIChE Journal. – 2004. – Vol. 50. – № 9. – P. 2306-2319.
173. Numerical modeling of the combustion of densified wood under fixed-bed conditions / J. Collazo, J. Porteiro, D. Patiño, E. Granada // Fuel. – 2012. – Vol. 93. – P. 149-159.
174. Bryden, K. M. Numerical modeling of a deep, fixed bed combustor / K. M. Bryden, K. W. Ragland // Energy & Fuels. – 1996. – Vol. 10. – № 2. – P. 269-275.
175. Hermansson, S. CFD modelling of bed shrinkage and channelling in fixed-bed combustion / S. Hermansson, H. Thunman // Combustion and Flame. – 2011. – Vol. 158. – № 5. – P. 988-999.

176. Duffy, N. T. M. Investigation of factors affecting channelling in fixed-bed solid fuel combustion using CFD / N. T. M. Duffy, J. A. Eaton // Combustion and flame. – 2013. – Vol. 160. – № 10. – P. 2204-2220.

177. Pulverised coal and biomass co-combustion: particle flow modelling in a swirl burner / K. J. Larsen, A. D. Burns, S. R. Gubba [et al.] // Journal of the Energy Institute. – 2013. – Vol. 86. – № 4. – P. 220-226.

178. Peters, B. Measurements and application of a discrete particle model (DPM) to simulate combustion of a packed bed of individual fuel particles / B. Peters // Combustion and Flame. – 2002. – Vol. 131. – № 1-2. – P. 132-146.

179. Thurner, F. Kinetic investigation of wood pyrolysis / F. Thurner, U. Mann // Industrial & Engineering Chemistry Process Design and Development. – 1981. – Vol. 20. – № 3. – P. 482-488.

180. Evans, D. D. Combustion of wood charcoal / D. D. Evans, H. W. Emmons // Fire Safety Journal. – 1977. – Vol. 1. – № 1. – P. 57-66.

181. Johansson, R. Influence of intraparticle gradients in modeling of fixed bed combustion / R. Johansson, H. Thunman, B. Leckner // Combustion and Flame. – 2007. – Vol. 149. – № 1-2. – P. 49-62.

182. Heat of wood pyrolysis / J. Rath, M. G. Wolfinger, G. Steiner [et al.] // Fuel. – 2003. – Vol. 82. – № 1. – P. 81-91.

183. Baum, M. M. Predicting the combustion behaviour of coal particles / M. M. Baum, P. J. Street // Combustion science and technology. – 1971. – Vol. 3. – № 5. – P. 231-243.

184. Composition of volatile gases and thermochemical properties of wood for modeling of fixed or fluidized beds / H. Thunman, F. Niklasson, F. Johnsson, B. Leckner // Energy & fuels. – 2001. – Vol. 15. – № 6. – P. 1488-1497.

185. Girgis, E. Wood combustion in an overfeed packed bed, including detailed measurements within the bed / E. Girgis, W. L. H. Hallett // Energy & fuels. – 2010. – Vol. 24. – № 3. – P. 1584-1591.

186. Wakao, N. Heat and mass transfer in packed beds. Vol. 1 / N. Wakao, S. Kagei. – New York: Gordon and Breach, 1982. – 351 p.
187. Demirbas, A. Combustion characteristics of different biomass fuels / A. Demirbas // Progress in energy and combustion science. – 2004. – Vol. 30. – № 2. – P. 219-230.
188. Experimental study on effects of moisture content on combustion characteristics of simulated municipal solid wastes in a fixed bed / L. Liang, R. Sun, J. Fei [et al.] // Bioresource technology. – 2008. – Vol. 99. – № 15. – P. 7238-7246.
189. Effect of ash content on the combustion process of simulated MSW in the fixed bed / R. Sun, T. M. Ismail, X. Ren, M. Abd El-Salam // Waste management. – 2016. – Vol. 48. – P. 236-249.
190. Kornilova, N. V. Analysis of MSW Combustion temperature in a hot water boiler with the low-capacity / N. V Kornilova, P. A. Trubaev // Journal of Physics: Conference Series. – 2018. – Vol. 1066. – P. 12003.
191. Geochemical Characterization of Coals Using Proximate and Ultimate Analysis of Tadkeshwar Coals, Gujarat / M. A. Rasheed, P. L. S. Rao, A. Boruah [et al.] // Geosciences. – 2015. – Vol. 2015. – № 4. – P. 113-119.
192. Optimization of a tetrahedron compliant spherical joint via computer-aided engineering tools / S. M. Kargar, A. Parmiggiani, M. Baggetta [et al.] // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2024. – Vol. 132. – № 3. – P. 1151-1162.
193. Ruggiero, A. Comparison of meshing strategies in THR finite element modelling / A. Ruggiero, R. D'Amato, S. Affatato // Materials. – 2019. – Vol. 12. – № 14. – P. 2332.
194. An efficient Cartesian mesh generation strategy for complex geometries / X. Li, M. Yang, L. Bi [et al.] // Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. – 2024. – Vol. 418. – P. 116564.
195. Pollutants Generated by the Combustion of Solid Biomass Fuels / J. M. Jones, A. R. Lea-Langton, L. Ma [et al.] // London: Springer, 2014. – 109 p.

196. Трёмбовля, В. И. Теплотехнические испытания котельных установок / В.И. Трёмбовля, Е.Д. Фигнер, А.А. Авдеева. – М. : Энергоатомиздат, 1991. – 416 с.
197. Равич, М. Б. Эффективность использования топлива / М. Б. Равич. – М.: Наука, 1977. – 344 с.
198. Левин, Б. В. Использование твердых бытовых отходов в системах энергоснабжения / Б. В. Левин. – М.: Энергоиздат, 1982. – 224 с.
199. Айвазян, С. А. Основы моделирования и первичная обработка данных / С. А. Айвазян, И. С. Енюков. – М. : Финансы и статистика, 1983. – 472 с.
200. Торф: возгорание торфа, тушение торфяников и торфокомпозиты / Л. Б. Хорошавин, О. А. Медведев, В. А. Беляков [et al.]. – М.: ФГБУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ), 2013. – 256 с.
201. Методика определения выбросов при сжигании топлива в котлах производительностью менее 30 т пара или 20 Гкал / Разр. НИИАтмосфера. – М.: Интеграл, 1999. – 70 с.
202. Расчет выбросов загрязняющих веществ в атмосферу от установок малой производительности по термической переработке твердых бытовых отходов и промотходов / Разр. ВНИИГАЗа. – М.: Газпром, 1998. – 33 с.
203. Blarke, M. B. Towards an intermittency-friendly energy system: Comparing electric boilers and heat pumps in distributed cogeneration / M. B. Blarke // Applied Energy. – 2012. – Vol. 91. – № 1. – P. 349-365.
204. NO_x reduction by steam injection method during liquid fuel and waste burning / I. S. Anufriev, E. P. Kopyev, I. S. Sadkin, M. A. Mukhina // Process safety and environmental protection. – 2021. – Vol. 152. – P. 240-248.
205. Gasification of refuse-derived fuel from municipal solid waste for energy production: a review / Y. Yang, R. K. Liew, A. M. Tamothran [et al.] // Environmental chemistry letters. – 2021. – Vol. 19. – P. 2127-2140.
206. Gasification of municipal solid waste blends with biomass for energy production and resources recovery: Current status, hybrid technologies and innovative

prospects / Z. Hameed, M. Aslam, Z. Khan [et al.] // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2021. – Vol. 136. – P. 110-375.

207. Numerical modelling and experimental verification of the low-emission biomass combustion process in a domestic boiler with flue gas flow around the combustion chamber / P. Motyl, D. Król, S. Poskrobko, M. Juszczak // Energies. – 2020. – Vol. 13. – № 21. – P. 5837.

208. Effect of inhomogeneous methane-air mixtures on combustion characteristics in a constant volume combustion chamber / Y. Li, X. Zhang, Y. Wang, J. Sun // Fuel. – 2023. – Vol. 331. – P. 125960.

209. Staged supply of fuel and air to the combustion chamber to reduce emissions of harmful substances / S. Bolegenova, A. Askarova, A. Georgiev [et al.] // Energy. – 2024. – Vol. 293. – P. 130622.

210. Zhang, Y. Theory and calculation of heat transfer in furnaces / Y. Zhang, Q. Li, H. Zhou. – London: Jonathan Simpson, 2016. – 338 p.

211. Particulate matter emission control from small residential boilers after biomass combustion. A review / A. Jaworek, A. T. Sobczyk, A. Marchewicz [et al.] // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2021. – Vol. 137. – P. 110446.

212. Ortiz, F. J. G. Modeling of fire-tube boilers / F. J. G. Ortiz // Applied Thermal Engineering. – 2011. – Vol. 31. – № 16. – P. 3463-3478.

213. Heat transfer and flow characteristics of straight-type PCHEs with rectangular channels of different widths / Q. Wang, B. Xu, X. Huang [et al.] // Nuclear Engineering and Design. – 2022. – Vol. 391. – P. 111734.

214. Structure parameters and designs and their impact on performance of different heat exchangers: A review / H. Azeez Mohammed Hussein, R. Zulkifli, W. M. Faizal Bin Wan Mahmood, R. K. Ajeel // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2022. – Vol. 154. – P. 111842.

215. Цзяпэй, Л. Оптимальное проектирование тепловых котлов / Л. Цзяпэй, Ч. Цзуннань, С. Ф. Кудашев // Бюллетень науки и практики. – 2022. – Vol. 8. – № 8. – P. 263-276.

216. Jaćimović, B. Influence of flue gas pattern flow in boiler radiant section on heat transfer / B. Jaćimović, S. Genić, N. Jaćimović // Journal of Thermal Science and Engineering Applications. – 2022. – Vol. 14. – № 2. – P. 21007.
217. Aydın, A. Design and optimization of a combi boiler heat exchanger: A CFD-based approach / A. Aydın, T. Engin, S. Kılıç // Applied Thermal Engineering. – 2024. – Vol. 257. – P. 124178.
218. Moinuddin, K. Numerical study on effect of relative humidity (and fuel moisture) on modes of grassfire propagation / K. Moinuddin, N. Khan, D. Sutherland // Fire safety journal. – 2021. – Vol. 125. – P. 103422.
219. Li, Z. Fire behaviors of fuels with different sootiness levels in hot and humid conditions / Z. Li, P. Zhang // Process Safety and Environmental Protection. – 2021. – Vol. 146. – P. 350-359.
220. Vabø, M. L.-M. Analysis of wood fuel moisture content on enclosure fire through small scale experiments / M. L.-M. Vabø. – Haugesund: Høgskolen på Vestlandet, 2021. – 63 p.
221. ИТС 9-2020. Утилизация и обезвреживание отходов термическими способами. – М.: Бюро НДТ, 2020. – 200 с.
222. ГОСТ Р 55837-2023 «Ресурсосбережение. Наилучшие доступные технологии. Обработка отходящих газов при сжигании отходов». – М.: Российский институт стандартизации, 2023. – 48 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1. АКТЫ ВНЕДРЕНИЯ РАБОТЫ

1. Акт о внедрении на ООО «ТК Экотранс».
2. Акт внедрения в учебный процесс БГТУ им. В.Г. Шухова.
3. Письмо об использовании в учебном процессе Университета Тикрит (Ирак).



ОБЩЕСТВО С ОГРАНИЧЕННОЙ ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ «ТРАНСПОРТНАЯ КОМПАНИЯ «ЭКОТРАНС»

308017, Россия, г. Белгород
ул. Серафимовича, 72
e-mail ecotransTK@yandex.ru
тел. (4722) 20-10-90; 20-10-91
факс (4722) 20-10-80

Утверждаю



Н.Т. Шеин

2025 г.

АКТ

о внедрении результатов диссертационной работы
«Повышение эффективности сжигания твердого топлива и отходов в котлах малой мощности с колосниковой решеткой»
аспиранта кафедры «Энергетики теплотехнологии» БГТУ им. В.Г. Шухова
Ахмеда Ашрафа Абдуллы Ахмеда,
представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук

Результаты работы Ахмеда А.А.А. послужили основой при выполнении мало-затратных проектов реконструкций отопительных водогрейных котлов, эксплуатирующихся на промышленной площадке полигона ТКО по адресу г. Белгород, ул. Зареченская 85, для обеспечения возможности сжигания RDF-топлива.

Ахмедом А.А.А. получены научные и практические результаты по направлениям повышения эффективности систем обеспечения теплового режима теплоэнергетических объектов исследованию методов их совершенствования, разработка теоретических и практических основ создания малоотходных тепловых технологических установок, способствующих защите окружающей среды.

Внедрены следующие результаты исследований:

— организация дожига загрязняющих веществ в дополнительном газоходе, расположенном между топкой и конвективной частью (газоводяным теплообменником) котла;

— обеспечение полного сгорания топлива и последующего нахождения продуктов горения при температурах более 850°C более 2 с. путем организации режима работы котла с коэффициентом избытка воздуха 1,4–1,8 и влажностью топлива 10-30% без превышения этих значений.

Начальник отдела энергетики

М.А. Опрышко

Профессор кафедры ЭТ
БГТУ им. В.Г. Шухова

П.А. Трубаев



Утверждаю
Первый проректор
БГТУ им. В.Г. Шухова,
д-р техн. наук, проф.

Евтушенко Е.И.

« 31 » 03 2025 г.

АКТ
о внедрении в учебный процесс

Наименование:	Компьютерная модель «Горение слоя твердого топлива на колосниковой решетке в неподвижном слое».
Состав:	а) CFD-модель топки размером 1700x1430x715 мм, реализованная в ANSYS Fluent (расчетная область, сгенерированная сетка, граничные условия, настроенные расчетные модели); б) CFD-модель топки размером 1220x1430x2335 мм с дополнительным газоходом для дожигания вредных веществ высотой 2500 мм с поворотом в верхней части газов на 180°, реализованная в ANSYS Fluent (расчетная область, сгенерированная сетка, граничные условия, настроенные расчетные модели); в) xlsm-файл, реализующий методику расчета времени течения газового потока после окончания горения по данным 3d-streamline, сгенерированным в ANSYS Fluent.
Свидетельство об охране интеллектуальной собственности	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. Номер и дата поступления заявки: 2024690608 05.12.2024. Дата регистрации: 27.01.2025.
Краткое описание:	Горение твердого топлива характеризуется большой сложностью в моделировании. Разработанная компьютерная модель сжигания твердого топлива в неподвижном слое в топках печей и котлов малой мощности позволяет выполнять моделирование с приемлемым для учебных целей временем. 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 газофазных реакций окисления СО и углеводородов выделившихся летучих веществ. Дополняющий модель метод расчета времени течения газового потока после окончания горения по данным линий тока, сгенерированным при моделировании твердотопливного котла в ANSYS Fluent, позволяет оценить границы области горения и полноту разложения загрязняющих веществ в продуктах горения. Компьютерная модель позволяет: – моделировать сжигание твердого топлива, биотоплива, RDF-топлива различного состава и влажности; – определять полноту сгорания топлива и образование вредных ве-

	образования «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова». Номер и дата поступления заявки: 2024617890 15.04.2024. Дата регистрации: 25.04.2024.
Разработчик:	Аспирант кафедры Энергетики теплотехнологии Леонов Евгений Сергеевич (научный консультант проф. кафедры Энергетики теплотехнологии, д-р техн. наук, доц. Трубаев П.А.)
Основание разработки:	Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук «Совершенствование систем теплогазоснабжения с использованием биогаза переменного состава в качестве топлива» по специальности 2.1.3. Теплоснабжение, вентиляция, кондиционирование воздуха, газоснабжение и освещение.
Краткое описание:	Назначение комплекса программ: 1. Расчет расхода биогаза, воздуха для горения и продуктов сгорания, необходимых для получения 1 МВт энергии при расчете печей и котлов, использующих в качестве топлива биогаз, свалочный газ, низкокалорийные газы. Программа обеспечивает выполнение следующих функций: расчет характеристик топлива по его составу; расчет материального баланса процесса горения с получением результатов с размерностью $\text{м}^3/\text{МВт}$; расчет адиабатической и теоретической температуры горения. 2. Расчет удельной объемной теплоемкости, плотности, коэффициентов теплопроводности, кинематической и динамической вязкости, критерия Прандтля для продуктов сгорания биогаза при заданной температуре в диапазоне от 0 до 2500°C. 3. Тепловой поверочный расчета водотрубного котла типа КВГМ, содержащего топку и конвективную поверхность нагрева с использованием в качестве газообразного топлива газа произвольного состава, в том числе природного газа, биогаза, свалочного газа, низкокалорийных газов. Программа обеспечивает выполнение следующих функций: расчет температуры уходящих газов по заданной тепловой мощности; расчет тепловой мощности для заданной температуры уходящих газов; расчет выбросов NO_x и CO в продуктах сгорания. 4. Тепловой поверочный расчет жаротрубного котла типа КСВ, содержащего топку, поворотную камеру и две конвективных поверхности с использованием в качестве газообразного топлива газа произвольного состава, в том числе природного газа, биогаза, свалочного газа, низкокалорийных газов. Программа обеспечивает выполнение следующих функций: расчет температуры уходящих газов по заданной тепловой мощности; расчет тепловой мощности для заданной температуры уходящих газов; расчет выбросов NO_x и CO в продуктах сгорания.
Образовательные программы, в которых внедрена разработка:	1. Образовательные программа бакалавриата «Энергообеспечение предприятий», «Энергетика теплотехнологий» по направлению «13.03.01 Теплоэнергетика и теплотехника»: а) Дисциплина «Источники энергии теплоэнергетики»: – лабораторная работа «Расчет горения биогаза»; б) Дисциплина «Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии»: – РГЗ «Замена в водогрейном котле природного газа на биогаз». 2. Образовательная программа магистратуры «Энергетика теплотехнологий» по направлению «13.04.01 Теплоэнергетика и

	ществ NO_x, SO_2 и CO; – определять время нахождения продуктов горения в расчетной области, определять границы окончания горения; – оценивать эффективность горения при изменении основных параметров: коэффициента избытка воздуха α и температуры воздуха, подаваемого на горение, высоты топочного пространства, расположения и размеров выходного окна.
Основание разработки:	Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук «Повышение эффективности сжигания твердого топлива и отходов в котлах малой мощности с колосниковой решеткой» по специальности 2.4.6 «Теоретическая и прикладная теплотехника».
Разработчик:	Аспирант кафедры Энергетики теплотехнологии Ахмед Ашраф Абдулла Ахмед (научный консультант проф. кафедры Энергетики теплотехнологии, д-р техн. наук, доц. Трубаев П.А.)
Образовательные программы, в которых внедрена разработка:	1. Образовательная программа магистратуры «Энергетика теплотехнологии» по направлению «13.04.01 Теплоэнергетика и теплотехника»: а) Дисциплина «Математическое и компьютерное моделирование теплотехнологических процессов»: – лабораторная работа «Исследование аэродинамики топки котла при сжигании твердого топлива»; – лабораторная работа «Исследование образование выбросов при сжигании твердого топлива»; б) Дисциплина «Производственная научно-исследовательская работа»: выполнение проектов по конструированию и оптимизации твердо-топливных котлов для сжигания угля, биотоплива, RDF-топлива с целью обеспечения полноты сгорания и снижения выбросов. 2. Программа повышения квалификации «Использование альтернативной энергетики на основе нетрадиционных и возобновляемых источников энергии в промышленности и коммунальном хозяйстве»: использование результатов работы в модуле «2. Использование биомассы в тепловой и электрогенерации».

Акт утвержден на заседании кафедры энергетики теплотехнологии, протокол № 9 от 31 марта 2025 г.

Проф. кафедры
Энергетики теплотехнологии,
д-р техн. наук, доц.

Заведующий кафедрой
Энергетики теплотехнологии,
канд. техн. наук, доц.

 Трубаев П.А.

 Васильченко Ю.В.



التاريخ: ١٤/٤/٢٠٢٥

العدد: ١٤٥٦ / ١٦٣/٧

To whom it may concern,

Subject: Evaluation of a Study on Solid Fuel and Waste Combustion in Small Capacity Boilers with Grates

Greetings,

The research implemented by **Ashraf Abullah Ahmed** on solid fuel and waste combustion in small capacity boilers with grates is highly detailed and well-structured, making a valuable contribution to heat and thermal power engineering. It effectively addresses waste management challenges by proposing small-scale incineration as a viable alternative to large waste-to-energy plants. The study develops a CFD-based model for solid fuel bed combustion, enhancing predictive accuracy for emissions and combustion efficiency. A new method for gas flow time estimation is introduced, improving the understanding of pollutant decomposition. Optimized combustion conditions are identified, showing that maintaining temperatures above 850°C for over two hours at an excess air ratio of 1.4–1.8 ensures efficient pollutant reduction. The research also presents innovative design modifications to the gas duct and afterburning process, reducing turbulence and improving emission control.

The practical implementation of this work in industry, specifically in LLC 'TC Ecotrans' and LLC 'Kommunalshchik', demonstrates its real-world applicability. Strong validation with experimental data and the publication of findings in Scopus-indexed journals further ensure scientific rigor. This study is scientifically robust, methodologically sound, and industrially relevant. It successfully bridges the gap between theoretical modeling and practical application, offering practical solutions for sustainable waste combustion. Future work could explore AI-driven optimization and advanced afterburning techniques to further enhance efficiency and emissions control. Overall, this is a well-executed and impactful study that significantly contributes to sustainable energy engineering. Therefore, we appreciate Ashraf findings in his research work as it may be useful in developing our students skills in the College of Engineering at Tikrit University in future.

With appreciation and respect,


Saad Ramadan Ahmed, PhD
Assistant Professor of Material Engineering
Dean of the College of Engineering
Tikrit University
Tikrit, Salahudin, Iraq
14/4/2025



Республика Ирак
Министерство высшего образования и научных исследований
Инженерный колледж Тикритского университета

Для предъявления по месту требования.

Тема: Оценка результатов исследования сжигания твердого топлива и отходов в котлах малой мощности с решетками

Здравствуйте,

Исследование Ашрафа Абуллы Ахмеда по сжиганию твердого топлива и отходов в котлах малой мощности с решетками является очень подробным и хорошо структурированным, вносящим ценный вклад в тепло- и электроэнергетику. Оно эффективно решает проблемы управления отходами, предлагая маломасштабное сжигание отходов в качестве жизнеспособной альтернативы крупным заводам по переработке отходов в энергию. В исследовании разработана модель сжигания твердого топлива на основе CED, повышающая точность прогнозирования выбросов и эффективности сжигания. Представлен новый метод оценки времени малого газа, что улучшает понимание процесса разложения загрязняющих веществ. Определены оптимальные условия сжигания, показавшие, что поддержание температуры выше 850°C в течение более двух часов при соотношении избыточного воздуха 1,4-1,8 обеспечивает эффективное снижение загрязняющих веществ. В исследовании также представлены инновационные конструктивные изменения газохода и процесса дожигания, снижающие турбулентность и улучшающие контроль выбросов.

Практическое внедрение данной работы в промышленность, в частности в “ТК Экотранс” и ООО “Коммунальщик”, демонстрирует ее применимость в практическом плане. Строгое подтверждение экспериментальными данными и публикация результатов в журналах, индексируемых Scopus, также обеспечивают научную строгость. Данное исследование является научно обоснованным, методологически достоверным и промышленно значимым. Оно успешно преодолевает разрыв между теоретическим моделированием и практическим применением, предлагая практические решения для устойчивого сжигания отходов. В дальнейших работах можно исследовать оптимизацию с использованием AI и передовые технологии дожигания для дальнейшего повышения эффективности и контроля выбросов. В целом, это хорошо выполненное и значимое исследование, которое вносит существенный вклад в развитие устойчивой энергетики. Поэтому мы благодарим Ашрафа за его исследовательскую работу, так как она может быть полезна для развития навыков наших студентов в Инженерном колледже Тикритского университета.

С признательностью и уважением,

Саад Рамадан Ахмед (PhD),
Доцент кафедры материаловедения,
Декан инженерного колледжа Тикритского университета

Тикрит, Салалиудин, Ирак

ПРИЛОЖЕНИЕ 2. ПРОТОКОЛ ПРОМЫШЛЕННЫХ ИСПЫТАНИЙ

Утверждаю
Директор ООО «ТК «Экотранс»
Шеин Н.Т.
2023 г.



Протокол испытаний

Испытания проводились на промышленной площадке полигона ТКО «Стрелецкое» ООО «ТК «Экотранс» специалистами БГТУ им. В.Г. Шухова:

1. Трубаев П.А., проф. каф. ЭТ;
2. Гришко Б.М., вед. инженер каф. ЭТ;
3. Леонов Е.С., инженер каф. ЭТ;
4. Ахмед А.А.А., аспирант кафедры ЭТ

при участии специалистов ООО «ТК «Экотранс»:

5. Веревкин О.А, начальник отдела внедрения систем энергосбережения и газификации;
6. Опышко М.А., начальник отдела энергетики.

1. Общие данные

Место проведения: г. Белгород, ул. Зареченская 85.

Даты проведения: 04.12.2023 – 08.12.2023 г., 11.12.2023 г.

Объект испытаний: отопительный котел KBM-1,0.

2. Топливо

Для испытаний изготовлена партия RDF-топлива из частично высушенных отходов ТКО, вывозимых на полигон. Характеристики топлива приняты расчетные по среднему составу отходов, определенному при исследовании биогазового потенциала, проводимого АО «Белгородский институт альтернативной энергетики» (отчёт от 25.08.2023 г.):

Морфологический состав ТКО

Наименование отходов	Содержание, %
Бумага, картон	21,48
Пищевые отходы	36,80
Стекло	8,98
Текстиль	3,20
Пластмасса, полимеры	16,60
Металлы	2,10
Древесные и растительные отходы	6,82
Песок, почва, камни, смет и др.	4,02

Элементарный состав определен по среднему составу компонентов ТКО, приведенному в работе «Левин Б. И. Использование твердых бытовых отходов в системах энергоснабжения. – М.: Энергоиздат, 1982. – 224 с.».

Компоненты	Рабочая масса, мас. % (Б.И. Левин)								Доля, %
	C ^p	H ^p	O ^p	N ^p	S ^p	A ^p	W ^p	Сумма	
Бумага	34,65	4,63	35,40	0,20	0,18	18,76	6,2	100	21,48
Пищевые отходы	29,84	4,26	18,95	2,25	0,36	10,66	33,7	100	36,8
Текстиль	46,93	5,84	27,64	4,05	1,31	9,53	4,7	100	3,2
Древесина	48,24	5,72	40,26	0,12	0,00	0,95	4,7	100	6,82
Кожа, резина	68,42	5,26	13,26	0,21	0,63	12,21	0,0	100	–
Пластмасса	58,88	8,12	18,70	0,96	0,32	11,33	1,7	100	16,6
Отсев	16,56	2,26	16,80	0,00	0,12	59,56	4,7	100	–
Негорючая масса	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	0,0	100	15,1
Расчетный состав ТКО									
при естественной влажности	23,26	3,12	15,60	0,60	0,17	22,05	35,20	100	–
при влажности 10%	34,33	4,61	23,03	0,88	0,25	26,90	10,00	100	–
на горючую массу	54,4	7,3	36,5	1,4	0,4	–	–	100	–

Из отобранных предварительно подсушенных отходов на линии производства древесных пеллет приготовлена опытная партия брикетов массой 12 500 кг (12,5 т, объемом около 10 м³) диаметром 50 мм длиной до 400 мм.

Влажность образца определялась в лаборатории 408 УК2 в БГТУ им. В.Г. Шухова в камерной сушилке, оборудованной весами для взвешивания образцов, влажность составила $10,4 \pm 0,6\%$ и принята 10%.

3. Используемое оборудование и контрольные приборы

Наименование, тип	Измеряемые параметры	Пределы измерений
Газоанализатор Testo 330-1 LL	O ₂	0...21 об.%
	CO	0 ... 8000 ppm
	Температура	40 ... +1200 °C
Газоанализатор MPU Vario Plus Industrial	CO	0 ... 30%
	NO _x	0... 2 000 ppm
	SO ₂	0... 10 000 ppm
	H ₂ S	0... 1 000 ppm
Дифференциальный манометр Testo 512/2 и трубки Пито Testo 1000 и 350 мм	Давление	0 ... +200 Па
	Скорость (расчетная)	+2 ... +17,5 м/с
Инфракрасный термометр (пирометр) Testo 845 с подключаемым контактным Термопреобразователем	Температура (ИК)	-35 ... +1200°C
	Температура (термопара типа K NiCr-Ni)	-50 ... +1000°C
Ультразвуковой расходомер Panametrics PT878	Скорость (среды в трубах)	-12,2...12,2 м/с
Датчик температуры с керамической защитной оболочкой TTSC-22 («ОЛИЛ»)	Температура (термопара Тип S ТПП, вмонтирован в газоход котла)	от 0 до 1600 °C
Контроллер MIRKIP REX-C100 (индикация температуры)		
Термопреобразователь сопротивления (ТПС) ОВЕН ДТС305М	Температура (медный преобразователь, вмонтированы в трубы теплоносителя)	-100...+250 °C
Измеритель двухканальный ОВЕН 2ТРМ1		

4. Методика проведения испытаний

1. Путем регулирования частоты дутьевого вентилятора переход в режим с необходимым содержанием кислорода в отходящих газах.

Параметры		Содержание кислорода в продуктах горения O ₂ , об. %				
Содержание оксида углерода в продуктах горения CO, об. %		0	2000	4000	6000	8000
Коэффициент избытка воздуха	1,4	6,0	5,9	5,8	5,7	5,6
	1,6	7,9	7,8	7,7	7,6	7,5
	1,8	9,3	9,2	9,1	9,0	8,9

2. Измерение температуры и состава уходящих газов (O₂, CO) после котла в точке 1 с использованием газоанализатора «Testo 330-1 LL» для контроля недожога, расчета коэффициента избытка воздуха и оценки стабильности режима (интервал 5...10 мин);

3. Измерение скорости воздуха и отходящих газов в точке 1 для определения объемного расхода с использованием дифференциального манометра Testo 512/2 и трубки Пито Testo 1000 и 350 мм (интервал 5...10 мин при достижении стационарного режима);

4. Измерение содержания выбросов (SO₂, NO_x, H₂S) в точке 1 с использованием газоанализатора «MPU Vario Plus» (интервал 10 мин при достижении стационарного режима);

5. Измерение расхода теплоносителя (ультразвуковой расходомер Panametrics PT878) (точка 3).

6. Считывание показаний температуры теплоносителя (измеритель ОВЕН 2ТРМ1, точки 3, 4).

7. Считывание показаний контроллера MIRKIP REX-C100 (датчик TTSC-22 температуры газов в выходном окне топки, точка 2).

8. Измерение температуры золы пирометром Testo 845 (точка 5, каждые 60 мин).

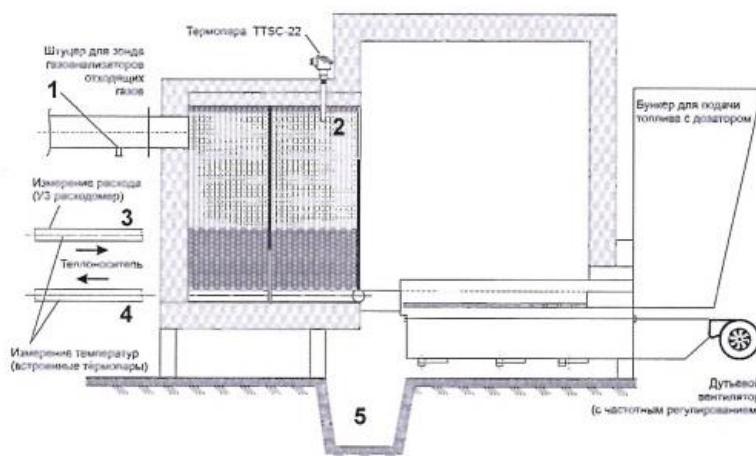


Рис. Схема измерений

5. Первичные полученные результаты

Параметр		Отходящие газы								Газо-ход	Теплоноситель			Зола
Измерительный прибор		Testo 330			MPU Vario Plus				Testo 512/2	TTSC-22	Встроенные ТПС		Panametrics PT878	Testo-845
Дата	Время	O ₂ , %	CO, ppm	t _{o,2} , °C	CO, ppm	NO _x , ppm	SO ₂ , ppm	H ₂ S, ppm	v _o , м/с	t _o , °C	t _{np} , °C	t _{ср} , °C	v _o , м/с	t _o , °C
04.12.2023	9:51	6,6	1836	252,3	1843	96	484	12	6,3	1385	65,3	49,3	1,79	
2	10:00	6,2	1814	240,7	1834	90	530	12	6,5	1382	65,3	49,5	1,79	
3	10:10	5,5	1790	239,8	1769	83	537	13	6,2	1404	64,9	48,7	1,80	150,1
4	10:22	5,6	1790	242,2	1820	73	495	13	6,4	1421	65,2	48,9	1,79	
5	10:32	5,5	1762	238,3	1780	68	532	13	6,3	1424	64,2	48,6	1,79	
6	10:42	5,3	1763	242,5	1788	91	515	13	6,0	1450	64,8	48,6	1,82	
7	10:51	5,4	1729	234,9	1719	45	543	13	6,2	1444	64,9	48,6	1,82	
8	11:00	5,7	1715	236,2	1944	83	530	13	6,0	1467	64,0	49,3	1,82	159,3
9	11:09	5,7	1721	239,9	1634	59	537	13	6,0	1489	64,4	49,3	1,80	
10	11:20	5,2	1678	240,3	1656	56	546	13	6,1	1486	64,1	49,1	1,80	
11	11:30	5,5	1677	242,1	1702	39	549	13	5,9	1490	64,5	49,2	1,79	
12	11:39	5,4	1681	242,1	1694	70	528	13	5,8	1476	64,2	48,4	1,81	
13	11:50	5,1	1699	230,2	1708	57	531	13	5,9	1451	64,2	47,9	1,79	
14	12:01	5,1	1694	230,0	1713	0	567	13	6,0	1459	64,0	47,8	1,79	
15	12:08	5,0	1692	238,2	1664	48	525	13	5,9	1452	64,2	48,1	1,81	157,9
16	12:30	5,5	1990	245,9	1668	36	526	13	5,8	1467	64,4	48,0	1,79	
17	12:39	5,0	1880	238,3	1694	41	560	13	5,9	1483	64,9	48,0	1,81	
18	12:52	5,1	1675	232,1	1659	69	517	13	6,0	1484	64,9	48,2	1,82	
19	13:40	5,0	1676	238,7	1697	58	518	17	6,0	1491	65,3	47,5	1,78	154,35
20	13:48	6,0	1745	237,2	1772	85	555	17	6,1	1426	66,0	47,5	1,78	
21	13:59	5,9	1738	245,5	1708	46	517	16	5,9	1442	66,4	47,2	1,82	160,94
22	14:10	5,0	1728	240,8	1707	46	529	13	6,2	1443	67,0	47,6	1,80	
23	14:20	5,6	1721	242,9	1725	40	560	13	5,9	1462	66,4	48,2	1,81	
24	14:32	5,6	1704	233,6	1730	69	532	13	6,0	1487	66,8	47,8	1,82	
25	14:41	5,3	1693	243,9	1685	59	520	13	6,0	1460	66,5	47,9	1,79	
26	14:49	5,1	1735	233,8	1725	57	522	13	5,8	1449	66,8	48,0	1,80	
27	14:59	5,6	1738	243,9	1737	82	504	13	6,2	1462	66,5	48,0	1,81	
28	15:12	5,3	1742	243,7	1721	52	557	13	6,2	1442	67,4	48,5	1,80	151,41
29	15:32	5,2	1734	238,7	1755	62	515	13	6,2	1430	66,5	48,1	1,82	
30	15:40	6,1	1760	251,3	1775	48	497	13	6,3	1426	66,7	49,0	1,79	
31	15:51	5,9	1754	250,5	1754	93	508	13	6,1	1399	66,9	48,9	1,82	
32	16:00	6,5	1770	246,6	1740	70	540	13	6,1	1398	66,5	48,5	1,81	
33	16:08	7,8	1800	239,6	1829	81	529	12	6,5	1413	67,2	48,6	1,79	
34	16:20	6,4	1781	238,7	1751	77	488	12	6,2	1401	66,7	49,4	1,81	
05.12.2023	9:21	6,8	1055	235,8	1079	135	540	14	5,8	1307	63,0	50,6	1,78	
2	9:35	7,7	1085	223,1	1058	143	538	13	6,0	1298	62,9	49,8	1,79	
3	9:52	8,0	1162	227,5	1160	127	470	13	6,2	1250	62,0	48,5	1,81	171,6
4	10:11	8,3	1131	233,2	1150	150	503	13	6,3	1227	61,5	49,6	1,82	
5	10:33	7,9	1173	243,8	1161	142	506	12	6,2	1189	61,9	49,2	1,82	
6	10:50	8,6	1163	237,0	1155	151	448	12	6,5	1202	62,2	49,1	1,79	
7	11:06	8,4	1162	226,3	1122	148	459	12	6,4	1199	61,7	49,4	1,79	
8	11:19	7,9	1175	245,6	1174	143	458	12	6,5	1220	61,4	49,0	1,80	171,19
9	11:37	8,0	1152	230,8	1163	136	460	13	6,5	1219	62,1	49,4	1,81	
10	11:51	8,0	1151	234,3	1160	145	496	13	6,0	1227	61,4	50,0	1,80	
12	12:59	8,1	1154	218,0	1169	142	485	13	6,2	1247	62,4	50,1	1,82	
13	13:15	9,9	1237	236,9	1231	201	459	12	6,9	1135	63,2	49,4	1,80	
14	13:28	8,7	1220	236,6	1253	183	433	12	6,6	1156	63,4	50,1	1,80	
15	13:45	8,6	1214	255,0	1174	166	454	12	6,7	1167	62,4	50,4	1,80	
16	13:59	8,6	1198	233,8	1173	174	462	12	6,8	1159	62,8	49,9	1,80	168,10
18	14:22	7,9	1182	238,1	1147	151	457	12	6,4	1192	62,8	50,3	1,81	
19	14:43	7,6	1123	221,7	1098	139	492	13	5,9	1241	62,3	50,3	1,82	
20	15:01	7,5	1133	215,7	1095	117	516	13	6,0	1278	61,7	50,1	1,79	
21	15:16	7,8	1120	229,0	1095	134	507	13	6,0	1289	61,5	50,1	1,79	169,5
22	15:32	7,1	1108	236,0	1091	113	507	13	5,9	1265	62,1	48,9	1,80	

Параметр		Отходящие газы								Газо-ход	Теплоноситель			Зола
Измерительный прибор		Testo 330			MPU Vario Plus				Testo 512/2	TTSC-22	Встроенные ТПС	Panametrics PT878	Testo-845	
Дата	Время	O ₂ , %	CO, ппм	t _{о.г.} , °C	CO, ппм	NO _x , ппм	SO ₂ , ппм	H ₂ S, ппм	v _г , м/с	t _г , °C	t _{пр} , °C	t _{с.пр} , °C	v _г , м/с	t _г , °C
23	15:47	7,5	1106	237,2	1137	120	507	13	6,1	1297	61,5	49,2	1,81	159,48
24	15:47	7,0	966	237,1	1050	122	499	13	5,6	1301	62,6	49,8	1,80	
06.12.2023	8:52	10,6	39	215,4	34	132	423	11	5,8	999	63,0	49,6	1,84	
2	9:01	10,4	31	227,8	32	153	447	11	6,0	1019	62,8	49,7	1,86	159,5
3	9:14	10,3	42	204,8	39	154	477	12	5,5	1050	62,2	49,3	1,86	
4	9:30	10,1	36	220,2	38	155	494	12	5,4	1067	61,8	48,8	1,87	
5	9:48	10,1	36	226,3	36	154	482	11	5,6	1062	62,2	48,8	1,86	
6	10:03	10,5	34	204,8	38	136	470	11	5,6	1038	62,6	48,9	1,86	
7	10:17	10,4	48	231,7	47	147	422	11	5,9	1025	62,6	49,5	1,83	169,0
8	10:33	10,7	42	215,1	40	152	449	11	6,3	1003	62,3	49,1	1,85	
9	10:48	10,6	19	215,4	32	151	427	11	5,9	988	62,2	48,4	1,83	
10	11:03	12,1	47	228,9	47	150	407	11	6,3	977	62,5	49,2	1,85	164,3
11	11:19	10,9	39	218,5	42	166	437	11	6,1	958	61,6	49,9	1,87	
12	11:34	10,8	44	240,1	39	167	412	11	6,3	967	61,9	49,6	1,84	
13	11:47	11,2	47	222,1	19	185	406	11	6,5	950	61,8	50,1	1,84	
14	12:01	11,4	42	234,0	43	200	403	10	6,6	952	61,8	50,4	1,84	
15	12:38	11,2	37	250,5	42	215	409	10	6,9	900	63,5	50,0	1,86	166,3
16	12:54	11,5	60	239,7	50	218	432	10	6,6	908	62,6	49,8	1,83	
17	13:08	11,2	37	238,6	40	192	428	10	6,7	920	62,9	50,4	1,85	
18	13:21	11,1	47	236,8	46	185	412	10	6,6	930	62,6	49,7	1,82	
19	13:39	11,3	49	240,2	53	197	399	10	6,5	968	62,6	49,5	1,83	
20	13:51	11,0	46	214,0	46	184	458	11	6,6	945	63,0	49,4	1,80	167,7
21	14:07	11,1	44	237,8	42	156	454	11	6,5	959	62,8	49,8	1,82	
22	14:19	10,8	38	227,9	41	150	408	11	6,0	982	62,4	49,4	1,80	
23	14:38	11,0	34	224,9	35	146	411	11	6,3	976	62,2	50,3	1,80	
24	14:53	10,7	37	213,0	40	150	425	11	6,1	995	62,8	49,9	1,81	166,8
25	15:10	10,8	35	219,5	36	148	419	11	6,0	990	61,9	49,7	1,84	
26	15:25	10,9	32	209,1	35	159	424	11	6,1	1012	61,9	50,0	1,83	
27	15:41	10,6	39	221,7	43	138	468	11	5,9	1015	62,4	49,9	1,85	
28	15:53	10,3	39	203,2	34	145	443	12	6,0	1022	62,1	49,9	1,81	163,9
07.12.2023	9:41	5,1	1697	231,2	1709	79	515	13	6,1	1467	64,8	49,4	1,81	158,2
2	9:51	5,2	1715	238,2	1735	48	516	13	6,0	1463	64,4	48,8	1,80	
3	10:00	5,5	1758	245,0	1778	38	533	13	6,0	1439	64,3	48,8	1,79	
4	10:12	6,0	1757	241,4	1759	71	542	13	6,1	1415	64,2	49,1	1,79	
5	10:18	6,3	1770	247,7	1790	54	523	13	6,4	1416	64,2	49,4	1,79	
6	10:29	6,0	1766	215,2	1740	91	536	13	6,0	1446	64,2	48,5	1,80	
7	10:48	5,3	1722	236,0	1735	80	519	13	6,2	1460	63,9	49,1	1,79	
8	11:00	5,6	1713	239,9	1689	56	543	13	6,1	1471	64,4	49,1	1,80	
9	11:11	4,9	1684	232,2	1661	57	557	13	6,0	1465	64,4	48,5	1,79	154,481
10	11:18	5,0	1695	226,8	1694	46	564	13	5,9	1496	63,5	48,1	1,81	
11	11:32	4,5	1665	240,2	1666	80	543	13	5,6	1511	63,9	47,7	1,79	
12	11:38	3,6	1642	230,6	1661	75	542	14	5,7	1527	63,8	48,1	1,82	
13	11:48	4,3	1635	235,4	1625	63	574	14	5,7	1513	64,3	48,2	1,78	
14	12:01	5,1	1630	232,7	1634	41	586	14	5,6	1516	64,9	48,0	1,79	
15	12:12	4,4	1665	240,6	1686	76	562	14	5,7	1507	64,6	48,0	1,78	152,692
16	13:22	4,5	1675	241,5	1705	49	583	13	5,8	1607	65,0	47,5	1,80	
17	13:32	5,6	1738	236,2	1720	42	504	13	6,0	1643	65,6	47,1	1,81	152,415
18	13:40	5,4	1729	245,2	1707	52	547	13	5,9	1459	65,6	47,0	1,78	
19	13:51	5,9	1743	247,2	1742	71	537	13	6,0	1422	66,5	47,2	1,79	
20	14:01	5,7	1736	235,8	1717	82	537	14	6,3	1440	66,0	47,3	1,80	
21	14:10	6,0	1759	251,5	1775	56	543	18	6,2	1435	66,9	47,0	1,81	
22	14:18	5,4	1780	238,3	1790	89	511	17	6,1	1433	66,2	47,8	1,81	157,999
23	14:28	6,2	1768	252,6	1770	73	507	17	6,2	1400	66,4	47,6	1,79	
24	14:38	5,4	1793	253,3	1811	67	522	13	6,2	1416	67,3	47,6	1,80	
25	14:48	5,7	1780	254,8	1794	66	502	13	6,3	1414	67,0	48,2	1,79	

Параметр		Отходящие газы								Газо-ход	Теплоноситель			Зола
Измерительный прибор		Testo 330			MPU Vario Plus				Testo 512/2	TTSC-22	Встроенные ТПС		Panametrics PT878	Testo-845
Дата	Время	O ₂ , %	CO, ppm	t _{о.г} , °C	CO, ppm	NO _x , ppm	SO ₂ , ppm	H ₂ S, ppm	v _г , м/с	t _г , °C	t _{сп} , °C	t _{ксп} , °C	v _г , м/с	t _г , °C
26	15:00	6,1	1804	240,5	1804	61	516	12	6,5	1397	67,3	48,0	1,80	
27	15:18	6,2	1787	247,7	1814	99	521	13	6,2	1390	66,6	47,8	1,81	153,589
28	15:31	5,9	1789	245,0	1788	69	509	13	6,1	1426	67,4	48,2	1,79	
29	15:39	6,2	1751	246,3	1760	78	517	13	6,2	1438	66,9	48,6	1,81	
30	15:52	5,7	1768	250,7	1786	44	527	13	6,3	1432	67,5	48,2	1,81	
31	16:01	5,4	1747	244,7	1745	76	537	13	6,0	1454	66,7	48,6	1,79	
32	16:09	5,8	1715	232,8	1721	73	542	13	5,9	1453	67,3	49,1	1,78	
33	16:22	5,3	1713	244,0	1725	62	521	13	5,9	1462	67,2	48,4	1,79	154,54
34	16:28	5,3	1703	247,3	1711	43	559	13	5,9	1453	67,0	48,8	1,80	
35	16:39	5,7	1682	229,3	1666	52	514	13	6,0	1470	66,6	49,1	1,80	
36	16:48	5,2	1540	239,5	1695	33	527	13	6,1	1495	66,6	49,3	1,82	
37	16:48	5,1	1520	230,1	1668	70	523	13	5,7	1492	67,0	49,7	1,82	
08.12.2023	9:01	7,4	1123	239,7	1346	124	504	13	6,2	1272	65,5	51,7	1,80	169,98
2	9:11	7,8	1135	228,3	1312	116	504	13	5,9	1259	64,7	51,1	1,78	
3	9:19	7,8	1117	238,3	1214	135	503	13	6,0	1280	65,7	50,3	1,82	
4	9:41	7,2	1096	215,3	1130	130	509	13	5,7	1282	64,6	51,2	1,79	
5	9:51	7,1	1102	215,2	1120	115	543	13	6,0	1285	65,3	51,1	1,80	
6	9:58	7,5	1074	228,6	1099	113	495	16	5,6	1281	64,9	50,8	1,82	
7	10:11	7,0	1091	221,7	1077	122	510	17	6,0	1303	65,1	49,9	1,80	
8	10:19	7,2	1090	220,4	1107	114	504	17	5,6	1330	65,3	49,6	1,79	
9	10:31	6,6	1077	236,1	1096	117	519	16	5,5	1323	65,3	49,8	1,79	164,195
10	10:42	6,8	1095	214,8	1059	125	529	14	5,7	1333	64,4	50,1	1,79	
11	10:50	6,8	1093	212,9	1131	112	499	14	5,9	1335	65,7	50,1	1,80	
12	11:00	7,4	1065	234,8	1032	123	541	13	5,7	1329	64,3	50,6	1,79	
13	11:11	7,3	1053	218,2	1049	118	523	13	5,7	1311	64,5	49,7	1,82	
14	11:19	7,2	1084	235,3	1076	131	543	13	5,9	1314	65,7	50,5	1,80	
15	11:34	6,9	1102	234,9	1082	123	538	13	5,6	1309	65,3	49,4	1,78	167,786
16	11:50	7,6	1106	239,0	1102	127	507	13	6,0	1298	65,0	49,1	1,82	
17	12:15	7,6	1096	232,9	1101	135	484	13	6,2	1276	64,6	49,1	1,81	168,774
18	12:41	7,9	1102	231,3	1140	135	478	13	5,9	1248	64,4	49,5	1,78	
19	12:51	7,7	1115	227,1	1107	122	519	13	5,8	1275	64,6	50,7	1,81	
20	13:05	7,4	1111	222,4	1147	131	497	13	6,0	1235	63,7	49,4	1,82	
21	13:13	7,7	1151	220,8	1115	133	482	13	6,2	1235	64,0	50,6	1,81	
22	13:23	7,8	1128	228,1	1104	134	496	13	6,3	1241	64,8	50,6	1,79	164,982
23	13:43	7,6	1165	232,7	1141	130	490	13	6,0	1233	64,0	49,7	1,78	
24	13:52	8,3	1154	238,7	1138	147	498	13	6,3	1212	64,6	49,8	1,82	
25	14:04	8,0	1320	248,4	1172	151	500	12	6,5	1215	65,5	49,3	1,80	
26	14:13	8,5	1196	234,5	1168	152	498	12	6,5	1198	65,4	50,8	1,82	
27	14:31	8,2	1184	230,0	1193	169	447	12	6,7	1178	65,6	50,8	1,82	171,131
28	14:42	8,1	1167	244,2	1141	154	497	12	6,4	1173	65,1	50,5	1,79	
29	14:51	8,4	1197	226,8	1169	170	481	12	6,3	1187	65,0	50,9	1,81	
30	15:02	8,6	1194	242,5	1215	164	474	12	6,3	1216	65,5	51,6	1,78	
31	15:15	10,2	1171	248,8	1177	145	466	12	6,2	1219	65,4	50,6	1,78	
32	15:23	8,6	1160	243,8	1197	163	476	12	6,2	1220	65,0	51,1	1,80	
33	15:34	8,3	1186	237,5	1158	156	472	12	6,2	1224	65,5	50,4	1,80	168,8
34	15:45	8,1	1168	239,2	1203	138	480	12	6,2	1229	66,2	50,4	1,788	
35	15:45	8,1	1140	240,6	1143	139	469	12	6,2	1209	66	50,5	1,81	
11.12.2023	9:08	10,3	66	208,8	44	143	442	13	5,9	1010	65,0	50,4	1,83	
2	9:19	10,6	43	229,9	38	144	451	14	5,9	1011	65,0	50,7	1,85	160,0
3	9:30	10,9	31	230,7	35	150	442	11	6,2	989	64,7	50,7	1,84	
4	9:39	10,9	43	238,4	39	146	458	11	6,2	988	64,7	50,8	1,86	
5	9:52	10,5	42	219,9	45	161	465	11	6,3	990	65,1	50,2	1,87	
6	9:59	10,8	42	226,8	37	150	433	11	6,2	979	65,4	50,1	1,86	
7	10:08	11,0	42	211,6	46	165	446	11	6,4	990	64,8	50,3	1,84	159,8
8	10:22	10,8	41	222,5	45	171	443	11	6,3	978	64,5	50,3	1,85	

Параметр		Отходящие газы								Газо-ход	Теплоноситель			Зола
Измерительный прибор		Testo 330			MPU Vario Plus				Testo 512/2	TTSC-22	Встроенные ТПС		Panametrics PT878	Testo-845
Дата	Время	O ₂ , %	CO, ppm	t _{o.г} , °C	CO, ppm	NO _x , ppm	SO ₂ , ppm	H ₂ S, ppm	v _г , м/с	t _г , °C	t _{пр} , °C	t _{обгр} , °C	v _г , м/с	t _з , °C
9	10:30	11,0	38	231,5	39	169	420	11	6,1	966	65,2	49,9	1,83	
10	10:41	11,1	33	235,4	37	164	411	11	6,3	970	64,4	50,1	1,87	
11	10:50	11,1	33	238,7	32	166	421	11	6,3	967	64,5	50,2	1,85	
12	11:02	10,8	44	238,2	47	183	409	11	6,5	972	64,9	50,5	1,86	
13	11:10	10,8	37	226,6	38	177	422	11	6,6	977	64,5	50,6	1,87	158,2
14	11:22	10,7	34	215,1	34	173	430	10	6,3	945	65,5	50,3	1,84	
15	11:34	11,0	49	221,1	50	170	422	11	6,1	985	65,1	49,3	1,86	
16	11:51	12,2	42	232,9	41	159	416	11	6,5	985	64,3	49,6	1,85	
17	12:05	11,0	34	214,4	38	151	434	11	6,0	973	63,9	49,7	1,85	171,6
18	12:22	11,0	48	209,9	44	144	464	11	6,3	1007	64,3	48,7	1,84	
19	13:21	10,3	35	217,6	32	153	484	11	5,6	1048	63,6	49,9	1,87	
20	13:31	10,1	41	228,5	40	141	432	11	5,8	1015	64,8	50,2	1,85	
21	13:42	10,4	39	201,9	34	151	487	11	6,0	1015	64,3	50,0	1,85	
22	13:51	10,1	42	202,0	44	153	438	11	5,8	1038	64,5	49,7	1,87	
23	14:02	10,1	42	207,2	39	150	440	13	5,7	1008	65,2	50,3	1,86	167,3
24	14:11	10,2	43	225,4	43	144	427	13	5,8	1022	64,5	49,9	1,84	
25	14:19	10,7	44	209,0	40	152	472	11	5,8	1029	65,0	50,1	1,87	
26	14:32	10,3	40	222,5	38	136	459	11	6,1	1002	65,0	50,1	1,86	
27	14:41	10,3	49	222,0	47	138	424	11	5,9	1010	65,2	50,9	1,84	
28	14:48	10,5	33	207,5	32	141	424	11	6,0	1003	65,5	50,2	1,86	
29	15:02	10,5	43	208,2	39	139	452	11	5,9	1019	65,0	50,5	1,86	167,4
30	15:10	10,7	33	229,7	35	134	438	11	6,1	1018	64,4	50,3	1,86	
31	15:21	10,7	34	233,7	31	152	443	11	5,9	993	64,4	50,2	1,83	
32	15:28	10,8	31	216,9	33	144	474	11	6,0	998	64,6	50,3	1,85	
33	15:41	10,3	42	212,4	44	134	428	11	6,2	1014	65,1	50,9	1,83	
34	15:50	10,6	34	211,6	38	144	432	11	6,2	991	65,5	50,5	1,84	
35	15:59	10,7	37	230,4	64	138	474	11	5,9	989	65,0	50,5	1,83	163,5
36	16:11	10,8	42	230,0	38	148	441	11	6,2	1021	65,4	50,5	1,86	
37	16:20	10,6	47	229,8	52	156	462	11	6,0	1013	65,6	51,4	1,87	
38	16:30	10,2	43	204,4	46	137	458	11	6,0	1002	65,7	51,1	1,84	
39	16:38	10,5	42	223,3	37	129	473	11	5,7	1031	66,1	51,0	1,85	
40	16:51	10,1	32	215,9	36	137	448	11	5,7	1045	65,8	51,2	1,85	163,6

От БГТУ им. В.Г. Шухова

Аспирант кафедры ЭТ

 Ахмед А.А.А.

Вед. инженер каф. ЭТ

 Гришко Б.М.

Инженер каф. ЭТ

 Леонов Е.С.

Профессор кафедры ЭТ

 Трубаев П.А.

От ООО «ТК «Экотранс»

Начальник отдела внедрения
систем энергосбережения и газификации

 Веревкин О.А.

Начальник отдела энергетики

 Опрышко М.А.

ПРИЛОЖЕНИЕ 3. СТАТИСТИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ДАННЫХ ИСПЫТАНИЙ И РАСЧЕТ ТЕПЛОВОГО БАЛАНСА

ПЗ.1. Методика обработки (ГОСТ Р 8.736-2011)

1.1. Основные условные обозначения:

$\bar{x}$ – оценка измеряемой величины;

x_i – i -й результат измерений;

n – число исправленных результатов измерений;

S – среднее квадратическое отклонение;

$S_{\bar{x}}$ – среднее квадратическое отклонение среднего арифметического (оценки измеряемой величины);

q – уровень значимости;

p – доверительная вероятность;

G – критерий Граббса;

χ^2 – критерий Пирсона;

ω^2 – критерий Мизеса-Смирнова;

ε – доверительные границы случайной погрешности;

t – коэффициент Стьюдента;

m – количество неисклученных систематических погрешностей (далее – НСП);

Θ_{Σ} – границы НСП;

Δ – границы погрешности оценки измеряемой величины ;

S_{Σ} – суммарное среднее квадратическое отклонение оценки измеряемой величины;

S_{Θ} – среднее квадратическое отклонение НСП.

1.2. При статистической обработке группы результатов прямых многократных независимых измерений выполняют следующие операции:

– исключают известные систематические погрешности из результатов измерений;

- вычисляют оценку измеряемой величины;
- вычисляют среднее квадратическое отклонение результатов измерений;
- проверяют наличие грубых погрешностей и при необходимости исключают их;
- проверяют гипотезу о принадлежности результатов измерений нормальному распределению;
- вычисляют доверительные границы случайной погрешности (доверительную случайную погрешность) оценки измеряемой величины;
- вычисляют доверительные границы (границы) неисключенной систематической погрешности оценки измеряемой величины;
- вычисляют доверительные границы погрешности оценки измеряемой величины.

1.2. Оценка измеряемой величины $\bar{x}$, за которую принимают среднее арифметическое значение исправленных результатов измерений, вычисляют по формуле

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \quad (\text{П2.1})$$

где x_i – i -й результат измерений; n – число исправленных результатов измерений.

1.3. Среднее квадратическое отклонение S группы, содержащей n результатов измерений, вычисляют по формуле

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}} \quad (\text{П2.2})$$

Среднее квадратическое отклонение среднего арифметического (оценки измеряемой величины) $S_{\bar{x}}$ вычисляют по формуле

$$S_{\bar{x}} = \frac{S}{\sqrt{n}}. \quad (\text{П2.3})$$

1.4. Для исключения грубых погрешностей используют критерий Граббса. Статистический критерий Граббса исключения грубых погрешностей осно-

ван на предположении о том, что группа результатов измерений принадлежит нормальному распределению. Для этого вычисляют критерии Граббса G_1 и G_2 , предполагая, что наибольший x_{max} или наименьший x_{min} результат измерений вызван грубыми погрешностями:

$$G_1 = \frac{|x_{max} - \bar{x}|}{S}, G_2 = \frac{|\bar{x} - x_{min}|}{S}. \quad (\text{П2.4})$$

Сравнивают G_1 и G_2 с теоретическим значением G_T критерия Граббса при выбранном уровне значимости q . Таблица критических значений критерия Граббса приведена в приложении А ГОСТ Р 8.736-2011.

Если $G_1 > G_T$, то x_{max} исключают как маловероятное значение. Если $G_2 > G_T$, то x_{min} исключают как маловероятное значение. Далее вновь вычисляют среднее арифметическое и среднее квадратическое отклонения результатов измерений и процедуру проверки наличия грубых погрешностей повторяют.

Если $G_1 \leq G_T$, то x_{max} не считают промахом и его сохраняют в ряду результатов измерений. Если $G_2 \leq G_T$, то x_{min} не считают промахом и его сохраняют в ряду результатов измерений.

1.5. Доверительные границы случайной погрешности оценки измеряемой величины устанавливают для результатов измерений, принадлежащих нормальному распределению.

При числе результатов измерений $n \leq 15$ принадлежность их к нормальному распределению не проверяют.

При числе результатов измерений $15 < n \leq 50$ для проверки принадлежности их к нормальному распределению использован критерий ω^2 Мизеса-Смирнова (прил. Г ГОСТ Р 8.736-2011).

Доверительные границы ε (без учета знака) случайной погрешности оценки измеряемой величины вычисляют по формуле

$$\varepsilon = tS_{\bar{x}}, \quad (\text{П2.5})$$

где t – коэффициент Стьюдента, который в зависимости от доверительной вероятности P и числа результатов измерений n находят по таблице, приведенной в приложении Д ГОСТ Р 8.736-2011.

1.6. Неисключенная систематическая погрешность (далее - НСП) оценки измеряемой величины образуется из составляющих, в качестве которых могут быть приняты НСП:

- метода;
- средства измерений;
- вызванные другими источниками.

В качестве границ составляющих НСП принимают, например, пределы допускаемых основных и дополнительных погрешностей средств измерений, если случайные составляющие погрешности пренебрежимо малы.

Границу НСП Θ_{Σ} оценки измеряемой величины при наличии менее трех ($m < 3$) НСП, представленных границами Θ_i , оценивают по формуле

$$\Theta_{\Sigma} = \pm \sum_{i=1}^m |\Theta_i|. \quad (\text{П2.6})$$

1.7. Доверительные границы погрешности оценки измеряемой величины находят путем построения композиции распределений случайных погрешностей и НСП, рассматриваемых как случайные величины. Границы погрешности оценки измеряемой величины Δ (без учета знака) вычисляют по формуле

$$\Delta = K S_{\Sigma}, \quad (\text{П2.7})$$

Где K – коэффициент, зависящий от соотношения случайной составляющей погрешности и НСП.

Суммарное среднее квадратическое отклонение S_{Σ} оценки измеряемой величины вычисляют по формуле

$$S_{\Sigma} = \sqrt{S_{\Theta}^2 + S_{\bar{x}}^2} = \sqrt{\left(\frac{\Theta_{\Sigma}}{\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{S}{\sqrt{n}}\right)^2}, \quad (\text{П2.8})$$

где S_{θ} – среднее квадратическое отклонение НСП, которое оценивают в зависимости от способа вычисления НСП по формуле

$$S_{\theta} = \frac{\theta_{\Sigma}}{\sqrt{3}}, \quad (\text{П2.9})$$

где θ_{Σ} – границы НСП, которые определяют по (П2.6).

Коэффициент K для (П2.7) определяют по эмпирическим формулам

$$K = \frac{\varepsilon + \theta_{\Sigma}}{S_{\bar{x}} + S_{\theta}} = \frac{\varepsilon + \theta_{\Sigma}}{\frac{S}{\sqrt{n}} + \frac{\theta_{\Sigma}}{\sqrt{3}}} \quad (\text{П2.10})$$

1.8. Оформление записи оценок измеряемых величин проводят в соответствии с правилами по межгосударственной стандартизации [П2.2].

При симметричных доверительных границах погрешности оценку измеряемой величины представляют в форме

$$\bar{x} \pm \Delta, P, \quad (\text{П2.11})$$

где $\bar{x}$ – оценка измеряемой величины.

Погрешность оценки измеряемой величины выражается не более чем двумя значащими цифрами. Числовое значение оценки измеряемой величины должно оканчиваться цифрой того разряда, что и значение погрешности Δ .

При отсутствии данных о виде функций распределений составляющих погрешности оценки измеряемой величины и необходимости дальнейшей обработки результатов измерений или анализа погрешностей оценки измеряемой величины представляют в форме

$$\bar{x}; S_{\bar{x}}; n; \theta. \quad (\text{П2.13})$$

Оценки $S_{\bar{x}}$ и θ могут быть в абсолютной и относительной формах.

П3.2. Проверка гипотезы о нормальности распределения результатов измерений при числе измерений $n \geq 50$, критерий ω^2

2.1 Критерий Мизеса-Смирнова ω^2 использует статистику, имеющую вид

$$\omega_n^2[\Psi(F)] = \int_{-\infty}^{\infty} [F_n(x) - F(x)]^2 \Psi[F(x)] dF(x), \quad (\text{П2.14})$$

где $F(x)$ - теоретическая функция распределения; $F_n(x)$ – эмпирическая функция распределения; $\Psi[F(x)]$ – весовая функция, область определения которой представляет собой область значений функции $F(x)$.

Конкретный вид статистики ω_n^2 (или, точнее, ω_n^2) зависит от вида весовой функции. Как правило, используют весовые функции двух видов: $\Psi(F) = 1$, при которой все значения функции распределения обладают одинаковым весом, и $\Psi(F) = 1/(F(1 - F))$, при которой вес результатов измерений увеличивается на "хвостах" распределений. В приведенном критерии использована весовая функция второго вида, поскольку на практике различия между распределениями наиболее отчетливы в области крайних значений. Однако почти всегда малое число результатов измерений имеется как раз в области крайних значений. Поэтому целесообразно придать этим результатам больший вес.

Если принять весовую функцию второго вида, то статистика $n\omega_n^2$ после выполнения интегрирования имеет вид

$$\begin{aligned} n\omega_n^2 \left[\frac{1}{F(1-F)} \right] &= n\Omega_n^2 = \\ &= -n - 2 \sum_{j=1}^n \left\{ \frac{2j-1}{2n} \ln F(x_j) + \left(1 - \frac{2j-1}{2n} \right) \ln [1 - F(x_j)] \right\} \end{aligned} \quad (\text{П2.15})$$

где $x_1 \leq x_2 \leq \dots \leq x_n$ - результаты измерений, упорядоченные по значению; $F(x_j)$ - значение функции теоретического распределения при значении аргумента, равном x_j ($j = 1, \dots, n$).

Статистика $n\Omega_n^2$ подчиняется асимптотическому (при $n \rightarrow \infty$) распределению

$$\begin{aligned} P(n\Omega_n^2 \leq x) &= a(x) = \\ &= \frac{\sqrt{2\pi}}{x} \sum_{j=0}^{\infty} (-1)^j \frac{\Gamma(j+\frac{1}{2})}{\Gamma(\frac{1}{2})\Gamma(j+1)} (4j+1) e^{-\frac{(4j+1)^2 \pi^2}{8x}} \times \end{aligned} \quad (\text{П2.16})$$

$$\times \int_0^{\infty} \frac{x}{e^{8(y^2 + 1)}} - \frac{(4j + 1)^2 \pi^2 y^2}{8x} dy$$

Значения функции распределения $a(x)$ для $0 \leq x < 2,6$ с шагом 0,01 приведены в таблице Г.3 ГОСТ Р 8.736-2011.

2.2 При использовании критерия ω^2 вычисления проводят в следующем порядке:

- а) вычисляют значение статистики $n\Omega_n^2$ по формуле (П2.14);
- б) по таблице Г.3 ГОСТ Р 8.736-2011 находят значение функции распределения $a(x)$ для X , равного вычисленному значению $n\Omega_n^2$.
- в) задают уровень значимости α .
- г) если $a \geq (1 - \alpha)$, то гипотезу о согласии эмпирического и теоретического распределений отвергают, если $a < (1 - \alpha)$, то гипотезу принимают.

П3.3. Методика обработки результатов анализ дымовых газов и определение КПД котельного агрегата методом обратного баланса

3.1. Расчет коэффициента избытка воздуха производится по кислородной формуле с учетом недожога:

$$\alpha = \frac{21}{21 - O_2 - 0,5CO} = \frac{21}{21 - O_2 - 0,5 \cdot 10^{-4} \cdot CO^{ppm}},$$

где O_2 , CO – содержание кислорода и оксида углерода в отходящих газах по результатам газового анализа, об. %; CO^{ppm} – содержание оксида углерода в ppm.

3.2. Потери тепла с уходящими газами q_2

$$q_2 = 0,01(t_{o.g.} - t_b)Z, \%$$

где $t_{o.g.}$ – температура уходящих газов, °C; t_b – температура воздуха, °C.

Величина Z определяется по методике упрощенных теплотехнических расчетов М.Б. Равича, применительно к RDF-топливу изл. в работе [П2.4].

3.3. Потери от химической неполноты сгорания q_3

Потери тепла от химической неполноты сгорания q_3 определялись по формуле:

$$q_3 = 100 Q_{\text{нед}} h / p = 12\,640 \text{ СО } h / p,$$

где $Q_{\text{нед}}$ – теплота сгорания продуктов недожога, содержащихся в продуктах горения, кДж/м³;

$$Q_{\text{нед}} = 126,4 \text{ СО},$$

где СО – содержание газов в продуктах сгорания, %; h – изменение объема сухих продуктов горения по сравнению с теоретическим вследствие разбавления их воздухом; p – низшая рабочая теплота сгорания топлива, отнесенная к 1 м³ сухих продуктов горения, образующихся при сжигании в теоретических условиях (при $\alpha = 1$).

3.4. Потери от механической неполноты сжигания топлива q_4

Потерями теплоты от механической неполноты сжигания топлива q_4 пренебрегаем, из-за больших размеров брикетов унос частиц несгоревшего топлива из котла мал.

3.5. Потери через стенки котла $q_5 = 6\%$ (Рисунок ПЗ.1).

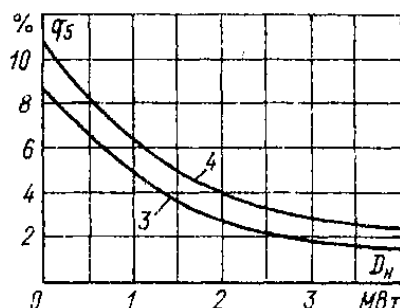


Рисунок ПЗ.1 – Потери теплоты в окружающую среду для водогрейных и малых паровых котлов:

3 – без экономайзера; 4 – с экономайзером

Источник: Эстеркин Р.И. Эксплуатация, ремонт, наладка и испытания теплотехнического оборудования: 3-е изд., перераб. и доп. СПб.: Энергоатомиздат, 1991. 304 с.

3.6. Потери с физической теплотой золы q_6

$$q_6 = 0,001 W^p / Q_H^p t_3 c_3$$

где Q_H^p – теплота сгорания топлива, МДж/кг; t_3 – температура золы, °С; c_3 – теплоемкость золы, $c_3 \approx 1,3 - 0,0005 t_3 + 0,00167 t_3^2$ кДж/(кг·К).

3.7. Определение КПД котельного агрегата η по обратному балансу

$$\eta = 100 - q_2 - q_3 - q_4 - q_5 - q_6, \%$$

3.8. Объем теплоносителя V_T , м³/с

$$V_T = 0,25\pi d^2 \cdot v_T,$$

где d – диаметр трубы, м; v_T – измеренная скорость теплоносителя, м/с.

3.9. Теплота, полученная теплоносителем, МВт

$$Q_T = c_p V_T (t_{пр} - t_{об}),$$

где c_p – теплоемкость воды, 4,19 кДж/(кг·К); $t_{пр}$, $t_{об}$ – температура прямой и обратной воды, °С.

3.10. Расход топлива G_T , кг/ч

$$G_T = 3600 Q_T / (0,01\eta Q_H^p).$$

ПЗ.4. Погрешность используемых приборов (НСП)

Наименование, тип	Измеряемые параметры	Точность измерений	НСП □□
Газоанализатор Testo 330-1 LL	O ₂	0,2 об.%	0,2 об.%
	CO	10 ppm или 10 % от изм. знач. (0 ... 200 ppm); 20 ppm или 5 % от изм. знач. (201 ... 2000 ppm); ±10 % от изм. знач. (2001 ... 8000 ppm)	Расчет в зависимости от измеренного значения
	Температура	±0,5 °С (0 ... +100,0 °С); ±0,5 % от изм. знач. (в ост. диапазоне)	– « –
Газоанализатор MPU Vario Plus Industrial	CO	40 ppm или 5 % от изм. знач.	– « –
	NO _x	5 ppm или 5 % от изм.	– « –

		знач.	
	SO ₂	10 ppm или 5 % от изм. знач.	– « –
	H ₂ S	5 ppm или 5 % от изм. знач.	– « –
Дифференциальный манометр Testo 512/2 и трубки Пито Testo 1000 и 350 мм	Давление	0,5%	1 Па
	Скорость (расчетная)	0,5%	0,08 м/с
Testo-845	Температура (ИК)	0,5%	6°C
	Температура (термопара типа K NiCr-Ni)	1%	10°C
Ультразвуковой расходомер Panametrics PT878	Скорость (среды в трубах)	Без калибровки: 2% от показаний ($d > 150$ мм)	Расчет в зависимости от измеренного значения
		5% от показаний ($d < 150$ мм)	– « –
Датчик температуры с керамической защитной оболочкой TTSC-22 («ОЛИЛ»)	Температура (термопара Тип S ТПП, вмонтирован в газоход котла)	1%	16°C
Контроллер MIRKIP REX-C100 (индикация температуры)		0,5%	8°C
Термопреобразователь сопротивления ОВЕН ДТС305М	Температура (медный преобразователь, вмонтированы в трубы теплоносителя)	0,5%	1,25
Измеритель двухканальный ОВЕН 2TRM1		0,5%	1,25

П3.5. Климатические данные

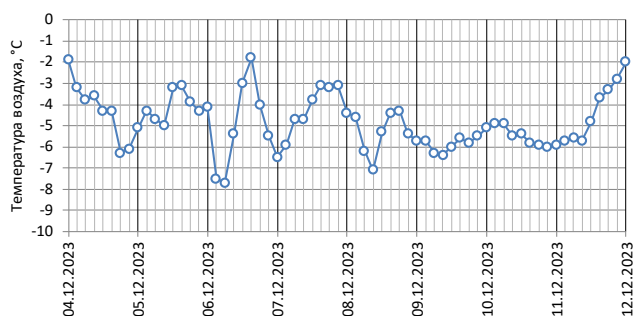


Рисунок П3.2 – Температура наружного воздуха в г. Белгороде по данным метеостанции 34214

П3.6. Принятые уровни значимости проверки статистических гипотез

Принятый уровень значимости $\alpha = 0,05$ (5%)

Доверительная вероятность $1 - \alpha = 0,95$ (95%)

ПЗ.7. Исключение систематических погрешностей из результатов измерений

Отмечены исключенные данные.

$$\alpha = 1,4$$

Параметр		Отходящие газы								Газо-ход	Теплоноситель			Зола
Измерительный прибор		Testo 330			MPU Vario Plus				Testo 512/2	TTSC-22	Встроенные ТПС		Panametrics PT878	Testo-845
Дата	Время	O ₂ , %	CO, ппм	t _{о.г} , °C	CO, ппм	NO _x , ппм	SO ₂ , ппм	H ₂ S, ппм	v _г , м/с	t _г , °C	t _{пр} , °C	t _{обг} , °C	v _г , м/с	t _з , °C
04.12.2023	9:51	6,6	1836	252,3	1843	96	484	12	6,3	1385	65,3	49,3	1,79	
2	10:00	6,2	1814	240,7	1834	90	530	12	6,5	1382	65,3	49,5	1,79	
3	10:10	5,5	1790	239,8	1769	83	537	13	6,2	1404	64,9	48,7	1,80	150,1
4	10:22	5,6	1790	242,2	1820	73	495	13	6,4	1421	65,2	48,9	1,79	
5	10:32	5,5	1762	238,3	1780	68	532	13	6,3	1424	64,2	48,6	1,79	
6	10:42	5,3	1763	242,5	1788	91	515	13	6,0	1450	64,8	48,6	1,82	
7	10:51	5,4	1729	234,9	1719	45	543	13	6,2	1444	64,9	48,6	1,82	
8	11:00	5,7	1715	236,2	1944	83	530	13	6,0	1467	64,0	49,3	1,82	159,3
9	11:09	5,7	1721	239,9	1634	59	537	13	6,0	1489	64,4	49,3	1,80	
10	11:20	5,2	1678	240,3	1656	56	546	13	6,1	1486	64,1	49,1	1,80	
11	11:30	5,5	1677	242,1	1702	39	549	13	5,9	1490	64,5	49,2	1,79	
12	11:39	5,4	1681	242,1	1694	70	528	13	5,8	1476	64,2	48,4	1,81	
13	11:50	5,1	1699	230,2	1708	57	531	13	5,9	1451	64,2	47,9	1,79	
14	12:01	5,1	1694	230,0	1713	0	567	13	6,0	1459	64,0	47,8	1,79	
15	12:08	5,0	1692	238,2	1664	48	525	13	5,9	1452	64,2	48,1	1,81	157,9
16	12:30	5,5	1990	245,9	1668	36	526	13	5,8	1467	64,4	48,0	1,79	
17	12:39	5,0	1880	238,3	1694	41	560	13	5,9	1483	64,9	48,0	1,81	
18	12:52	5,1	1675	232,1	1659	69	517	13	6,0	1484	64,9	48,2	1,82	
19	13:40	5,0	1676	238,7	1697	58	518	17	6,0	1491	65,3	47,5	1,78	154,35
20	13:48	6,0	1745	237,2	1772	85	555	17	6,1	1426	66,0	47,5	1,78	
21	13:59	5,9	1738	245,5	1708	46	517	16	5,9	1442	66,4	47,2	1,82	160,94
22	14:10	5,0	1728	240,8	1707	46	529	13	6,2	1443	67,0	47,6	1,80	
23	14:20	5,6	1721	242,9	1725	40	560	13	5,9	1462	66,4	48,2	1,81	
24	14:32	5,6	1704	233,6	1730	69	532	13	6,0	1487	66,8	47,8	1,82	
25	14:41	5,3	1693	243,9	1685	59	520	13	6,0	1460	66,5	47,9	1,79	
26	14:49	5,1	1735	233,8	1725	57	522	13	5,8	1449	66,8	48,0	1,80	
27	14:59	5,6	1738	243,9	1737	82	504	13	6,2	1462	66,5	48,0	1,81	
28	15:12	5,3	1742	243,7	1721	52	557	13	6,2	1442	67,4	48,5	1,80	151,41
29	15:32	5,2	1734	238,7	1755	62	515	13	6,2	1430	66,5	48,1	1,82	
30	15:40	6,1	1760	251,3	1775	48	497	13	6,3	1426	66,7	49,0	1,79	
31	15:51	5,9	1754	250,5	1754	93	508	13	6,1	1399	66,9	48,9	1,82	
32	16:00	6,5	1770	246,6	1740	70	540	13	6,1	1398	66,5	48,5	1,81	
33	16:08	7,8	1800	239,6	1829	81	529	12	6,5	1413	67,2	48,6	1,79	
34	16:20	6,4	1781	238,7	1751	77	488	12	6,2	1401	66,7	49,4	1,81	
07.12.2023	9:41	5,1	1697	231,2	1709	79	515	13	6,1	1467	64,8	49,4	1,81	158,2
2	9:51	5,2	1715	238,2	1735	48	516	13	6,0	1463	64,4	48,8	1,80	
3	10:00	5,5	1758	245,0	1778	38	533	13	6,0	1439	64,3	48,8	1,79	
4	10:12	6,0	1757	241,4	1759	71	542	13	6,1	1415	64,2	49,1	1,79	
5	10:18	6,3	1770	247,7	1790	54	523	13	6,4	1416	64,2	49,4	1,79	
6	10:29	6,0	1766	215,2	1740	91	536	13	6,0	1446	64,2	48,5	1,80	
7	10:48	5,3	1722	236,0	1735	80	519	13	6,2	1460	63,9	49,1	1,79	
8	11:00	5,6	1713	239,9	1689	56	543	13	6,1	1471	64,4	49,1	1,80	
9	11:11	4,9	1684	232,2	1661	57	557	13	6,0	1465	64,4	48,5	1,79	154,481
10	11:18	5,0	1695	226,8	1694	46	564	13	5,9	1496	63,5	48,1	1,81	
11	11:32	4,5	1665	240,2	1666	80	543	13	5,6	1511	63,9	47,7	1,79	
12	11:38	3,6	1642	230,6	1661	75	542	14	5,7	1527	63,8	48,1	1,82	
13	11:48	4,3	1635	235,4	1625	63	574	14	5,7	1513	64,3	48,2	1,78	

Параметр		Отходящие газы								Газо-ход	Теплоноситель			Зола
Измерительный прибор		Testo 330			MPU Vario Plus				Testo 512/2	TTSC-22	Встроенные ТПС		Panametrics PT878	Testo-845
Дата	Время	O ₂ , %	CO, ппм	t _{о.г} , °C	CO, ппм	NO _x , ппм	SO ₂ , ппм	H ₂ S, ппм	v _г , м/с	t _г , °C	t _{нр} , °C	t _{обр} , °C	v _г , м/с	t _з , °C
14	12:01	5,1	1630	232,7	1634	41	586	14	5,6	1516	64,9	48,0	1,79	
15	12:12	4,4	1665	240,6	1686	76	562	14	5,7	1507	64,6	48,0	1,78	152,692
16	13:22	4,5	1675	241,5	1705	49	583	13	5,8	1607	65,0	47,5	1,80	
17	13:32	5,6	1738	236,2	1720	42	504	13	6,0	1643	65,6	47,1	1,81	152,415
18	13:40	5,4	1729	245,2	1707	52	547	13	5,9	1459	65,6	47,0	1,78	
19	13:51	5,9	1743	247,2	1742	71	537	13	6,0	1422	66,5	47,2	1,79	
20	14:01	5,7	1736	235,8	1717	82	537	14	6,3	1440	66,0	47,3	1,80	
21	14:10	6,0	1759	251,5	1775	56	543	18	6,2	1435	66,9	47,0	1,81	
22	14:18	5,4	1780	238,3	1790	89	511	17	6,1	1433	66,2	47,8	1,81	157,999
23	14:28	6,2	1768	252,6	1770	73	507	17	6,2	1400	66,4	47,6	1,79	
24	14:38	5,4	1793	253,3	1811	67	522	13	6,2	1416	67,3	47,6	1,80	
25	14:48	5,7	1780	254,8	1794	66	502	13	6,3	1414	67,0	48,2	1,79	
26	15:00	6,1	1804	240,5	1804	61	516	12	6,5	1397	67,3	48,0	1,80	
27	15:18	6,2	1787	247,7	1814	99	521	13	6,2	1390	66,6	47,8	1,81	153,589
28	15:31	5,9	1789	245,0	1788	69	509	13	6,1	1426	67,4	48,2	1,79	
29	15:39	6,2	1751	246,3	1760	78	517	13	6,2	1438	66,9	48,6	1,81	
30	15:52	5,7	1768	250,7	1786	44	527	13	6,3	1432	67,5	48,2	1,81	
31	16:01	5,4	1747	244,7	1745	76	537	13	6,0	1454	66,7	48,6	1,79	
32	16:09	5,8	1715	232,8	1721	73	542	13	5,9	1453	67,3	49,1	1,78	
33	16:22	5,3	1713	244,0	1725	62	521	13	5,9	1462	67,2	48,4	1,79	154,54
34	16:28	5,3	1703	247,3	1711	43	559	13	5,9	1453	67,0	48,8	1,80	
35	16:39	5,7	1682	229,3	1666	52	514	13	6,0	1470	66,6	49,1	1,80	
36	16:48	5,2	1540	239,5	1695	33	527	13	6,1	1495	66,6	49,3	1,82	
37	16:48	5,1	1520	230,1	1668	70	523	13	5,7	1492	67,0	49,7	1,82	

$$\alpha = 1,6$$

Параметр		Отходящие газы								Газо-ход	Теплоноситель			Зола
Измерительный прибор		Testo 330			MPU Vario Plus				Testo 512/2	TTSC-22	Встроенные ТПС		Panametrics PT878	Testo-845
Дата	Время	O ₂ , %	CO, ппм	t _{о.г} , °C	CO, ппм	NO _x , ппм	SO ₂ , ппм	H ₂ S, ппм	v _г , м/с	t _г , °C	t _{нр} , °C	t _{обр} , °C	v _г , м/с	t _з , °C
05.12.2023	9:21	6,8	1055	235,8	1079	135	540	14	5,8	1307	63,0	50,6	1,78	
2	9:35	7,7	1085	223,1	1058	143	538	13	6,0	1298	62,9	49,8	1,79	
3	9:52	8,0	1162	227,5	1160	127	470	13	6,2	1250	62,0	48,5	1,81	171,6
4	10:11	8,3	1131	233,2	1150	150	503	13	6,3	1227	61,5	49,6	1,82	
5	10:33	7,9	1173	243,8	1161	142	506	12	6,2	1189	61,9	49,2	1,82	
6	10:50	8,6	1163	237,0	1155	151	448	12	6,5	1202	62,2	49,1	1,79	
7	11:06	8,4	1162	226,3	1122	148	459	12	6,4	1199	61,7	49,4	1,79	
8	11:19	7,9	1175	245,6	1174	143	458	12	6,5	1220	61,4	49,0	1,80	171,19
9	11:37	8,0	1152	230,8	1163	136	460	13	6,5	1219	62,1	49,4	1,81	
10	11:51	8,0	1151	234,3	1160	145	496	13	6,0	1227	61,4	50,0	1,80	
12	12:59	8,1	1154	218,0	1169	142	485	13	6,2	1247	62,4	50,1	1,82	
13	13:15	9,9	1237	236,9	1231	201	459	12	6,9	1135	63,2	49,4	1,80	
14	13:28	8,7	1220	236,6	1253	183	433	12	6,6	1156	63,4	50,1	1,80	
15	13:45	8,6	1214	255,0	1174	166	454	12	6,7	1167	62,4	50,4	1,80	
16	13:59	8,6	1198	233,8	1173	174	462	12	6,8	1159	62,8	49,9	1,80	168,10
18	14:22	7,9	1182	238,1	1147	151	457	12	6,4	1192	62,8	50,3	1,81	
19	14:43	7,6	1123	221,7	1098	139	492	13	5,9	1241	62,3	50,3	1,82	
20	15:01	7,5	1133	215,7	1095	117	516	13	6,0	1278	61,7	50,1	1,79	
21	15:16	7,8	1120	229,0	1095	134	507	13	6,0	1289	61,5	50,1	1,79	169,5
22	15:32	7,1	1108	236,0	1091	113	507	13	5,9	1265	62,1	48,9	1,80	
23	15:47	7,5	1106	237,2	1137	120	507	13	6,1	1297	61,5	49,2	1,81	159,48
24	15:47	7,0	966	237,1	1050	122	499	13	5,6	1301	62,6	49,8	1,80	
08.12.2023	9:01	7,4	1123	239,7	1346	124	504	13	6,2	1272	65,5	51,7	1,80	169,98
2	9:11	7,8	1135	228,3	1312	116	504	13	5,9	1259	64,7	51,1	1,78	
3	9:19	7,8	1117	238,3	1214	135	503	13	6,0	1280	65,7	50,3	1,82	
4	9:41	7,2	1096	215,3	1130	130	509	13	5,7	1282	64,6	51,2	1,79	
5	9:51	7,1	1102	215,2	1120	115	543	13	6,0	1285	65,3	51,1	1,80	
6	9:58	7,5	1074	228,6	1099	113	495	16	5,6	1281	64,9	50,8	1,82	

Параметр		Отходящие газы								Газо-ход	Теплоноситель			Зола
Измерительный прибор		Testo 330			MPU Vario Plus				Testo 512/2	TTSC-22	Встроенные ТПС		Panametrics PT878	Testo-845
Дата	Время	O ₂ , %	CO, ппм	t _{о.г.} , °C	CO, ппм	NO _x , ппм	SO ₂ , ппм	H ₂ S, ппм	v _г , м/с	t _г , °C	t _{нр} , °C	t _{обр} , °C	v _г , м/с	t _з , °C
7	10:11	7,0	1091	221,7	1077	122	510	17	6,0	1303	65,1	49,9	1,80	
8	10:19	7,2	1090	220,4	1107	114	504	17	5,6	1330	65,3	49,6	1,79	
9	10:31	6,6	1077	236,1	1096	117	519	16	5,5	1323	65,3	49,8	1,79	164,195
10	10:42	6,8	1095	214,8	1059	125	529	14	5,7	1333	64,4	50,1	1,79	
11	10:50	6,8	1093	212,9	1131	112	499	14	5,9	1335	65,7	50,1	1,80	
12	11:00	7,4	1065	234,8	1032	123	541	13	5,7	1329	64,3	50,6	1,79	
13	11:11	7,3	1053	218,2	1049	118	523	13	5,7	1311	64,5	49,7	1,82	
14	11:19	7,2	1084	235,3	1076	131	543	13	5,9	1314	65,7	50,5	1,80	
15	11:34	6,9	1102	234,9	1082	123	538	13	5,6	1309	65,3	49,4	1,78	167,786
16	11:50	7,6	1106	239,0	1102	127	507	13	6,0	1298	65,0	49,1	1,82	
17	12:15	7,6	1096	232,9	1101	135	484	13	6,2	1276	64,6	49,1	1,81	168,774
18	12:41	7,9	1102	231,3	1140	135	478	13	5,9	1248	64,4	49,5	1,78	
19	12:51	7,7	1115	227,1	1107	122	519	13	5,8	1275	64,6	50,7	1,81	
20	13:05	7,4	1111	222,4	1147	131	497	13	6,0	1235	63,7	49,4	1,82	
21	13:13	7,7	1151	220,8	1115	133	482	13	6,2	1235	64,0	50,6	1,81	
22	13:23	7,8	1128	228,1	1104	134	496	13	6,3	1241	64,8	50,6	1,79	164,982
23	13:43	7,6	1165	232,7	1141	130	490	13	6,0	1233	64,0	49,7	1,78	
24	13:52	8,3	1154	238,7	1138	147	498	13	6,3	1212	64,6	49,8	1,82	
25	14:04	8,0	1320	248,4	1172	151	500	12	6,5	1215	65,5	49,3	1,80	
26	14:13	8,5	1196	234,5	1168	152	498	12	6,5	1198	65,4	50,8	1,82	
27	14:31	8,2	1184	230,0	1193	169	447	12	6,7	1178	65,6	50,8	1,82	171,131
28	14:42	8,1	1167	244,2	1141	154	497	12	6,4	1173	65,1	50,5	1,79	
29	14:51	8,4	1197	226,8	1169	170	481	12	6,3	1187	65,0	50,9	1,81	
30	15:02	8,6	1194	242,5	1215	164	474	12	6,3	1216	65,5	51,6	1,78	
31	15:15	10,2	1171	248,8	1177	145	466	12	6,2	1219	65,4	50,6	1,78	
32	15:23	8,6	1160	243,8	1197	163	476	12	6,2	1220	65,0	51,1	1,80	
33	15:34	8,3	1186	237,5	1158	156	472	12	6,2	1224	65,5	50,4	1,80	168,8
34	15:45	8,1	1168	239,2	1203	138	480	12	6,2	1229	66,2	50,4	1,788	
35	15:45	8,1	1140	240,6	1143	139	469	12	6,2	1209	66	50,5	1,81	

$\alpha = 2,0$

Параметр		Отходящие газы								Газо-ход	Теплоноситель			Зола
Измерительный прибор		Testo 330			MPU Vario Plus				Testo 512/2	TTSC-22	Встроенные ТПС		Panametrics PT878	Testo-845
Дата	Время	O ₂ , %	CO, ппм	t _{о.г.} , °C	CO, ппм	NO _x , ппм	SO ₂ , ппм	H ₂ S, ппм	v _г , м/с	t _г , °C	t _{нр} , °C	t _{обр} , °C	v _г , м/с	t _з , °C
06.12.2023	8:52	10,6	39	215,4	34	132	423	11	5,8	999	63,0	49,6	1,84	
2	9:01	10,4	31	227,8	32	153	447	11	6,0	1019	62,8	49,7	1,86	159,5
3	9:14	10,3	42	204,8	39	154	477	12	5,5	1050	62,2	49,3	1,86	
4	9:30	10,1	36	220,2	38	155	494	12	5,4	1067	61,8	48,8	1,87	
5	9:48	10,1	36	226,3	36	154	482	11	5,6	1062	62,2	48,8	1,86	
6	10:03	10,5	34	204,8	38	136	470	11	5,6	1038	62,6	48,9	1,86	
7	10:17	10,4	48	231,7	47	147	422	11	5,9	1025	62,6	49,5	1,83	169,0
8	10:33	10,7	42	215,1	40	152	449	11	6,3	1003	62,3	49,1	1,85	
9	10:48	10,6	19	215,4	32	151	427	11	5,9	988	62,2	48,4	1,83	
10	11:03	12,1	47	228,9	47	150	407	11	6,3	977	62,5	49,2	1,85	164,3
11	11:19	10,9	39	218,5	42	166	437	11	6,1	958	61,6	49,9	1,87	
12	11:34	10,8	44	240,1	39	167	412	11	6,3	967	61,9	49,6	1,84	
13	11:47	11,2	47	222,1	19	185	406	11	6,5	950	61,8	50,1	1,84	
14	12:01	11,4	42	234,0	43	200	403	10	6,6	952	61,8	50,4	1,84	
15	12:38	11,2	37	250,5	42	215	409	10	6,9	900	63,5	50,0	1,86	166,3
16	12:54	11,5	60	239,7	50	218	432	10	6,6	908	62,6	49,8	1,83	
17	13:08	11,2	37	238,6	40	192	428	10	6,7	920	62,9	50,4	1,85	
18	13:21	11,1	47	236,8	46	185	412	10	6,6	930	62,6	49,7	1,82	
19	13:39	11,3	49	240,2	53	197	399	10	6,5	968	62,6	49,5	1,83	
20	13:51	11,0	46	214,0	46	184	458	11	6,6	945	63,0	49,4	1,80	167,7
21	14:07	11,1	44	237,8	42	156	454	11	6,5	959	62,8	49,8	1,82	
22	14:19	10,8	38	227,9	41	150	408	11	6,0	982	62,4	49,4	1,80	
23	14:38	11,0	34	224,9	35	146	411	11	6,3	976	62,2	50,3	1,80	
24	14:53	10,7	37	213,0	40	150	425	11	6,1	995	62,8	49,9	1,81	166,8
25	15:10	10,8	35	219,5	36	148	419	11	6,0	990	61,9	49,7	1,84	

Параметр		Отходящие газы								Газо-ход	Теплоноситель			Зола
Измерительный прибор		Testo 330			MPU Vario Plus				Testo 512/2	TTSC-22	Встроенные ТПС		Panametrics PT878	Testo-845
Дата	Время	O ₂ , %	CO, ппм	t _{о.г.} , °C	CO, ппм	NO _x , ппм	SO ₂ , ппм	H ₂ S, ппм	v _г , м/с	t _г , °C	t _{нр} , °C	t _{обр} , °C	v _г , м/с	t _з , °C
26	15:25	10,9	32	209,1	35	159	424	11	6,1	1012	61,9	50,0	1,83	
27	15:41	10,6	39	221,7	43	138	468	11	5,9	1015	62,4	49,9	1,85	
28	15:53	10,3	39	203,2	34	145	443	12	6,0	1022	62,1	49,9	1,81	163,9
11.12.2023	9:08	10,3	66	208,8	44	143	442	13	5,9	1010	65,0	50,4	1,83	
2	9:19	10,6	43	229,9	38	144	451	14	5,9	1011	65,0	50,7	1,85	160,0
3	9:30	10,9	31	230,7	35	150	442	11	6,2	989	64,7	50,7	1,84	
4	9:39	10,9	43	238,4	39	146	458	11	6,2	988	64,7	50,8	1,86	
5	9:52	10,5	42	219,9	45	161	465	11	6,3	990	65,1	50,2	1,87	
6	9:59	10,8	42	226,8	37	150	433	11	6,2	979	65,4	50,1	1,86	
7	10:08	11,0	42	211,6	46	165	446	11	6,4	990	64,8	50,3	1,84	159,8
8	10:22	10,8	41	222,5	45	171	443	11	6,3	978	64,5	50,3	1,85	
9	10:30	11,0	38	231,5	39	169	420	11	6,1	966	65,2	49,9	1,83	
10	10:41	11,1	33	235,4	37	164	411	11	6,3	970	64,4	50,1	1,87	
11	10:50	11,1	33	238,7	32	166	421	11	6,3	967	64,5	50,2	1,85	
12	11:02	10,8	44	238,2	47	183	409	11	6,5	972	64,9	50,5	1,86	
13	11:10	10,8	37	226,6	38	177	422	11	6,6	977	64,5	50,6	1,87	158,2
14	11:22	10,7	34	215,1	34	173	430	10	6,3	945	65,5	50,3	1,84	
15	11:34	11,0	49	221,1	50	170	422	11	6,1	985	65,1	49,3	1,86	
16	11:51	12,2	42	232,9	41	159	416	11	6,5	985	64,3	49,6	1,85	
17	12:05	11,0	34	214,4	38	151	434	11	6,0	973	63,9	49,7	1,85	171,6
18	12:22	11,0	48	209,9	44	144	464	11	6,3	1007	64,3	48,7	1,84	
19	13:21	10,3	35	217,6	32	153	484	11	5,6	1048	63,6	49,9	1,87	
20	13:31	10,1	41	228,5	40	141	432	11	5,8	1015	64,8	50,2	1,85	
21	13:42	10,4	39	201,9	34	151	487	11	6,0	1015	64,3	50,0	1,85	
22	13:51	10,1	42	202,0	44	153	438	11	5,8	1038	64,5	49,7	1,87	
23	14:02	10,1	42	207,2	39	150	440	13	5,7	1008	65,2	50,3	1,86	167,3
24	14:11	10,2	43	225,4	43	144	427	13	5,8	1022	64,5	49,9	1,84	
25	14:19	10,7	44	209,0	40	152	472	11	5,8	1029	65,0	50,1	1,87	
26	14:32	10,3	40	222,5	38	136	459	11	6,1	1002	65,0	50,1	1,86	
27	14:41	10,3	49	222,0	47	138	424	11	5,9	1010	65,2	50,9	1,84	
28	14:48	10,5	33	207,5	32	141	424	11	6,0	1003	65,5	50,2	1,86	
29	15:02	10,5	43	208,2	39	139	452	11	5,9	1019	65,0	50,5	1,86	167,4
30	15:10	10,7	33	229,7	35	134	438	11	6,1	1018	64,4	50,3	1,86	
31	15:21	10,7	34	233,7	31	152	443	11	5,9	993	64,4	50,2	1,83	
32	15:28	10,8	31	216,9	33	144	474	11	6,0	998	64,6	50,3	1,85	
33	15:41	10,3	42	212,4	44	134	428	11	6,2	1014	65,1	50,9	1,83	
34	15:50	10,6	34	211,6	38	144	432	11	6,2	991	65,5	50,5	1,84	
35	15:59	10,7	37	230,4	64	138	474	11	5,9	989	65,0	50,5	1,83	163,5
36	16:11	10,8	42	230,0	38	148	441	11	6,2	1021	65,4	50,5	1,86	
37	16:20	10,6	47	229,8	52	156	462	11	6,0	1013	65,6	51,4	1,87	
38	16:30	10,2	43	204,4	46	137	458	11	6,0	1002	65,7	51,1	1,84	
39	16:38	10,5	42	223,3	37	129	473	11	5,7	1031	66,1	51,0	1,85	
40	16:51	10,1	32	215,9	36	137	448	11	5,7	1045	65,8	51,2	1,85	163,6

ПЗ.8. Статистическая обработка данных

$\alpha = 1,4$ (04.12.2023 г., 07.12.2023 г.)

Показатель	O ₂ , %	CO, ппм	t _{o, r} , °C	CO, ппм	NO _x , ппм	SO ₂ , ппм	H ₂ S, ппм	v _r , м/с	t _r , °C	t _{нр} , °C	t _{обр} , °C	v _r , м/с	t _з , °C
Число точек после исключения ошибок n	69	68	70	70	70	71	65	71	69	71	71	71	13
Среднее значение x	5,50	1733,66	240,68	1730,46	64,11	531,04	12,96	6,05	1449,83	65,61	48,35	1,80	155,23
СКО (S)	0,610	67,612	7,191	57,966	18,416	21,140	1,295	0,206	45,716	1,223	0,681	0,012	12,968
Критерий Мизеса-Смирнова ω^2 принадлежности результатов измерений нормальному распределению ($\leq 0,95$)	0,170	0,004	0,028	0,060	0,248	0,123	0,074	0,544	0,008	0,962	0,258	0,681	0,096
Доверительные границы случайной погрешности ε	0,1465	16,3643	1,7145	13,8206	4,3908	5,0034	0,3209	0,0488	10,9813	0,2896	0,1612	0,0028	7,8370
Неисключенная систематическая погрешность (НСП) Θ_z	0,20	86,68	1,20	86,52	5,00	26,55	5,00	0,08	24,00	2,50	2,50	0,09	6,00
Коэффициент K, зависящий от соотношения случайной составляющей погрешности и НСП	1,834	1,769	1,877	1,764	1,846	1,769	1,746	1,823	1,807	1,756	1,746	1,739	1,960
Суммарное среднее квадратическое отклонение S _z	0,14	50,71	1,11	50,43	3,63	15,53	2,89	0,05	14,91	1,45	1,45	0,05	4,99
Границы погрешности оценки измеряемой величины Δ	0,25	89,72	2,07	88,97	6,70	27,48	5,05	0,10	26,94	2,55	2,52	0,09	9,8
	5%	5%	1%	5%	10%	5%	39%	2%	2%	4%	5%	5%	6%

$\alpha = 1,6$ (05.12.2023 г., 08.12.2023 г.)

Показатель	O ₂ , %	CO, ппм	t _{o, r} , °C	CO, ппм	NO _x , ппм	SO ₂ , ппм	H ₂ S, ппм	v _r , м/с	t _r , °C	t _{нр} , °C	t _{обр} , °C	v _r , м/с	t _з , °C
Число точек после исключения ошибок n	55	55	57	55	56	57	53	57	57	57	57	57	12
Среднее значение x	7,75	1136,22	232,22	1134,51	137,43	493,53	12,73	6,12	1247,93	63,95	50,08	1,80	167,96
СКО (S)	0,706	55,888	9,523	61,438	19,364	26,657	1,158	0,327	51,138	1,505	0,709	0,012	13,536
Критерий Мизеса-Смирнова ω^2 принадлежности результатов измерений нормальному распределению ($\leq 0,95$)	0,087	0,141	0,320	0,027	0,322	0,230	0,163	0,262	0,191	0,923	0,039	0,532	0,361
Доверительные границы случайной погрешности ε	0,1909	15,1073	2,5264	16,6076	5,1852	7,0725	0,3191	0,0867	13,5675	0,3994	0,1881	0,0032	8,6103
Неисключенная систематическая погрешность (НСП) Θ_z	0,20	56,81	1,16	56,73	6,87	24,68	5,00	0,08	24,00	2,50	2,50	0,09	6,00
Коэффициент K, зависящий от соотношения случайной составляющей погрешности и НСП	1,855	1,783	1,909	1,787	1,839	1,786	1,746	1,863	1,821	1,765	1,749	1,740	1,982
Суммарное среднее квадратическое отклонение S _z	0,15	33,65	1,43	33,78	4,74	14,68	2,89	0,06	15,42	1,46	1,45	0,05	5,22
Границы погрешности оценки измеряемой величины Δ	0,28	60,01	2,73	60,37	8,71	26,21	5,05	0,12	28,09	2,57	2,53	0,09	10,3
	4%	5%	1%	5%	6%	5%	40%	2%	2%	4%	5%	5%	6%

$\alpha = 2,0$ (06.12.2023 г., 11.12.2023 г.)

Показатель	O ₂ , %	CO, ппм	t _{o, r} , °C	CO, ппм	NO _x , ппм	SO ₂ , ппм	H ₂ S, ппм	v _r , м/с	t _r , °C	t _{нр} , °C	t _{обр} , °C	v _r , м/с	t _з , °C
Число точек после исключения ошибок n	66	65	68	66	68	68	64	68	68	68	68	68	15
Среднее значение x	10,70	39,77	222,42	39,95	156,26	439,49	10,86	6,11	993,87	63,87	50,02	1,85	164,59
СКО (S)	0,436	7,082	11,502	6,601	19,145	23,364	0,708	0,314	33,939	1,339	0,609	0,017	13,280
Критерий Мизеса-Смирнова ω^2 принадлежности результатов измерений нормальному распределению ($\leq 0,95$)	0,266	0,587	0,181	0,296	0,954	0,374	0,022	0,269	0,104	0,962	0,139	0,791	0,096
Доверительные границы случайной погрешности ε	0,1071	1,7548	2,7840	1,6226	4,6338	5,6548	0,1769	0,0759	8,2145	0,3240	0,1475	0,0042	7,3548
Неисключенная систематическая погрешность (НСП) Θ_z	0,20	10,00	1,11	40,00	7,81	21,97	5,00	0,08	24,00	2,50	2,50	0,09	6,00
Коэффициент K, зависящий от соотношения случайной составляющей погрешности и НСП	1,816	1,767	1,913	1,741	1,822	1,780	1,740	1,851	1,792	1,759	1,745	1,742	1,937
Суммарное среднее квадратическое отклонение S _z	0,13	5,84	1,54	23,11	5,07	13,00	2,89	0,06	14,45	1,45	1,45	0,05	4,87
Границы погрешности оценки измеряемой величины Δ	0,23	10,32	2,94	40,23	9,24	23,14	5,03	0,11	25,91	2,55	2,52	0,09	9,4
	2%	26%	1%	101%	6%	5%	46%	2%	3%	4%	5%	5%	6%

П3.9. Результаты расчета теплового баланса по средним показателям

Дата	Коэффициент избытка воздуха α	Коэффициенты			Температура воздуха $t_{\text{в}}$, °C	Потери				КПД	Теплоноситель		Расход топлива, кг/ч
		Z	h	p		q_2 (с отходящими газами)	q_3 (с химическим недожогом)	q_5 (потери через стенки)	q_6 (потери с золой)		Объемный расход V_t , м³/с	Полученная теплота Q_t , МВт	
$\alpha = 1,4$													
04.12.2023	1,37	6,080	1,386	3960	-4,3	14,88	0,77	6	4,69	73,7	0,0142	1,02	365
07.12.2023	1,36	6,066	1,380	3960	-4,4	14,92	0,76	6	4,69	73,6	0,0141	1,03	371
За два дня	1,36	6,073	1,383	3960	-4,4	14,90	0,77	6	4,69	73,6	0,0141	1,03	368
$\alpha = 1,6$													
05.12.2023	1,62	6,781	1,644	3960	-3,6	16,04	0,60	6	5,64	71,7	0,0141	0,74	271
08.12.2023	1,58	6,678	1,607	3960	-3,6	15,63	0,58	6	5,64	72,2	0,0141	0,87	319
За два дня	1,60	6,718	1,621	3960	-3,6	15,79	0,59	6	5,64	72,0	0,0141	0,82	300
$\alpha = 2,0$													
06.12.2023	2,05	8,060	2,082	3960	-3,27	18,33	0,03	6	5,64	70,0	0,0144	0,77	291
11.12.2023	2,02	7,971	2,053	3960	-3,13	17,86	0,03	6	5,64	70,5	0,0146	0,89	333
За два дня	2,04	8,006	2,064	3960	-3,19	18,04	0,03	6	5,64	70,3	0,0145	0,84	316

П3.10. Результаты расчета показателей эффективности

(средние показатели)

Дата	Объем продуктов горения, м³/с				Массовый расход, г/с				Критерии	
	По замерам		Расчет по α						КПД топки η_t	Доля несгоревших горючих веществ топлива F_{uf}
	при $t_{o,r}$	при н.у.	Удельный объем, м³/кг топл	м³/с	CO	NO _x	SO ₂	H ₂ S		
$\alpha = 1,4$										
04.12.2023	0,97	0,52	5,38	0,545	–	–	–	–	81,5%	0,77%
07.12.2023	0,97	0,51	5,36	0,553	–	–	–	–	82,1%	0,76%
За два дня	0,97	0,52	5,37	0,549	0,873 ± 0,045	0,0346 ± 0,0036	0,626 ± 0,032	0,717 ± 0,038	81,8%	0,77%
$\alpha = 1,6$										
05.12.2023	1,00	0,54	6,27	0,4729	–	–	–	–	80,0%	0,60%
08.12.2023	0,96	0,52	6,14	0,5445	–	–	–	–	80,6%	0,58%
За два дня	0,98	0,53	6,19	0,5164	0,645 ± 0,034	0,0837 ± 0,0053	0,657 ± 0,035	0,0079 ± 0,0030	80,3%	0,59%
$\alpha = 2,0$										
06.12.2023	0,98	0,54	7,81	0,631	–	–	–	–	79,6%	0,03%
11.12.2023	0,97	0,54	7,71	0,713	–	–	–	–	79,6%	0,03%
За два дня	0,97	0,54	7,75	0,681	0	0,1169 ± 0,0069	0,717 ± 0,038	0,0082 ± 0,0037	79,6%	0,03%

Библиография

П2.1. Национальный стандарт РФ ГОСТ Р 8.736-2011 «Государственная система обеспечения единства измерений. Измерения прямые многократные. Методы обработки результатов измерений. Основные положения».

П2.2. Правила по межгосударственной стандартизации ПМГ 96-2009 «Государственная система обеспечения единства измерений. Результаты и характеристики качества измерений. Формы представления».

П2.3. Рекомендации по межгосударственной стандартизации РМГ 29-2013 «Государственная система обеспечения единства измерений. Метрология. Основные термины и определения».

П2.4. Корнилова, Н.В. Разработка методики теплотехнических расчетов по приведенным характеристикам RDF-топлив / Н.В. Корнилова, П.А. Трубаев // Энергетические системы. – 2018. – № 1. – С. 214-233.

ПРИЛОЖЕНИЕ 4. ТЕКСТ ПРОГРАММЫ РАСЧЕТА ВРЕМЕНИ ТЕЧЕНИЯ ГАЗОВОГО ПОТОКА ПОСЛЕ ОКОНЧАНИЯ ГОРЕНИЯ ПО ДАННЫМ 3D-STREAMLINE, СГЕНЕРИРОВАННЫМ В ANSYS FLUENT

Option Explicit

' РАСЧЕТ ВРЕМЕНИ ТЕЧЕНИЯ ГАЗОВОГО ПОТОКА ПОСЛЕ ОКОНЧАНИЯ ГОРЕНИЯ ПО ДАННЫМ
3D-STREAMLINE, СГЕНЕРИРОВАННЫМ В ANSYS FLUENT

' Положение на листе данных

Const ColD = 13

Const RowSize = 6

Const RowLimit = 1

Const RowCut = 14

' Положение на листе выводимых результатов

Const RowRes = 6

Const ColRes = 16

Const ColIso = 36

' Ограничения и допуски

Public Const Delta = 0.2

' Тип данных "точка" StreamLines

Public Type TPoint

x As Double

y As Double

z As Double

v As Double

t As Double

O2 As Double

CO As Double

Vol As Double

End Type

' Тип данных "StreamLines"

Public Type TLine

Active As Boolean

Count As Integer

Len As Double

Time As Double

TimeG As Double

TimeT As Double

```

TimeV As Double
Note As String
MaxVol As Double
End Type

```

```

' Тип данных "Сечение"

```

```

Public Type TCut
    x1 As Double
    y1 As Double
    x2 As Double
    y2 As Double
End Type

```

```

Function DlCalc(p1 As TPoint, p2 As TPoint) As Double
    DlCalc = ((p1.x - p2.x) ^ 2 + (p1.y - p2.y) ^ 2 + (p1.z - p2.z) ^ 2) ^ 0.5
End Function

```

```

' Проверка на прохождение через сечения

```

```

Function CheckCut(ByVal x As Double, ByVal y As Double, Cut As TCut) As Boolean
    Dim tmp As Double
    Dim x1, y1, x2, y2 As Double
    x1 = Cut.x1: x2 = Cut.x2: y1 = Cut.y1: y2 = Cut.y2:
    CheckCut = True
    If y2 < y1 Then: tmp = y1: y1 = y2: y2 = tmp
    If x2 < x1 Then: tmp = x1: x1 = x2: x2 = tmp
    If x1 = x2 Then
        ' Вертикальное сечение
        If Abs(x - x1) > Delta Then
            CheckCut = False
        ElseIf (y > (Delta + y2)) Or (y < (y1 - Delta)) Then
            CheckCut = False
        End If
    Else
        ' Горизонтальное сечение
        If Abs(y - y1) > Delta Then
            CheckCut = False
        ElseIf (x > (Delta + x2)) Or (x < (x1 - Delta)) Then
            CheckCut = False
        End If
    End If
End Function

```

```

' Основная процедура
Public Sub CalcTime()

```

```

Application.ScreenUpdating = False
Application.Calculation = xlCalculationManual

Dim Points() As TPoint
Dim Lines() As TLine
Dim TempP As TPoint
Dim MinMaxP(2) As TPoint
Dim Arr As Variant

Dim LimitCO, LimitVol, Tmin, time1, time2, time3, dl As Double
Dim n, i, j, MaxPoint, MaxLine As Integer
Dim DataS As Worksheet
Dim InOutCut(1) As TCut
Dim R As Range
Dim IsVol As Boolean

' ПОЛУЧЕНИЕ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ
Application.StatusBar = "Получение исходных данных": DoEvents
Set DataS = ActiveSheet

' Входное и выходное сечения
InOutCut(0).x1 = DataS.Cells(RowCut + 2, ColD)
InOutCut(0).y1 = DataS.Cells(RowCut + 2, ColD + 1)
InOutCut(0).x2 = DataS.Cells(RowCut + 3, ColD)
InOutCut(0).y2 = DataS.Cells(RowCut + 3, ColD + 1)
InOutCut(1).x1 = DataS.Cells(RowCut + 5, ColD)
InOutCut(1).y1 = DataS.Cells(RowCut + 5, ColD + 1)
InOutCut(1).x2 = DataS.Cells(RowCut + 6, ColD)
InOutCut(1).y2 = DataS.Cells(RowCut + 6, ColD + 1)

' Пределы содержания и минимальная температура
LimitCO = DataS.Cells(RowLimit + 2, ColD)
Tmin = DataS.Cells(RowLimit + 3, ColD)
LimitVol = DataS.Cells(RowLimit + 4, ColD)

Arr = Range("A1:H50000").Value

' Определение количества StreamLine и максимального числа точек
Application.StatusBar = "Определение числа линий и максимального числа точек": DoEvents
n = 1
i = 6
j = 1
MaxPoint = 0
MaxLine = 1

For i = 6 To 50000
    If Arr(i, 1) = "" Then Exit For

```

```

If Arr(i, 1) = "undef" Then
    If j > MaxPoint Then MaxPoint = j
    j = 1
    MaxLine = MaxLine + 1
Else
    j = j + 1
End If
DoEventsCheck
Next
If j > MaxPoint Then MaxPoint = j

ReDim Points(MaxLine + 1, MaxPoint + 1) As TPoint
ReDim Lines(MaxLine + 1) As TLine

' Считывание массивов Ansys в массивы StreamLine
n = 1
j = 1

For i = 6 To 50000
    If Arr(i, 1) = "" Then Exit For
    If Arr(i, 1) = "undef" Then
        If (n \ 10) = (n / 10) Then Application.StatusBar = "Считывание массивов Ansys: " + CStr(n):
        DoEvents
        Lines(n).Count = j - 1
        DataS.Cells(i, 9) = ""
        DataS.Cells(i, 10) = ""
        n = n + 1
        j = 1
    Else
        Points(n, j).x = Arr(i, 1)
        Points(n, j).y = Arr(i, 2)
        Points(n, j).z = Arr(i, 3)
        Points(n, j).v = Arr(i, 4)
        Points(n, j).t = Arr(i, 5)
        Points(n, j).O2 = Arr(i, 6)
        Points(n, j).CO = Arr(i, 7)
        Points(n, j).Vol = Arr(i, 8)
        ' Запись в строку номера линии и расстояния между точками
        DataS.Cells(i, 9) = n
        If j = 1 Then
            DataS.Cells(i, 10) = ""
        Else
            dl = D1Calc(Points(n, j), Points(n, j - 1))
            DataS.Cells(i, 10) = dl
        End If
        j = j + 1
    End If
End For

```


Next

Lines(n).Count = j - 1

DataS.Range("\$I\$" + CStr(i) + ":\$J50000").Clear

' Очистка координат изолиний конца горения

Application.StatusBar = "Очистка координат изолиний конца горения": DoEvents

DataS.Range(DataS.Cells(RowRes, ColIso), DataS.Cells(RowRes + 249, ColIso)) = ""

DataS.Range(DataS.Cells(RowRes, ColIso + 1), DataS.Cells(RowRes + 249, ColIso + 1)) = 0

DataS.Range(DataS.Cells(RowRes, ColIso + 2), DataS.Cells(RowRes + 249, ColIso + 2)) = -1

DataS.Range(DataS.Cells(RowRes, ColIso + 3), DataS.Cells(RowRes + 249, ColIso + 3)) = ""

DataS.Range(DataS.Cells(RowRes, ColIso + 4), DataS.Cells(RowRes + 249, ColIso + 4)) = 0

DataS.Range(DataS.Cells(RowRes, ColIso + 5), DataS.Cells(RowRes + 249, ColIso + 5)) = -1

DataS.Range(DataS.Cells(RowRes, ColIso + 6), DataS.Cells(RowRes + 249, ColIso + 6)) = ""

DataS.Range(DataS.Cells(RowRes, ColIso + 7), DataS.Cells(RowRes + 249, ColIso + 7)) = 0

DataS.Range(DataS.Cells(RowRes, ColIso + 8), DataS.Cells(RowRes + 249, ColIso + 8)) = -1

' Транспортирование обратных StreamLine

Application.StatusBar = "Транспортирование обратных StreamLine": DoEvents

For n = 1 To MaxLine

 If Points(n, 1).x > Points(n, Lines(n).Count).x Then

 For j = 1 To Lines(n).Count \ 2

 TempP = Points(j)

 Points(j) = Points(Lines(n).Count - j + 1)

 Points(Lines(n).Count - j + 1) = TempP

 Next

 End If

Next

' Поиск максимального значения содержание летучих

For n = 1 To MaxLine

 Lines(n).MaxVol = 0

 For j = 1 To Lines(n).Count

 If Points(n, j).Vol > Lines(n).MaxVol Then Lines(n).MaxVol = Points(n, j).Vol

 Next

Next

' Проверка на расположении начала и конца StreamLines в входном и выходном сечениях

Application.StatusBar = "Проверка на расположении начала и конца StreamLines в входном и выходном сечениях": DoEvents

For n = 1 To MaxLine

 Lines(n).Active = CheckCut(Points(n, 1).x, Points(n, 1).y, InOutCut(0)) And _
 CheckCut(Points(n, Lines(n).Count).x, Points(n, Lines(n).Count).y, InOutCut(1))

Next

' Расчет параметров в конце Streamline (0 - мин, 1 - среднее, 2 - максимум)

Application.StatusBar = "Расчет параметров в конце Stremline": DoEvents

```

MinMaxP(0).t = 10000000: MinMaxP(1).t = 0: MinMaxP(2).t = -10000000
MinMaxP(0).v = 10000000: MinMaxP(1).v = 0: MinMaxP(2).v = -10000000
MinMaxP(0).O2 = 10000000: MinMaxP(1).O2 = 0: MinMaxP(2).O2 = -10000000
MinMaxP(0).CO = 10000000: MinMaxP(1).CO = 0: MinMaxP(2).CO = -10000000
MinMaxP(0).Vol = 10000000: MinMaxP(1).Vol = 0: MinMaxP(2).Vol = -10000000
j = 0
For n = 1 To MaxLine
  If Lines(n).Active Then
    If MinMaxP(0).t > Points(n, Lines(n).Count).t Then MinMaxP(0).t = Points(n, Lines(n).Count).t
    If MinMaxP(0).v > Points(n, Lines(n).Count).v Then MinMaxP(0).v = Points(n, Lines(n).Count).v
    If MinMaxP(0).O2 > Points(n, Lines(n).Count).O2 Then MinMaxP(0).O2 = Points(n,
Lines(n).Count).O2
    If MinMaxP(0).CO > Points(n, Lines(n).Count).CO Then MinMaxP(0).CO = Points(n,
Lines(n).Count).CO
    If MinMaxP(0).Vol > Points(n, Lines(n).Count).Vol Then MinMaxP(0).Vol = Points(n,
Lines(n).Count).Vol

    If MinMaxP(2).t < Points(n, Lines(n).Count).t Then MinMaxP(2).t = Points(n, Lines(n).Count).t
    If MinMaxP(2).v < Points(n, Lines(n).Count).v Then MinMaxP(2).v = Points(n, Lines(n).Count).v
    If MinMaxP(2).O2 < Points(n, Lines(n).Count).O2 Then MinMaxP(2).O2 = Points(n,
Lines(n).Count).O2
    If MinMaxP(2).CO < Points(n, Lines(n).Count).CO Then MinMaxP(2).CO = Points(n,
Lines(n).Count).CO
    If MinMaxP(2).Vol < Points(n, Lines(n).Count).Vol Then MinMaxP(2).Vol = Points(n,
Lines(n).Count).Vol

    MinMaxP(1).t = Points(n, Lines(n).Count).t + MinMaxP(1).t
    MinMaxP(1).v = Points(n, Lines(n).Count).v + MinMaxP(1).v
    MinMaxP(1).O2 = Points(n, Lines(n).Count).O2 + MinMaxP(1).O2
    MinMaxP(1).CO = Points(n, Lines(n).Count).CO + MinMaxP(1).CO
    MinMaxP(1).Vol = Points(n, Lines(n).Count).Vol + MinMaxP(1).Vol
    j = j + 1
  End If
Next
MinMaxP(1).t = MinMaxP(1).t / j
MinMaxP(1).v = MinMaxP(1).v / j
MinMaxP(1).O2 = MinMaxP(1).O2 / j
MinMaxP(1).CO = MinMaxP(1).CO / j
MinMaxP(1).Vol = MinMaxP(1).Vol / j

' Расчет времени прохождения для каждой StreamLine
Application.StatusBar = "Расчет времени прохождения": DoEvents
For n = 1 To MaxLine
  Lines(n).Len = 0
  Lines(n).Time = 0
  Lines(n).TimeG = 0
  Lines(n).TimeT = 0

```

```

Lines(n).TimeV = 0
Lines(n).Note = ""
IsVol = False
For i = 2 To Lines(n).Count
    ' Длина отрезка между точками
    dl = D1Calc(Points(n, i - 1), Points(n, i))
    Lines(n).Len = Lines(n).Len + dl
    ' Время прохождения между точками
    time1 = dl / (0.5 * (Points(n, i).v + Points(n, i - 1).v))
    Lines(n).Time = Lines(n).Time + time1

    If IsVol = False Then If Points(n, i).Vol >= Lines(n).MaxVol Then IsVol = True

    ' Проверка конца горения по концентрации O2 и CO
    If ((Points(n, i).CO <= LimitCO) And IsVol) Or (Lines(n).TimeG > 0) Then
        ' Добавление точки окончания горения (по концентрации)
        If (Lines(n).TimeG = 0) And (Lines(n).Active) Then
            DataS.Cells(RowRes + n - 1, Collso) = i
            DataS.Cells(RowRes + n - 1, Collso + 1) = Points(n, i).x
            DataS.Cells(RowRes + n - 1, Collso + 2) = Points(n, i).y
        End If
        Lines(n).TimeG = Lines(n).TimeG + time1
    End If

    ' Проверка конца горения по концентрации летучих
    If ((Points(n, i).Vol <= LimitVol) And IsVol) Or (Lines(n).TimeV > 0) Then
        ' Добавление точки окончания горения (по концентрации)
        If (Lines(n).TimeV = 0) And (Lines(n).Active) Then
            DataS.Cells(RowRes + n - 1, Collso + 6) = i
            DataS.Cells(RowRes + n - 1, Collso + 7) = Points(n, i).x
            DataS.Cells(RowRes + n - 1, Collso + 8) = Points(n, i).y
        End If
        Lines(n).TimeV = Lines(n).TimeV + time1
    End If

    ' Проверка конца горения по падению температуры
    If (i > 3) And (Points(n, i).t > Tmin) Then
        If ((Points(n, i).t <= Points(n, i - 1).t) And (Points(n, i).t <= Points(n, i - 2).t)) Or (Lines(n).TimeT >
0) Then
            ' Добавление точки окончания горения (по температуре)
            If (Lines(n).TimeT = 0) And (Lines(n).Active) Then
                DataS.Cells(RowRes + n - 1, Collso + 3) = i
                DataS.Cells(RowRes + n - 1, Collso + 4) = Points(n, i).x
                DataS.Cells(RowRes + n - 1, Collso + 5) = Points(n, i).y
            End If
            Lines(n).TimeT = Lines(n).TimeT + time1
        End If
    End If
End If

```

Next
Next

' Исключение выпадающих точек
Dim MasstG, MasstV, MassN
Dim MassCount As Integer
Dim EndCicle As Boolean
Dim AvQG, AvQV, DispG, DispV, Rkrit, KrR, Min1, Min2 As Double

Do
 DoEventsCheck
 MassCount = 0
 For n = 1 To MaxLine
 If Lines(n).Active Then
 MassCount = MassCount + 1
 End If
 Next
 Rkrit = R_kr(0.05, MassCount)

 ReDim MasstG(MassCount + 1) As Double
 ReDim MasstV(MassCount + 1) As Double
 ReDim MassN(MassCount + 1) As Double

 i = 1
 For n = 1 To MaxLine
 If Lines(n).Active Then
 MasstG(i) = Lines(n).TimeG
 MasstV(i) = Lines(n).TimeV
 MassN(i) = n
 i = i + 1
 End If
 Next

EndCicle = True

AvQG = 0
AvQV = 0
For i = 1 To MassCount
 AvQG = AvQG + MasstG(i)
 AvQV = AvQV + MasstV(i)
Next
AvQG = AvQG / MassCount
AvQV = AvQV / MassCount
DispG = 0
DispV = 0
For i = 1 To MassCount

```

    DispG = DispG + (MasstG(i) - AvQG) ^ 2
    DispV = DispV + (MasstV(i) - AvQV) ^ 2
Next
DispG = (DispG / (MassCount - 1)) ^ 0.5
DispV = (DispV / (MassCount - 1)) ^ 0.5

If DispG > 0 Then
    For i = 1 To MassCount
        If MassN(i) = 79 Then
            j = 0
        End If
        KrR = Abs(MasstG(i) - AvQG) / (DispG * ((MassCount - 1) / MassCount) ^ 0.5)
        If KrR > Rkrit Then
            'MsgBox "Удаляемое значение CO:  n = " & Format(MassN(i), "Fixed") & "  t = " &
Format(MasstG(i), "Fixed")
            Lines(MassN(i)).Active = False
            EndCicle = False
            Exit For
        End If
    Next
End If

If (DispV > 0) And EndCicle Then
    For i = 1 To MassCount
        KrR = Abs(MasstV(i) - AvQV) / (DispV * ((MassCount - 1) / MassCount) ^ 0.5)
        If KrR > Rkrit Then
            'MsgBox "Удаляемое значение Vol:  n = " & Format(MassN(i), "Fixed") & "  t = " &
Format(MasstV(i), "Fixed")
            Lines(MassN(i)).Active = False
            EndCicle = False
            Exit For
        End If
    Next
End If

If EndCicle Then
    Min1 = 1000000000#: Min2 = 1000000000#: n = 0
    For i = 1 To MassCount
        If MasstG(i) < Min1 Then Min1 = MasstG(i): n = i
    Next
    For i = 1 To MassCount
        If (MasstG(i) < Min2) And (n <> i) Then Min2 = MasstG(i)
    Next
    If Abs(Min1 - Min2) > 0.5 Then Lines(MassN(n)).Active = False: EndCicle = False
End If

If EndCicle Then

```

```

Min1 = 1000000000#: Min2 = 1000000000#: n = 0
For i = 1 To MassCount
    If MasstV(i) < Min1 Then Min1 = MasstV(i): n = i
Next
For i = 1 To MassCount
    If (MasstV(i) < Min2) And (n <> i) Then Min2 = MasstV(i)
Next
If Abs(Min1 - Min2) > 0.5 Then Lines(MassN(n)).Active = False: EndCicle = False
End If

Loop Until EndCicle

' Вывод на лист
Application.StatusBar = "Вывод на лист": DoEvents
For n = 1 To 250
    DataS.Cells(RowRes + n - 1, ColRes) = n
    If (n > MaxLine) Then
        For j = 1 To 4: DataS.Cells(RowRes + n - 1, ColRes + j) = "-": Next
    Else
        DataS.Cells(RowRes + n - 1, ColRes + 1) = Lines(n).Len
        If Not Lines(n).Active Then
            For j = 2 To 4: DataS.Cells(RowRes + n - 1, ColRes + j) = "-": Next
            DataS.Cells(RowRes + n - 1, ColRes + 5) = Lines(n).Note
        Else
            DataS.Cells(RowRes + n - 1, ColRes + 2) = Lines(n).Time
            DataS.Cells(RowRes + n - 1, ColRes + 3) = Lines(n).TimeG
            DataS.Cells(RowRes + n - 1, ColRes + 4) = Lines(n).TimeT
            DataS.Cells(RowRes + n - 1, ColRes + 5) = Lines(n).TimeV
        End If
    End If
Next

For i = 0 To 2
    DataS.Cells(32, ColD + i) = MinMaxP(i).t
    DataS.Cells(33, ColD + i) = MinMaxP(i).v
    DataS.Cells(34, ColD + i) = MinMaxP(i).O2
    DataS.Cells(35, ColD + i) = MinMaxP(i).CO
    DataS.Cells(36, ColD + i) = MinMaxP(i).Vol
Next

Application.ScreenUpdating = True
Application.StatusBar = "Конец расчета. Включение пересчета": DoEvents
Application.Calculation = xlCalculationAutomatic
Application.StatusBar = "": DoEvents

End Sub

```

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2025612097

**Расчет времени течения газового потока после
окончания горения по данным 3D-StreamLine,
сгенерированным в ANSYS FLUENT**

Правообладатели: *Ахмед Ашраф Абдулла Ахмед (IQ), Трубаев
Павел Алексеевич (RU)*

Авторы: *Ахмед Ашраф Абдулла Ахмед (IQ), Трубаев Павел
Алексеевич (RU)*



Заявка № 2024690608

Дата поступления 05 декабря 2024 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 27 января 2025 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат: 0692e7c1a6300b154f2401670bca2026
Владелец: **Зубов Юрий Сергеевич**
Действителен с 10.07.2024 по 03.10.2025

Ю.С. Зубов



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(12) ГОСУДАРСТВЕННАЯ РЕГИСТРАЦИЯ ПРОГРАММЫ ДЛЯ ЭВМ

Номер регистрации (свидетельства):

[2025612097](#)

Дата регистрации: 27.01.2025

Номер и дата поступления заявки:

2024690608 05.12.2024

Дата публикации и номер бюллетеня:

[27.01.2025](#) Бюл. № 2

Контактные реквизиты:

нет

Авторы:

Ахмед Ашраф Абдулла Ахмед (IQ),
Трубаев Павел Алексеевич (RU)

Правообладатели:

Ахмед Ашраф Абдулла Ахмед (IQ)
Трубаев Павел Алексеевич (RU)

Название программы для ЭВМ:

Расчет времени течения газового потока после окончания горения по данным 3D-StreamLine, сгенерированным в ANSYS FLUENT**Реферат:**

Программа предназначена для обработки результатов расчета горения твердого топлива в программном комплексе ANSYS FLUENT и позволяет по экспортированным точкам линий тока (StreamLine) определить время нахождения газов в расчетной области после окончания процесса горения. Программа может использоваться при конструировании и анализе работы котлов, сжигающих твердое топливо или отходы, для оценки полноты разложения вредных веществ в продуктах горения. Функциональные возможности программы: проверка корректности линий тока по нахождению начальной и конечной точек в входном и выходном сечениях; расчет времени прохождения по линии тока; определение точки конца горения по концентрации CO, летучих веществ и началу уменьшения температуры; определение среднего и минимального времени нахождения газов в расчетной области после окончания горения; расчет средних значений переменных в выходном сечении.

Язык программирования: Visual Basic**Объем программы для ЭВМ:** 1 МБ