УДК 628.474.3: 004.94

Ашраф Абдулла Ахмед

Белгородский государственный технологический университет имени В.Г. Шухова, аспирант кафедры энергетики теплотехнологии, Россия, Белгород, телефон (4722) 500-381, e-mail: ashraf.a.ahmed@tu.edu.iq

Павел Алексеевич Трубаев

Белгородский государственный технологический университет имени В.Г. Шухова, доктор технических наук, профессор кафедры энергетики теплотехнологии, Россия, Белгород, телефон (4722) 500-381, e-mail: trubaev@mail.ru

Исследование режимов горения RDF-топлива в котле малой мощности при изменении влажности топлива и коэффициента избытка воздуха¹

Авторское резюме

Состояние вопроса. Адекватность результатов CFD-моделирования в значительной степени зависит от принятого подхода к моделированию и точности заданных граничных условий. Моделирование горения твердого топлива характеризуется большой сложностью и в связи с высокими вычислительными и временными затратами невозможно без использования существенных упрощений. В связи с этим актуальным является разработка CFD-модели горения твердого топлива в неподвижном слое в топках печей и котлов малой мощности, позволяющей получать решения с приемлемыми вычислительными и временными затратами.

Материалы и методы. Предложен подход к построению CFD-модели горения твердого топлива в неподвижном слое в топках печей и котлов малой мощности. Предлагается слой топлива в отдельную расчетную область не выделять и заменить его граничными условиями, расчетная область при этом должна содержать только газовую часть. Для моделирования горения применяется механизм, состоящий из газофазных реакций окисления СО и углеводородов выделившихся летучих веществ и гетерогенной реакции горения твердого углерода на поверхности слоя топлива. Для оценки параметров модели использованы результаты испытаний промышленного котла, сжигающего RDF-топливо (refuse-derived fuel – топливо, полученное из отходов), что позволило обеспечить допустимое совпадение результатов моделирования с данными измерений на котле при разных режимах его работы.

Результаты. Для окисления находящихся в продуктах сгорания отходов органических вредных веществ предлагается производить дожиг вредных веществ в дополнительном газоходе, расположенном между топкой и конвективной частью (газоводяным теплообменником). В результате моделирования процесса горения при изменении влажности с 10 до 50 % и коэффициента избытка воздуха α с 1,4 до 2,2 установлено, что при незначительном повышении параметров (влажности до 30 % и α до 1,6) условия дожига вредных веществ (нахождение продуктов сгорания более 2 с при температурах 850/1100 °C) соблюдается, но при дальнейшем увеличении параметров дожиг не обеспечивается, при увеличении влажности до 50 % из-за низкой температуры горения даже при увеличении времени нахождения газов в расчетном объеме горение заканчивается позднее, при увеличении коэффициента избытка воздуха наряду с уменьшением температуры газов увеличивается их объем и скорость, что приводит к уменьшению времени нахождения газов в расчетном объеме.

Выводы. Разработанная CFD-модель обеспечивает допустимое совпадение с результатами измерений на промышленном котле при разных режимах его работы, что позволяет считать ее адекватной. Для обеспечения полного сгорания топлива и последующего нахождения продуктов горения не менее 2 с при температурах более 850/1100 °C необходимо соблюдать режим горения при оптимальном коэффициенте избытка воздуха (1,4–1,6) без превышения этого значения, при этом недопустимо подавать на сжигание материал с высокой влажностью.

Ключевые слова: CFD-модель, RDF-топливо, процесс горения, колосниковая решетка, дожиг вредных веществ

Ashraf Abdulla Ahmed

BSTU named after V.G. Shukhov, Postgraduate Student of Heat Engineering Technology Department, Russia, Belgorod, telephone (4722) 500-381, e-mail: ashraf.a.ahmed@tu.edu.iq

Pavel Alekseevich Trubaev

BSTU named after V.G. Shukhov, Doctor of Engineering Sciences (Post-doctoral degree), Professor of Heat Engineering Technology Department, Russia, Belgorod, telephone (4722) 500-381, e-mail: trubaev@mail.ru

© Ахмед А.А., Трубаев П.А., 2025

¹ Работа выполнена в рамках реализации федеральной программы поддержки университетов «Приоритет 2030» с использованием оборудования на базе Центра высоких технологий БГТУ им. В.Г. Шухова.

The study is carried out within the framework of the federal program for supporting universities "Priority 2030" using equipment based on the High Technology Center of the BSTU named after V.G. Shukhov

Вестник ИГЭУ, 2025, вып. 3, с. 13-21.

Study of RDF combustion modes in a small capacity boiler when changing fuel moisture content and excess air ratio

Abstract

Background. The adequacy of CFD modelling results depends to a large extent on the modelling approach adopted and the accuracy of the specified boundary conditions. Modelling of solid fuel combustion is very complicated and, due to high computational and time costs, is impossible without significant simplifications. Thus, it is relevant to develop a CFD model of solid fuel combustion in a fixed bed in furnaces and low-power boilers. The model allows obtaining simulation results with acceptable computational and time costs.

Materials and methods. The authors have proposed an approach to design a CFD model of solid fuel combustion in a fixed bed in furnaces and low-power boilers. It is proposed not to allocate the fuel bed into a separate computational domain and replace it with boundary conditions; in this case, the computational domain should contain only the gas part. For combustion modelling, the authors have applied the mechanism that consists of gas-phase reactions of CO and hydrocarbon oxidation of the released volatiles, and a heterogeneous interaction of solid carbon combustion on the surface of the fuel bed. To estimate the model parameters, the results of tests of an industrial boiler burning RDF have been used. It made it possible to ensure acceptable agreement of the modelling results and the data of measurements on the boiler under different modes of operation.

Results. To oxidize the organic harmful substances in the combustion products of the waste, it is suggested to carry out afterburning of deleterious substances in an additional gas duct located between the furnace and the convective part (gaswater heat exchanger). As a result of modelling the combustion process when changing humidity from 10 to 50 % and excess air coefficient from 1,4 to 2,2, it is established that with an insignificant increase of parameters (humidity up to 30 % and α up to 1,6), conditions of afterburning of harmful substances (presence of combustion products for more than 2 sec at temperatures of 850/1100 °C) are observed. But with further increase of parameters afterburning is not ensured. When the humidity increases up to 50 percent due to low combustion temperature, even when the time of gases in the calculated volume increases, the combustion ends later. With an increase of excess air ratio along with a decrease of temperature of gases, their volume and velocity increase, which leads to a reduction of time of presence of gases in the calculated volume. **Conclusions.** The developed CFD model provides an acceptable agreement with the results of measurements on the industrial boiler under different modes of operation, which allows us to consider it adequate. To ensure complete combustion of fuel and subsequent presence of combustion products at temperatures above 850/1100 °C for more than 2 s, it is necessary to observe the combustion mode at the optimum excess air ratio (1,4-1,6) without exceeding this value. At the same time, it is unacceptable to supply material with high humidity for combustion.

Key words: CFD-model, RDF, combustion, grate, afterburning of harmful substances

DOI: 10.17588/2072-2672.2025.3.013-021

Введение. Сжигание биомассы и отходов в неподвижном или перемешивающемся слое на колосниковой решетке является одной из основных технологий производства теплоты и энергии в печах и котлах малой мощности, поскольку позволяет эффективно сжигать разнообразные виды топлива с различным уровнем влажности и требует минимальной подготовки топлива [1], но на эффективность сжигания существенно влияют условия эксплуатации и горения [2]. Проблема использования альтернативных топлив обусловлена, как правило, их низкой калорийностью [3]. Эффективно управлять процессом горения возможно с использованием CFD-моделирования, обеспечивая в котле оптимальный режим, определенный в результате исследования модели [4].

Для моделирования работы маломасштабных котлов с фиксированным слоем топлива необходим учет взаимодействующих процессов горения, движения среды и тепломассообмена, сложность которых влияет на время вычислений и точность результатов моделирования [2].

При моделировании горения неподвижного слоя твердого топлива в CFD-системах используют три основных подхода [2]:

1) слой топлива в модель не включается, и в качестве граничных условий задаются экспериментальные данные скорости горения и выхода летучих веществ;

 горение представляется как две отдельные модели – первая включает тепло-, массообмен и химические реакции в твердой фазе с получением газообразных продуктов горения, параметры которых представляют граничные условия для второй модели, содержащей газовую область;

3) слой топлива представляется в виде пористой зоны, через которую проходит воздух; процессы сушки, газификации и выхода летучих задаются в виде пользовательских функций (UDF).

Адекватность результатов CFD-моделирования в значительной степени зависит от принятого подхода к моделированию и точности заданных граничных условий. Во многих случаях достоверные результаты возможно получить при использовании упрощенных граничных условий в сочетании с уменьшенной расчетной сеткой [4]. На теплопередачу в печи определяющее влияние оказывает теплота сгорания топлива, от которой зависит температура горения. Вид топлива и его свойства при этом на теплопередачу в печи не оказывают заметного влияния [5]. На эффективность горения и образование выбросов значительное влияние оказывают условия подачи воздуха для горения [4, 6] и влажность топлива, которая существенно влияет на снижение теплотворной способности и температуры воспламенения, а также на скорость горения [7]. Повышенное содержание влаги в топливе приводит к неполному сгоранию, увеличению количества смол [8].

Цель исследования – представить подход к использованию компьютерного моделирования процесса сжигания твердого топлива в неподвижном слое в топках печей и котлов малой мощности в программном комплексе Ansys Fluent, позволяющий получать решения с приемлемыми вычислительными и временными затратами.

В настоящее время принято сжигать отходы крупных городов в котлах мощностью от 60 до 300 МВт. Ниже предлагается альтернативный подход – сжигание твердых коммунальных отходов (ТКО) и RDF-топлива (refusederived fuel – топливо, полученное из отходов) в установках малой мощности в пределах полигонов ТКО для обеспечения местного энергоснабжения. В отличие от крупных мусоросжигательных установок, при небольшой производительности возможно осуществить качественную сортировку с отбором фракций, содержащих тяжелые металлы, что исключает их переход в продукты сгорания. Кроме того, расположение источника выбросов в пределах полигона ТКО, уже являющегося территорией с неблагоприятной экологической обстановкой с выделенной санитарно-защитной зоной, позволит избежать экологических проблем крупных установок.

Методы исследования. Описание *СFD-модели.* Так как моделирование горения характеризуется большой сложностью, в целях упрощения слой топлива предлагается в отдельную расчетную область не выделять и заменить его граничными условиями, расчетная область при этом будет содержать только газовую часть. В связи с крайней неоднородностью состава отходов детальные механизмы окисления для них отсутствуют. Поэтому для моделирования горения применяется механизм, состоящий из газофазных реакций окисления СО и углеводородов выделившихся летучих веществ и гетерогенной реакции горения твердого углерода на поверхности слоя топлива.

В модели не учитывается унос твердых частиц с поверхности слоя. Для котла мощностью 1 МВт с размером решетки 2×1,22 мм усредненная скорость потока газов по горизонтальному сечению для топлив различного вида (угля, отходов, древесины) будет составлять:

• воздуха – 0,13–0,15 м/с (при н.у.);

• продуктов горения – 0,15–0,21 м/с (при н.у.) и 1,1–1,2 м/с при температуре горения.

В [9] проведен анализ скорости витания горных материалов неправильной формы и установлено, что наиболее подходящим выражением для определения скорости витания является формула А.Е. Смолдырева, определен коэффициент сопротивления частиц ψ , который для пород, близких по характеристикам к твердому топливу, составил 0,72–1,2.

Диаметр частиц, при котором начинается унос при таких скоростях, составляет 45 мкм.

Несгоревшие частицы такого размера, находясь в потоке горячего газа, будут прогреваться и сгорать за время менее 0,1 с [10], поэтому выдвигаемое упрощение об отсутствии уноса не приведет к погрешности моделирования.

Таким образом, исходя из отсутствия уноса частиц, горение коксового остатка осуществляется в слое топлива и место окончания горения в топке определяется сгоранием летучих веществ.

При разработке моделей сделаны следующие предположения:

• слой топлива моделируется через его непрерывную подачу на границе области, ограничивающей твердое топливо;

• уравнение импульса твердой фазы не учитывается;

• тепловое равновесие между фазами отсутствует;

• для характеристики процесса сушки используется модель постоянной температуры;

• включено горение в газовой фазе;

• для описания пиролиза используется модель параллельной реакции с одним этапом;

• включены газификация и сжигание, которые являются гетерогенными реакциями углеродного остатка;

• скорость однородного горения рассчитывается по модели вихревой диссипации (EDM);

• транспортировка газов в твердой фазе не учитывается; продукты горения выделяются немедленно с той же температурой, которую имеет твердая фаза.

Границы трехмерной расчетной области были представлены следующими областями (рис. 1):

1. Air inlet – входное окно для воздуха. В качестве граничных условий задавался состав воздуха (0,23 массовых долей кислорода и 0,77 азота), массовый расход, температура.

2. Outlet – выходное окно для продуктов горения.

3. Fuel – область, ограничивающая твердое топливо, для которой задавались массовый расход топлива, температура и в окне Coal calculator состав топлива.

4. Wall Surface – стенки топки/котла, для которых задавались материал и толщина стенки, а также граничные условия третьего рода, в которых заданы коэффициент внешней конвективной теплоотдачи, непрозрачность для излучения, степень черноты поверхности $\varepsilon = 0.9$.

5. Symmetric – сечение, делящее объект на две симметричные части для упрощения расчетов.

В разработанную расчетную модель, кроме включенных по умолчанию уравнений законов сохранения массы и импульса, включены модели физических процессов, представленные в табл. 1. Топливо поступает в расчетную область, соответствующую газовой части, через поверхность Fuel (рис. 2), горение происходит на границе области при окислении топлива кислородом воздуха, проходящего между участками поверхности топлива.

Форма расчетной области топлива выбрана прямоугольная, так как круглая форма из-за особеностей построения сетки не обеспечивает сходимость решения.



Рис. 1. Граничные условия расчетной модели при моделировании топки: а – модель топки; б – модель топки с дополнительным газоходом для дожига вредных соединений

Таблица 1. Пара	аметры расчетных	моделей
-----------------	------------------	---------

Модели физических процессов	Параметр	Значение	
1. Модели теплообмена конвекцией и теплопроводностью (Energy)	-	-	
2. Модель турбулентности (Viscous)	Model	k-ε (модель турбулентности)	
	k-ε модель	Realizable	
	Near-War Treatment	Standard Wall Function	
3. Модель теплообмена излучением (Radiation)	Discrete Ordinates	Solar Load (off)	
4. Модель переноса компонентов	Reactions	Volumetric	
(Species Transport)	Chemistry Solver	None-Direct Source	
	Mixture Material	Coal-volatiles-air	
	Turbulence-Chemistry Interaction	EDD-Dissipation	
5. Модель образования оксидов азота (NOx)	Pathways	Thermal NOx Prompt NOx Fuel NOx	
	Fuel Streams	Vol	
6. Модель дискретной фазы (Discrete Phase)	-	_	



Рис. 2. Расчетная область с граничными условиями для поступления топлива

Определение параметров объекта е ходе промышленных испытаний. Для получения характеристик процесса сжигания, необходимых в процессе разработки и тестирования модели в целях обеспечения ее адекватности, использовались параметры работы промышленного котла КВМ-1,0 мощностью 1 МВт (рис. 3), эксплуатируемого на полигоне ТКО «Стрелецкий» (г. Белгород, ул. Зареченская, 85). Котел используется для отопления административного здания и двух производственных цехов, система отопления выполнена по закрытой зависимой схеме. Топливом в котельной является древесина.

Для проведения испытаний была изготовлена партия RDF-топлива из частично высушенных отходов ТКО, вывозимых на полигон. Характеристики топлива приняты расчетные по среднему составу отходов полигона ТКО, полученные путем отбора проб, разделения их на фракции и взвешивания. По морфологическому составу отходов был рассчитан элементарный состав (табл. 2).



Рис. 3. Твердотопливный котел КВМ-1,0: 1 – подача воздуха; 2 – подача топлива; 3 – колосниковая решетка; 4 – слой топлива; 5 – топка; 6 – окно между топкой и теплообменником (место замеров); 7 – выход продуктов горения в дымовую трубу Подготовка топлива велась на линии производства древесных пеллет в виде цилиндрическх брикетов диаметром 50 мм, длиной 250–400 мм. Сжигание проводилось в течение 4 дней (с 04.12.23 г. по 07.12.23 г.) для разных значений избытка воздуха, который задавался частотой вращения дутьевого вентилятора.

Морфологически отходов	ий состав	Элементарный состав		
Фракция	массовые %	элемент	массовые %	
Бумага	21,48	Cp	34,20	
Пищевые отходы	36,80	H ^p	4,61	
Текстиль	3,20	O ^p	21,90	
Древесина	6,82	N ^p	0,91	
Пластмасса	16,60	Sp	0,25	
Отсев	4,02	Ap	28,20	
Негорючая масса	11,08	Wp	10,00	
Всего	100	Всего	100	

Таблица 2. Состав сжигаемых отходов

Выполнялись следующие замеры.

1. Измерение температуры и состава уходящих газов (O₂, CO) после котла с использованием газоанализатора Testo 330-1 LL для контроля недожога, расчета коэффициента избытка воздуха и оценки стабильности режима (интервал 1–3 мин);

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

3. Измерение содержания выбросов (SO₂, NO_x, H₂S) с использованием газоанализатора MPU Vario Plus (интервал 5 мин при достижении стационарного режима);

4. Измерение температуры (пирометр Testo-845) и расхода (ультразвуковой расходомер Panametrics PT878) нагреваемой воды для определения теплопроизводительности котла и, как результат, КПД котла – расхода топлива.

КПД котельного агрегата определялся методом обратного баланса.

Также в ходе проведения испытаний аккредитованной лабораторией Росприроднадзора проводились измерения выбросов загрязняющих веществ, которые показали содержание выбросов в пределах ПДК для воздуха рабочих зон.

Проверка адекватности модели. Адекватность моделирования горения на этапе разработки модели проверялась аналитическими методами:

1) путем сравнения:

 усредненного состава газов в выходном окне (outlet) и состава продуктов горения из расчета горения топлива;

– усредненной температуры газового потока в выходном окне (outlet) и результатов расчета адиабатной температуры горения;

– усредненного содержания SO₂ и NO_x в выходном окне (outlet) и результатов расчета выбросов при сжигании твердого топлива и выбросов загрязняющих веществ в атмосферу от установок малой производительности по термической переработке отходов;

2) анализом распределения температур, содержания O₂, CO, летучих по длине линий тока (обозначаемых в Ansys Fluent как Streamline).

Для оценки адекватности модели и решения задачи по организации дожига вредных веществ после топки была разработана методика определения времени нахождения продуктов горения в расчетной области после окончания процессов горения, основанная на анализе импортированных из решения данных линий тока (streamline). Для каждой линии тока (их общее количество в разных решениях изменялось от 200 до 400) по координатам точек определялось расстояние между ними, по скорости – время прохождения. Время окончания горения определялось по снижению содержания летучих и СО ниже заданного предела. Программа, разработанная на языке программирования VBA для Excel, производит расчет среднего и минимального времени нахождения газов в расчетной области после окончания горения, расчет средних значений переменных в выходном сечении, графическую визуализацию выбранных линий тока.

Для предлагаемой модели путем оценки ее параметров по результатам данных испытаний определены: а) форма и размеры области Fuel, ограничивающей твердое топливо; б) тип и размер сетки для расчетной (газовой) области и ограничивающих поверхностей; в) параметры моделей физических процессов (см. табл. 1). Сопоставление средних значений измерений с результатами моделирования приведены в табл. 3.

В результате параметры модели обеспечили допустимое совпадение с результатами измерений на промышленном котле при разных режимах его работы, что позволяет считать разработанную модель адекватной.

Результаты моделирования процесса дожига вредных веществ. Для практически полного окисления находящихся в продуктах сгорания отходов органических вредных вешеств необходимо обеспечить высокие температуры. Согласно Директиве Европейского Парламента И Совета 2010/75/EC от 24.11.2010 г. о промышленных выбросах (о комплексном предотвращении загрязнения и контроле над ним), экологическим требованиям удовлетворяют установки, в которых продукты горения находятся не менее 2 с при температуре не менее 850 °С. Если сжигаются опасные отходы с содержанием галогенных органических соединений более 1 % (при пересчете на хлорин), температура должна быть минимум 1100 °С.

Предлагается производить дожиг вредных веществ в дополнительном газоходе, расположенном между топкой и конвективной частью (газоводяным теплообменником).

Изменение влажности топлива. В результате моделирования установлено, что оптимальный диапазон влагосодержания топлива для устойчивого распространения и стабильности пламени составляет 10 % [11]. В [12] установлено, что в диапазоне влажности 8–30 % максимальная температура в слое и над ним, а также условия горения и образование вредных веществ существенно не изменяются. Для выявления особенностей изменения режима горения и влияния варьирования влажности топлива на характер горения было проведено моделирование процесса горения при увеличении его влажности до 30 и 50 % (рис. 4, 5).

Параметр	Коэффициент избытка воздуха $lpha$					
	1,4		1,6		2,0	
	данные измерений	результаты модели- рования	данные измерений	результаты модели- рования	данные измерений	результаты модели- рования
Температура, °С	1392	1457	1212	1267	1010	994
О2, об. %	6,0	5,2	7,9	8,4	10,5	11,8
NOx, ppm	42,7	57,4	167	132,8	149	151,2
SO ₂ , ppm	172	225,3	141	111,4	96	78,6
CO, ppm	736	540	605	505	-	45
H₂S, ppm	1,3	1,25	1,3	0,99	1,1	0,87

Таблица 3. Параметры газового потока на выходе из топки



Рис. 4. Результаты моделирования процесса горения топлива с разной влажностью W (α = 1,4)



Рис. 5. Результаты расчета времени прохождения потока в расчетной области для топлива с разной влажностью W (при $\alpha = 1,35$)

Анализ полученных результатов показывает, что поля скоростей для трех вариантов похожи, но при увеличении влажности снижается температура газов и, соответственно, их скорость.

Изменение коэффициента избытка воздуха. В [11] установлено, что оптимальный коэффициент избытка воздуха при сжигании отходов в неподвижном слое равен 1,4, что подтверждает и ряд других исследований [13]. Но так как при работе печей из-за нестабильности состава отходов возможно изменение условий горения, предпочтительнее избыток воздуха поддерживать с запасом. Для определения возможной величины избытка воздуха проведено моделирование процесса горения топлива при трех значениях расхода воздуха (рис. 6, 7).





 $\alpha = 1,4$ $\alpha = 1,6$ $\alpha = 2,2$ Линия тока № 79 t(all)=5,77 с.; t(CO)=1,88 с.; t(vol)=1,92 с a No 77 чния тока № t(all)=6,18 с. t(all)=6.45 c. t(CO)=2.11 c.; t(vol)=2.21 c t(CO)=2 c.; t(vol)=2.01 c 5.0 5.0 5.0 4,5 4,5 4,5 4,0 4,0 4,0 3,5 3,5 3,5 ٨, M ٨, M γ, Μ 3,0 3,0 3,0 2,5 2,5 2,5 2,0 2,0 2,0 1,5 1,5 1,5 1.0 1.0 1.0 0,5 0,5 0,5 0,0 0,0 0,0 2,0 1,5 1,0 0,5 0,0 2,0 1,5 1,0 0,5 2,0 1,5 1,0 0,5 0,0 0.0 х, м



При увеличении коэффициента избытка воздуха температура газов снижается.

Основные результаты. В табл. 4 приведено сравнение результатов расчета для каждого диапазона влажности и избытка воздуха. Результаты моделирования показывают, что расчетные параметры температуры продуктов горения на выходе из расчетной зоны ниже расчетной температуры горения значений на

таолица 4. Основные результа	аты расч	ета
------------------------------	----------	-----

величину около 200 °С, что связано с потерями теплоты в окружающую среду через стенки топки (что составляет 10 % от поступившей теплоты и согласуется со справочными данными для малых котлов).

При увеличении влажности до 30 % и коэффициента избытка воздуха до 1,6 время прохождения продуктов горения после окончания горения составляет 2 секунды и более (табл. 5).

Коэффициент избытка	Влажность топлива, %	Температура, °С					
воздуха		максимальная	средняя	расчетная			
		в топке	в выходном окне	(по балансу горения топлива)			
	10	1798	1445	1668			
1,4	30	1562	1242	1491			
	50	1258	969	1206			
1,4		1798	1445	1668			
1,6	10	1796	1244	1483			
2,2		1745	986	1190			

Таблица 5. Сравнение вариантов расчета

Коэффициент	Влаж-	Время прохождения потока t, с						
избытка воздуха	ность,	общее (от входного сече- ния до выходного)		время прохождения после окончания горения				
	%			оценка по CO ≤ CO _{min}		оценка по содержанию летучих веществ <i>VoI ≤ VoI</i> _{min}		
		<i>t</i> _{cp}	<i>t</i> min	<i>t</i> _{cp}	<i>t</i> min	<i>t</i> _{cp}	t min	
	10	5,76	3,79	3,06	2,11	3,13	2,11	
1,4	30	5,85	4,01	3,48	2,19	3,60	2,10	
	50	7,17	4,15	4,83	1,70	4,86	1,89	
1,4		5,76	3,79	3,06	2,11	3,13	2,11	
1,6	10	5,20	3,28	2,94	2,00	3,09	2,01	
2,2		4,22	2,82	2,84	1,88	2,85	1,92	

Но при дальнейшем увеличении параметров данное условие не соблюдается. При увеличении влажности до 50 % из-за низкой температуры горения даже при увеличении времени нахождения газов в расчетном объеме горение заканчивается позднее.

При увеличении коэффициента избытка воздуха наряду с уменьшением температуры газов увеличивается их объем и скорость, что приводит к уменьшению времени нахождения газов в расчетном объеме.

Таким образом, чтобы обеспечить полное сгорание топлива и последующее нахождение продуктов горения при температурах более 850 °C более 2 с, необходимо соблюдать режим горения при оптимальном коэффициенте избытка воздуха (1,4–1,6) без превышения это-го значения. При этом недопустимо подавать на сжигание материал влажностью более 30 %.

Выводы. Полученные результаты обеспечивают достижение цели исследования – разработка CFD-модели, предназначенной для моделирования горения в топках и печах малой мощности с колосниковой решеткой. С использованием полученной модели произведен анализ процесса дожига вредных веществ в дополнительном газоходе.

Научная новизна исследования заключается в новом подходе к моделированию горения в слое, позволяющему получать результаты с требуемой точностью и приемлемыми временными затратами. Практическая значимость полученных результатов заключается в установлении переделов влажности и коэффициента избытка воздуха при сжигании ТКО, обеспечивающих дожиг вредных веществ в дополнительном газоходе.

Результаты работы могут быть использованы при проектировании установок для сжигания твердого топлива и отходов в целях поиска конструктивных решений для минимизации выбросов вредных веществ. Направления дальнейших исследований связаны с моделированием движения газов в конвективном трубном пучке, поиском методов снижения выбросов путем организации рецикуляции продуктов сгорания.

Список литературы

1. **Review** on modelling approaches based on computational fluid dynamics for biomass combustion systems / A. Dernbecher, D.A. Alonso, A. Ortwein, F. Tabet // Biomass Conversion and Biorefinery. – 2019. – Vol. 9(1). – P. 129–182. DOI: 10.1007/s13399-019-00370-z.

2. **Chaney J., Liu H., Li J.** An overview of CFD modelling of small-scale fixed-bed biomass pellet boilers with preliminary results from a simplified approach // Energy Conversion and Management. – 2012. – Vol. 63. – P. 149–156. DOI: 10.1016/j.enconman.2012.01.036.

3. Сжигание rdf-топлива с использованием кислородного дутья / В.М. Коновалов, А.А. Гончаров, А.С. Федоров и др. // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2022. – № 10. – С. 79–86. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-10-79-86.

4. **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(113919). – P. 124451. DOI: 10.1016/j.fuel.2022.124451.

5. Judt W. Numerical and Experimental Analysis of Heat Transfer for Solid Fuels Combustion in Fixed Bed Conditions // Energies. – 2020. – Vol. 13(22). – P. 6141. DOI: 10.3390/en13226141.

6. Junejo A., Al-Abdeli Y.M., Porteiro J. Role of Air Staging in a Batch-Type Fixed Bed Biomass Combustor under Constant Primary Air // Journal of Thermal Science. – 2023. – Vol. 33(1). – P. 284–299. DOI: 10.1007/s11630-023-1869-9.

7. **Performance** and boiler efficiency using lowgrade 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 Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. – 2021. – Vol. 882. – P. 12033. DOI: 10.1088/1755-1315/882/1/012033.

8. **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. – P. 15373–15393. DOI: 10.1007/s13399-023-03767-z.

9. Часе С.И. Определение скорости витания мелкозернистых материалов методом взвешенного состояния // Известия УГГУ. – 1997. – № 6. – С. 157–164.

10. Белоусов В.Н., Смородин С.Н., Цимбал В.Д. Топливо и процессы горения в теплоэнергетических установках. – СПб.: СПбГУПТД, 2020. – Ч. 3. – 154 с.

11. Ahmed A.A., Trubaev P.A., Ramazanov R.S. CFD Modelling and Optimization of Solid Waste Combustion in a1 MW Fixed Bed Combustion Chamber // Journal of Advanced Research in Numerical Heat Transfer. – 2024. – Vol. 23(1). – P. 66–87. DOI: 10.37934/arnht.23.1.6687. 12. **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. 120687. DOI: 10.1016/j.fuel.2021.120687

13. **CFD Steady** Model Applied to a Biomass Boiler Operating in Air Enrichment Conditions / M.Á. Gómez, R. Martín, J. Collazo, J. Porteiro // Energies. – 2018. – Vol. 11(10). – P. 2513. DOI: 10.3390/en11102513.

References

1. Dembecher, A., Alonso, D.A., Ortwein, A., Tabet, F. Biomass Conversion and Biorefinery, 2019, vol. 9(1), pp. 129–182. DOI: 10.1007/s13399-019-00370-z.

2. Chaney, J., Liu, H., Li, J. *Energy Conversion and Management*, 2012, vol. 63, pp. 149–156. DOI: 10.1016/j.enconman.2012.01.036.

3. Konovalov, V.M., Goncharov, A.A., Fedorov, A.S., Moshkov, I.P., Gostev, N.S. *Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta im. V.G. Shukhova*, 2022, no. 10, pp. 79–86. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-10-79-86.

4. Zadravec, T., Rajh, B., Kokalj, F., Samec, N. *Fuel*, 2022, vol. 324(113919), p. 124451. DOI: 10.1016/j.fuel.2022.124451.

5. Judt, W. *Energies*, 2020, vol. 13(22), p. 6141. DOI: 10.3390/en13226141.

6. Junejo, A., Al-Abdeli, Y.M., Porteiro, J. *Journal of Thermal Science*, 2023, vol. 33(1), pp. 284–299. DOI: 10.1007/s11630-023-1869-9.

7. Supriyanto, E., Cahyo, N., Sitanggang, R., Triani, M., Bakti, D. Performance and boiler efficiency using low-grade coal on 400 MWe coal-fired power plant: case study of Suralaya Power Plant Unit 2. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2021, vol. 882, p. 12033. DOI: 10.1088/1755-1315/882/1/012033.

8. El-Sayed, S.A., Mostafa, M.E., Khass, T.M., Noseir, E.H., Ismail, M.A. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 2024, vol. 14, pp. 15373–15393. DOI: 10.1007/s13399-023-03767-z.

9. Chase, S.I. *Izvestiya UGGU*, 1997, no. 6, pp. 157–164.

10. Belousov, V.N., Smorodin, S.N., Tsimbal, V.D. Toplivo i protsessy goreniya v teploenergeticheskikh ustanovkakh. Ch. 3 [Fuel and combustion processes in thermal power plants. Part 3]. Saint-Petersburg: SPbGUPTD, 2020. 154 p.

11. Ahmed, A.A., Trubaev, P.A., Ramazanov R.S. *Journal of Advanced Research in Numerical Heat Transfer*, 2024, vol. 23(1), pp. 66–87. DOI: 10.37934/armht.23.1.6687.

12. Anca-Couce, A., Archan, G., Buchmayr, M., Essl, M., Hochenauer, C., Scharler, R. *Fuel*, 2021, vol. 296, p. 120687. DOI: 10.1016/j.fuel.2021.120687

13. Gómez, M.Á., Martín, R., Collazo, J., Porteiro, J. *Energies*, 2018, vol. 11(10), p. 2513. DOI: 10.3390/en11102513.