

УДК 662.7

РЕЗУЛЬТАТЫ ОПЫТНО-ЭКСПЛУАТАЦИОННОГО СЖИГАНИЯ ВОДОУГОЛЬНОГО ТОПЛИВА В ВОДОГРЕЙНОМ КОТЛЕ МАЛОЙ МОЩНОСТИ

Алексеев Сергей Владимирович^{1,4},
aleks@itp.nsc.ru

Мальцев Леонид Иванович¹,
Maltzev@itp.nsc.ru

Богомолов Александр Романович¹,
barom@kuzstu.ru

Чернецкий Михаил Юрьевич¹,
micch@yandex.ru

Кравченко Игорь Вадимович²,
79537790844@yandex.ru

Кравченко Антон Игоревич¹,
79994501987@yandex.ru

Лапин Дмитрий Александрович³,
dmitry-skek@mail.ru

Шевырёв Сергей Александрович⁴,
shevyrev@tpu.ru

Лырщиков Сергей Юрьевич⁴,
lyrschikov@tpu.ru

¹ Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 1.

² ООО «Корпорация ПРОТЭН»,
Россия, 630068, г. Новосибирск, ул. Твардовского, 3.

³ Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева,
Россия, 650000, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28.

⁴ Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

Актуальность работы обусловлена значительными перспективами (экологическими, энергетическими, экономическими и другими) применения водоугольного топлива в качестве основного топлива для котельных агрегатов различной мощности.

Цель работы: исследование тепловых и экологических характеристик работы котла при различных режимах, обеспечивающих как твердое, так и жидкое шлакоудаление. Изучение тепловых характеристик предполагает экспериментальное определение распределения температур в топке котла для дальнейшего построения математических моделей горения водоугольного топлива и поиска оптимальных режимных параметров.

Методы включают экспериментальные исследования сжигания на опытно-промышленном образце водогрейного котла водоугольного топлива, приготовленного на основе флотационных продуктов (кек) после обогащения каменного угля марки «К». Исследования проводились при помощи различных (термопары, пирометр, газоанализатор) приборов с низкой погрешностью измерения.

Результаты. Получены экспериментальные данные по распределению температур в топке котла для дальнейшего моделирования процесса горения водоугольного топлива; проведены измерения состава дымового газа для различных режимов работы; выполнен анализ работы котла и полученных данных относительно исходных характеристик используемого топлива.

Выводы. Выполнены опытно-промышленные испытания перспективной конструкции водогрейного котла, обеспечивающего работу как в режиме твердого, так и жидкого шлакоудаления. Получены первичные данные для моделирования тепломассообменных процессов горения водоугольного топлива, приготовленного на основе отходов обогащения каменного угля. Полученные результаты по измерениям вредных выбросов дымового газа свидетельствуют о перспективах использования водоугольного топлива в качестве альтернативы для традиционных видов топлива, в частности угля и мазута.

Ключевые слова:

Водогрейный котел, водоугольное топливо, вредные выбросы, пневматическая форсунка, циклонная топка, факельно-капельное сжигание, отходы углеобогащения.

Введение

С целью развития научно-технического потенциала Российской Федерации и модернизации экономики в 2012 г. была принята программа «Развитие науки и технологий» на 2013–2020 гг. [1]. Одним из направлений программы в рамках модернизации экономики является создание научно-технических и технологических решений в области энерго- и ресурсосберегающих технологий на уровне мировых разработок. Перспективными направлениями в данной области как для «большой», так и для «малой» энергетики считается повышение КПД энергоустановок, развитие потенциала использования нетрадиционных и возобновляемых источников энергии, обеспечение безопасного производства и распределения тепловой энергии, снижение экологической нагрузки на окружающую среду.

К 2030 г. в мире планируется потребление более 9 млрд т угля [2] для производства тепловой и электрической энергии. За последние 30 лет потребление человечеством электрической и тепловой энергии увеличилось почти в 2,6 раза. При этом до 87 % антропогенных выбросов по CO_2 приходится на ископаемое топливо [3]. В настоящее время принято считать, что увеличение количества выбросов CO_2 является основным источником повышения средней температуры на Земле и усиления парникового эффекта, причем до 40 % выбросов приходится на электростанции, среди которых наибольший вред оказывают угольные [4].

В мире для энергетики представляет интерес уголь со стабильным качеством и заранее определенными значениями теплотехнических и химических показателей [5]. Например, при снижении зольности углей на 1 % теплота их сгорания увеличивается на 68–78 ккал/кг. При уменьшении влажности угля на 1 % (и постоянной зольности) теплота сгорания возрастает в пределах 53–76 ккал/кг [6]. Это также относится и к не топливному направлению использования угля – коксование, газогенераторные процессы, производство активированного угля и другим.

В связи с этим существенно возросла роль процессов обогащения твердого топлива на месте его добычи. Однако наряду с товарным углем при обогащении неизбежно образуются побочные продукты, среди которых наибольший интерес для энергетики представляют высокзолые (до 50–60 %) и высоковлажные (до 50 %) отходы, содержащие горючую основу в необходимом количестве для экономически обоснованного их использования в различных энергоустановках [7]. К таким отходам относятся кеки (обогащение флотацией). На их основе могут быть приготовлены различные водоугольные (ВУТ) и органоводоугольные топлива (ОВУТ), которые в настоящее время рассматриваются в качестве эффективного топлива для котельных установок.

Применение ВУТ для производства тепловой энергии имеет ряд экономических и экологических преимуществ [8, 9]. Экономические преиму-

щества применения угля в качестве топлива для котлов малой энергетики в виде ВУТ неоднократно упоминались в [10–13]. К ним относится снижение себестоимости производства тепловой энергии при замене дорогостоящих топлив (газа и мазута) на ВУТ. При приготовлении ВУТ из отходов углеобогащения также экономически оправдано замещение каменного угля на ВУТ, особенно учитывая низкое качество поставляемого угля для нужд коммунальной энергетики [12]. В [14] отмечено, что слоевое сжигание мелкого угля приводит к его перерасходу на 30–40 %. Одновременно при этом происходит загрязнение атмосферы.

В качестве экологических выгод применения ВУТ, приготовленного из отходов углеобогащения, можно выделить прямые и косвенные. Косвенной выгодой можно считать вовлечение в хозяйственный оборот отходов производства обогатительных фабрик, представляющих собой фильтр-кеки, содержащие тонкодисперсный уголь, который в настоящее время не используется и складывается в отвалах, негативно влияя на экологическую обстановку угледобывающих регионов. Количество сбросов отдельных фабрик, в зависимости от их производительности, составляет от 130 до 350 тыс. т/год при средней зольности отходов от 26 до 60 % [14]. Кроме того, при транспортировке данных кеков до места сжигания не образуется вредных выбросов в атмосферу в виде угольной пыли, а зола, образующаяся при сжигании ВУТ, является ценным сырьем для производства строительных материалов, и может быть активно вовлечена в хозяйственный оборот [15].

К прямому влиянию на снижение экологического воздействия на окружающую среду при сжигании ВУТ можно отнести более полное сжигание углерода топлива по сравнению с углем и снижение вредных газообразных выбросов. Если результаты о полноте сжигания угля в форме водоугольной суспензии (ВУС) широко известны, то реальные практические данные по выбросам от сжигания ВУТ как на крупных котлах, так и на котлах малой и средней энергетики в публичном доступе представлены в недостаточном объеме [16].

Институтом теплофизики СО РАН совместно с ЗАО «Корпорация ПРОТЭН» разработан оригинальный водогрейный котел, работающий на водоугольном топливе. Он включает циклонную вертикальную топочную камеру с подачей топлива и дутьевого воздуха в ее верхней части и отбором горячих газов в нижней части, оригинальные пневматические форсунки для распыливания ВУТ. По договоренности с руководством ОАО «СКЭЖ» котел смонтирован силами и за счет разработчиков на котельной № 7 ОАО «СКЭЖ», расположенной в Березовском городском округе Кемеровской области в поселке станции Барзас.

В данной работе представлены практические результаты по технологии сжигания на этом котле низкосортных углей в виде ВУС. Отопительно-бытовой температурный график соответствует темпе-

ратурам теплоносителя в системе теплоснабжения – 95–70 °С. Система теплоснабжения является зависимой и открытой. В процессе эксплуатации котла производилось измерение концентраций вредных выбросов в уходящих дымовых газах.

Характерные особенности ВУТ, а именно: наличие большого количества инертной жидкой фазы и минеральных компонентов в частицах крупностью от 0 до 350 мкм, а также сравнительно низкая теплота сгорания, требуют соответствующих условий для надежного воспламенения и устойчивого эффективного горения ВУТ в топках котлов [3]. Конструкция котла с циклонной топкой, выполняющей роль муфеля, позволяет поддерживать высокую температуру, что обеспечивает устойчивую работу котла [17].

Цель работы – исследовать тепловые и экологические характеристики водогрейного котла, работающего на ВУТ; получить данные по распределению температур по объему топki при различных тепловых режимах работы, необходимых для моделирования тепло-массообменных процессов горения ВУТ в вихревом потоке.

Принцип работы котла, методика измерения параметров процесса

Основные конструктивные особенности исследованного котла, а также схема измерений температуры топчного объема, расходных параметров топлива, окислителя и дымового газа представлены на рис. 1–3.

Котел (рис. 1) обеспечивает нагрев сетевой воды в восходящем газоходе конвективной части. Для обеспечения высоких экономических характеристик работы котла (малые габариты при высоком тепловом напряжении топчного объема) в его конструкции предусмотрено наличие воздухоподогревателя и системы жидкого шлакоудаления. Номинальная мощность котла составляет 1 МВт.

Топливо в топку подается пневматической форсункой [18, 19] (поз. 2, рис. 2), конструкция которой благодаря распылу топлива вне тела форсунки за счет энергии сжатого воздуха и подачи топлива по центральному каналу, имеющему относительно большой диаметр, а значит обеспечивающему низкую скорость движения топлива, имеет хорошие показатели надежности. Данная схема подачи и

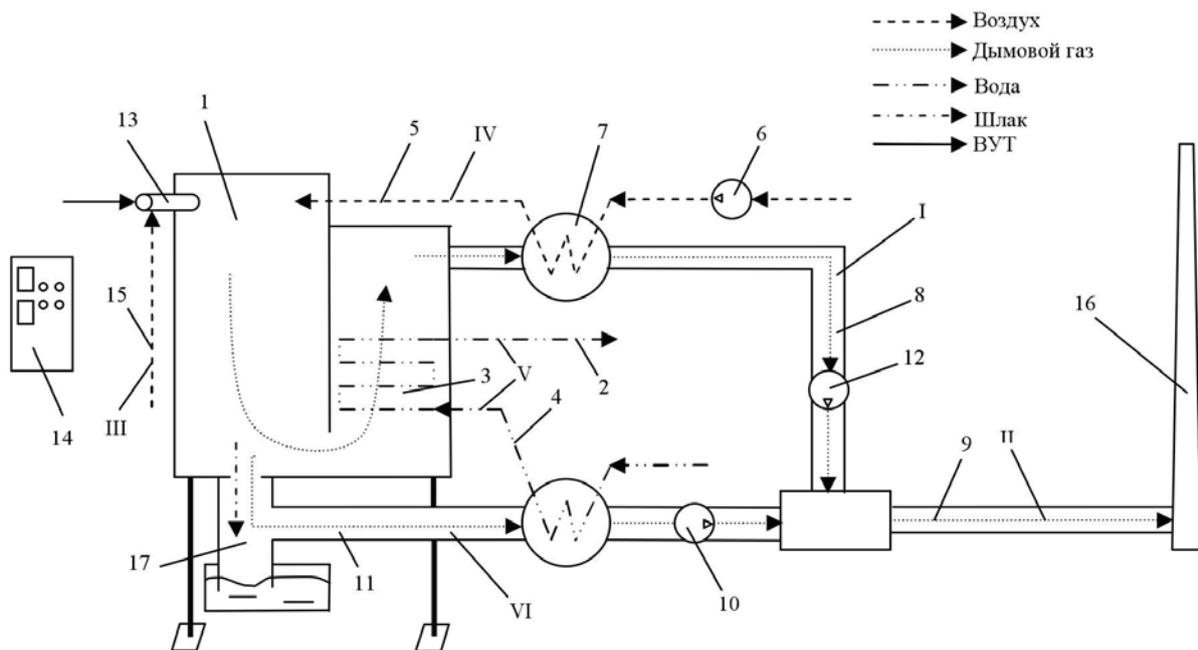


Рис. 1. Компоновка водогрейного котла: 1 – топка котла; 2 – трубопровод воды из котла; 3 – конвективная часть; 4 – трубопровод воды в котел; 5 – газоход для подачи воздуха в котел; 6 – дутьевой вентилятор; 7 – воздухоподогреватель; 8 – короб для измерения состава дымового газа; 9 – общий газоход дымовых газов; 10 – дымосос системы шлакозолоудаления (ШЗУ); 11 – газоход ШЗУ; 12 – дымосос основной; 13 – форсунка; 14 – щит управления; 15 – газоход для измерения расхода сжатого воздуха на распыл ВУТ; 16 – дымовая труба; 17 – выход шлака. Точки измерений: I – состав и температура дымового газа; II – расход дымового газа; III – расход сжатого воздуха на распыл топлива; IV – расход и температура дутьевого воздуха для горения топлива; V – расход и температура воды на входе и выходе из котла; VI – температура и расход газа ШЗУ

Fig. 1. Arrangement of water-heating boiler unit: 1 is the boiler furnace; 2 is the water pipe from boiler; 3 is the convective part; 4 is the water pipe to boiler; 5 is the gas pipe for supplying air to boiler; 6 is the blowing fan; 7 is the air heater; 8 is the box for measuring the flue gas composition; 9 is the total pipe for flue gases; 10 is the exhauster of the system of slag and ash removal (SAR); 11 is the gas pipe of SAR; 12 is the main exhauster; 13 is the nozzle; 14 is the control panel; 15 is the gas pipe to measure the flow of compressed air for coal-water fuel (CWF) spraying; 16 is the chimney; 17 is the slag output. Measuring points: I is the flue gas composition and temperature; II is the flue gas flow rate; III is the compressed air consumption for fuel atomization; IV is the flow and temperature of blast air for fuel combustion; V is the flow rate and water temperature at the inlet and outlet of boiler; VI is the gas temperature and flow for SAR

распыла ВУТ позволяет снизить абразивный износ деталей форсунки при взаимодействии с абразивными компонентами топлива.

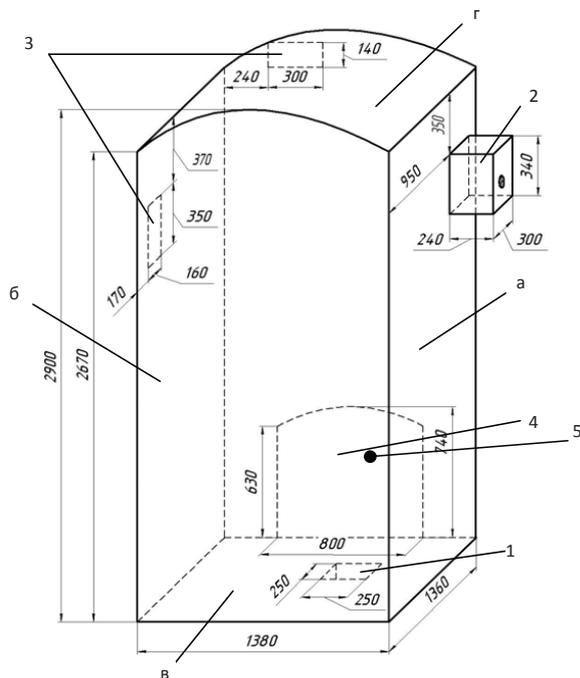


Рис. 2. Схема топки котла (размеры в мм): а) фронтальная стенка топки; б) задняя стенка топки; в, г) боковые стенки топки. 1 – летка; 2 – короб форсунки; 3 – коробка для ввода воздуха из дутьевого вентилятора; 4 – газоход для вывода дымовых газов из топки котла в конвективную часть котла; 5 – место измерения интегральной температуры газов (точка № 10 табл. 7, 8)

Fig. 2. Scheme of boiler furnace (in mm): a) frontal wall of furnace; b) back wall of furnace; c, d) side walls of furnace. 1 is the tap hole; 2 is the nozzle box; 3 are the boxes for air inlet from blowing fan; 4 is the gas pipe for flue gas removal from boiler furnace to convective part; 5 is the measurement point for integral gas temperature (point no. 10 Tables 7, 8)

Исследуемый водогрейный котел характеризуется наличием неэкранированной топки (рис. 2), обмуровка которой состоит из последовательно расположенных слоев огнеупорного кирпича, красного кирпича, теплоизоляции и покрывного материала. В топке имеются два ввода из газоходов для подачи дутьевого воздуха (поз. 3, рис. 2), которые обеспечивают вихревое движение потока смеси топливо–окислитель и позволяют интенсифицировать тепло-массообменные процессы горения. Форсунка для распыла ВУТ располагается на фронтальной стенке топки и направлена в сторону воздушных коробов, расположенных в задней и правой боковой стенках топки. При распыле водоугольного топлива его частицы смешиваются с воздухом, поступающим из воздуховода в правой боковой стенке топки, и движутся далее по направлению к воздушному коробу, расположенному на задней стенке, где подхватываются потоком воздуха. В топке возникает пристеночное движение твердых частиц топлива, что позволяет увеличить

время пребывания частиц топлива в активной зоне горения.

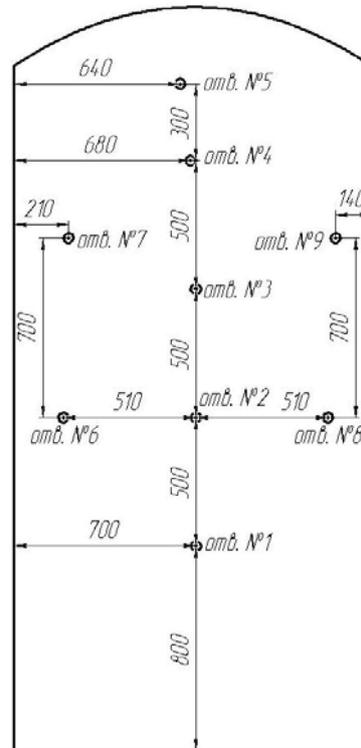


Рис. 3. Схема измерения температур на левой боковой стенке котла (вид изнутри топки, размеры в мм)

Fig. 3. Scheme of temperature measurements on the left side wall of the boiler (inner view of the furnace, in mm)

Подовая часть топки выполнена из огнеупорного кирпича и содержит летку размером 250×250 мм. Отсутствие поверхностей нагрева в топочной части котла способствует адиабатному процессу горения и достижению температуры в топке выше 1300 °С при расчетных режимах работы котла. При таких температурах обеспечивается переход минеральной части топлива в жидкое состояние и ее удаление через летку (поз. 1, рис. 2). Для этого в нижней части котла под топкой имеется водяная ванна, в которую попадают расплавленные продукты золы и шлака и гранулируются. Для удаления золы и шлака из ванны предусмотрено механическое устройство на основе шнека с электроприводом.

Для того чтобы обеспечить устойчивый режим работы котла с жидким шлакоудалением, предусмотрен дымосос ШЗУ 7 (рис. 1), который позволяет через летку в топке котла выводить часть дымовых газов. Это предотвращает затвердевание шлака в летке и вертикальном коробе, по которому движется расплав в приемную ванну. Количество дымовых газов, которое проходит через дымосос ШЗУ, регулируется частотным преобразователем. Тепло, образующееся при парообразовании воды во время охлаждения и грануляции шлака, а также теплота дымовых газов утилизируются в теплообменнике. В нем происходит подогрев обратной сетевой воды, поступающей из системы теплоснабжения поселка.

Дымовые газы из циклонной топки удаляются через окно, расположенное в нижней части боковой стенки топки (поз. 4, рис. 2), и далее отдают тепловую энергию теплоносителю в конвективной части котла.

Прогрев топки при розжиге котла из холодного состояния осуществляется подачей через пневматическую форсунку отработанного масла. Розжиг масла производится газовой горелкой, работающей на сжиженном углеводородном газе. После розжига моторного масла температура в топочной части начинает резко повышаться и при достижении 800 °С начинается постепенная подача ВУТ совместно с маслом. В течение 30 минут совместного сжигания масла и ВУТ постепенно снижается количество подаваемого в топку котла масла и увеличивается подача ВУТ, до полного прекращения подачи масла. Время пуска из холодного состояния до рабочего режима работы котла составляет не более 2–3 часов.

Для измерения температуры в топочном объеме предусмотрено 9 отверстий в левой боковой стенке (рис. 3) топки. Через данные отверстия осуществляется ввод датчиков температуры и замер температуры в отдельных точках топочного объема.

Характеристика топлива

Водоугольное топливо приготовлено на основе кека ОФ «Северная» и представляет собой смесь угля марки «К», воды (до 50 %) и флокулянта, применяемого в технологии обогащательной фабрики. Наличие флокулянта в кеке, после его разбавления водой, негативно сказывается на текучести ВУТ, так как он способствует коагуляции и образованию сгустков топлива, приводящих к забиванию канала подачи топлива в форсунке. Решение этой проблемы достигается добавлением в кек реагента-пластификатора в количестве около 0,3 % от общей массы ВУТ и/или путем гомогенизации топлива с помощью его кавитационной обработки на гидродинамическом роторном генераторе кавитации. В качестве реагента-пластификатора применен ХР-20N (хромлигнит) компании M-I Drilling Fluids. Технический и элементный анализ кека и химический анализ золы представлен в табл. 1–3.

При опытно-промышленном испытании работы котла контроль и регулирование всех процессов осуществлялись в ручном режиме. Имеется возможность регулировать частотными преобразователями расход воздуха через дутьевой вентилятор, расход дымовых газов через основной дымосос и дымосос ШЗУ, расход водоугольного топлива. Контроль температуры в зоне горения при розжиге котла контролируется термомпарами типа ХА, расположенными в чехле из нержавеющей стали и подключенными к вторичным приборам «ОВЕН». При температуре внутри топки выше 1100 °С измерения проводили термомпарой типа ПР. Погрешность измерения температур составляла не более ±1,5 %. Температура в точке № 10 (рис. 2) соот-

ветствует интегральным значениям теплового потока дымовых газов на выходе из топки котла и входе в конвективную часть. Значение данной температуры получено после усреднения нескольких измерений в различных точках сечения выходного окна.

Таблица 1. Результаты технического анализа кека

Table 1. Results of cake technical analysis

Топливо Fuel	W	A ^d	V ^{daf}	Q _{с,в} ^d	Q'
	%			ккал/кг	
Кек «К», состав № 1 Cake «К», composition № 1	56,05	18,19	30,66	6692	2530
Кек «К», состав № 2 Cake «К», composition № 2	50,86	22,41	28,86	6439	2778
Кек «К», состав № 3 Cake «К», composition № 3	50,06	21,50	28,76	6570	2804

Таблица 2. Результаты элементного анализа кека

Table 2. Results of cake elemental analysis

Топливо Fuel	C ^{daf}	H ^{daf}	N ^{daf}	S _t ^d
	%			
Кек «К», состав № 1 Cake «К», composition № 1	85,05	4,845	2,51	0,570
Кек «К», состав № 2 Cake «К», composition № 2	83,62	4,397	0,01	0,522
Кек «К», состав № 3 Cake «К», composition № 3	82,80	4,289	0,01	0,493

Таблица 3. Элементный анализ золы фильтр-кека

Table 3. Elemental analysis of filter-cake ash

Топливо Fuel	Массовая доля компонента золы, % Mass fraction of ash component, %									
	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	K ₂ O	CaO	TiO ₂	Fe ₂ O ₃
Кек «К» Cake «К»	1,76	3,03	19,76	57,11	0,25	2,75	4,09	3,03	1,10	7,08

Расходы воздуха и дымового газа были определены с помощью стандартизованной трубки Пито–Прандтля и известных сечений труб и коробов. Расход воздуха на распыл водоугольного топлива определен с помощью счетчика сжатого воздуха KRONNE H250. Погрешность измерения составляла не более ±2,5 % от измеряемого значения.

Расход воды, циркулирующей в котле, измеряли портативным ультразвуковым расходомером Portaflow 220. Погрешность измерений составляла не более ±3 % от измеряемой величины. Температуру сетевой воды определяли относительно показаний инфракрасного пирометра С-300 «Фаворит», внесенного в государственный реестр средств измерений (№ 19642–03), с помощью которого измеряли температуру поверхности трубопровода. Погрешность измерения составляла не более ±1,5 % от измеряемой величины.

Результаты измерений и обсуждение

На начальном этапе была исследована динамика изменения характеристик котла в течение началь-

ных 300 минут работы котла, в зависимости от вида и расхода топлива и времени. В этом эксперименте температура измерялась только датчиком № 1 в районе расположения форсунки (рис. 2). На рис. 4, а, б, в, в последовательном порядке показан характер изменения температуры в топке и содержания CO и O₂ в отходящих газах. Здесь можно выделить три этапа. На первом этапе (первые 30 мин.) в топку поступало только печное топливо с постоянным расходом 100 кг/ч. Как видно, температура очень быстро поднялась до высоких значений (1000–1100 °С). Содержание CO в отходящих газах (рис. 4, б) сначала приняло очень высокое значение (n=3500 ppm), но потом стало плавно уменьшаться, а содержание кислорода (рис. 4, в) практически сразу установилось близким к постоянному значению, что говорит о достаточно надежном выгорании печного топлива даже в холодной топке. После 30 мин работы котла дополнительно к печному топливу добавлялся ВУТ. В течение следующих 30 мин. расход ВУТ оставался постоянным (340 кг/ч), а расход печного топлива поэтапно (с шагом в 10 мин) уменьшался сначала до 40 кг/ч, затем до 20 кг/час, и далее до нуля. За это время температура в топке (датчик № 1) продолжала неуклонно подниматься, содержание CO в отходящих газах, сначала резко подскочив до высоких значений (3500 ppm), потом опустилось до 180 ppm, а содержание кислорода, тоже несколько увеличившись, затем опустилось до 8,6 %. Через один час после начала работы котел переведен полностью на ВУТ. После перевода на ВУТ температура T1 упала на 200 градусов, а затем медленно стала увеличиваться и только через полтора часа достигла устойчивого значения в 1100 градусов. Содержание CO снова резко подскочило, а затем за 25 мин уменьшилось до 12 ppm и на этом остановилось. Содержание кислорода на третьем этапе запуска котла оставалось практически постоянным, равным 8,5 %.

После полутора часов работы котла от начала запуска, в течение следующих двух часов при постоянном расходе топлива в 340 кг/час характеристики котла по T1, CO, и O₂ стабилизировались.

По достижении температуры T₂=1300–1400 °С расплавленные шлаковые массы сползают через летку в днище камеры сжигания в специальную емкость с водой и затем, после их затвердевания, они удалялись механическим путем.

Таким образом, эксперименты показали, что примерно в течение полутора часов данный котел может быть запущен из холодного состояния в рабочем режиме.

В последующих испытаниях котла с подробным измерением температурных полей в топке и других параметров работы котла запуск котла осуществлялся примерно по той же схеме.

Измерения состава уходящих дымовых газов за котлом производились для шести режимов работы при различных расходах ВУТ газоанализатором Testo 350 XL, включенным в государственный реестр средств измерений.

Как было сказано выше, воздух для поддержания процесса горения подавался как через форсунку, так и дутьевым вентилятором в верхнюю часть топки правой боковой и задней стенок. Массовые расходы окислителя через форсунку и дутьевым вентилятором, а также общий расход приведены в табл. 4.

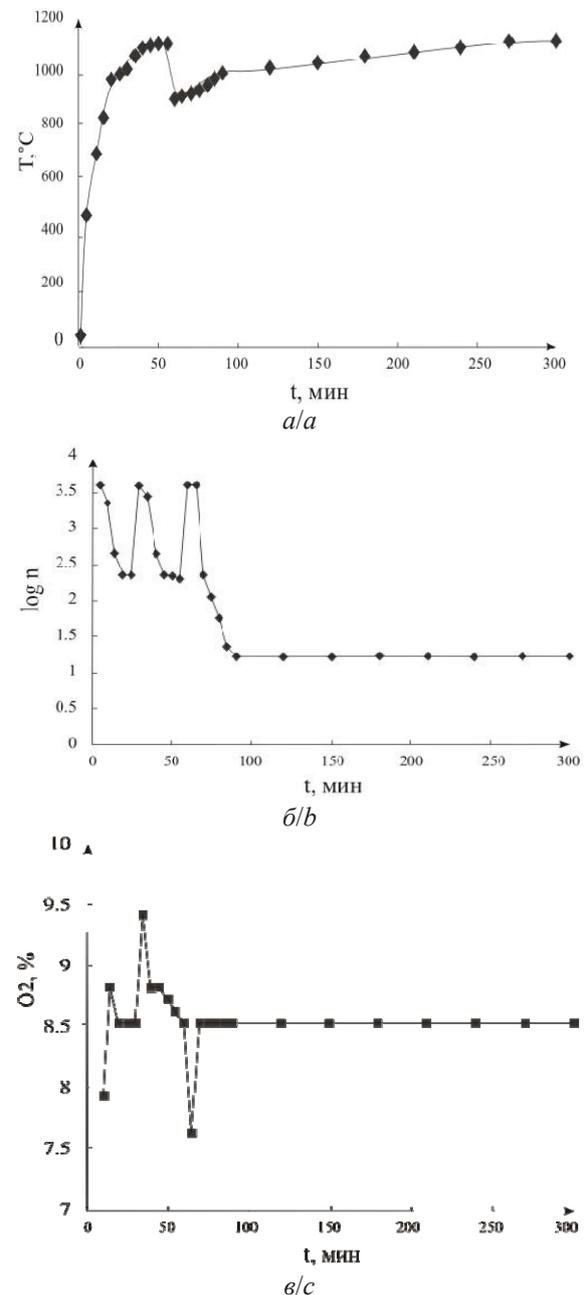


Рис. 4. а) динамика температурного режима в топке вблизи форсунки (термопара T1); б) изменение содержания CO в отходящих газах на стадии запуска котла; в) изменение содержания кислорода в отходящих газах на стадии запуска котла

Fig. 4. а) dynamics of temperature regime in the furnace near the nozzle (thermocouple T1); б) change in CO content in flue gases at the stage of boiler launch; в) change in oxygen content in flue gases at the stage of boiler launch

Таблица 4. Расходные характеристики топлива и окислителя
Table 4. Metering characteristics of fuel and oxidizer

№ опыта Experiment no.	Расход воздуха через форсунку G_f Air consumption through nozzle G_f	Расход воздуха через воздушные короба G_d Air consumption through air ducts G_d	Общий расход воздуха G_o Total air consumption G_o	Расход топлива G_t Fuel consumption G_t
	кг/с (н.у.)/kg/s (н.у.)			
1	0,045	0,168	0,213	0,086
2	0,045	0,336	0,381	0,086
3	0,045	0,324	0,369	0,098
4	0,045	0,384	0,429	0,109
5	0,045	0,252	0,297	0,12
6	0,045	0,3	0,345	0,12

Таблица 5. Теоретический расход воздуха
Table 5. Theoretical air flow rate

Состав Composition № 1	Состав Composition № 2	Состав Composition № 3
2,23 кг воздуха/кг топлива kg of air/kg of fuel	2,21 кг воздуха/кг топлива kg of air/kg of fuel	2,31 кг воздуха/кг топлива kg of air/kg of fuel

Теоретический расход воздуха на горение 1 кг топлива для различных составов, рассчитанный по формуле (1), приведен в табл. 5, при н.у.

$$V_0 = \frac{(8/3)C^r + 8H^r + S_o^r - O^r}{100\rho_0 y_0}, \quad (1)$$

где C^r , H^r , S_o^r , O^r – процентное содержание углерода, водорода, серы и кислорода в топливе в пересчете

на рабочее состояние; ρ_0 – плотность кислорода при нормальных условиях; y_0 – объемная доля кислорода в воздухе.

Результаты измерений состава уходящих газов, температуры в топке, недожог углерода в шлаке и другие параметры работы котла сведены в табл. 6.

Для определения режима стабильного жидкого шлакозолоудаления был рассчитан коэффициент плавления золы. Коэффициент плавления золы K_{pl} характеризует интегральную температуру плавления минеральных компонентов топлива. По данным химического анализа золы (табл. 3) был рассчитан коэффициент плавления золы K_{pl} для ВУТ по формуле [20]:

$$K_{pl} = \frac{SiO_2 + Al_2O_3}{CaO + MgO + Fe_2O_3},$$

по величине которого производят оценку характера плавления золы: чем больше значение K_{pl} , тем больше тугоплавкость золы. Как, применяемый в качестве основного компонента ВУТ, имеет коэффициент плавления $K_{pl}=5,85$. Таким образом, как следует из [20], температура начала жидкоплавкого состояния для минеральной части используемого ВУТ находится в пределах 1320–1350 °С. Представленные аналитические результаты достаточно хорошо согласуются с экспериментальными данными по определению плавкостных характеристик золы (табл. 7). В связи с этим режим жидкого шлакоудаления используемого в исследованиях ВУТ возможен при температурах в топке выше 1330 °С.

Таблица 6. Основные параметры процесса при различных режимах работы котла

Table 6. The main parameters of the process under different operation boiler regimes

Параметр Parameter	Состав/Composition					
	№ 1		№ 2		№ 3	
	Опыт/Experiment					
	1	2	3	4	5	6
Расход топлива G_t , кг/с (кг/ч)/Fuel consumption kg/s (kg/h)	0,086 (309,6)	0,097 (349,2)	0,109 (392,4)	0,12 (432)		
Коэффициент избытка окислителя, α /Excess oxidizer coefficient	1,12	2,00	1,70	1,78	1,07	1,25
CO ₂ , %	7,38	7,22	7,23	6,20	10,75	9,7
CO, ппм/ppm	65	35	61	139	245	220
H ₂ , ппм/ppm	9	6	13	23	38	39
NO, ппм/ppm	85	85	83	77	98	104
NO ₂ , ппм/ppm	0	0,41	0,6	0,2	1,1	0,4
ΣNO_x , ппм/ppm	85	85,41	83,6	77,2	99,1	104,4
SO ₂ , ппм/ppm	97	34	62,0	110	88	154
Температура дымового газа после конвективной части T_g , °С Temperature of flue gas after convective part T_g , °С	282,1	265,4	309	284,4	305,2	281
Температура дымовых газов из топки котла/ ср. по ТП., °С Furnace flue gas temperature/average for thermocouple	–/1152	1137/1106	1134/1121	1225/1139	1378/–	1412/–
Доля горючих веществ в шлаке C_{ost} , % Share of combustible substances in slag	43,35	19,11	6,81	9,04	2,08	1,13
Тепловая напряженность на ед. площади сечения q_f , МВт/м ² Thermal tension per unit cross-sectional area MW/m ²	0,465	0,510	0,576	0,647	0,719	0,719

Таблица 7. Результаты анализа плавкостных характеристик золы

Table 7. Results of analysis of ash melting characteristics

Определяемый показатель Determined indicator	Нормативный документ Normative document	Результат анализа Analysis result
Температура деформации DT_{cp} Deformation temperature	°C ГОСТ/SS 32978–2014	1223
Температура сферы ST_{cp} Sphere temperature		1258
Температура полусферы HT_{cp} Hemisphere temperature		1263
Температура растекания FT_{cp} Flow temperature		1330

По данным табл. 6 первые четыре промышленных испытания работы котла были проведены при интегральной температуре на выходе из топки до 1320 °С, а пятый и шестой опыт проведены при температуре выше 1320 °С.

Данные табл. 6 показывают, что коэффициент избытка воздуха изменялся для режима твердого шлакоудаления в пределах 1,1–2,0, а для режима жидкого удаления – 1,1–1,25. Для имеющихся данных режима твердого шлакоудаления интегральная температура на выходе из топки удовлетворительно коррелирует с приведенной тепловой напряженностью (тепловая напряженность, рассчитанная на теоретический расход окислителя, умноженная на коэффициент избытка воздуха).

Для режима жидкого шлакоудаления интегральная температура также прямо пропорционально зависит от приведенной тепловой напряженности в топке.

Можно отметить, что концентрация диоксида углерода в дымовых газах, измеренная после конвективной части газоанализатором Testo 350 XL, при температурах в топке до 1320 °С имела значения от 6,2 до 7,4 %, а при температурах выше 1320 °С принимала повышенные значения: от 9,7 до 10,75 %. Анализ показал, что концентрация диоксида углерода в выбрасываемых дымовых газах не превышает содержания CO_2 в дымовых газах энергетических котлов с жидким шлакоудалением (8–12 %).

При жидком шлакоудалении недожог в шлаке составил около 2 %, а при температурах менее 1320 °С в опытах № 1–4 остаток углерода в шлакозольных отходах изменялся довольно в широком диапазоне: от 6,81 до 43,35. Опыт № 1 был проведен с влажностью ВУТ 56 %, а опыты № 2–4 – с влажностью 51 %. Средняя температура в топке по показаниям термопар в этих 4-х опытах была практически одинаковой – 1106–1152 °С, т. е. отличие составляло около 4 %. Высокий остаток углерода в шлакозольных отходах в опыте № 1, вероятно, связан с высокой влажностью ВУТ и низким коэффициентом избытка ($\alpha=1,12$) воздуха. Второй опыт был проведен при таком же расходе, как в первом,

но с большей теплотворной способностью ВУТ на рабочее состояние. Незначительно увеличенная тепловая напряженность положительно повлияла на снижение недожога в шлаке до 19 %. Третий и четвертый опыты были проведены при большей тепловой напряженности 0,6–0,65 МВт/м², и это сказалось на значительном снижении недожога шлакозольных отходов до 6–9 %.

Отметим, что исследуемый котел, работающий в режиме жидкого шлакоудаления, выделяет шлакозольные отходы с содержанием углерода, сопоставимым с энергостанциями большой мощности (МВт). Авторами получены данные по недожогу в расплавленных шлаках некоторых энергетических станций Кузбасса, которые варьируются в пределах от 0,2 до 4,8 %, а в образцах золы уноса после хвостового теплообменника 2,6–4,9 %.

Из табл. 6 следует (опыт № 2–4), что интегральная температура дымовых газов на выходе из топки котла в конвективную часть выше, чем температура в объеме котла. Это объясняется тем, что в подовой части котла происходит интенсивное горения угольных частиц и размягченного шлака с большим остатком углерода. При этом теплота горения углерода, находящегося в подовой части, передается дымовым газам, и они дополнительно нагреваются непосредственно перед выходом из топки. Наибольшее возрастание температуры произошло в опыте № 4 в связи с более высокой тепловой напряженностью.

Особое внимание уделено измерению концентрации в дымовых газах оксида и диоксида азота при различных температурах процесса горения в топке. Известно, что диоксид азота значительно токсичнее оксида азота. В режиме твердого шлакоудаления при средней температуре в топке 1130 °С в дымовых газах содержится 82,5 ppm оксида азота и около 0,3 ppm диоксида азота. При повышении температуры процесса до 1400 °С в составе дымовых газов этих газов около 100 и 0,7 ppm, соответственно.

Энергетические котлы, работающие на пылеугольном топливе с жидким шлакоудалением, имеют в среднем содержание соответствующих компонентов в выбрасываемых дымовых газах 555 и 45 ppm. Таким образом, выбросы оксидов азота при сжигании водоугольного топлива из исследуемого котла с дымовыми газами меньше более чем в 5 раз. Низкое содержание оксидов при сжигании ВУТ по сравнению с сжиганием пылеугольного топлива связано, вероятно, с присутствием в процессе горения большого содержания водяных паров, которые при температурах более 1200 °С подвержены диссоциации.

Выбросы оксидов серы в дымовых газах зависят от многих факторов, начиная от параметров процесса и заканчивая содержанием серы в органической части угля и горючей неорганической части, например, в виде пирита. Для уменьшения выбросов сернистых соединений следует готовить топливо к сжиганию, вводя различные серопогло-

щающие агенты, которые в процессе горения переводят горючую серу в минеральную часть, связывая ее.

Для каждого режима работы котла были проведены измерения температуры внутри циклонной топки в различных точках. Для характерного установившегося режима работы котла (состав ВУТ № 2, опыт 3) измеренные температуры внутри топки представлены в табл. 8. Измерения температуры в топке осуществляли согласно заранее известным расстояниям, тарированным относительно внутренней части боковой стенки и оси симметрии топки, расположенной на расстоянии 0,7 м от боковой стенки. Точка в центре топки котла соответствовала 0,0 по относительной координате ($X=l/L$), а на боковой стенке – 1,0.

Таблица 8. Температуры в топке котла, °C (состав ВУТа № 2, опыт 3)

Table 8. Temperatures in the boiler furnace, °C (CWF composition No. 2, experiment 3)

Относительная координата X Relative coordinate X	Номер отверстия в схеме измерения температуры Number of hole in the temperature test circuit									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0,9	1106	1093	990	1078	1085	1040	1079	1115	917	1134
0,6	1153	1117	1051	1102	1104	1061	1103	1150	1084	
0,3	1186	1166	1135	1137	1141	1121	1146	1207	1175	
0,0	1190	1177	1157	1131	1116	1146	1167	1227	1204	

Для характерного установившегося режима работы котла (состав ВУТ № 3, опыт 6) измеренные температуры внутри топки представлены в табл. 9.

Таблица 9. Температуры в топке котла, °C (состав ВУТа № 3, опыт 4)

Table 9. Temperatures in the boiler furnace, °C (CWF composition No. 3, experiment 4)

Относительная координата X Relative coordinate X	Номер отверстия в схеме измерения температуры Number of hole in the temperature test circuit									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0,7	1405	1403	1407	1373	1365	1414	1377	1412	1027	1412

В соответствии с полученными данными, можно наблюдать следующее распределение температуры газовых потоков внутри топки. Наименьшая измеренная температура находится на уровне ввода вторичного воздуха для горения напротив воздушного короба (точка измерений № 9) в боковой стенке (рис. 2, 3). По результатам измерений наблюдается увеличение температуры от точки измерений № 5 к точке № 1 (сверху вниз). Так как распыл топлива осуществляется в верхней части котла, то соответственно частицы топлива движутся по спиралевидной траектории сверху вниз. Твердые частицы при этом проходят стадии разогрева, испарения воды, горения при выделении летучих

веществ и коксового остатка. В связи с этим наиболее полное выгорание органической массы водоугольного топлива, а также летучих веществ, наблюдается вблизи пода топки перед выходом дымовых газов в конвективную часть.

Следует отметить, что при работе котла расплавленные частицы шлака налипают на внутренние стенки камеры сжигания и затвердевают. В результате стенки покрываются тонким слоем (3–4 мм) стекловидного продукта шоколадного цвета. Этот слой играет определенную положительную роль: он повышает теплоизоляцию стенок камеры сжигания и защищает стенки от абразивного износа.

Заключение

Представленные результаты испытания водогрейного котла, работающего на ВУТ, являются первичными данными, по которым в дальнейшем будут проведены широкомасштабные опытно-промышленные испытания. По результатам этих испытаний станет возможным решить несколько вопросов, среди которых:

- оптимизация режимов пуска и останова котла, имеющего циклонную топку и позволяющего работать в режиме как жидкого, так и твердого шлакозолоудаления;
- составление тепловой карты работы котла при различных режимах в зависимости от требуемой нагрузки;
- обеспечение безаварийной и надежной работы всех машин и механизмов, ответственных за подготовку, подачу и стабильное сжигание ВУТ;
- организация автоматизированной системы управления с минимальным присутствием обслуживающего персонала;
- проведение испытаний работы котла при совместном сжигании ВУТ и различных органических добавок, например отработанного моторного масла.

Выводы

1. Конструкция котла обладает оригинальными конструктивными решениями (вертикальная циклонная топка прямоугольного поперечного сечения, возможность жидкого шлакозолоудаления и др.), которые могут быть использованы для создания линейки однотипных энергоустановок различной тепловой мощности.
2. Проведены опытно-промышленные испытания водогрейного котла на ВУТ, и получена первичная информация об основных рабочих параметрах котла, которая позволяет провести верификацию метода математического моделирования тепло-массообменных процессов, происходящих при горении водоугольного топлива.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации по Соглашению о субсидии № 14.607.21.0150 (уникальный идентификатор проекта RFMEFI60716X0150)

Номенклатура

- W^a – влага топлива в рабочем состоянии, %;
- A^d – зольность топлива в сухом состоянии, %;
- V^{daf} – количество летучих веществ, определенное для сухого беззольного состояния топлива, %;
- $Q_{s,v}^a$ – высшая теплота сгорания аналитической пробы топлива при постоянном объеме, ккал/кг;
- Q^r – низшая теплота сгорания пробы топлива на рабочее вещество, ккал/кг;
- C^{daf} , H^{daf} , N^{daf} – содержание химических элементов топлива в пересчете на сухое беззольное состояние, %;
- S_i^d – общая сера топлива в пересчете на сухое состояние, %;
- α – коэффициент избытка окислителя в топке котла;
- T_g – температура дымовых газов после конвективной части котла, °С;

- K_{pl} – коэффициент плавления золы;
- X – относительная координата при измерения температуры внутри предтопка котла;
- G_f – расход воздуха через форсунку, кг/с (н.у.);
- G_d – расход воздуха через воздушные короба, кг/с (н.у.);
- G_o – общий расход воздуха в топку, кг/с (н.у.);
- G_t – расход топлива, кг/с;
- C^r , H^r , S_o^r , O^r – процентное содержание горючих элементов топлива в пересчете на рабочее состояние;
- ρ_0 – плотность кислорода при н.у.;
- y_0 – объемная доля кислорода в воздухе;
- q_f – тепловая напряженность на ед. площади сечения;
- C_{ost} – доля горючих веществ в шлаке;
- ТП – термоэлектрический преобразователь.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Государственная программа Российской Федерации «Развитие науки и технологий» на 2013–2020 годы. Правительство Российской Федерации, Распоряжение от 20 декабря 2012 г. № 2433-р.
2. Kontorovich A.E., Erov M.I., Eder L.V. Long-term and medium term scenarios and factors in world energy perspectives for the 21st century // *Russian Geology and Geophysics*. – 2014. – V. 55. – № 5–6. – P. 534–543.
3. The global carbon budget 1959–2011 / C. Le Quéré et al. // *Earth Syst. Sci. Data*. – 2013. – V. 5. – № 1. – P. 165–185.
4. Khalilpour R., Abbas A. HEN optimization for efficient retrofitting of coal-fired power plants with post-combustion carbon capture // *International Journal of Greenhouse Gas Control*. – 2011. – № 5. – P. 189–199.
5. Influence of coal quality on combustion behaviour and mineral phases transformations / V. Mishra et al. // *Fuel*. – 2016. – V. 186. – P. 443–455.
6. Омарова Б.А. Экономическая эффективность повышения качества угольного топлива для тепловых электростанций Казахстана // *Горный журнал*. – 2008. – № 6. – С. 49–51.
7. Pena B., Bartolome C., Gil A. Analysis of thermal resistance evolution of ash deposits during co-firing of coal with biomass and coal mine waste residues // *Fuel*. – 2017. – V. 194. – P. 357–367.
8. Pilot-scale investigation on slurring, combustion, and slagging characteristics of coal slurry fuel prepared using industrial waste liquid / L. Jianzhong et al. // *Applied Energy*. – 2017. – V. 115. – P. 309–319.
9. Co-firing of oil sludge with coal–water slurry in an industrial internal circulating fluidized bed boiler / L. Jianguo et al. // *Journal of Hazardous Materials*. – 2009. – V. 167. – P. 817–823.
10. Делягин Г.Н., Давыдова И.В. Сжигание твердого топлива в виде водоугольных суспензий. – М.: ЦНИИУголь, 1969. – 49 с.
11. Производство и использование водоугольного топлива / В.Е. Зайденварг, К.Н. Трубецкой, В.И. Мурко, И.Х. Нехорший. – М.: Изд-во Академии горных наук, 2001. – 176 с.
12. Сжигание каменного угля в виде водоугольной суспензии в котлах малой мощности / Л.И. Мальцев, И.В. Кравченко, С.И. Лазарев, Д.А. Лапин // *Теплоэнергетика*. – 2014. – № 7. – С. 25–29.
13. Мосин С.И., Морозов А.Г., Делягин Г.Н. Российский опыт внедрения промышленной технологии производства водоугольного топлива // *Новости теплоснабжения*. – 2008. – № 9. – С. 22–28.
14. Плотников В.П. Экономическое обоснование внедрения выемочных комбайнов с гидроприводом исполнительных органов для добычи крупного угля // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. – 2006. – № 3. – С. 49–53.
15. Recycling combustion ash for sustainable cement production: a critical review with data-mining and time-series predictive models / Yu Wang et al. // *Construction and building materials*. – 2016. – V. 123. – P. 673–689.
16. Антипенко Л.А. Перспектива внедрения новой технологии выемки и обогащения шламов отстойников углеобогажительных фабрик // *Энергетическая безопасность России. Новые подходы к развитию угольной промышленности: Труды междунар. конф.* – Кемерово, 1999. – С. 82–83.
17. Морозов А.Г. Практические результаты измерения выбросов от сжигания ВУТ // *Экологический вестник России*. – 2014. – № 5. – С. 20–25.
18. Устройство для сжигания водоугольного топлива (Варианты): пат. Рос. Федерация № 2518754; заявл. 29.08.2012; опубл. 10.06.2014, Бюл. № 16. – 16 с.
19. Пневматическая форсунка (Варианты): пат. Рос. Федерация № 2523816; заявл. 22.01.2013; опубл. 27.07.2014, Бюл. № 21. – 10 с.
20. Козлов В.А. Влияние химического состава золы углей на технологические свойства кокса // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. – 2012. – № 55. – С. 231–237.

Поступила 21.09.2017 г.

Информация об авторах

Алексеев С.В., доктор физико-математических наук, академик, заведующий отделом Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН; профессор кафедры парогенераторостроения и парогенераторных установок Энергетического института Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Мальцев Л.И., доктор технических наук, главный научный сотрудник лаборатории многофазных систем Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН.

Богомолов А.Р., доктор технических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории проблем тепломассопереноса Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН.

Чернецкий М.Ю., кандидат технических наук, научный сотрудник лаборатории физических основ энергетических технологий Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН.

Кравченко И.В., директор ООО «Корпорация ПРОТЭН».

Кравченко А.И., инженер лаборатории многофазных систем Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН.

Лапин Д.А., старший преподаватель кафедры теплоэнергетики Кузбасского государственного технического университета им. Т.Ф. Горбачева.

Шевырёв С.А., кандидат технических наук, научный сотрудник кафедры автоматизации теплоэнергетических процессов Энергетического института Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Лырчиков С.Ю., кандидат химических наук, старший научный сотрудник кафедры автоматизации теплоэнергетических процессов Энергетического института Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 662.7

RESULTS OF PILOT-OPERATING COMBUSTION OF COAL-WATER FUEL IN A LOW-CAPACITY HOT WATER BOILER

Sergey V. Alekseenko^{1,4},
aleks@itp.nsc.ru

Leonid I. Maltsev¹,
Maltzev@itp.nsc.ru

Aleksandr R. Bogomolov¹,
barom@kuzstu.ru

Mikhail Yu. Chernetskiy¹,
micch@yandex.ru

Igor V. Kravchenko²,
79537790844@yandex.ru

Anton I. Kravchenko¹,
79994501987@yandex.ru

Dmitriy A. Lapin³,
dmitry-skek@mail.ru

Sergey A. Shevyrev⁴,
shevyrev@tpu.ru

Sergey Yu. Lyrshchikov⁴,
lyrshchikov@tpu.ru

¹ Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS,
1, Ac. Lavrentiev avenue, Novosibirsk, 630090, Russia.

² PROTEN Corporation,
3, Tvardovsky street, Novosibirsk, 630068, Russia.

³ Gorbachev Kuzbass State Technical University,
28, Vesennyaya street, Kemerovo, 650000, Russia.

⁴ National Research Tomsk Polytechnic University,
30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia.

The relevance of the work is proved by considerable prospects (environmental, energy, economic and other) of using coal-water fuel as the primary fuel for boilers of different capacities.

The aim of the research is to study the thermal and environmental performance of boiler in different regimes, providing both dry and liquid slag removal. Investigation of thermal characteristics involves an experimental study of temperature distributions in the boiler furnace for further construction of mathematical models of coal-water fuel combustion and search for optimal regime parameters.

The methods include experimental studies of combustion of coal-water fuel, prepared on the basis of flotation product (cake) after enrichment of coal of grade «K», using a pilot sample of the boiler unit. Experimental studies were carried out by various (thermocouples, pyrometer, gas analyzer) instruments with low measurement error.

Results. Experimental data on temperature distributions in the boiler furnace were obtained for further modeling of coal-water fuel combustion; flue gas composition was measured for different operation regimes; boiler operation and data on the baseline characteristics of fuel were analyzed.

Conclusions. The promising design of the boiler unit, which can work at dry and liquid slag removal, was studied. Primary the data were obtained for modeling heat and mass transfer processes at combustion of coal-water fuel, prepared on the basis of coal tailings. The results obtained on measuring the flue gas emissions indicate the prospects of using the coal-water fuel as an alternative to the traditional fuels, such as coal and oil.

Key words:

Boiler, water-coal fuel, emissions, air nozzle, cyclone burner, flare-droplet burning, waste coal.

The research was financially supported by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation by Grant agreement no. 14.607.21.0150 (project unique identifier RFMEFI60716X0150).

REFERENCES

1. Gosudarstvennaya programma Rossiyskoy Federatsii «Razvitie nauki i tekhnologii» na 2013–2020 gody. Pravitelstvo Rossiyskoy Federatsii, Rasporyazhenie ot 20 dekabrya 2012 g. № 2433-r [State program of Russian Federation «Development of science and technology» for 2013–2020. Government of Russian Federation, resolution no. 2433-r from 20 December 2012].
2. Kontorovich A.E., Epov M.I., Eder L.V. Long-term and medium term scenarios and factors in world energy perspectives for the 21st century. *Russian Geology and Geophysics*, 2014, vol. 55, no. 5–6, pp. 534–543.
3. Le Quéré C. The global carbon budget 1959–2011. *Earth Syst. Sci. Data*, 2013, vol. 5, no. 1, pp. 165–185.
4. Khalilpour R. HEN optimization for efficient retrofitting of coal-fired power plants with post-combustion carbon capture. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2011, no. 5, pp. 189–199.
5. Mishra V. Influence of coal quality on combustion behaviour and mineral phases transformations. *Fuel*, 2016, vol. 186, pp. 443–455.
6. Omarova B.A. Ekonomicheskaya effektivnost povysheniya kachestva ugolnogo topliva dlya teplovykh elektrostantsiy Kazakhstana [Economical effectiveness of improving the quality of coal fuel for thermal power stations of Kazakhstan]. *Gornyy zhurnal*, 2008, no. 6, pp. 49–51.
7. Pena B. Analysis of thermal resistance evolution of ash deposits during co-firing of coal with biomass and coal mine waste residues. *Fuel*, 2017, vol. 194, pp. 357–367.
8. Jianzhong L. Pilot-scale investigation on slurring, combustion, and slagging characteristics of coal slurry fuel prepared using industrial waste liquid. *Applied Energy*, 2017, vol. 115, pp. 309–319.
9. Jianguo L. Co-firing of oil sludge with coal–water slurry in an industrial internal circulating fluidized bed boiler. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, vol. 167, pp. 817–823.
10. Delyagin G.N., Davydova I.V. *Szhiganiye tverdogo topliva v vide vodougolnykh suspenziy* [Combustion of solid fuel in the form of coal water suspension]. Moscow, TsNIEIUGol Publ., 1969. 49 p.
11. Zaydenvarg V.E. *Proizvodstvo i ispolzovanie vodougolnogo topliva* [Production and usage of coal water fuel]. Moscow, Mining Sciences Academy Publ., 2001. 176 p.
12. Maltsev L.I. Szhiganiye kamennogo uglya v vide vodougolnoy suspenzii v kotlakh maloy moshchnosti [Combustion of black coal in the form of coal-water slurry in low-capacity boilers]. *Teploenergetika*, 2014, no. 7, pp. 25–29.
13. Mosin S.I. Rossiyskiy opyt vnedreniya promyshlennoy tekhnologii proizvodstva vodougolnogo topliva [Russian experience in industrial implementation of coal-water fuel production technology]. *Novosti teplosnabzheniya*, 2008, no. 9, pp. 22–28.
14. Plotnikov V.P. Ekonomicheskoe obosnovanie vnedreniya vyemochnykh kombaynov s gidroprivodom ispolnitelnykh organov dlya dobychi krupnogo uglya [Economic feasibility of implementing coal-mining harvesters with hydraulic actuators for mining large coal]. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten*, 2006, no. 3, pp. 49–53.
15. Wang Yu. Recycling combustion ash for sustainable cement production: a critical review with data-mining and time-series predictive models. *Construction and building materials*, 2016, vol. 123, pp. 673–689.
16. Antipenko L.A. Perspektiva vnedreniya novoy tekhnologii vyemki i obogashcheniya shlamov otstoynikov ugleobogatitelnykh fabrik [Prospects of implementation of new technologies of extraction and enrichment of sludge settling tanks of coal preparation plants]. *Energeticheskaya bezopasnost Rossii. Novye podhody k razvitiyu ugolnoy promyshlennosti: Trudy mezhdunarodnoy konferentsii* [Energy safety in Russia. New approaches to development of coal industry: International Conference Proc.]. Kemerovo, 1999. pp. 82–83.
17. Morozov A.G. Prakticheskie rezultaty izmereniya vybrosov ot szhiganiya VUT [Practical results of emission measurements during coal water fuel combustion]. *Ekologicheskiy vestnik Rossii*, 2014, no. 5, pp. 20–25.
18. Alekseenko S.V., Maltsev L.I., Kravchenko I.V., Kravchenko A.I., Kartashova L.V. *Ustroystvo dlya szhiganiya vodougolnogo topliva (Varianty)* [The device for burning coal water fuel (Variants)]. Patent RF, no. 2518754, 2014.
19. Alekseenko S.V., Maltsev L.I., Kravchenko I.V., Kravchenko A.I. *Pnevmaticheskaya forsunka (Varianty)* [The pneumatic atomizer (Variants)]. Patent RF, no. 2523816, 2014.
20. Kozlov V.A. Vliyaniye khimicheskogo sostava zoly ugley na tekhnologicheskie svoystva koksa [Influence of coal ash chemical composition on technological properties of coke]. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten*, 2012, no. 55, pp. 231–237.

Received: 21 September 2017.

Information about the authors

Sergey V. Alekseenko, Dr. Sc., academician, head of the department, Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS; professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Leonid I. Maltsev, Dr. Sc., chief researcher, Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS.

Aleksandr R. Bogomolov, Dr. Sc., leading researcher, Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS.

Mikhail Yu. Chernetskiy, Cand. Sc., senior researcher, Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS.

Igor V. Kravchenko, director, PROTEN Corporation.

Anton I. Kravchenko, engineer, Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS.

Dmitriy A. Lapin, senior lecturer, Gorbachev Kuzbass State Technical University.

Sergey A. Shevryev, Cand. Sc., researcher, National Research Tomsk Polytechnic University.

Sergey Yu. Lyrshchikov, Cand. Sc., senior researcher, National Research Tomsk Polytechnic University.