

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ГОРЕНИЯ ТВЕРДЫХ КОММУНАЛЬНЫХ ОТХОДОВ В ТОПКЕ КОТЛА МОЩНОСТЬЮ 1 МВт С КОЛОСНИКОВОЙ РЕШЕТКОЙ

Ахмед А.А.А.^{1,2}, Трубаев П.А.²

¹ Тикритский университет, г. Тикрит (Республика Ирак)

² БГТУ им. В.Г. Шухова, г. Белгород

Аннотация.

В работе проведена оценка эффективности горения и обеспечения полного сгорания горючих веществ в газовой фазе и снижение объема вредных выбросов при сжигании неоднородного твердого топлива в топках печей и котлов малой мощности за счет организации рациональной структуры газового потока в топке и дожига несгоревших соединений и загрязняющих веществ после нее. Предложены критерии оценки эффективности горения топлива в топках котлов: доля несгоревших горючих веществ топлива; коэффициент полезного действия (КПД) топки; обобщенный критерий выбросов, отнесенные к единице выделенной при сгорании теплоты; минимальное время нахождения продуктов горения в расчетной области после завершения горения. Приведены результаты экспериментальных и численных исследований горения высушенных до влажности 10% твердых коммунальных отходов в промышленном котле КВМ-1,0 мощностью 1 МВт. Сделан вывод, что полное сгорание топлива и дожиг загрязняющих веществ возможен только при вертикальном потоке газа, позволяющем избегать резкого изменения направления движения газового потока. Результаты работы позволяют оценить необходимые размеры топки и дополнительного газохода, обеспечивающие условия полного сгорания топлива и дожига вредных веществ.

Ключевые слова: эффективность горения, горение, ТКО, топка, котел малой мощности, промышленные испытания, численная модель

EVALUATION OF THE EFFICIENCY OF SOLID MUNICIPAL WASTE COMBUSTION IN A 1 MW BOILER FURNACE WITH A GRATE

Ashraf Ahmed^{1,2}, Pavel Trubaev²

¹ Tikrit University, Republic of Iraq

² Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Belgorod

Abstract

The paper evaluates the combustion efficiency and ensures complete combustion of combustible substances in the gas phase and reduces harmful emissions when burning heterogeneous solid fuel in furnaces and low-power boilers by organizing a rational gas flow structure in the furnace and afterburning unburned compounds and pollutants. Criteria for evaluating the combustion efficiency of fuel in boiler furnaces are proposed: the proportion of unburned combustible fuel substances; the efficiency coefficient (EC) of the furnace; a generalized criterion for emissions relative to the unit of heat released during combustion; minimum time of combustion products in the calculation area after combustion is complete. The results of experimental and numerical studies of the combustion of solid municipal waste dried to 10% moisture content in a 1 MW KVM-1.0 industrial boiler are presented. It is concluded that complete combustion of fuel and afterburning of pollutants is possible only with a vertical gas flow, which allows avoiding a sharp change in the direction of the gas flow. The results of the work allow estimating the necessary dimensions of the furnace and additional gas duct, ensuring conditions for complete combustion of fuel and afterburning of harmful substances.

Keywords: combustion efficiency, combustion, MSW, furnace, low-power boiler, industrial testing, numerical model



1. Введение

Проблема твердых коммунальных отходов имеется во всех странах [1]. Единой универсальной технологии утилизации отходов не существует. Даже после отбора и переработки полезной части (вторсырья) остаётся около трети органических отходов [2]. Размещение их на полигонах захоронения не экологично, переработка в биоустановках дорога и неэффективна. Мировой тенденцией переработки органических отходов является технология «Waste-to-Energy», то есть термическая утилизация с выработкой энергии [3]. Получение энергии из ТКО в основном осуществляется за счёт сжигания с применением котельных установок, оснащённых колосниковыми решётками различного типа [2], которые позволяют эффективно сжигать разнообразные виды топлив с различным уровнем влажности и требуют его минимальной подготовки [4], но на эффективность сжигания существенно влияют условия эксплуатации и горения [5, 6].

В настоящее время в России и мире термическая утилизация отходов осуществляется в крупных установках производительностью по утилизируемым отходам мощностью 20-500 т/ч или 175-4400 тыс. т/год [7, 8]. В работе рассматривается альтернативный подход – сжигание ТКО в установках малой мощности в пределах полигонов ТКО небольших городов для обеспечения местного энергоснабжения. Процесс горения твердого топлива в небольших котлах плохо формализован и поэтому трудно прогнозируем, особенно в условиях неоднородности топлива.

Рассматриваемая установка мощностью по сжигаемым отходам 1 МВт (0,37 т/ч или 3,2 тыс. т/год) с колосниковой решеткой для сжигания твердых бытовых отходов является важной для Ирака с экологической, экономической и политической точек зрения. В крупных городах, таких как Багдад и Басра, ежедневно производит более 30 000 тонн отходов, в меньших городах их количество не учитывается. Эти отходы бессистемно сжигаются или вывозятся на открытые свалки, поскольку в Ираке в настоящее время нет мусоросжигательных и мусороперерабатывающих заводов. Это приводит к высокой заболеваемости раком легких жителей старны и другими заболеваниями, а также к загрязнению воздуха, почвы и грунтовых вод [9]. Еще одной причиной для разработки такого проекта является производство электроэнергии, поскольку Ирак страдает от постоянной нехватки электроэнергии, что приводит к ежедневным отключениям электроэнергии. Учитывая текущий высокий уровень безработицы в стране, крайне важно создать рабочие места в технической и инженерной сфере (инженеры, техники, операторы), сократить выбросы, укрепить местную экономику и национальную промышленность, а также уменьшить количество отходов в городских и сельских районах для улучшения состояния окружающей среды. Это также способствует развитию местной экономики за счет производства и эксплуатации небольших тепловых электростанций, которые снижают нагрузку на национальную электросеть.

Проблема небольших мусоросжигательных установок является актуальной и для России, в которой по состоянию на находятся 1119 городов и 1173 поселков городского типа, в которых проживает 75% населения страны [10]. По данным ФГИС УТКО (utko.mnr.gov.ru) в стране функционируют 862 объекта захоронения (полигона ТКО). Таким образом полигоны ТКО имеется у большинства городов. При этом треть источников – с объемом образования менее 200 тыс. т/год (рис. 1).



Рис. 1. Структура отходов РФ по объёму генерации



С практической точки зрения, в отличие от крупных мусоросжигательных заводов, сжигание отходов в установках малой мощности, расположенные в пределах полигонов ТКО, имеет следующие особенности:

а) функционирование на полигонах ТКО, уже являющихся участками с неблагоприятной экологической обстановкой с выделенной санитарно-защитной зоной, в пределах которой будут распространяться выбросы;

б) небольшая производительность позволяет осуществить качественную сортировку с отбором фракций, содержащих тяжелые металлы (вся проблема выбросов тяжелых металлов в МСЗ заключается только в их наличии в сжигаемых отходах, то есть в некачественной сортировке).

Принималось, что для практически полного разрушения находящихся в продуктах сгорания отходов органических загрязняющих веществ согласно Директиве Европейского Парламента и Совета 2010/75/ЕС от 24.11.2010 о промышленных выбросах (о комплексном предотвращении загрязнения и контроле над ним) необходимо обеспечить нахождение продуктов сгорания не менее 2 с при температуре не менее 850°C (1100°C для опасных отходов с галогенными органическими соединениями).

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

С этой целью проведено экспериментальное и численное исследование горения высушенных твердых коммунальных отходов в промышленном котле КВМ-1,0 мощностью 1 МВт, который эксплуатируется на полигоне ТКО «Стрелецкое» (г. Белгород)

2. 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.

2.1. Доля несгоревших горючих веществ топлива F_{uf}

Критерий F_{uf} , %, представляет собой часть топлива, эквивалентное теплоте сгорания горючих соединений в продуктах горения.

При испытаниях она определяется по величине потерь q_3 :

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

где $Q_{нед}$ – 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 численной модели Ansys Fluent доля несгоревших горючих веществ определяется следующим образом:

$$F_{uf} = (15,8 d_{CO} + q_{vol} d_{vol}) \cdot g_{пр} / (Q_n^p g_{т}), \quad (2)$$

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_n^p – низшая теплота сгорания топлива, МДж/кг; $g_{пр}$ – массовый расход газов, кг/с; $g_{т}$ – расход топлива, кг/с.



2.2. Коэффициент полезного действия (КПД) топки η_T

Критерий η_T , %, 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 учётом потерь q_3 от неполноты сгорания топлива:

$$\eta_T = \frac{100\% Q_T}{Q_H^p g_T (1-0,01q_3) + Q_B} - q_3, \quad (3)$$

где Q_T – теплота газового потока после топки, МДж; g_T – расход топлива, кг/с, определяется при испытаниях по данным измерений и расчета теплового баланса, методика и результаты приведены в прил. 3; Q_B – теплота воздуха, поступающего на горение, МВт; q_3 – потери с недожогом, %.

Теплота газового потока после топки:

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

где $t_{пг}$ – температура газов после топки (результаты измерения высокотемпературной термопарой), °С; $c_{пг}$ – средняя массовая удельная теплоемкость газов на интервале температур $0 \dots t_{пг}$, кДж/(кг·К).

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

$$Q_B = 0,001 c_B g_B t_B, \quad (5)$$

где t_B – температура воздуха (температура окружающей среды), °С; c_B – средняя массовая удельная теплоемкость воздуха на интервале температуре $0 \dots t_B$, кДж/(кг·К); g_B – массовый расход воздуха, кг/с.

Определение массового расхода воздуха и продуктов горения предлагается производить по расчету горения топлива (при коэффициенте избытка воздуха, определенном при испытаниях по данным газового анализа) и значению расхода топлива g_T , полученного при испытаниях. Массовая теплоемкость продуктов горения определяется по их составу, определенному расчетом горения топлива (при коэффициенте избытка воздуха, определенном при испытаниях по данным газового анализа).

Потери от неполноты сгорания топлива определяются по величине продуктов недожога [11] с использованием упрощенной методики теплотехнических расчетов М.Б. Равича [12]. При испытаниях из продуктов недожога фиксировалось только содержание оксида углерода, поэтому q_3 имеет вид

$$q_3 = 12\,640 \text{ CO} \frac{h}{p}, \% \quad (6)$$

Таким образом КПД топки при испытаниях имеет вид:

$$\eta_T = 0,1 \frac{c_{пг} g_{пг} t_{пг}}{Q_H^p g_T (1-0,01 F_{uf}) + c_B g_B t_B} - F_{uf}, \% \quad (7)$$

В Ansys Fluent КПД топки определяется по исходным данным (задаваемым массовому расходу топлива g_T) и результатам моделирования – среднему массовому расходу газов в выходном окне $g_{пг}$, средней массовой доли соединений в выходном окне, средней температуре в выходном окне топки $t_{пг}$:

$$\eta_T = \frac{0,1 \cdot c_{пг} \cdot t_{пг} \cdot g_{пг}}{Q_H^p (1 - 0,01 F_{uf}) g_T} \cdot 100\% - F_{uf}, \quad (8)$$

где 15,8 – теплота сгорания CO, МДж/кг; q_{vol} – теплота сгорания летучих, МДж/кг, для RDF топлива, торфа, бурого угля принимается по ГОСТ 55128 «Топливо твердое из бы-



товых отходов. Определение поведения при горении», для древесины, каменного угля и антрацита – по справочным данным.

По сути КПД топки η_T включает потери в окружающую среду q_5 и потери с несгоревшим топливом q_5 :

$$\eta_T = q_3 + q_5. \tag{9}$$

2.3. Обобщенный критерий выбросов E (e)

Критерий применяется для оценки совокупности выбросов (массы выбросов, приведенной к нормируемому значению). Оцениваемые выбросы приведены в табл. 1

Таблица 1

Вредные выбросы при сжигании твердого топлива

Наименование		Измерение на объекте	Моделирование в Ansys Fluent	Расчет по методикам	
				[13]	[14]
Оцениваемые в работе	CO	+	+	+	+
	NO _x	+	+	+	+
	H ₂ S	+	+	-	-
	SO ₂	+	+	+	+
	Бензопирен	+	-	+	-
	HCl	+	-	-	+
	HF (фтороводород)	+	-	-	+
	Несгоревший остаток	-	+	+	-
Не учитываемые	Тяжелые металлы	Не учитывались, т.к. их выбросы определяются массовым содержанием в сырье, но не режимом горения. Моделирование выбросов тяжелых металлов в источниках заключается в расчете их транспортники из топлива в газовой среде			
	Диоксины, фураны	Не учитывались, т.к. задачей работы было обеспечить дожиг вредных веществ за счет нахождения газов не менее 2 сек. при температуре не менее 850°C (1100°C для хлорсодержащих отходов)			
	Формальдегиды	Не учитывались, так как они образуются при неполном сгорании, задачей работы было обеспечить полное сгорание топлива.			

Критерий E , г/с, включает сумму выбросов g_i , величина которых умножалась на коэффициент нормирования k_i :

$$E = \sum k_i g_i = \sum \frac{ПДК_{NO_x}}{ПДК_i} g_i, \tag{10}$$

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

Коэффициент k_i определялся по величине предельно-допустимой концентрации (ПДК) в атмосферном воздухе городских и сельских поселений, которые задавались согласно СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания» табл. 2. 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, ПДК_{NO_x}^{М.Р} = 0,2 мг/м³; ПДК_{SO₂}^{М.Р} = 0,5 мг/м³; $k_{NO_x} = 0,2/0,5 = 0,4$.



Таблица 2

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:

$$E = 0,4g_{SO_2} + g_{NO_x} + 0,04g_{CO} + 25g_{H_2S}, \text{ г/с} \tag{11}$$

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:

$$e = \frac{E}{g_T \cdot Q_H^p}, \text{ г/МВт.} \tag{12}$$

Это позволит оценивать разные котлы и сжигание различных топлив.

2.4. Время нахождения продуктов горения в расчетной области после завершения горения

Для решения задач оценки дожига была разработана методика определения времени нахождения продуктов горения в расчетной области после завершения горения, описанная в работе [15]. Одним из результатов решения в ANSYS Fluent являются линии тока (StreamLine), которые показывают путь прохождения газов (рис. 2). Методика заключается в импорте данных линий тока из Ansys Fluent и анализе их данных. Время прохождения определялось по расстоянию между точками, окончание горения – по значению концентрации летучих и СО, которые должны быть ниже заданного предела, и началу уменьшения температуры.

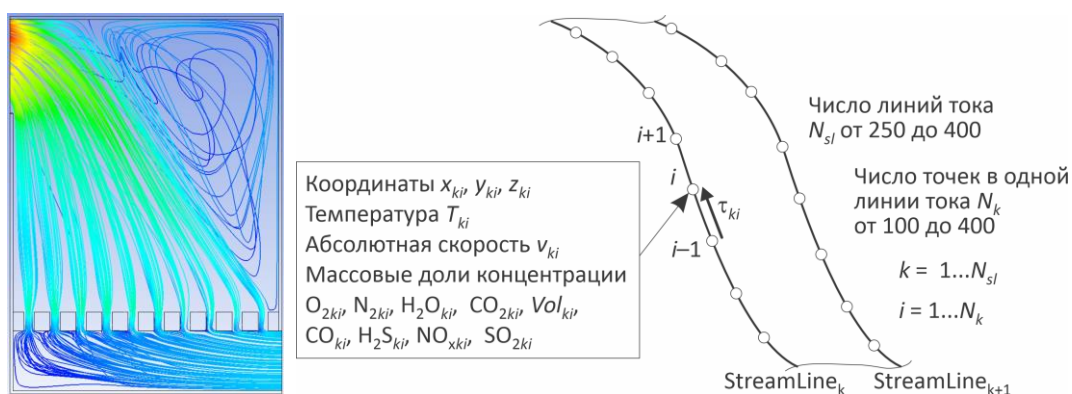


Рис. 2. Графическое изображение линий тока (StreamLines) и представление результатов расчета – значений переменных в узлах сетки



Результатами анализа является среднее по всем линиям тока и минимальное нахождения продуктов горения в расчетной области после завершения горения. Результаты так же представлялись в графическом виде с изображением выбранной линии тока в расчетной области и изменения параметров по длине (рис. 3).

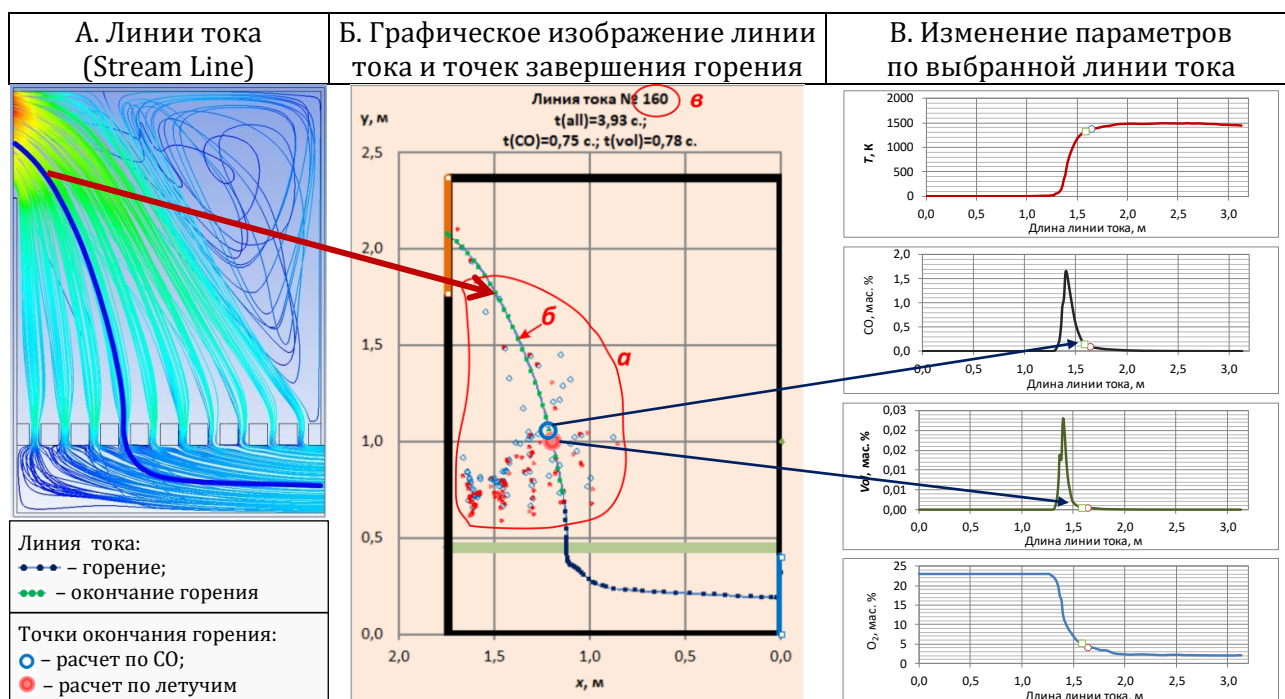


Рис. 3. Связь между линиями тока и графическими изображениями результатов расчета:

а – область, показывающее окончание горения; б – выбранная линия тока с номером в

Расчет по всем линиям позволяет оценить границы области горения, и оценить температуру продуктов горения и их время нахождения в расчетной области после завершения горения.

3. Проведение промышленных испытаний сжигания RDF-топлива в твердотопливном котле

Для получения характеристик процесса сжигания, необходимых в процессе разработки и тестирования численной модели с целью обеспечения ее адекватности, использовались параметры работы промышленного котла КВМ-1,0 мощностью 1 МВт (рис. 4), эксплуатируемого на полигоне ТКО «Стрелецкое» (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. 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». Морфологический состав (табл. 3) определялся путем систематического отбора проб отходов, вывозимых на полигон ТКО «Стрелецкое», разделения их на фракции и взвешивания. Элементарный состав (табл. 4) рассчитан по среднему составу компонентов ТКО, приведенному в работе [16].



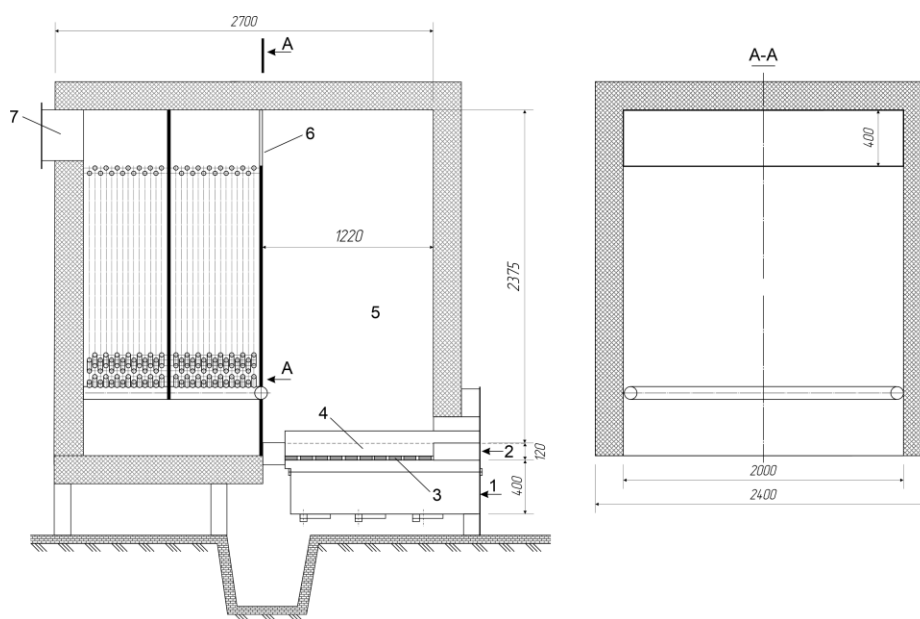


Рис. 4. Твердотопливный котел КВМ-1,0:

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

Таблица 3

Морфологический состав ТКО

Наименование фракции	Содержанием, мас. %
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 4

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. 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 ± 0,6% и принята 10%.

Сжигание проводилось в течение 8-х дней с 04.12.23 г. по 14.12.23 г. для разных значений избытка воздуха, который определялся по содержанию CO и O₂ в отходящих газах (табл. 5) и корректировался частотой вращения дутьевого вентилятора.

Таблица 5

Параметры для контроля коэффициента избытка воздуха

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

Выполнялись следующие замеры (рис. 5).

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 и 350 мм (интервал 5...10 мин при достижении стационарного режима);

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

4. Измерение температуры (встроенные термопреобразователи сопротивления) и расхода (ультразвуковой расходомер Panametrics PT878) нагреваемой воды для определения теплопроизводительности котла и по ней и КПД котла – расхода топлива (КПД котельного агрегата определялся методом обратного баланса).

Измерительный прибор	Измеряемые параметры	Точка измерений
Газоанализатор Testo 330-1 LL	O ₂ , %	1
	CO, ppm	
	t, °C	
Газоанализатор MPU Vario Plus Industrial	CO, ppm	1
	NO _x , ppm	
	SO ₂ , ppm	
	H ₂ S, ppm	
Дифференциальный манометр Testo 512/2 и трубки Пито Testo 1000 и 350 мм	p, Па (расчет скорости)	1
Инфракрасный термометр (пирометр) Testo 845 с подключаемым контактным термопреобразователем	t, °C (ИК)	5
	t, °C (термопара NiCr-Ni)	
Ультразвуковой расходомер Panametrics PT878	v, м/с	3, 4
Датчик температуры «ОЛИЛ» TTSC-22, вмонтирован в газоход котла	t, °C (термопара ТПП)	2
Термопреобразователи сопротивления ОВЕН ДТС305М, вмонтированы в трубы теплоносителя	t, °C	3, 4

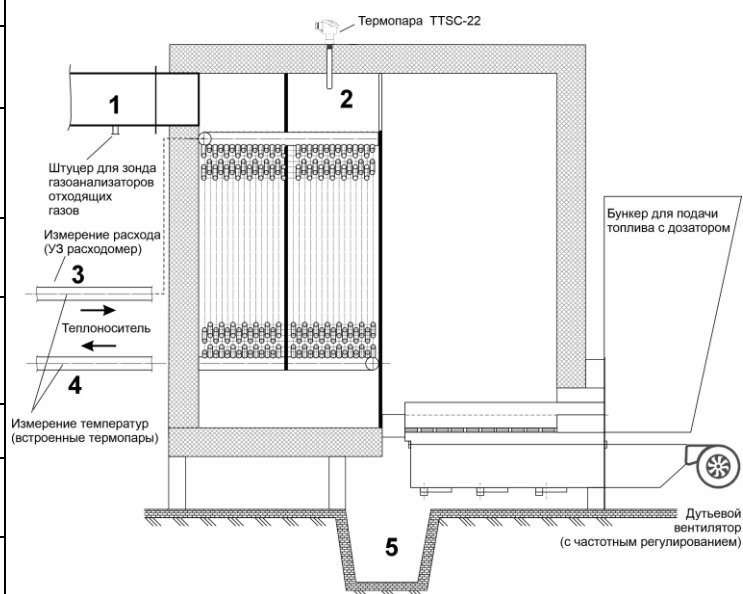


Рис. 5. Схемы проведения замеров



Обработка результатов проводилась по методике ГОСТ Р 8.736-2011 и включала:

- расчет среднего и СКО;
- проверка наличие грубых погрешностей;
- проверка гипотезы о принадлежности нормальному распределению;
- расчет доверительных границ.

Полученные средние значения измеряемых параметров приведены в табл. 6.

Таблица 6

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*
H ₂ S, ppm	$13,0 \pm 5,1$	$12,9 \pm 5,0$	$10,9 \pm 5,0$

* Среднее значение меньше погрешности измерений

В табл. 7 приведены данные об эффективности работы котла, полученные в ходе испытаний.

Таблица 7

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

Как видно из результатов испытаний, полнота сгорания топлива обеспечивается только при высоком коэффициенте избытка воздуха, но при этом низкая температура газов после топки, что может не обеспечить дожиг вредных веществ.

4. Исследование эффективности горения в топках котлов численными методами

4.1. Расчетная модель горения твердого топлива в неподвижном слое в топках печей и котлов малой мощности

Слоя топлива по объему значительно меньше газовой фазы, поэтому для обеспечения приемлемых временных и вычислительных затрат расчетная область содержит только газовую часть, а слой топлива представлен в виде границы, через которую в газовую часть поступают летучие вещества и влага.

Слоя топлива по объему значительно меньше газовой фазы, поэтому для обеспечения приемлемых временных и вычислительных затрат расчетная область содержит



только газовую часть, а слой топлива представлен в виде границы, через которую в газовую часть поступают летучие вещества и влага. Границы были представлены следующими областями (рис. 6): 1) Air inlet – входное окно для воздуха; 2) Outlet – выходное окно для продуктов горения; 3) Fuel – область, ограничивающее твердое топливо; 4) Wall Surface – стенки топки/котла с граничными условиями третьего рода; 5) Symmetric – сечение, делящее объект на две симметричные части для снижения объема расчетов [17].

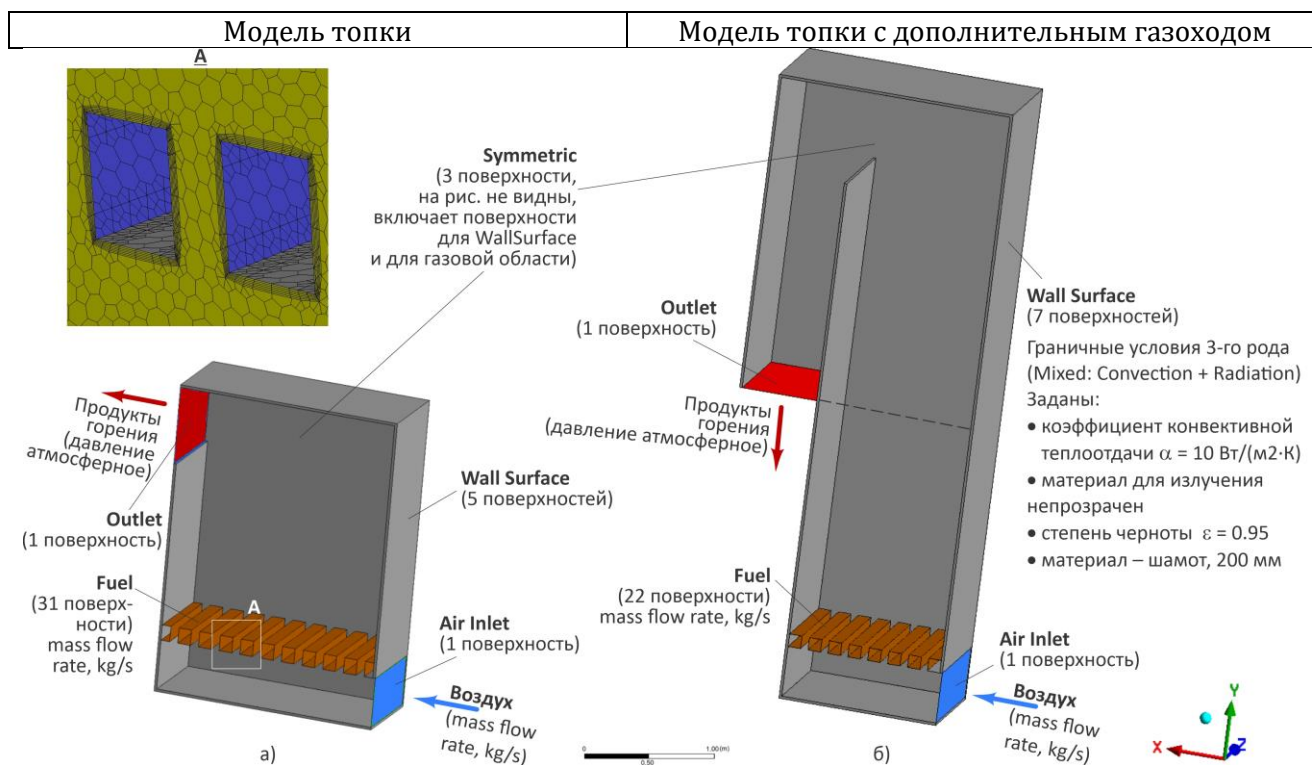


Рис. 6. Граничные условия расчетной модели при моделировании топки:
 а) модель топки; б) модель топки с дополнительным газоходом для дожига загрязняющих веществ

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

В качестве топлива при моделировании использовалось RDF топливо с влажностью 10% (табл. 4).

4.2. Исследование эффективности горения в топке

Первоначально оценивалось влияние различных ключевых параметров на эффективность горения:



- а) коэффициента избытка воздуха α , от 1,2 до 3 (табл. 8);
- б) геометрии топки – высоты топки, расположения и размера выходного окна (рис. 7, табл. 9);
- в) температуры воздуха $t_{air} = 0, 200$ и 400°C , подаваемого на горение (табл. 10).

Таблица 8

Показатели эффективности горения и величины выбросов при изменении α

Коэффициент избытка воздуха α	Температура после топки	КПД топки $\eta_{т, \%}$	Доля несгоревших горючих веществ топлива $F_{uf, \%}$	$e, \text{ г/МВт}$
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

* Менее 850°C

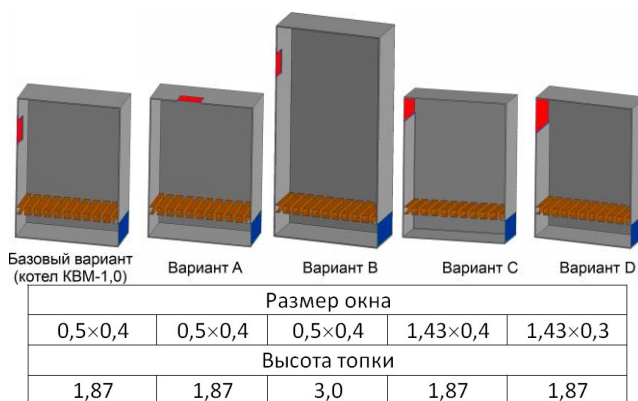


Рис. 7. Схемы геометрии топки котла

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

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

Таким образом, имеется противоречие – одновременно достичь низких значений выбросов и полного сгорания топлива, изменяя коэффициент избытка воздуха, невозможно. Поэтому предлагается сжигать отходы с минимально возможным количеством воздуха и обеспечить дожиг несгоревшего топлива и загрязняющих веществ после топки.

Таблица 9

Показатели эффективности горения и величины выбросов для разной геометрии топки

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

Таблица 10

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

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



4.3. Исследование расположения дополнительного газохода для дожига топлива и вредных веществ

Предлагается производить дожиг загрязняющих веществ в газоходе, расположенном между топкой и конвективной частью котла. Рассматриваемые схемы организации горения представлены на рис. 8.

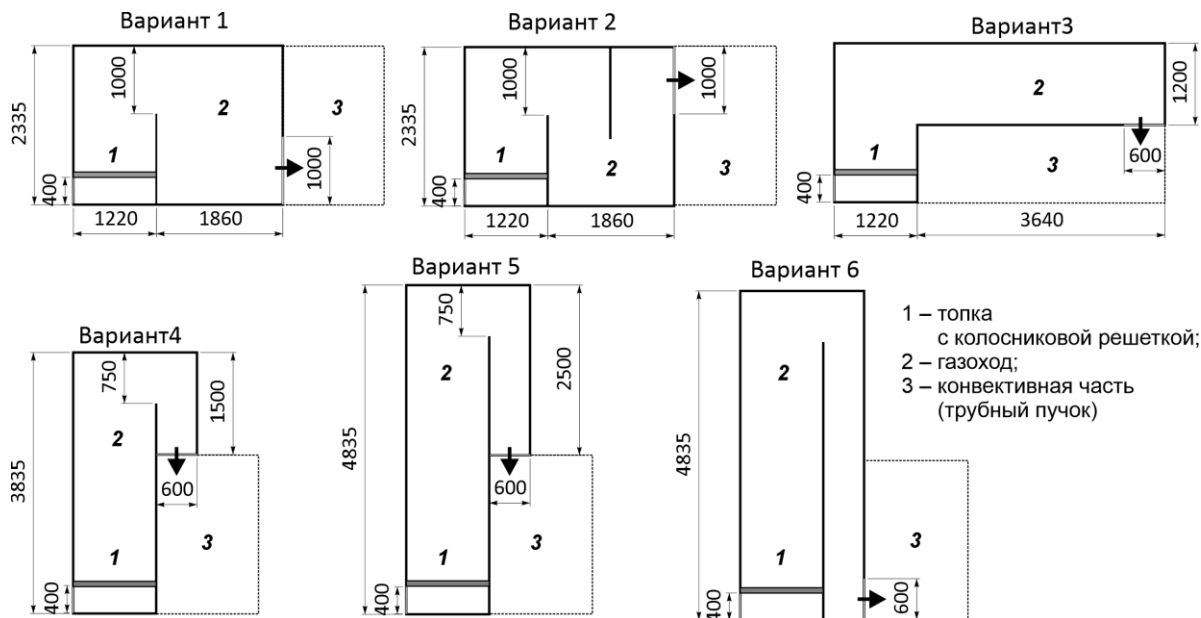


Рис. 8. Исследуемые варианты расположения дополнительного газохода

Первоначально рассматривалась схема с дополнительным газоходом, расположенным между топкой и трубным пучком (конвективным блоком) с нижним выходом газов (рис. 8, вар. 1). Для увеличения времени пребывания в газоходе он был разделен перегородкой на две части с верхним выходом газов (вар. 2). Дальнейшие исследования проводились для горизонтального газохода (вар. 3), конвективный блок при этом предполагалось располагать под газоходом, что приводит к изменению размеров и необходимости конструкторской разработки нового блока. Рассмотренные варианты характеризовались большим размером конструкции и не обеспечивали необходимые условия дожига, что было связано с неоптимальным неравномерным потоком газов из-за резкого поворота после топки. Поэтому для продолжения исследований был выбран вертикальный газоход над топкой с разной высотой (вар. 4-6). Предполагалось использовать конвективный блок от существующего котла с изменением места входа газов (сверху или снизу).

В табл. 11 приведены сводные данные рассмотренных вариантов.

Таблица 11

Сравнение вариантов расчета для разных схем сжигания

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



Дожиг загрязняющих веществ обеспечивали только варианты 5 (рис. 9) и 6.

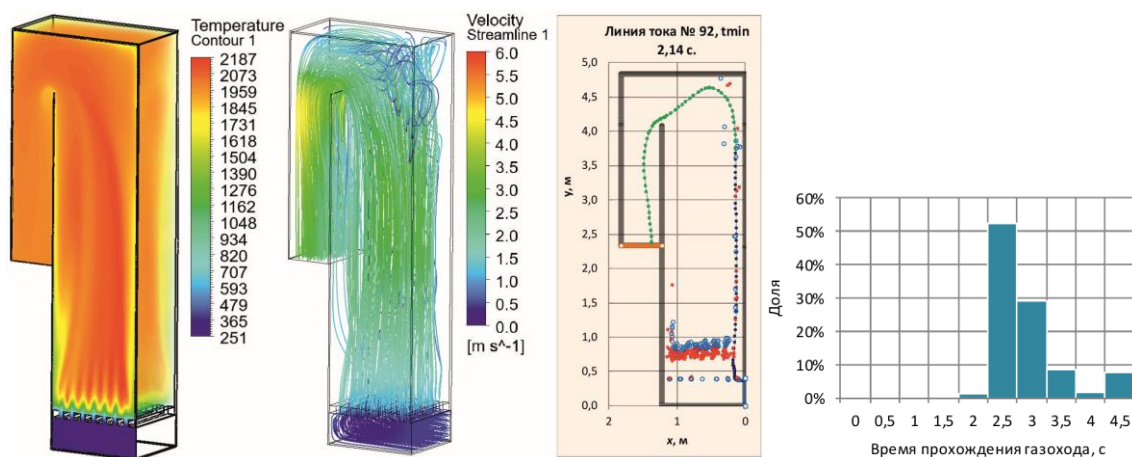


Рис. 9. Результаты моделирования выбранной схемы (вариант 5)

Но в связи с небольшими отличиями в результатах был выбран вариант № 5, который предусматривает организацию над котлом дополнительного газохода высотой 2,5 м с поворотом потока на 180° и опускной частью 2,5 м с отводом газов в трубный пучок. При этом время прохождения от 2 до 2,5 с имеет всего 1% от газового потока (рис. 9).

4.4. Исследование влияние коэффициента избытка воздуха и влажности отходов на эффективность горения

В заключение для выбранного варианта с дополнительным газоходом выявления особенностей изменения режима горения и влияния варьирования влажности топлива на характер горения было проведено моделирование в рамках компьютерной CFD-симуляции в Ansys Fluent (табл. 12).

Таблица 12

Сравнение вариантов расчета для выбранной схемы (вариант 5)

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

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

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



5. Выводы

1. 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 $\alpha = 1,8...2,35$, обеспечивающий полное сгорание топлива при температуре газов, выходящих из топки, не ниже 850°C . Но при $\alpha = 1,8...2,0$ 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.

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

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

4. 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.

Информация о финансировании (Acknowledgments)

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

Библиографический список

1. 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. DOI: [10.1016/j.jenvman.2021.112793](https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112793).
2. **Тугов А.Н.** Энергетическая утилизация ТКО: Мировой и отечественный опыт (обзор) / А.Н. Тугов // Теплоэнергетика. – 2022. – Vol. 12. – № 12. – С. 5-22. EDN: [TMRTIC](https://www.edn.ru/TMRTIC), [QCUADI](https://www.edn.ru/QCUADI). DOI: [10.56304/S0040363622120098](https://doi.org/10.56304/S0040363622120098).
3. Dangerous substances in waste: Technical report No 38 / **J. Schmid, A. Elser, R. Ströbel, M. Crowe**. – Copenhagen: European Environment Agency, 2000. – 50 p.
4. Modeling of the biomass combustion on a forward acting grate using XDEM. / **A.H. Mahmoudi, X. Besseron, F. Hoffmann** [et al.] // Chemical Engineering Science. – 2016. – Vol. 142. – P. 32-41. DOI: [10.1016/j.ces.2015.11.015](https://doi.org/10.1016/j.ces.2015.11.015).



5. **Demirbas A.** Potential applications of renewable energy sources, biomass combustion problems in boiler power systems and combustion related environmental issues // *Progress in Energy and Combustion Science*. – 2005. – Vol. 31, № 2. – P. 171-192. DOI: [10.1016/j.pecs.2005.02.002](https://doi.org/10.1016/j.pecs.2005.02.002).
6. **Trojanowski R., Fthenakis V.** Nanoparticle emissions from residential wood combustion: A critical literature review, characterization, and recommendations // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2019. – Vol. 103. – P. 515-528. DOI: [10.1016/j.rser.2019.01.007](https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.01.007).
7. Waste-to-energy plants are a small but stable source of electricity in the United States [Сайт]: Washington: U.S. Energy Information Administration (EIA) [March 21, 2023]. URL: <https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=55900> (дата обращения: 10.06.2025).
8. **Ефремов А.А., Дудолин А.Н.** Анализ зарубежного опыта в части построения энергетической структуры ТЭС на твердых коммунальных отходах // *Вестник КГЭУ*. – 2021. – №2 (50). – С. 3-14. EDN: [FYMFZJ](https://www.edn.ru/yymfzj).
9. **Jbara A.A.** Environmental and Health Impacts Resulting From Burning Solid Waste Near Residential Areas in Diyala Governorate, Iraq / *Academia Open*. – 2024. – Vol. 9, No. 2. – P. 10088. DOI: [10.21070/acopen.9.2024.10088](https://doi.org/10.21070/acopen.9.2024.10088).
10. Численность населения Российской Федерации по муниципальным образованиям на 1 января 2024 года (Статистический бюллетень) [Электронный ресурс]. – М.: Росстат, 2024. URL: http://ssl.rosstat.gov.ru/storage/mediabank/BUL_MO_2024.xlsx (дата обращения 01.06.2025 г.)
11. **Трембовля В.И., Фигнер Е.Д., Авдеева А.А.** Теплотехнические испытания котельных установок. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 416 с.
12. **Равич М.Б.** Эффективность использования топлива. – М.: Наука, 1977. – 344 с.
13. Методика определения выбросов при сжигании топлива в котлах производительностью менее 30 т пара или 20 Гкал / Разр. НИИАтмосфера. М.: Интеграл, 1999.
14. Расчет выбросов загрязняющих веществ в атмосферу от установок малой производительности по термической переработке твердых бытовых отходов и промходов / Разр. ВНИИГАЗа. М.: Газпром, 1998.
15. **Ахмед А.А., Трубаев П.А.** Выбор конструкции газохода для дожига вредных веществ в котлах малой мощности, сжигающих RDF-топливо // *Энергобезопасность и энергосбережение*. – 2025. – № 2. С. 17-26. EDN: [OQCFXL](https://www.edn.ru/oqcfxl).
16. **Левин Б.В.** Использование твердых бытовых отходов в системах энергоснабжения. – М.: Энергоиздат, 1982. – 224 с.
17. **Ahmed A.A., Trubaev P.A., Ramazanov R.S.** CFD Modelling and Optimization of Solid Waste Combustion in a 1 MW Fixed Bed Combustion Chamber // *Journal of Advanced Research in Numerical Heat Transfer*. – 2024. – Vol. 23, Issue 1. – P. 66-87. DOI: [10.37934/arnht.23.1.6687](https://doi.org/10.37934/arnht.23.1.6687).

References

1. Timonen, H., Mylläri, F., Simonen, P., Aurela, M., Maasikmets, M., Bloss, M., Kupri, H.-L., Vainumäe, K., Lepistö, T., Salo, L., Niemelä, V., Seppälä, S., Jalava, P.I., Teinemaa, E., Saarikoski, S., & Rönkkö, T. (2021). Household solid waste combustion with wood increases particulate trace metal and lung deposited surface area emissions. *Journal of Environmental Management*, 293, 112793. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112793>
2. Tugov, A. N. (2022). Municipal solid wastes-to-energy conversion: global and domestic experience (review). *Thermal engineering*, 69(12), 909-924. <https://doi.org/10.1134/s0040601522120084>
3. Schmid, J., Elser, A., Ströbel, R., & Crowe, M. (2000). *Dangerous substances in waste: Technical report No 38*. European Environment Agency.
4. Mahmoudi, A. H., Besseron, X., Hoffmann, F., Markovic, M., & Peters, B. (2016). Modeling of the biomass combustion on a forward acting grate using XDEM. *Chemical Engineering Science*, 142, 32-41. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2015.11.015>
5. Demirbas, A. (2005). Potential applications of renewable energy sources, biomass combustion problems in boiler power systems and combustion related environmental issues. *Progress in Energy and Combustion Science*, 31(2), 171-192. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2005.02.002>
6. Trojanowski, R., & Fthenakis, V. (2019). Nanoparticle emissions from residential wood combustion: A critical literature review, characterization, and recommendations. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 103, 515-528. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.01.007>



7. EIA (March 21, 2023). *Waste-to-energy plants are a small but stable source of electricity in the United States*. U.S. Energy Information Administration (EIA). Retrieved June 10, 2025, from <https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=55900>
8. Efremov, A., & Dudolin, A. (2021). Analysis of foreign experience in the energy structure of WTE Plant. *Vestnik KGEU*, 2(50), 3-14. [In Russian]
9. Jbara, A. A. (2024). Environmental and Health Impacts Resulting From Burning Solid Waste Near Residential Areas in Diyala Governorate, Iraq. *Academia Open*, 9(2), 10088. <https://doi.org/10.21070/acopen.9.2024.10088>
10. Rosstat. (2024). *Chislennost' naseleniya Rossijskoj Federacii po municipal'nym obrazovaniyam na 1 yanvarya 2024 goda (Statisticheskij byulleten')* [Population of the Russian Federation by municipalities as of January 1, 2024 (Statistical Bulletin)]. Retrieved June 01, 2025, from http://ssl.rosstat.gov.ru/storage/mediabank/BUL_MO_2024.xlsx [In Russian]
11. Trembovliya, V. I., Figner, E. D., & Avdeeva, A. A. (1991). *Teplotexnicheskie ispy'taniya kotel'ny'x ustanovok* [Thermal testing of boiler installations]. E'nergoatomizdat. [In Russian]
12. Ravich, M. B. (1977). *E'ffektivnost' ispol'zovaniya topliva* [Fuel efficiency]. Nauka. [In Russian]
13. NIIAtmosfera. (1999). *Metodika opredeleniya vy'brosov pri szhiganiy topliva v kotlax proizvoditel'nost'yu menee 30 t para ili 20 Gkal* [Methodology for determining emissions from fuel combustion in boilers with a capacity of less than 30 tons of steam or 20 Gcal]. Integral. [In Russian]
14. VNIIGAZ. (1998). *Raschet vy'brosov zagryaznyayushhix veshhestv v atmosferu ot ustanovok maloj proizvoditel'nosti po termicheskoj pererabotke tverdy'x by'tovy'x otxodov i promotxodov* [Calculation of emissions of pollutants into the atmosphere from low-capacity installations for thermal processing of solid municipal waste and industrial waste]. Gazprom. [In Russian]
15. Ahmed, A. A., & Trubaev, P. A. (2025). Selection of gas duct design for afterburning of harmful substances in small capacity RDF boilers. *Energy safety and energy economy*, 2, 17-26. [In Russian]
16. Levin, B. B. (1982). *Ispol'zovanie tverdy'x by'tovy'x otxodov v sistemax e'nergosnabzheniya* [Use of municipal solid waste in energy supply systems]. E'nergoizdat. [In Russian]
17. Ahmed, A. A., Trubaev, P. A., & Ramazanov, R. S. (2024). CFD Modelling and Optimization of Solid Waste Combustion in a 1 MW Fixed Bed Combustion Chamber. *Journal of Advanced Research in Numerical Heat Transfer*, 23(1), 66-87. <https://doi.org/10.37934/arnht.23.1.6687>

Сведения об авторах

Ахмед Ашраф Абдулла Ахмед, аспирант кафедры Энергетики теплотехнологии БГТУ им. В.Г. Шухова. E-mail: ashraf.a.ahmed@tu.edu.iq. SPIN-код: [2796-7349](https://orcid.org/2796-7349). ORCID [0009-0008-4592-9071](https://orcid.org/0009-0008-4592-9071)

Трубаев Павел Алексеевич, д-р техн. наук, профессор кафедры Энергетики теплотехнологии БГТУ им. В.Г. Шухова. SPIN-код: [5743-7260](https://orcid.org/5743-7260). E-mail: trubaev@gmail.com. ORCID: [0000-0003-1710-1599](https://orcid.org/0000-0003-1710-1599).

Authors about

Ashraf Ahmed, postgraduate student of the Department of Energy Engineering of Heat Technology, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Belgorod, Russia. E-mail: ashraf.a.ahmed@tu.edu.iq. ORCID [0009-0008-4592-9071](https://orcid.org/0009-0008-4592-9071)

Pavel Trubaev, Dr. of Tech. Sciences, Professor of Department of Energy Engineering of Heat Technology, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Belgorod, Russia. E-mail: trubaev@gmail.com. ORCID: [0000-0003-1710-1599](https://orcid.org/0000-0003-1710-1599).

Ссылки для цитирования

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

Ahmed, A., & Trubaev, P. (2025). Evaluation of the efficiency of solid municipal waste combustion in a 1 MW boiler furnace with a grate. *Energy Systems*, 2, 17-33. <https://doi.org/10.34031/es.2025.2.01>

