

АНАЛИЗ ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ВОДОГРЕЙНЫХ КОТЛОВ ДЛЯ СЖИГАНИЯ ОТХОДОВ В НЕПОДВИЖНОМ СЛОЕ И ВЫБОР КОНСТРУКЦИИ ГАЗОХОДА ДЛЯ РАЗРУШЕНИЯ ВРЕДНЫХ ВЕЩЕСТВ В ПРОДУКТАХ СГОРАНИЯ

Ахмед А.А.А.^{1,2}, Трубаев П.А.², Рамазанов Р.С.²

¹ Тикритский университет, г. Тикрит (Ирак)

² БГТУ им. В.Г. Шухова, г. Белгород

Аннотация

Целью работы является анализ технических решений, используемых для повышения эффективности работы водогрейных котлов для сжигания отходов. В результате анализа имеющихся конструктивных решений для водогрейных котлов малой мощности, в которых отходы сжигаются в неподвижном слое, выделены их основные недостатки: низкая температура сгорания; неэффективность передачи теплоты от продуктов сгорания к теплоносителю; загрязнение газоходов и поверхностей нагрева; неполное сгорание топлива; невозможность точного регулирования процесса горения, что приводит к образованию большого количества вредных выбросов и к снижению теплопроизводительности и КПД котла. Предлагается обустройство после топки котла газохода, в котором газы будут находиться более 2 секунд, и будет проходить полное разрушение находящихся в продуктах сгорания отходов органических вредных веществ. Для определения времени прохождения и выбора оптимальной конструкции газохода было проведено численное моделирование движения газового потока с использованием разработанной численной модели, реализованной в программном комплексе ANSYS Fluent. Для обеспечения равномерности газового потока в газоходе рассмотрены варианты с разной высотой окна между топкой и газоходом, установка в газоходе разделительной перегородки для организации двухходового движения газов. Наилучшие результаты были получены для горизонтального газохода. Для дальнейшей конструкторской проработки и поиска способов увеличения времени нахождения газа в газоходе был выбран наиболее эффективный вариант с горизонтальным газоходом.

Ключевые слова: водогрейный котел, колосниковая решетка, твердое топливо, MSW, RDF, ANSYS Fluent, движение газов, время прохождения.

ANALYSIS OF TECHNICAL SOLUTIONS TO INCREASE THE EFFICIENCY OF WATER BOILERS FOR WASTE COMBUSTION IN A FIXED BED AND CHOICE OF FLUE DESIGN FOR DESTRUCTION OF HARMFUL SUBSTANCES IN COMBUSTION PRODUCTS

Ashraf Ahmed ^{1,2}, Pavel Trubaev ², Rafshan Ramazanov ²

¹ Tikrit University, Tikrit

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

Abstract

The purpose of the work is to analyze technical solutions used to improve the efficiency of hot water boilers for waste combustion. As a result of the analysis of available design solutions for low-power water heating boilers, in which waste is burned in a fixed bed, their main disadvantages were identified: low combustion temperature; ineffective heat transfer from combustion products to the coolant; contamination of flues and heating surfaces; incomplete combustion of fuel; the impossibility



ity of accurately regulating the combustion process, which leads to the formation of a large amount of harmful emissions and a decrease in the heat output and efficiency of the boiler. It is proposed to install a flue after firing the boiler, in which the gases will remain for more than 2 seconds and the organic harmful substances contained in the combustion products will be completely destroyed. To determine the passage time and select the optimal design of the gas duct, a numerical simulation of the movement of the gas flow was carried out using the developed numerical model implemented in the ANSYS Fluent software package. To ensure uniformity of the gas flow in the gas duct, options with different heights of the window between the firebox and the gas duct and the installation of a dividing partition in the gas duct to organize two-pass gas movement were considered. The best results were obtained for a horizontal flue. For further design development and search for ways to increase the residence time of gas in the gas duct, the most effective option with a horizontal gas duct was chosen.

Keywords: hot water boiler, grate, solid fuel, MSW, RDF, ANSYS Fluent, gas movement, transit time.

Введение

Один из методов утилизации твёрдых коммунальных отходов (ТКО) является их сжигание в специализированных печах при температуре от 900 до 2000°C с производством электроэнергии и/или теплоты [1]. Сжигание ТКО отличается от сжигания биотоплива других видов, например древесины, или низкосортных углей (бурого угля и торфа). Главным фактором, определяющим технологию сжигания биотоплива и экономические аспекты, является его теплотворная способность [2]. Но ТКО состоит из разнообразных материалов, таких как пластик, текстиль и другие синтетические вещества, которые при сжигании могут выделять широкий спектр загрязняющих соединений, в том числе таких опасных, как диоксины и фураны [3, 4]. Неравномерное горение и низкие температуры приводят к образованию окиси углерода, алифатических и ароматических соединений, кислых газов, выбросу мелких несгоревших частиц [5]. При поддержке необходимого температурного уровня все вредные вещества, образующиеся в продуктах горения, разлагаются. Поэтому, например, использование RDF-топлива (высушенных и измельченных ТКО) в цементных печах, где температура газов составляет выше 1450°C, является наиболее безопасным и экологичным способом утилизации отходов [6]. Но из-за низкой теплоты сгорания отходов для поддержания необходимой температуры, требуемой для технологического процесса, требуется обеспечить дополнительное кислородное дутье [7].

При анализе процессов горения необходимо учитывать конкретные используемые технологии и их способность обеспечивать заданные характеристики сгорания. Для расчета локальных значений различных свойств целесообразно использование системы вычислительной гидродинамике (CFD) во время сгорания, но процессы горения отходов сложнее по сравнению с сжиганием древесины, имеющий более простой состав [8, 9], который, в отличие от отходов, является стабильным [10].

Целью работы является анализ технических решений, используемых для повышения эффективности работы водогрейных котлов для сжигания отходов. Для этого:

а) проведен патентный поиск, систематизированы основные недостатки сжигания топлива в водогрейных котлах малой мощности в неподвижном слое и решения для повышения эффективности сжигания отходов;

б) предлагается дополнение котлов газодом между топкой и блоком с конвективными поверхностями, в котором будет проходить разрушение находящихся в продуктах сгорания отходов органических вредных веществ;

в) путем моделирования движения газа выбрано наиболее эффективная схема расположения газодода.



Методы сжигания отходов на колосниковой решетке (патентный обзор)

Конструкция твердотопливных котлов с сжиганием топлива в неподвижном слое обычно включает топку с колосниковой решеткой, экранированную трубами, после которой может располагаться газоход для продуктов сгорания с трубными пучками.

Наиболее простой способ сжигания твердых отходов в неподвижном слое описан в патенте **RU 2 100 701 C1 «Топочное устройство»** (авторы Волохонский Л.А. и др., патентообладатель ТОО НПП «Термоэкология», 1997 г.). Печь для сжигания твердых отходов производительностью 2,8 т/ч (мощностью 6-8 МВт) содержит наклонную неподвижную колосниковую решетку, через отверстия в которой проходят шуровочные трубы для подачи воздуха в камеру сжигания (рис. 1). Недостатком ее является значительный химический и механический недожог, забивания сопел шуровочных труб золой и смолами.

В патенте **RU 121042 U1 «Водогрейный твердотопливный котел»** (автор Ренардас Э.К., патентообладатель «КАЛВИС», Латвия, 2012 г.) предложен твердотопливный водогрейный котел, в котором внешние экраны топки выполнены из теплоизоляционного материала, чередующегося с вертикальными трубами, которые через коллектор соединены с горизонтальным трубным пучком в газоходе (рис. 2). Недостатком конструкции является неэффективный и неравномерный теплообмен.

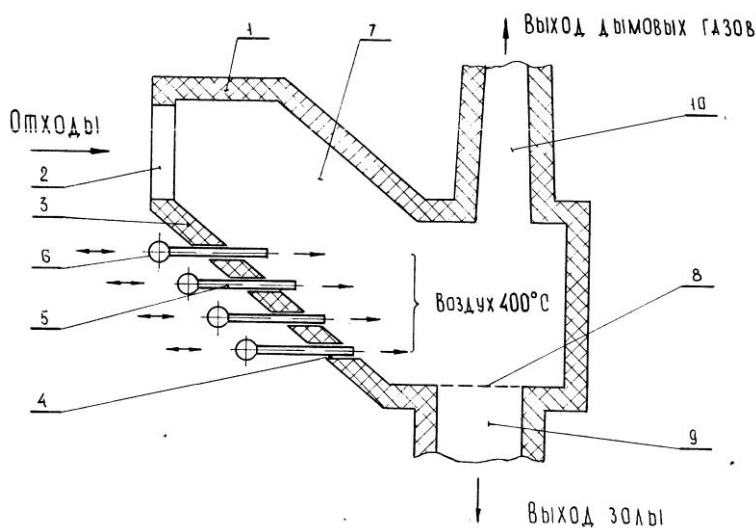


Рис. 1. Печь для сжигания твердых отходов (Патент RU 2100701):

1 – корпус; 2 – окно для подачи отходов; 3 – наклонный под (30-50°); 4 – отверстия для подачи воздуха 6 через шуровые сопла 5; 7 – топка; 8 – решетка; 9 – зольная камера; 10 – дымовая труба

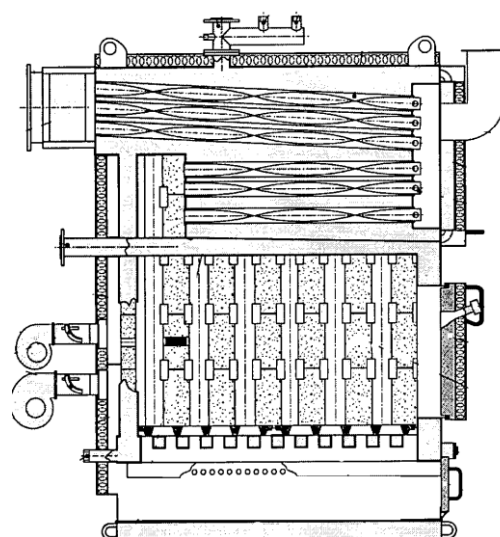


Рис. 2. Водогрейный твердотопливный котел (Патент RU 121042 U1)

В патенте **RU 168 146 U1 «Котёл водогрейный с многоходовым теплообменником»** (автор и патентообладатель Шабанов А.В., 2017 г.) описан котел, который для повышения эффективности теплообмена включает трёхходовой теплообменник, один или более ходов которого расположены с наклоном 15-25 градусов. Нагреваемая вода находится в рубашке между стенками топки и газоходов и корпусом котла. Отношение длины к высоте ходов составляет не менее трех.

Недостатком данной конструкции является низкая интенсивность нагрева воды и низкая производительность из-за небольшой поверхности теплообмена и непостоянного теплообмена.



В патентах **RU 2 736 687 C1 «Котел водогрейный (варианты)»** (Мухаева Н.А., патентообладатель ООО ТК «Инструменты», 2020 г.) и **RU 2 754 477 C1 «Твердотопливный котел»** (автор и патентообладатель Михайлов В.А, 2021 г.) предлагается увеличение площади теплообмена за счет устройства дополнительных ходов для газов внутри рубашки. Основными недостатками этих конструкций являются техническая сложность, значительные габаритные размеры и низкая эффективность, обусловленная высокими тепловыми потерями.

В патенте **RU 2147711 C1 «Печь для слоевого сжигания твердых отходов»** (авторы Попов А.Н. и др., патентообладатель АО «ВНИИЭТО», 2000 г.) предлагается устанавливать после камеры сгорания с неподвижной колосниковой решеткой камеру дожига с имеющимися на боковых стенах горелками для дополнительного газового топлива (рис. 4). Недостатком конструкции является повышенный расход газового топлива, что приводит к увеличению затрат при эксплуатации и необходимости наличия этого топлива.

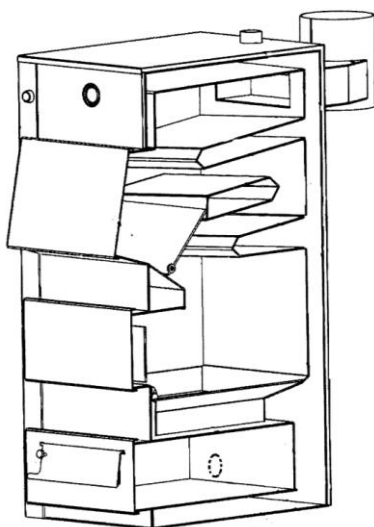


Рис. 3. Котёл водогрейный с многоходовым теплообменником (Патент RU 168 146 U1)

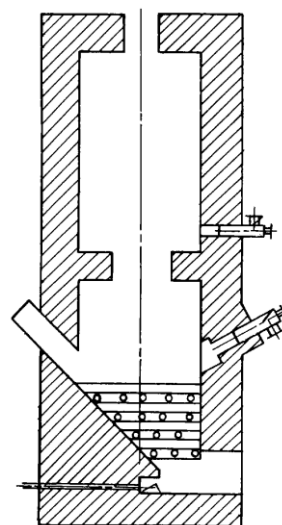


Рис. 4. Печь для слоевого сжигания твердых отходов (Патент RU 2147711)

Недостатками всех перечисленных способов является отсутствие регулирования расхода воздуха, что приводит к неэффективному горению.

В патенте **RU 2 794 577 C2 «Способ сжигания твердого топлива в бытовом твердотопливном отопительном устройстве с помощью колосникового устройства и колосниковое устройство для осуществления этого способа»**

(автор и патентообладатель Безкровный М.Г., 2023 г.) для регулирования расхода воздуха предложено колосниковое устройство из термостойкого неметаллического материала, в котором кроме основных отверстий для подачи воздуха в решетке имеется дополнительное боковое отверстие, через которое проходит воздух, необходимый для догорания топлива и расход которого регулируется наклоном решетки (рис. 5). Недостатком является необходимость регулировки решетки при неработающем котле и низкая интенсивность теплообмена, что приводит к низкому КПД.

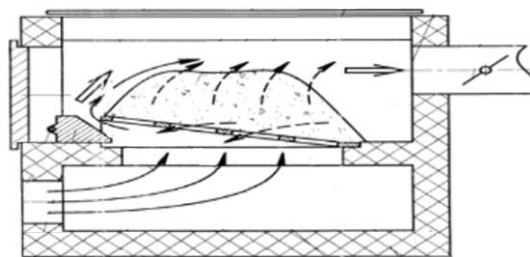


Рис. 5. Способ сжигания твердого топлива в бытовом твердотопливном отопительном устройстве с помощью колосникового устройства и колосниковое устройство для осуществления этого способа (Патент RU 2 794 577)

В патенте **RU 93 036 155 А «Способ ступенчатого сжигания»** (авторы Шульман В.Л. и др., заявитель Государственное предприятие по наладке, совершенствованию технологии и эксплуатации электростанций и сетей «Уралтехэнерго») по высоте в топочной камере выделяют три зоны: активного горения, восстановительную зону и зону дожигания. Основную часть топлива подают в зону активного горения воздуха в виде вихревых и прямоочных струй, остальную – в виде вихревых струй в восстановительную зону. Часть воздуха, необходимого для дожигания продуктов неполного горения, в виде вихревых струй направляют в зону дожигания. Ступенчатая подача воздуха и подача воздуха в виде вихревых и прямоочных струй дает положительные результаты по дожиганию топлива. Как отмечается в патенте RU 2 520 788, недостатком данного способа является неполное сгорание топлива и в связи с этим низкий КПД котла.

Патент **RU 2 520 788 «Способ сжигания топлива»** (автор Литоренко О.А., патентообладатель ООО «Основа», 2014 г.) предлагает простое и эффективное средство для достижения полного сгорания топлива в угольных котлах и заключается в управлении движением газа, содержащего частично сгоревшие частицы, через сложную сеть газовых каналов. Результатом является повышение эффективности сгорания, что приводит к увеличению общей эффективности на 7-10 процентов. Такой подход облегчает передачу тепла от горючего топлива к теплоносителю, повышая эффективность работы и снижая тепловую энергию, необходимую для нагрева котла (рис. 6).

Недостатком этого способа является наличие сложной сети газовых каналов, что может приводить к неэффективному движению газов, образованию застойных зон и ухудшению условий догорания несгоревших частиц.

В патенте **RU 2 735 755 С1 «Каталитическая печь для сжигания твердых отходов»** (авторы Печенегов Ю.Я. и др., патентообладатель ООО «Научно-исследовательский институт технологий органической, неорганической химии и Биотехнологий», 2020 г.) в печи предусмотрены ряд технических решений для повышения эффективности и экологических параметров. Печь оснащена компактным слоем катализатора, через который проходят продукты сгорания. Недостатком этого способа является необходимость прохождения слоя газов через катализатор, который создает повышенной аэродинамическое сопротивление в печи и может засоряться частицами золы и несгоревшего топлива

В патенте **RU 2 298 728 С1 «Способ и устройство для сжигания твердого топлива»** (авторы Голубкович А.В. и др., патентообладатель ГНУ ВИМ Россельхозакадемии, 2006 г.) эффективность сгорания повышается путем регулирования температуры дымовых газов на разных стадиях процесса горения, что достигается изменением расхода топлива, первичного и вторичного воздуха. Главный недостаток способа в том, что для его реализации необходима разработка системы автоматизации с большим количеством датчиков, ненадежность работы температурных датчиков и газоанализаторов в условиях горячего запыленного потока.

В каталоге [11] описан водогрейный котел, который имеет топку прямоугольной формы с равномерным распределением потока и упрощенными поверхностями нагрева – конвекционных газовых каналов, выполненных в виде горизонтальных пучков труб (рис. 7). Котел позволяет достичь полного сгорания топлива, но имеет значительные весогабаритные характеристики.

Бийский котельный завод выпускает серию котлов Гефест с колосниковой решеткой мощностью 0,4-3 МВт, в которых футеровка выполнена облегченной и имеют топочные экраны и на крыше и по бокам и дополнительный конвекционный блок из двух трубных пучков [12]. Недостатком является снижение мощности при повышении влажности топлива, повышенная температура выходящих газов, что вызывает снижение мощности и КПД котла.



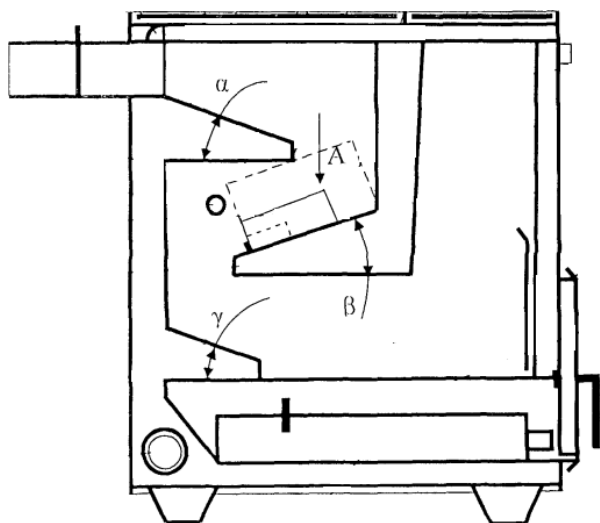


Рис. 6. Способ сжигания топлива (Патент RU 2 520 788)

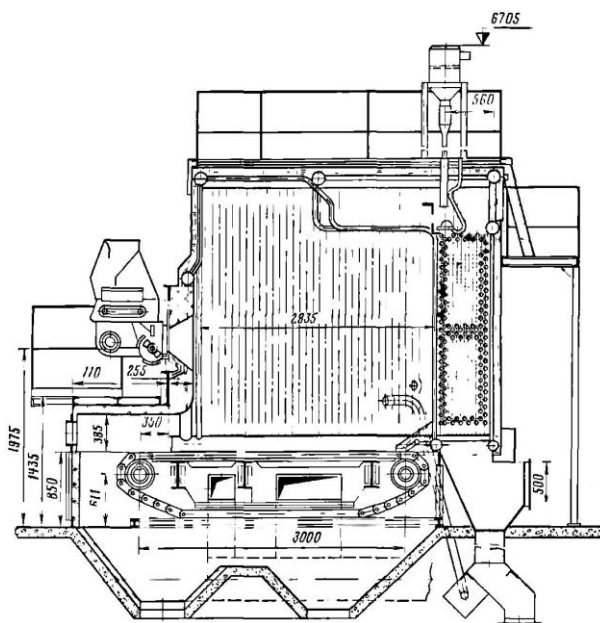


Рис. 7. Котел КВ-ТС 4-150

В патенте **RU 2 566 466 С1 «Водогрейный котел»** (авторы Захаров Г.А. и др., патентообладатель Дальневосточный Федеральный Университет" ДВФУ, 2015 г.) предлагается новая конфигурация поверхностей теплообмена водогрейного котла с облегченной футеровкой. Интенсификацию горения влажного твердого топлива обеспечивает система подогрева дутьевого воздуха, а работа котла регулируется заслонками в газоходе и воздуховоде. Основной технической проблемой котлов с соединенными топочными экранным и конвективными пучками является низкая теплоотдача, обусловленная последовательной циркуляцией теплоносителя сначала в топочном блоке, а затем в конвективном, что приводит к снижению температуры теплоносителя на выходе из котла.

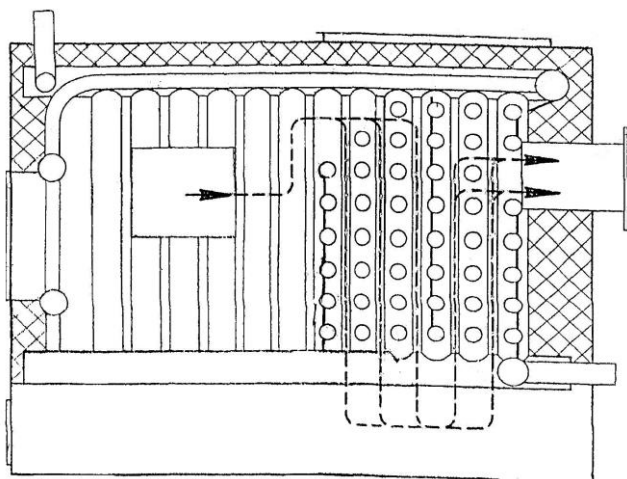
В патенте **RU 2 463 526 «Котел водогрейный» С1** (автор и патентообладатель Семичев О.В., 2012 г.) предложен водогрейный котел, в котором прямоугольная топочная камера, имеющая зону конвекционного нагрева, разделена вертикальной перегородкой с окном сверху для прохода продуктов горения (рис. 8). Удлинение пути, проходимого продуктами сгорания так же достигается дополнительными перегородками в конвективной зоне. Это дает возможность использовать низкокалорийное топливо и отходы с сохранением производительности и эффективности котла без увеличения его размеров. К недостаткам такого котла можно отнести сложность герметизации котла из-за большого количества элементов, большое аэродинамическое сопротивление, неэффективную систему отбора теплоты.

Для повышения эффективности в патенте **RU 194 591 «Котел водотрубный» U9** (автор Губин Д.В., патентообладатели Губин Д.В., Назаров А.А., 2019 г.) предлагается изменить систему циркуляции воды. В этом котле топка также разделена перегородкой с отверстием для топочных газов, но конвективные блоки расположены в шахматном порядке, противоположные части разделены вертикальными перегородками. Но так как вода все равно последовательно проходит через топочный и конвективный блоки, теплоотдача остается низкой, а наличие вертикальных труб увеличивает сопротивление и приводит к завоздушиванию теплообменных секций.

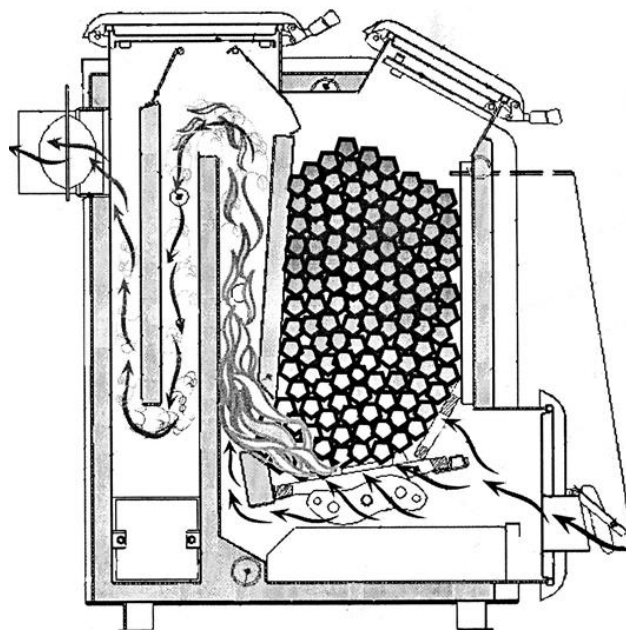
В патенте **RU 200 444 «Водогрейный твердотопливный котел» U1** (автор и патентообладатель Левчук Ю.С., 2020 г.) предлагается для увеличения площади поверхности теплообмена лабиринтное прохождение продуктов сгорания по трем верти-



кальным зонам (рис. 9). Котел так же снабжен каналами, обеспечивающими поступление третичного воздуха для организации дожига и шибером для регулирования тяги. , кроме этого, котел.



**Рис. 8. Котел водогрейный
(Патент RU 2 463 526)**



**Рис. 9. Водогрейный твёрдотопливный котел
(Патент RU 200 444)**

Анализируя предложенные конструкции котлов можно обобщить основные недостатки сжигания топлива в котлах малой мощности в неподвижном слое:

- 1) низкий КПД, обусловленный небольшой температурой сгорания и неэффективностью передачи теплоты от продуктов сгорания к теплоносителю из-за небольшой площади теплообмена;
- 2) загрязнение газоходов и поверхностей нагрева несгоревшими частицами топлива, золой и смолами;
- 3) неполное сгорание топлива из-за неэффективного смешения с окислителем и длительным горением;
- 4) невозможность точного регулирования объема воздуха, подаваемого в твердотопливный котел, что приводит к неполному сгоранию топлива и образованию большого количества вредных выбросов или к избытку воздуха, приводящему к снижению теплопроизводительности и эффективности котла.

Для повышения эффективности сжигания отходов предлагается:

- уменьшение отбора теплоты в топке, путем частичной замены экранов на теплоизоляцию;
- удлинение пути, которые проходят газы, путем устройства дополнительных ходов в виде полостей или каналов, разделение топки перегородкой;
- устройства камеры дожига, работающей на газовом топливе;
- использование подогретого воздуха, многоступенчатое сжигание топлива.

Моделирование условий обеспечения полного сгорания топлива

Для практически полного разрушения находящихся в продуктах сгорания отходов органических вредных веществ необходимо обеспечить высокие температуры. Согласно Директиве Европейского Парламента и Совета 2010/75/ЕС от 24.11.2010 г. о промышленных выбросах (о комплексном предотвращении загрязнения и контроле над ним) экологическим требованиям удовлетворяют установки, в которых продукты го-



рения находятся не менее 2 с при температуре не менее 850°C, или если сжигаются опасные отходы с содержанием более 1% галогенных органических соединений, выражаемых как хлорин, температура должна быть минимум 1100°C.

Объектом моделирования являлся котел с неподвижной колосниковой решеткой мощностью 1 МВт (рис. 10). Продукты горения после топки после топки через выходное окно высотой 400 мм направляются в двухходовый трубный пучок для нагрева воды. Воздух под колосниковую решетку подается через входное окно высотой 200 мм. С целью обеспечения максимальной температуры горения рассматривалась топка без экранов. Выбор мощности и типа котла вызван его потенциальным использованием в границах полигонов ТКО, которые уже являются объектами с неблагоприятной экологической обстановкой, для обеспечения тепловой энергией производственных объектов. Кроме того для потока отходов с расходом 0,3...0,6 т/час, которые необходимы для работы котла мощностью 1 МВт, возможна организация качественной сортировки с отбором фракций, содержащих тяжелые металлы (которые являются одной из основных проблем при сжигании ТКО).

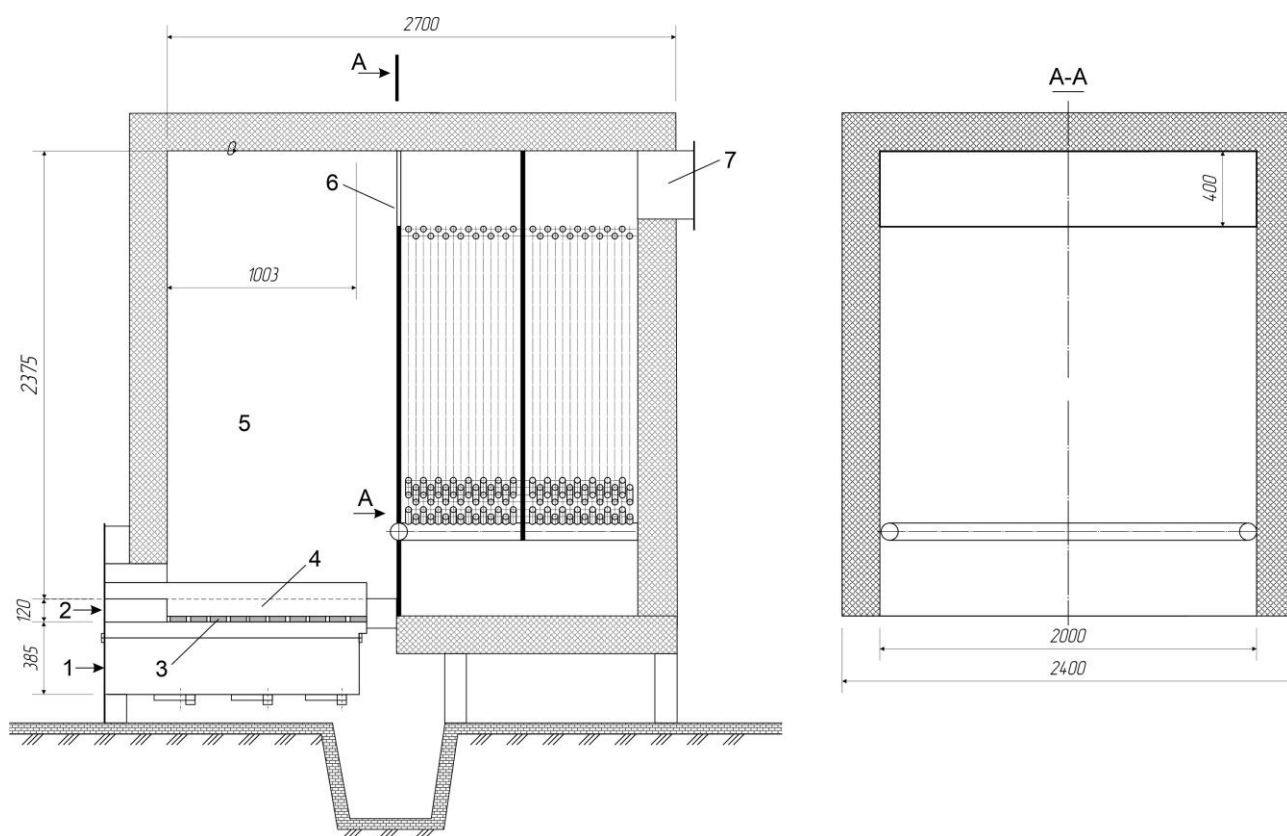


Рис. 10. Котел КВМ-12:

- 1 – подача воздуха; 2 – подача твердого топлива; 3 – колосниковая решетка; 4 – слой топлива; 5 – топка; 6 – окно для прохода продуктов сгорания в поворотную камеру конвективного блока; 7 – выход продуктов сгорания

Предлагается обустройство после топки котла газохода, в котором газы будут находиться более 2 секунд. Газоход может быть как вертикальным, расположенным между топкой и секцией с трубными пучками, так и горизонтальным, в верхней части, с расположением секции с трубными пучками под ним.

В табл. 1 приведены результаты расчета горения для ряда топлив и оценка необходимого размера газохода. Но обеспечение времени прохождения будет только при



постоянной и одинаковой скорости потока газов в поперечном сечении. При неравномерности поля скоростей, образовании локальных вихрей, часть газов будет проходить быстрее.

Таблица 1

Параметры газохода для дожига вредных веществ в продуктах сгорания ТКО

Вид топлива	Дрова	Антрацит	Каменный уголь	Торф	Бурый уголь	ТБО, с влажностью		
						50%	30%	10%
Состав топлива, %								
углерод С _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 $t_{теор}$	1489	1615	1472	1310	1429	1137	1387	1537
горения калориметрическая $t_{кал}$	1493	1637	1475	1310	1430	1137	1387	1546
действительная в выходном окне топки $t_r = 0,86 \cdot t_{кал}$	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_r	1,94	1,90	1,91	1,95	1,90	1,99	1,86	1,80
при $t_r = 850^\circ\text{C}$	1,40	1,27	1,39	1,57	1,42	1,79	1,43	1,26
Необходимая длина горизонтального газохода сечением 2x1 м, м								
при действительной температуре горения t_r	2,30	2,26	2,26	2,32	2,26	2,37	2,21	2,14
при $t_r = 850^\circ\text{C}$	1,66	1,51	1,65	1,86	1,69	2,12	1,69	1,50

Для определения времени прохождения и выбора оптимальной конструкции газохода было проведено численное моделирование движения газового потока с использованием разработанной численной модели, реализованной в программном комплексе ANSYS Fluent. Использовался метод конечных элементов, область разбита сеткой с полиэдральными (многогранными) ячейками, число ячеек – 1 060 690. Использована к-ε модель турбулентности, DO (discrete ordinates) модель излучения. Задавались граничные условия III рода (шамот 200 мм). Модель горения реализована совместным ис-



пользованием модели переноса (смещения) компонентов Species Transport с механизмом расчёта реакций Eddy Dissipation. Состав твёрдого топлива задавался элементарным массовым составом, приведённым на горючую массу (C, O, H, N, S) и составом, приведённым на рабочую массу, включающим массовую долю золы, выход летучих веществ, коксовое число и влажность.

По результатам численного моделирования в ANSYS Fluent строились линии потока (Stream Lines), которые затем экспортировались в Excel (рис. 11). Линии потока представляли собой набор точек, включающих значение координат x, y, z и скорости потока в точке v. Для части линии потока, находящейся в газоходе (что определялось значением координаты x), производился расчет времени прохождения:

$$\tau = \sum \frac{\sqrt{(x_{i-1} - x_i)^2 + (y_{i-1} - y_i)^2 + (z_{i-1} - z_i)^2}}{0,5(v_{i-1} + v_i)}$$

Затем определялась минимальное время прохождения газохода τ_{min} (для линий, начинающихся во входном окне газохода и заканчивающихся в выходном).

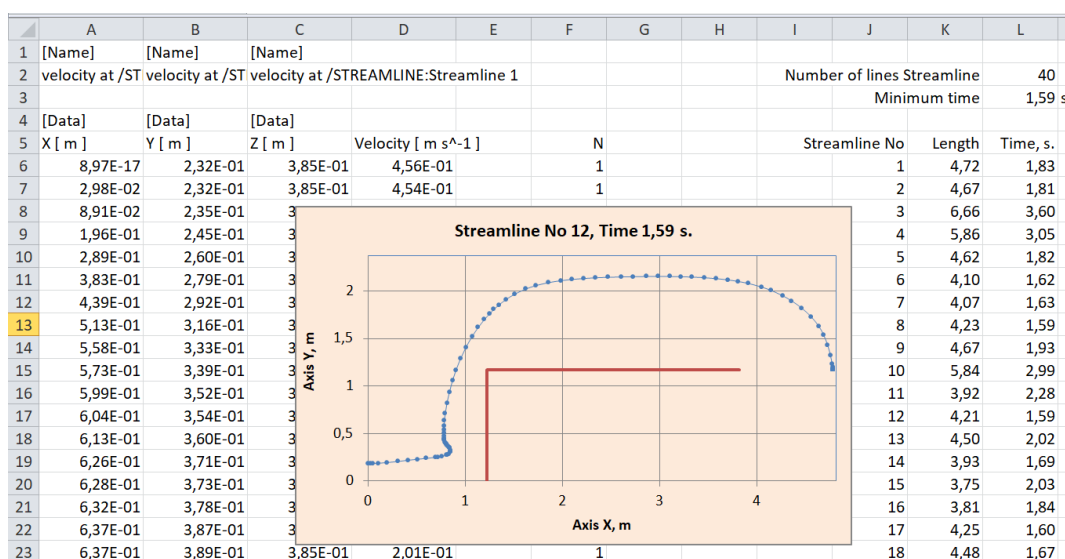


Рис. 11. Расчет времени прохождения газохода

Первоначально было произведено моделирование котла с оригинальными размерами топки (рис. 12). Поток газа в газоходе проходил вдоль верхней и боковой стенок, что определило его крайне высокую скорость и маленькое время прохождения, 0,59...1,12 с. Для увеличения времени были рассмотрены варианты: а) увеличение высоты выходного окна с 400 до 1000 мм (рис. 13); б) разделение газохода вертикальной стенкой для двухходового движения газов с высотой окон 400 мм (рис. 14) и 1000 мм (рис. 15). Это позволило увеличить время нахождения газов в газоходе, но все равно минимальное время было недостаточным и составляло около 1 с. Поэтому при использовании этого решения необходимо было организовывать как минимум четыре хода газов, что бы привело бы к значительному увеличению размеров газохода и котла. Наилучшие результаты были получены для горизонтального газохода, время прохождения составило 1,47...2,28 с. Размеры вертикального газохода составили 2×1,8×2,375 = 8,55 м³, горизонтального – 2×1×3,6 – 7,2 м³.



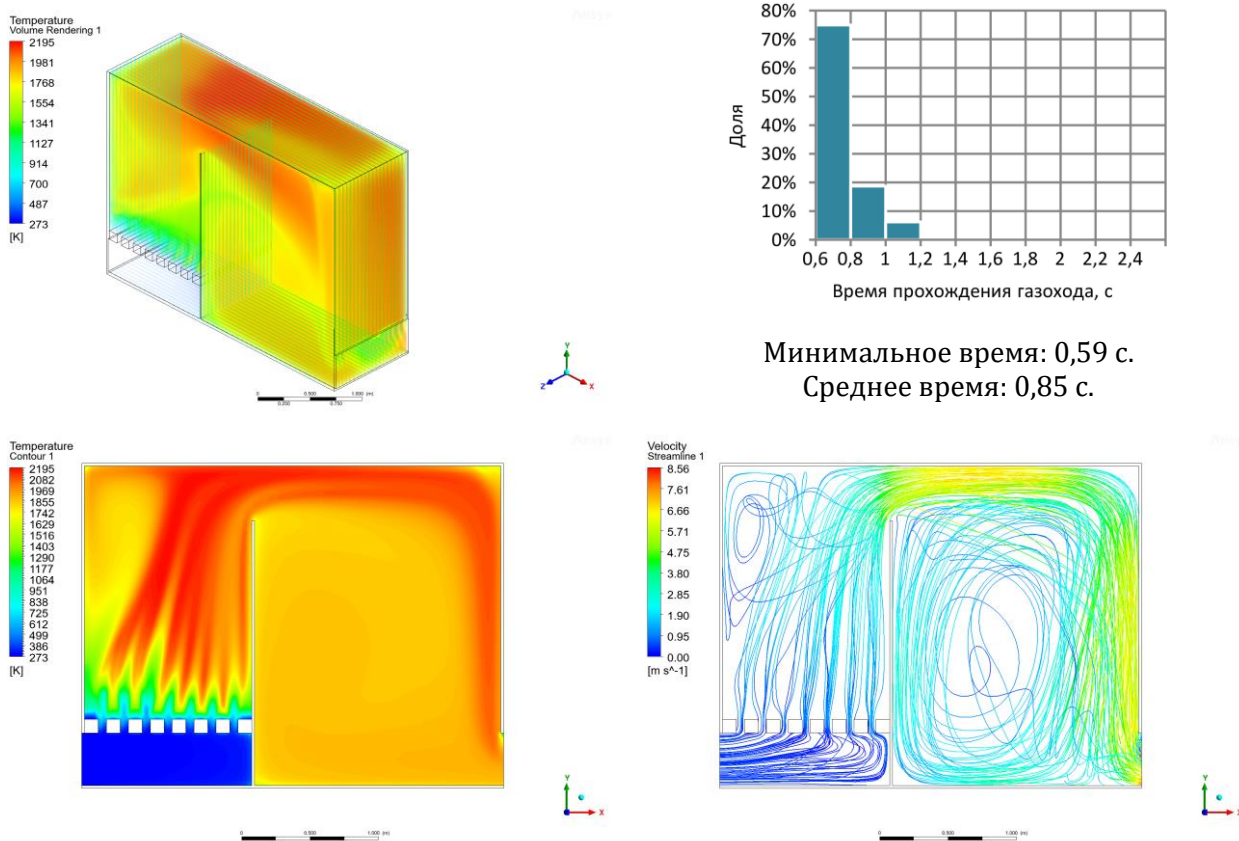


Рис. 12. Вертикальный газодоход сечением 2000×1800 мм (3,6 м²), высота окон между топкой и газодоходом и после газодохода 400 мм

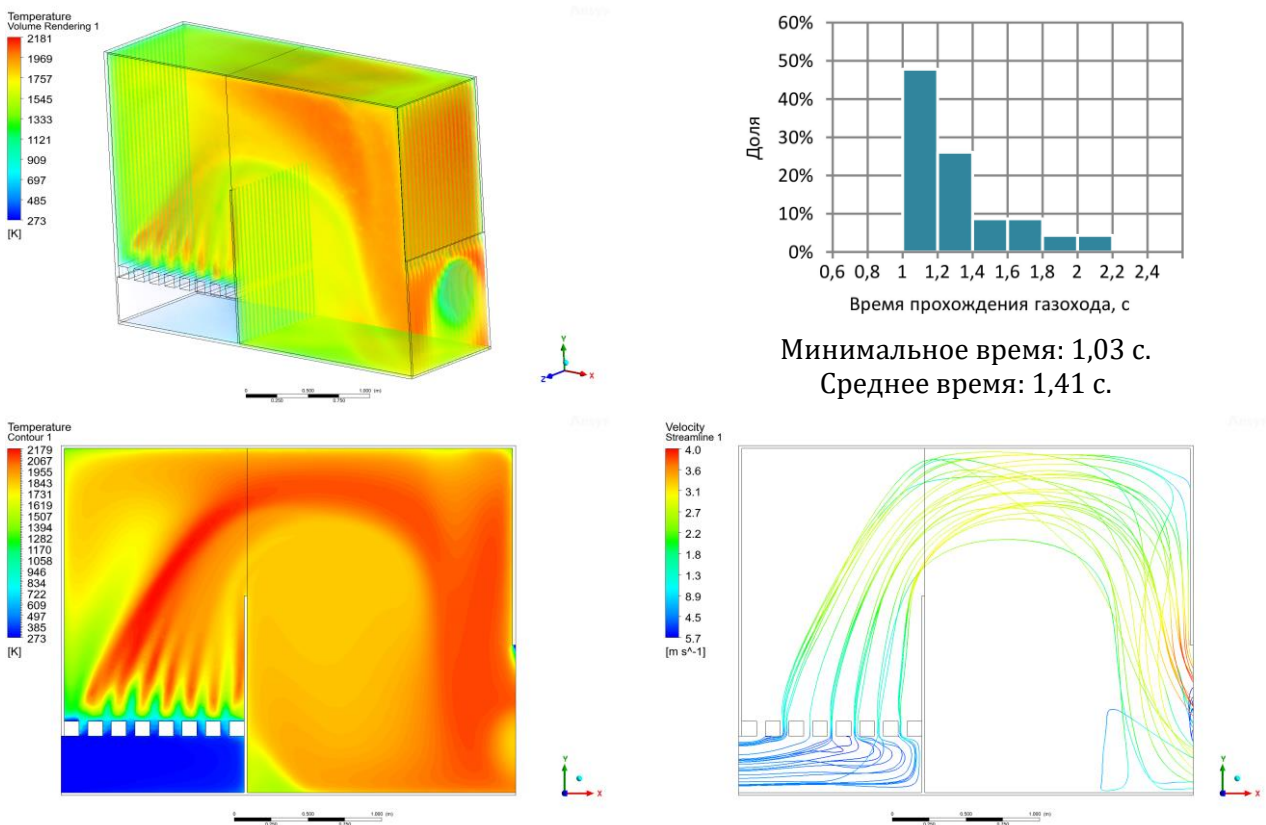


Рис. 13. Вертикальный газодоход, высота окон между топкой и газодоходом и после газодохода 1000 мм



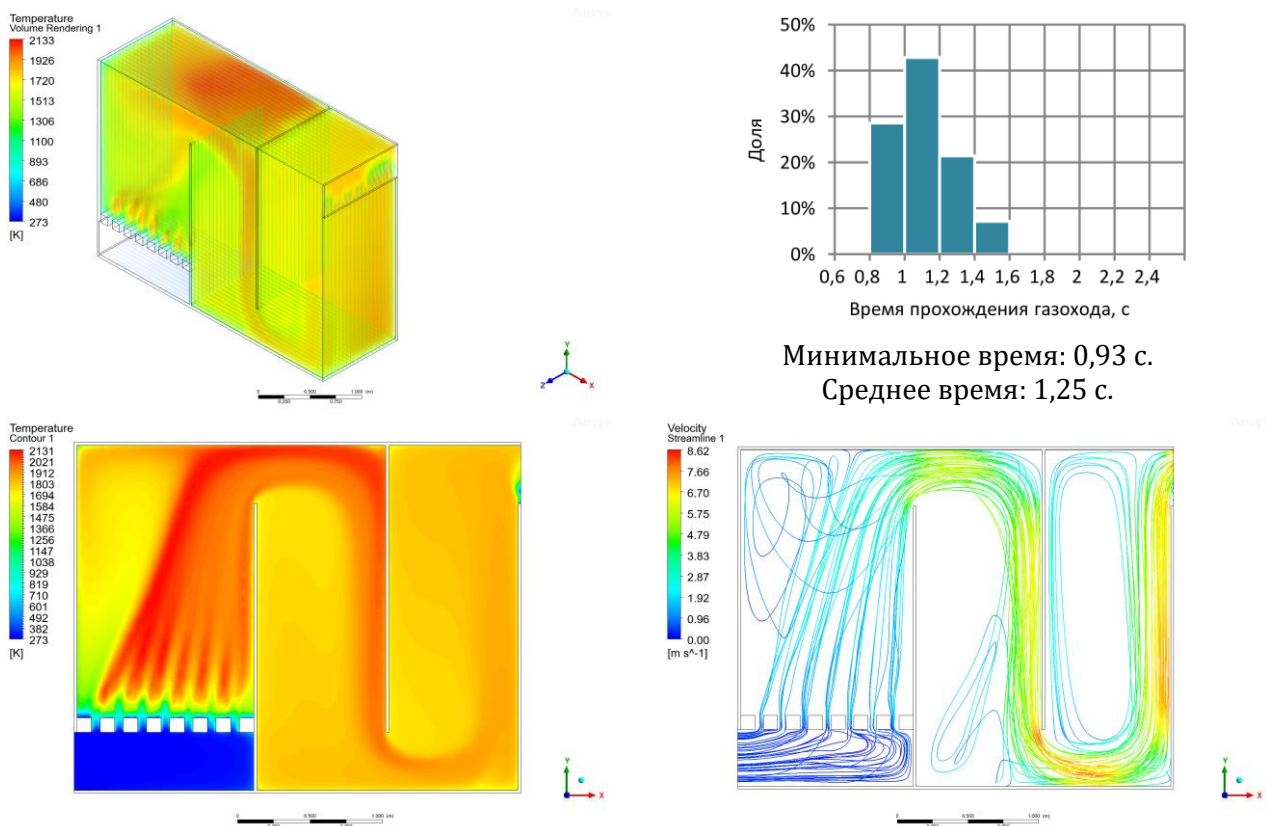


Рис. 14. Газоход разделен перегородкой, высота окон 400 мм

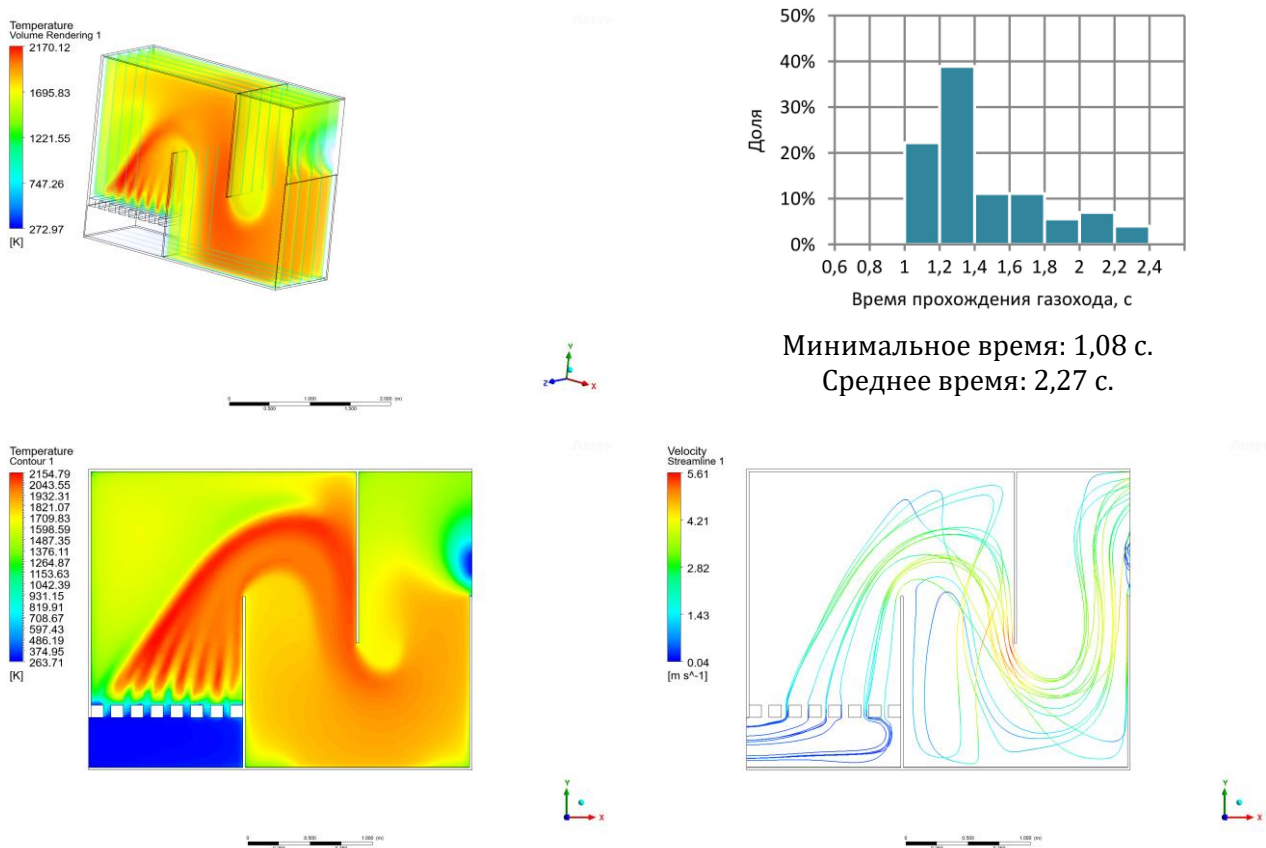


Рис. 15. Газоход разделен перегородкой, высота окон 1000 мм



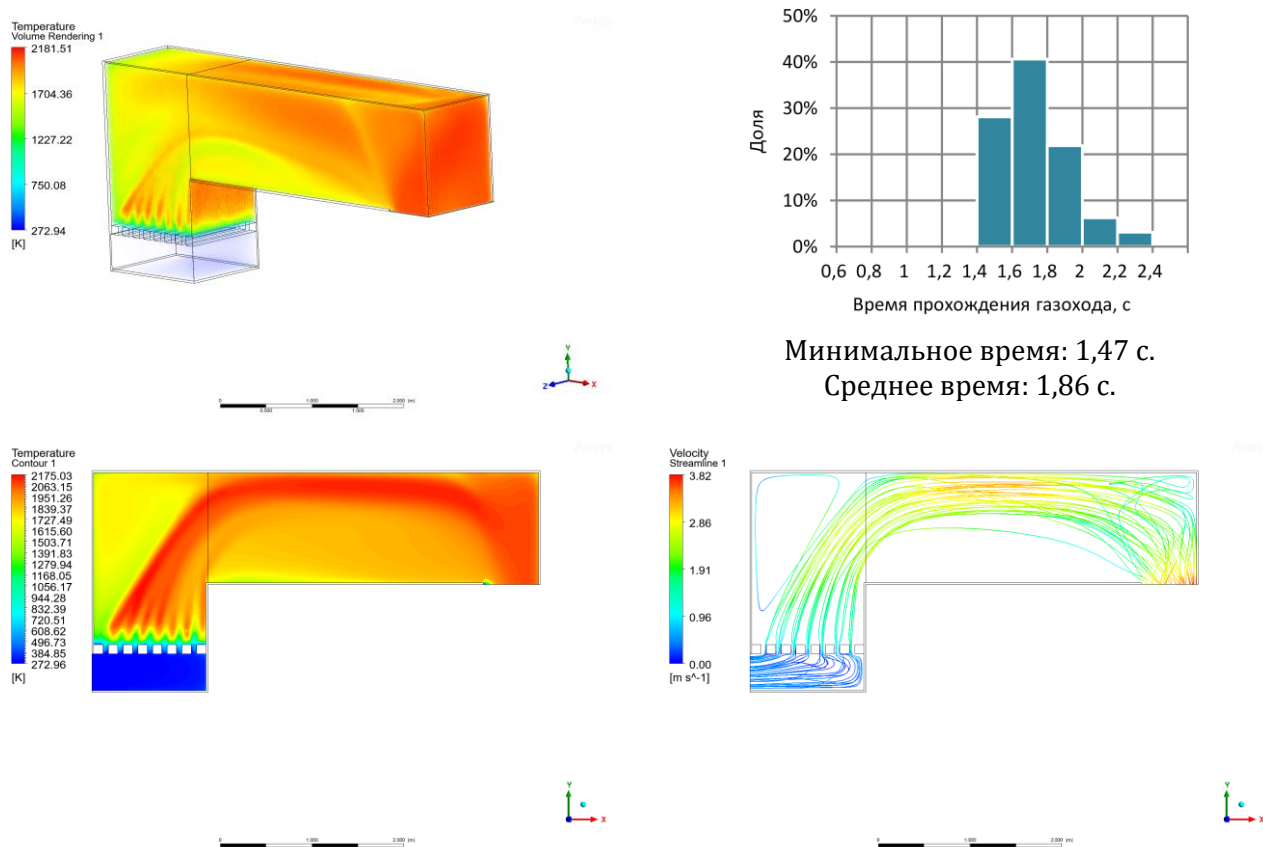


Рис. 16. Горизонтальный газоход сечением 1000×1000 мм и длиной 3600 мм

Для дальнейшей конструкторской проработки и поиска способов увеличения времени нахождения газа в газоходу до 2 с выбран вариант с горизонтальным газоходом.

Выводы

В результате анализа имеющихся конструктивных решений для водогрейных котлов малой мощности, в которых отходы сжигаются в неподвижном слое, выделены их основные недостатки: низкая температура сгорания; неэффективность передачи теплоты от продуктов сгорания к теплоносителю; загрязнение газоходов и поверхностей нагрева; неполное сгорание топлива; невозможность точного регулирования процесса горения, что приводит к образованию большого количества вредных выбросов и к снижению теплопроизводительности и КПД котла.

Для повышения эффективности сжигания отходов в патентных документах предлагается уменьшение отбора теплоты в топке; удлинение пути, которые проходят газы; устройства камеры дожига, работающей на газовом топливе; использование подогретого воздуха, многоступенчатое сжигание топлива.

Предлагается обустройство после топки котла газохода, в котором газы будут находиться более 2 с и будет происходить полное разрушение находящихся в продуктах сгорания отходов органических вредных веществ. Для определения времени прохождения и выбора оптимальной конструкции газохода было проведено численное моделирование движения газового потока с использованием разработанной численной модели, реализованной в программном комплексе ANSYS Fluent. Для обеспечения равномерности газового потока в газоходу рассмотрены варианты с разной высотой окна между топкой и газоходом, установка в газоходу разделительной перегородки для организации двухходового движения газов. Наилучшие результаты были получены для горизонтального газохода. Для дальнейшей конструкторской проработки и поиска



способов увеличения времени нахождения газа в газоходе до 2 с. был выбран наиболее эффективный вариант с горизонтальным газоходом.

Информация о финансировании

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. Gasification of hazelnut shells in a downdraft gasifier / M. Dogru, C.R. Howarth, G. Akay et al. // *Energy*. – 2002. – Vol. 27, Issue 5. – P. 415-427. DOI: [10.1016/S0360-5442\(01\)00094-9](https://doi.org/10.1016/S0360-5442(01)00094-9).
2. Knox A. An Overview of Incineration and EFW Technology as Applied to the Management of Municipal Solid Waste (MSW). – London (Canada): University of Western Ontario, 2005. – 74 p. URL: <http://www.durhamenvironmentwatch.org/Incinerator%20Files%20II/OverviewOfIncinerationAndEFWKnox.pdf>
3. 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, Issue 2. – P. 171-192. DOI: [10.1016/j.pecs.2005.02.002](https://doi.org/10.1016/j.pecs.2005.02.002).
4. Methods of choosing the optimal parameters for solid fuel combustion in stoker-fired boilers / H. Rusinowski, M. Szega, A. Szłek, R. Wilk // *Energy Conversion and Management*. – 2002. – Vol. 43, Issues 9-12. – P. 1363-1375. DOI: [10.1016/S0196-8904\(02\)00021-3](https://doi.org/10.1016/S0196-8904(02)00021-3)
5. Teke G., Julius F., Ghogomu N. Open waste burning in Cameroonian cities: an environmental impact analysis // *Environment Systems and Decisions*. – 2011. – Vol. 31. – P. 254-262. DOI: [10.1007/s10669-011-9330-0](https://doi.org/10.1007/s10669-011-9330-0).
6. Мирошникова О.В., Борисов И.Н. Использование различных горючих отходов в производстве цемента // *Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова*. – 2018. – № 7. – С. 71-76.
7. 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.
8. Bernard G., Lebas R., Demoulin F.X. , A 0D phenomenological model using detailed tabulated chemistry methods to predict diesel combustion heat release and pollutant emissions [Электронный ресурс] // SAE 2011 World Congress & Exhibition. SAE International: SAE Technical Papers, 2011. P. 2011-01-0847. DOI: [10.4271/2011-01-0847](https://doi.org/10.4271/2011-01-0847)
9. On the applicability of empirical heat transfer models for hydrogen combustion engines / J. Demuynck, M. De Paere, H. Huisseune et al. // *International Journal of Hydrogen Energy*. – 2011. – Vol. 36, Issue 1. – P. 975-984. DOI: [10.1016/j.ijhydene.2010.10.059](https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2010.10.059).
10. Comparative Analysis of Numerical Methods for Simulating N-Heptane Combustion with Steam Additive / A. V. Minakov, V.A. Kuznetsov, A.A. Dekterev et al. // *Energies*. – 2023. – Vol. 16, Issue 1. P. 25. DOI: [10.3390/en16010025](https://doi.org/10.3390/en16010025).
11. Котлы малой и средней мощности и топочные устройства. Каталог-справочник / Г.М. Вишерская, М.Н. Гуляев, В.Г. Иванова и др. – М.: НИИЭ ИНФОРМЭНЕРГОМАШ, 1983. – 200 с.
12. Котлы водогрейные Гефест [Сайт]: Энергостройдеталь – Бийский котельный завод (ООО «ЭСД-БИКЗ») / URL: <https://bikz.ru/catalog/seriya-gefest-0-4-3-5-mvt/> (дата обращения 20.01.2024 г.).

References

1. Dogru, M., Howarth, C. R., Akay, G., Keskinler, B., & Malik A. A. (2002). Gasification of hazelnut shells in a downdraft gasifier. *Energy*, 27(5), 415–427. [https://doi.org/10.1016/S0360-5442\(01\)00094-9](https://doi.org/10.1016/S0360-5442(01)00094-9).
2. Knox A. (2005). *An Overview of Incineration and EFW Technology as Applied to the Management of Municipal Solid Waste (MSW)*. University of Western Ontario. <http://www.durhamenvironmentwatch.org/Incinerator%20Files%20II/OverviewOfIncinerationAndEFWKnox.pdf>



3. 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>.
4. Rusinowski, H., Szega, M., Szlęk, A., & Wilk, R. (2002). Methods of choosing the optimal parameters for solid fuel combustion in stoker-fired boilers. *Energy Conversion and Management*, 43(9-12), 1363–1375. [http://dx.doi.org/10.1016/S0196-8904\(02\)00021-3](http://dx.doi.org/10.1016/S0196-8904(02)00021-3)
5. Teke, G., Julius, F., & Ghogomu, N. (2011) . Open waste burning in Cameroonian cities: an environmental impact analysis. *Environment Systems and Decisions*, 31, 254–262. <https://doi.org/10.1007/s10669-011-9330-0>.
6. Miroshnikova, O. V., & Borisov, I. N. (2018). Ispol'zovanie razlichny'x goryuchix otkhodov v proizvodstve cementa [Use of various combustible wastes in cement production]. *Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta im. V.G. Shuxova*, 7, 71-76. [In Russian]
7. Konovalov, V. M., Goncharov, A. A., Fedorov, A. S., Moshkov, I. P., & Gostev, N. S. (2022). Szhiganie RDF-topliva s ispol'zovanie kislorodnogo dut'ya [Combustion of RDF fuel using oxygen blast]. *Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta im. V.G. Shuxova*, 10, 79-86. [In Russian]
8. Bernard, G., Lebas, R., & Demoulin F. X. (2011). A 0D phenomenological model using detailed tabulated chemistry methods to predict diesel combustion heat release and pollutant emissions. In *Proc. SAE 2011 World Congress & Exhibition* (pp. 2011-01-0847). SAE Technical Papers. <http://dx.doi.org/10.4271/2011-01-0847>
9. Demuynck, J., De Paepe, M. , Huisseune, H., Sierens, R., Vancoillie, J., & Verhelst S. (2011). On the applicability of empirical heat transfer models for hydrogen combustion engines. *International Journal of Hydrogen Energy*, 36(1), 975–984. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2010.10.059>.
10. Minakov, A. V., Kuznetsov, V. A., Dekterev, A.A., Anufriev, I. S., Kopyev, E.P., & Alekseenko, S. V. (2023). Comparative Analysis of Numerical Methods for Simulating N-Heptane Combustion with Steam Additive. *Energies*, 16(1), 25. <https://doi.org/10.3390/en16010025>.
11. Visherskaia, G. M., Guliaev, M. N., Ivanova, V. G., Miller, V. I., Romanov, V. F., Sidorov, M. I., Chernova, V. V., & Shnaider Ia. B. (1983). *Kotly` maloj i srednej moshhnosti i topochny'e ustrojstva. Katalog-spravochnik* [Low and medium power boilers and combustion devices. Directory catalog]. NIIE`INFORME`NERGOMASH. [In Russian]
12. ESD – BIKZ, Ltd. (n.d.). *Kotly` vodogrejnny'e Gefest [Water heating boilers "Gefest"]*. Retrieved January 20, 2024 from <https://bikz.ru/catalog/seriya-gefest-0-4-3-5-mvt/>. [In Russian]

Сведения об авторах

Ахмед Ашраф Абдулла Ахмед, аспирант кафедры Энергетики теплотехнологии БГТУ им. В.Г. Шухова. E-mail: ashraf.a.ahmed@tu.edu.iq.

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

Рамазанов Рафшан Салманович, канд. техн. наук, доцент кафедры теплогазоснабжения и вентиляции БГТУ им. В.Г. Шухова. SPIN-код: [5513-1049](https://orcid.org/0000-0003-3616-4990).

Authors about

Ashraf Ahmed, postgraduate student of the Department of Energy Engineering of Heat Technologie, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Belgorod, Russia. E-mail: ashraf.a.ahmed@tu.edu.iq.

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

Rafshan Ramazanov, PhD of Tech. Sciences, associate Professor of the Department of Heat, Gas Supply and Ventilation, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Belgorod, Russia. ORCID: [0000-0003-3616-4990](https://orcid.org/0000-0003-3616-4990).

