

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-5-422-435>

УДК 662.6/9

## **Теплотехнические испытания отопительных котельных при работе на торфяном топливе**

**В. К. Любов<sup>1)</sup>, Д. Г. Чухчин<sup>1)</sup>, А. Н. Попов<sup>1)</sup>**

<sup>1)</sup>Северный (Арктический) федеральный университет имени М. В. Ломоносова  
(Архангельск, Российская Федерация)

© Белорусский национальный технический университет, 2022  
Belarusian National Technical University, 2022

**Реферат.** Процесс отказа от невозобновляемых топлив в системе сложившихся отношений к вопросам экологии и ресурсосбережения повсеместно сопровождает развитие общества и экономики. В данной статье представлены результаты комплексных промышленно-эксплуатационных испытаний водогрейных котлов КВм-2,0 с ТШП и КВр-0,4К на объектах теплоснабжения Архангельской области при типичных режимах работы при сжигании угля, топливных смесей, а также брикетированного и кускового торфа. Эксперименты осуществлялись с использованием современных методов и передовых технических средств. В рамках исследований по переводу котлов на торфяное топливо проведены балансовые опыты, получены технико-экономические и экологические показатели работы, выполнены отбор и анализ очаговых остатков, детально изучены мелкодисперсные твердые и сажевые частицы, выбрасываемые в окружающую среду. Приведены графики изменения КПД брутто, потерь теплоты с уходящими газами, химической неполнотой сгорания топлива и концентраций оксидов серы и азота в период между загрузками торфяных брикетов в котел КВр-0,4К, а также графики изменения составляющих теплового баланса и КПД брутто всех исследуемых котельных агрегатов. Перевод теплогенерирующих установок на сжигание торфяного топлива позволяет добиться существенного снижения выбросов твердых и сажевых частиц без модернизации золоулавливающих установок. Комплексные экспериментальные исследования, проведенные на действующих водогрейных котлах номинальной теплопроизводительностью 0,4 и 2,0 МВт, показали возможность, а также энергоэкологическую эффективность сжигания брикетированного и кускового торфа в топочных камерах данных теплогенерирующих установок.

**Ключевые слова:** возобновляемые ресурсы, тепловые потери, концентрация вредных веществ, выбросы, энергетический баланс, кусковой торф, брикеты, каменный уголь

**Для цитирования:** Любов, В. К. Теплотехнические испытания отопительных котельных при работе на торфяном топливе / В. К. Любов, Д. Г. Чухчин, А. Н. Попов // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2022. Т. 65, № 5. С. 422–435. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-5-422-435>

---

### **Адрес для переписки**

Любов Виктор Константинович  
Северный (Арктический) федеральный  
университет имени М. В. Ломоносова  
наб. Северной Двины, 17,  
163002, г. Архангельск, Российская Федерация  
Тел.: +7 8182 21-61-75  
[a.n.popov@narfu.ru](mailto:a.n.popov@narfu.ru)

### **Address for correspondence**

Lyubov Viktor K.  
Northern (Arctic) Federal University  
named after M. V. Lomonosov  
17, Severnaya Dvina Emb.,  
163002, Arkhangelsk, Russian Federation  
Tel.: +7 8182 21-61-75  
[a.n.popov@narfu.ru](mailto:a.n.popov@narfu.ru)

---

## Thermal Engineering Tests of Heating Boiler Houses when Working on Peat Fuel

V. K. Lyubov<sup>1)</sup>, D. G. Chukhchin<sup>1)</sup>, A. N. Popov<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Northern (Arctic) Federal University named after M. V. Lomonosov  
(Arkhangelsk, Russian Federation)

**Abstract.** Modern development of society and the economy is generally accompanied by abandonment of non-renewable fuels in the system of existing attitudes toward environmental issues and resource conservation. The paper presents the results of complex operational tests of KBM-2.0 water boilers with automatic stoker and KBp-0.4K at heat supply facilities of the Arkhangelsk region under the typical operating conditions on coal, fuel mixtures, and also peat briquettes and sod peat. Experimental work was carried out using modern methods and advanced technical means. Within the framework of the research on the conversion of boilers to peat fuel, balance experiments were carried out; technical, economic and environmental performance indicators were obtained; the selection and analysis of focal residues were carried out, fine solid and soot particles polluted into the environment were studied in detail. The paper presents graphs of changes in gross efficiency, heat loss with exhaust gas, heat loss with incomplete combustion, and concentrations of sulfur and nitrogen oxides during the cycle between loading peat briquettes into the KBp-0.4K boiler, as well as graphs of changes in the heat balance components and gross efficiency all boiler units under investigation. The conversion of heat generating plants to peat fuel combustion makes it possible to achieve a significant reduction in emissions of solid and soot particles without upgrading ash-collecting plants. Complex experimental studies conducted of existing hot water boilers with a nominal heating capacity of 0.4 and 2.0 MW have shown the possibility, as well as the energy-environmental efficiency of burning briquetted and sod peat in the combustion chambers of these heat generating plants.

**Keywords:** renewable resources, heat loss, concentration of pollutants, emission, heat balance, sod peat, briquettes, coal

**For citation:** Lyubov V. K., Chukhchin D. G., Popov A. N. (2022) Thermal Engineering Tests of Heating Boiler Houses when Working on Peat Fuel. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 65 (5), 422–435. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-5-422-435> (in Russian)

### Введение

Одним из направлений снижения выбросов вредных веществ в атмосферу установками топливно-энергетического комплекса следует считать замену невозобновляемых топлив – углей и мазутов – на возобновляемые виды биотоплива. Она активно поощряется в индустриально развитых странах, на долю которых приходится около 80 % общемировых выбросов парниковых газов [1]. Для стабилизации концентрации углекислого газа в атмосфере глобальная эмиссия парниковых газов должна снизиться по крайней мере до 60 % от современного уровня.

Торф занимает промежуточное положение между возобновляемыми и невозобновляемыми источниками энергии. Период его восстановления на месте добычи превышает 200 лет, т. е. для восьми поколений торф по факту является невозобновляемым энергоресурсом. Кроме того, выделяющиеся при сжигании торфа газы, как и в случае с ископаемым топливом, относятся к парниковым. Однако потребление торфа в РФ намного отстает от его ежегодного естественного прироста, что позволяет для ряда регионов страны считать его перспективным местным энергоисточником. Внедрение современных высокоэффективных технологий и оборудования для

добычи, агломерации и сжигания торфа позволит увеличить его долю в топливно-энергетическом балансе торфодобывающих регионов с 1–2 до 8–10 % к 2030 г. [1].

Мезенский район Архангельской области располагает большими запасами торфа (более 500 млн т), однако в его топливно-энергетическом балансе в настоящее время доминирует завозной уголь, доля которого составляет более 96 %. Каменный уголь доставляется из месторождений Кузнецкого бассейна по железнодорожным путям до г. Архангельска (расстояние около 4500 км), далее перевозится в г. Мезень автомобильным транспортом (около 420 км). Таким образом, при замещении завозных каменных углей местным кусковым торфом суммарный углеродный след уменьшится минимум на 100 т/год, а при сжигании брикетированного торфа это снижение будет еще более значительным.

Для замещения углей необходимо выполнить исследования торфяных залежей Мезенского района, в том числе теплотехнические и термогравиметрические, а также детально изучить энергоэкологическую эффективность сжигания брикетированного и кускового торфа в топочных камерах теплогенерирующих установок, действующих на территории района.

Цель исследований – оценить возможность перевода котлов на сжигание торфяного топлива и определить их технико-экономические и экологические показатели работы.

### Описание объектов исследований

Исследования выполнялись в двух котельных г. Мезени – ст. № 1, 2 центральной котельной и ст. № 1 котельной аэропорта. Первая котельная оборудована четырьмя котлами КВм-2,0, оснащенными топкой с шурующей планкой (ТШП), номинальной теплопроизводительностью каждого 2 МВт, вторая – двумя котлами КВр-0,4К номинальной производительностью по 0,4 МВт. Указанные водогрейные котлы рассчитаны на сжигание качественных каменных и бурых углей, работают с принудительной циркуляцией рабочей среды и тягой, обеспечиваемой дымососами. Номинальная температура нагрева воды 95 °С, рабочее давление 0,3–0,6 МПа, рекомендуемая минимальная температура воды на входе не менее 60 °С.

Топка котла КВм-2,0 состоит из привода шурующей планки и топочно-го модуля, в состав которого входят колосниковая решетка с поворотным колосником и зажигательный пояс высотой 0,47 м. Зажигательный пояс имеет П-образную конструкцию, выполнен из шамотного кирпича и обеспечивает стабильно высокую температуру в слое, что необходимо для воспламенения и эффективного сгорания топлива. Колосниковая решетка включает водоохлаждаемый трубчатый регистр, выполненный из труб диаметром 57 мм, корпус с распределителем воздуха на три зоны горения и поворотный колосник для сброса шлака в конце решетки. Система подачи воды на охлаждение колосниковой решетки и шурующей планки выполняется параллельно основному водяному контуру котла.

Подача топлива в индивидуальные бункера-дозаторы водогрейных котлов осуществляется скребковым транспортером. При этом сначала оно поступает в приемный бункер, под которым установлена дробилка, обеспечивающая измельчение крупных кусков до определенного размера. Регулирование расхода топлива осуществляется изменением продолжительности паузы между циклами удаления очаговых остатков и подачи топлива на колосниковую решетку. При проведении энергетического обследования продолжительность паузы варьировалась от 8 до 13 мин.

Поверхности нагрева котла КВм-2,0 состоят из отдельных водотрубных экранов, выполненных из стальных труб (ст20), последовательно соединенных между собой тангенциально вваренными в них патрубками, обеспечивающими закручивание потока. Спиральное движение воды в поверхностях нагрева уменьшает вероятность отложения солей и образования накипи на внутренней поверхности водяного тракта.

Комплект автоматики котла КВм-2,0 реализует следующие функции: управление приводами механизмов шурующей планки и питателя топлива по заданному алгоритму; дистанционный пуск и останов вентилятора и дымососа; ручное и автоматическое регулирование разрежения в топке; контроль параметров работы котла с помощью контрольно-измерительных приборов; автоматический останов котлоагрегата в аварийных ситуациях с запоминанием первопричины аварии и подачей светозвукового сигнала.

Тягодутьевые установки котлоагрегатов имеют частотное регулирование. Для очистки уходящих газов каждый котел оборудован расположенными на улице инерционно-осадительными устройствами, состоящими из четырех циклонов.

Котлы КВр-0,4К гладкотрубные, в передней части располагается ручная колосниковая топка с зольником, в задней – двухходовая конвективная поверхность нагрева. Топочное пространство газоплотное, выполнено путем сварки стальной полосы между экранными трубами, что исключает присосы холодного воздуха в топочную камеру и зону горения. Воздух для горения поступает снизу из зольника. Конвективные пакеты изготовлены в виде плотных регистров, устанавливаются в задней части котла друг напротив друга в шахматном порядке, что позволяет обеспечить компактное размещение достаточной поверхности нагрева.

В помещении котельной у каждого котла установлен вентилятор поддува с регулирующим клапаном. Для использования дров в качестве резервного топлива на фронте котла имеются две топочные дверки, одна над другой, что обеспечивает удобство загрузки объемного древесного топлива. Для очистки продуктов сгорания в газовом тракте каждого котла до дымососа установлен инерционный золоуловитель.

### **Обзор экспериментальных методов исследования**

Исследования проводились в соответствии с требованиями, предъявляемыми к промышленно-эксплуатационным испытаниям третьей категории сложности [2–4]. Методы и технические средства, используемые в рамках выполняемой работы, представлены в табл. 1.

Таблица 1

**Терминология, методы и измерительные приборы**  
**Terminology, methods and measuring instrumentation**

Параметр	Раз- мерность	Процедура	Источник	Инструмент
Концентрации O <sub>2</sub> , CO, CO <sub>2</sub> , SO <sub>2</sub> , NO, NO <sub>2</sub>	%, ppm, г/м <sup>3</sup>	Газовый электрохимический анализ	ГОСТ Р 50759–95 [4]	Газоанализатор Testo 350-XL
Расход газов	м/с, м <sup>3</sup> /с	Тарировка сечений газохода	[4]	Пневмометрическая трубка системы ВТИ, Testo 435-4, U-образный манометр
Концентрация твердых и сажистых частиц	г/м <sup>3</sup>	Фильтрация, термическая обработка	[5]	Аспирационная установка ОП-442 ТЦ
Теплота сгорания	кДж/г	Бомбовая калориметрия	ГОСТ 147–95 (ISO 1928–76), ASTM D240–87	Калориметр ИКА С2000 Basic Version 2
Содержание влаги, зольность, выход летучих веществ	%	Термическая обработка	ГОСТ Р 54184–2010, ГОСТ Р 54185–2010, ГОСТ Р 54186–2010, ГОСТ Р 54211–2010	Лабораторные сушильный шкаф и муфельная печь
Гранулометрический состав	%, мкм	Фракционирование	ГОСТ Р 54188–2010, ГОСТ Р 54189–2010	Аналитическая просеивающая машина Retsch AS 200 Control, анализатор 029
Тепловые потери	°С, Вт	Термография	[6, 7]	Тепловизор Testo 885-2, пирометр
Атомарный, элементный состав, размеры, форма микрочастиц	%, мкм	Растровая электронная микроскопия	EDX-микроанализ [8]	Сканирующий электронный микроскоп Zeiss SIGMA VP (Carl Zeiss); OXFORD 80 mm <sup>2</sup>
Элементный состав	%	CHNS-анализ	[9]	Анализатор элементного состава Euro EA 3000

### Комплексные испытания котлоагрегатов

Балансовые опыты осуществлялись на описанных выше водогрейных котлах КВм-2,0 и КВр-0,4К при типичных режимах работы при сжигании угля, топливных смесей, а также брикетированного и кускового торфа. В табл. 2 представлены результаты теплотехнического и элементного анализов применяемых топлив.

В процессе комплексного энергетического обследования проведены: внешний осмотр водогрейных котлов; анализ работы их основного и вспомогательного оборудования; балансовые опыты; анализ технико-экономических и экологических характеристик работы водогрейных котлов при сжигании различных топлив.

Таблица 2

## Теплотехнические свойства и элементный состав топлив на рабочую массу

## Thermal engineering properties and elemental composition of fuel per working mass

Параметр	Каменный уголь центральной котельной (У <sub>1</sub> )	Каменный уголь котельной аэропорта (У <sub>2</sub> )	Торф брикетированный (ТБ)	Торф кусковой (ТК)	Смесь каменного угля с брикетированным торфом (У + ТБ)	Смесь каменного угля с кусковым торфом (У + ТК)
Содержание влаги, %	16,4	16,0	14,2	45,5	15,3	31,0
Зольность, %	12,9	14,7	5,0	2,8	8,9	7,8
Низшая теплота сгорания, МДж/кг	21,00	20,60	16,74	9,93	18,88	15,48
Выход летучих веществ (на сухую беззольную массу), %	41,6	41,5	69,7	63,9	55,7	52,7
Углерод, %	54,85	53,64	46,06	29,29	50,41	42,10
Сера, %	0,47	0,48	0,21	0,21	0,34	0,34
Водород, %	3,72	3,74	4,79	3,08	4,26	3,40
Азот, %	1,63	1,60	1,87	1,19	1,80	1,38
Кислород, %	10,05	9,80	27,88	17,95	18,95	14,00

В качестве измерительных сечений выбраны: на котле КВМ-2,0 – отводящий газоход после котла и прямой участок газохода после дымососа, на котле КВр-0,4К – отводящий газоход после котла и участок газохода после золоуловителя.

Потери теплоты в окружающую среду определялись комбинированным способом, т. е. сочетанием относительного метода, при котором для установления температуры ограждающих конструкций котла использовался пирометр, и тепловизионного [6, 7]. Съемка осуществлялась тепловизором Testo 885-2, позволяющим получить в реальном времени распределение температуры по поверхности объекта с точностью  $\pm 2$  %. Обработка экспериментальных данных проводилась с помощью многомодульного программно-методического комплекса [1, 10].

### Результаты и обсуждение

Для котла КВМ-2,0 ст. № 1 при сжигании длиннопламенного каменного угля (ООО «Восточно-Бейский разрез», класс крупности «Рядовой») КПД брутто в диапазоне нагрузок 1332–1745 кВт составил 75,17–76,31 % (рис. 1), при этом полный расход топлива 299–397 кг/ч.

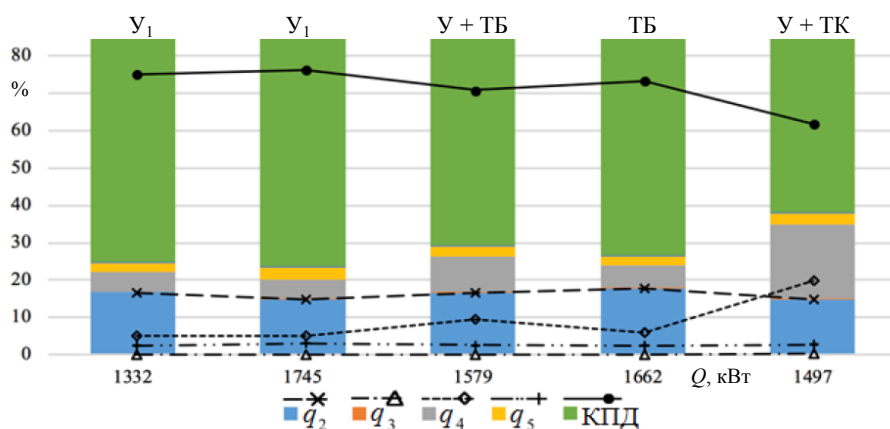


Рис. 1. Гистограмма и график изменения составляющих теплового баланса котла КВМ-2,0 № 1 при сжигании каменного угля, смесей каменного угля с торфом брикетированным и кусковым, торфяных брикетов

Fig. 1. Histogram and graph of changes in the components of the thermal balance of the КВМ-2.0 boiler (station No 1) during the combustion of coal, mixtures of coal with briquetted and sod peat, peat briquettes

Для котла КВр-0,4К с ручной подачей топлива характерно циклическое изменение всех составляющих теплового баланса в период между загрузками топлива. В диапазоне нагрузок 337–412 кВт при работе на каменном угле КПД brutto 60,1–73,45 % (рис. 2).

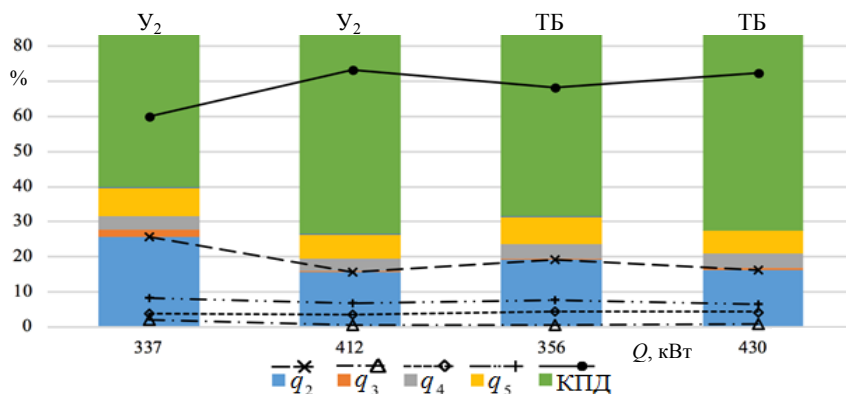


Рис. 2. Гистограмма и график изменения составляющих теплового баланса водогрейного котла КВр-0,4К при сжигании каменного угля и брикетированного торфа

Fig. 2. Histogram and graph of changes in the components of the thermal balance of the KBp-0.4K hot water boiler during the combustion of coal and briquetted peat

Анализ условий работы котлоагрегатов показал, что потери теплоты с уходящими газами у котла КВМ-2,0 ст. № 1 составили 14,79–16,76 %, у котла КВр-0,4К – 15,63–25,70 %. Такие значения объясняются высокими коэффициентами избытка воздуха и температурой уходящих газов. Кроме того, значительный уровень потерь теплоты с механической неполнотой сгорания обусловлен повышенным содержанием горючих веществ в очаговых остатках.

На рис. 1, 2 и 5 абсолютные значения потерь теплоты с уходящими газами  $q_2$ , химическим  $q_3$  и механическим  $q_4$  недожогом, потери теплоты в окру-

жающую среду из-за охлаждения ограждающих конструкций  $q_5$ , а также КПД брутто котла, показанные в виде точечной диаграммы с прямыми отрезками и маркерами, совмещены с гистограммой с накоплением, демонстрирующей долю каждой из потерь в тепловом балансе котельного агрегата [11, 12].

При сжигании каменных углей потери с физической теплотой шлака 0,27–0,32 %, при переходе на сжигание смесей угля с торфом и особенно при сжигании торфяного топлива величина данных потерь снизилась до 0,13–0,14 %.

Среднее значение КПД брутто за цикл между загрузками топлива при сжигании торфяных брикетов составило 70,5 %, что выше, чем при сжигании рядового длиннопламенного угля (рис. 3).

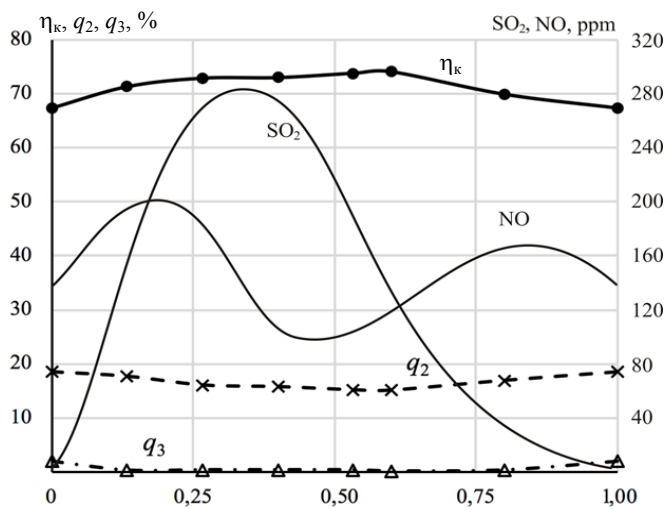


Рис. 3. Изменение КПД брутто, потерь теплоты с уходящими газами, химической неполнотой сгорания топлива и концентраций оксидов серы и азота в период между загрузками торфяных брикетов (в долях)

Fig. 3. Changes in gross efficiency, heat losses with exhaust gases, chemical incompleteness of fuel combustion and concentrations of sulfur and nitrogen oxides in the period between loading peat briquettes (in fractions)

При этом наблюдались некоторое снижение потерь теплоты с химической неполнотой сгорания и их незначительный рост с механическим недожогом. Исходя из зависимостей, характеризующих образование оксидов серы и азота, можно сделать вывод, что азотосодержащие компоненты начинают выделяться раньше, чем наступает процесс активного окисления сернистых соединений. Результаты энергетического обследования показали, что переход на сжигание брикетированного торфа позволил улучшить экологические показатели котла КВр-0,4К по всем вредным ингредиентам, что отчасти объясняется меньшим содержанием серы в торфяных брикетах.

После балансовых опытов при работе котла КВм-2,0 ст. № 1 на угле исследовано функционирование котлоагрегата при сжигании топливной смеси угля с торфяными брикетами (соотношение компонентов 50/50, брикеты цилиндрической формы (~Ø78 мм) длиной 30–80 мм) (рис. 1). Теплопроизводительность в данном случае составила 1579 кВт, КПД брутто 70,76 %. При этом отмечено некоторое снижение эмиссии оксидов азота и серы.



Далее котел КВм-2,0 ст. № 1 перевели на сжигание торфяных брикетов (рис. 1), и КПД брутто достиг 73,39 %. Повышение данного показателя по сравнению с результатом, полученным при сжигании смеси угля с брикетированным торфом, обусловлено снижением коэффициента избытка воздуха в топке.

Полный расход торфяных брикетов для исследованных нагрузок у котла КВм-2,0 487 кг/ч, у котла КВр-0,4К 112–128 кг/ч.

Значительный уровень потерь с механической неполнотой сгорания объясняется повышенным содержанием горючих веществ в уносе ( $C_{ун}^r = 49,25$  %). Поэтому проанализировано пофракционное содержание горючих веществ для летучей золы, уловленной в циклонном золоуловителе котла КВм-2,0. Максимальное содержание горючих веществ имеют частицы размером  $x \geq 63$  мкм (рис. 4а). Однако определяющее влияние на величину механического недожога топлива оказывает содержание горючих веществ в частицах  $x < 45$  и  $125 \leq x < 500$  ( $У_1$ );  $63 \leq x < 1000$  (ТБ);  $63 \leq x < 1000$  и  $x < 45$  мкм (ТК) (рис. 4б).

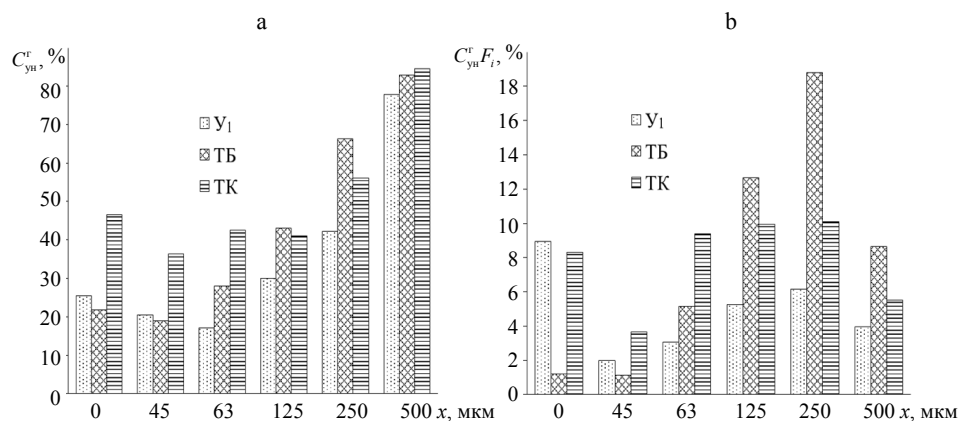


Рис. 4. Содержание горючих веществ в летучей золе котла КВм-2,0 ст. № 1 при сжигании каменного угля, торфа брикетированного и кускового: а – содержание горючих веществ; б – произведение содержания горючих на фракционный остаток

Fig. 4. The content of combustible substances in the fly ash of the КВм-2.0 boiler (station No 1) when burning coal, briquetted peat and sod peat: а – the content of combustible substances; б – the product of the content of combustible by fractional residue

На следующем этапе энергообследования котла КВм-2,0 ст. № 1 проведено сжигание топливной смеси угля с кусковым торфом (соотношение компонентов 50/50) (рис. 1).

Дальнейшие эксперименты по сжиганию торфа проводились в котле КВм-2,0 № 2 (рис. 5). Торфяные брикеты были пропущены через дробилку. Наличие большого количества мелких фракций в сжигаемом торфе привело к их провалу через зазоры колосниковой решетки и уносу из камеры сгорания. Это вызвало значительное повышение содержания горючих веществ в шлаке и провале ( $C_{шл+пр}^r = 59,47$  %) и увеличение потерь теплоты с механическим недожогом топлива с 12,19 до 12,27 %. В диапазоне нагрузок 1497–1579 кВт КПД брутто изменялся от 73,19 до 76,30 %. При работе котла на торфяных брикетах значительно уменьшились выбросы оксидов азота, что обусловлено избытком воздуха в топке (значение, близкое к оптимальному).

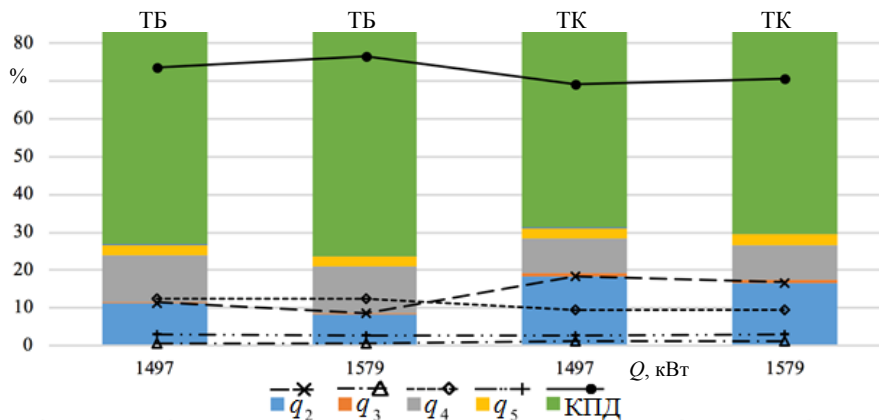


Рис. 5. Гистограмма и график изменения составляющих теплового баланса котла КВМ-2,0 при сжигании брикетированного и кускового торфа

Fig. 5. Histogram and graph of changes in the components of the heat balance of the KBM-2.0 boiler when burning briquetted and sod peat

Затем изучено функционирование котла КВМ-2,0 ст. № 2 при сжигании кускового торфа цилиндрической формы ( $\text{Ø}$  53–55 мм), длина цилиндров превышала их диаметр в 2,0–2,5 раза (рис. 5). Работа котла сопровождалась большими выбросами оксида углерода, что вызвало повышение потерь теплоты с химическим недожогом до 0,97–1,04 %. Потери теплоты с механической неполнотой сгорания при этом несколько снизились и составили 9,17–9,20 %. КПД брутто 68,71–70,42 %.

Эмиссии оксидов азота для обследованных водогрейных котлов составили 70,0–199,0 мг/МДж, при этом наилучшие результаты получены при сжигании торфяных брикетов и обеспечении нормальных избытков воздуха на выходе из котлов ( $\alpha = 1,37\text{--}1,59$ ). По выбросам диоксида серы наилучшие экологические результаты также получены при сжигании торфяных брикетов, что связано с более низким содержанием серы в данном топливе. Эмиссии оксида углерода изменялись в очень широком диапазоне (182–2079 мг/МДж) в зависимости от характеристик сжигаемых топлив и режима работы котлов. Однако наилучшие результаты получены при сжигании длиннопламенного каменного угля в котле КВМ-2,0.

Определение запыленности дымовых газов перед их поступлением в дымовые трубы котлов проводилось методом внешней фильтрации [4, 5, 13, 14]. Расчет концентраций твердой фазы в дымовых газах осуществлялся в соответствии с требованиями [5].

При сжигании топливной смеси угля и кускового торфа в котле КВМ-2,0 ст. № 1 среднее значение эмиссии твердых веществ в продуктах сгорания, поступающих в дымовую трубу, 89,91 мг/МДж, эмиссии сажевых частиц 28,96 мг/МДж. Данный режим работы характеризовался тем, что вся топливная смесь перед поступлением в бункер-дозатор проходила через дробильную установку, что вызвало образование большого количества мелких фракций торфа.

Применение в качестве топлива недробленых торфяных брикетов и их ввод в систему топливоподачи позволили почти в два раза уменьшить выбросы твердых и сажевых частиц в атмосферный воздух. Среднее значение

эмиссии твердых веществ в продуктах сгорания составило 39,90 мг/МДж, эмиссии сажевых частиц 19,65 мг/МДж.

Твердые частицы, уловленные из газоходов перед дымовыми трубами, изучены на электронном растровом микроскопе, по микрофотографиям летучей золы построены гистограммы распределения микрочастиц и определены весовые доли отдельных фракций (рис. 6, 7).

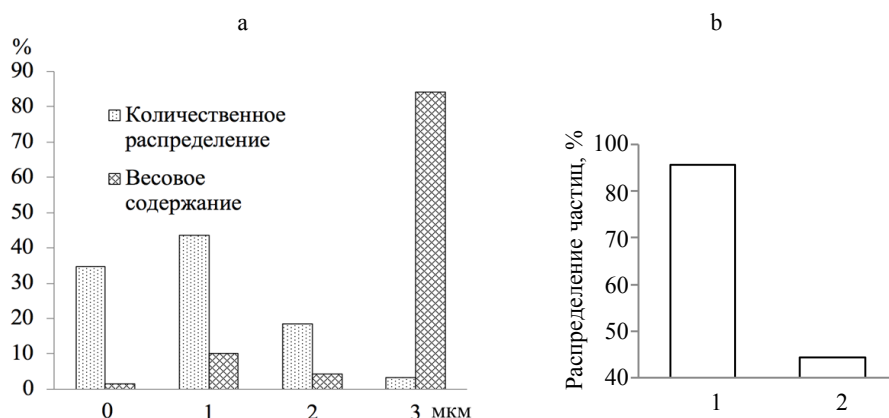


Рис. 6. Микрочастицы в уходящих газах котла KBM-2,0 ст. № 1 при сжигании торфяных брикетов: а – количественное распределение и весовое содержание частиц разного размера; б – количественное распределение частиц по форме (безразмерная величина отношения длины к эквивалентному диаметру)

Fig. 6. Microparticles in the exhaust gases of the KBM-2.0 boiler (station No 1) when burning peat briquettes: a – quantitative distribution and weight content of particles of different sizes; b – quantitative distribution of particles in shape (dimensionless ratio of length to equivalent diameter)

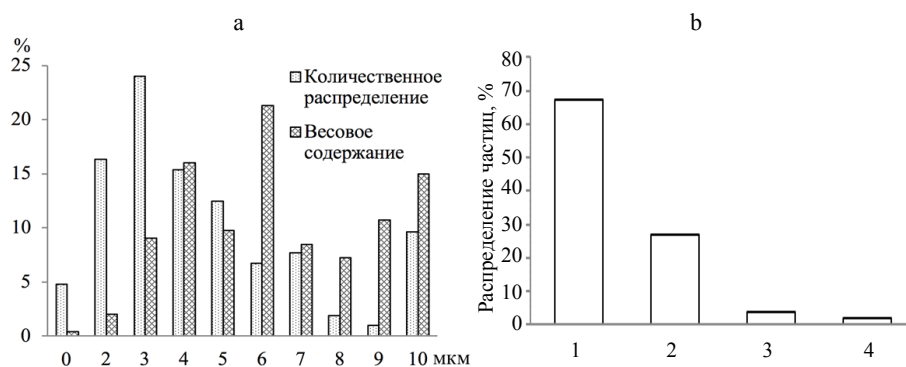


Рис. 7. Микрочастицы в уходящих газах котла KBM-2,0 ст. № 1 при сжигании смеси кускового торфа и угля (50/50): а – количественное распределение и весовое содержание частиц разного размера; б – количественное распределение частиц по форме (безразмерная величина отношения длины к эквивалентному диаметру)

Fig. 7. Microparticles in the exhaust gases of the KBM-2.0 boiler (station No 1) when burning a mixture of sod peat and coal (50/50): a – quantitative distribution and weight content of particles of different sizes; b – quantitative distribution of particles in shape (dimensionless ratio of length to equivalent diameter)

Циклонные золоуловители, которыми оснащены котлы KBM-2,0, позволяют выполнять очистку газов от взвешенных твердых частиц размером

более 10 мкм. Содержание мелких частиц  $PM_{2.5}$  в уходящих газах при сжигании брикетированного торфа превалирует над остальными фракциями, а при сжигании смеси кускового торфа и угля в уходящих газах наибольшее весовое содержание имеют частицы размером от 2 до 10 мкм.

Сравнение форм частиц летучей золы, образующейся при сжигании брикетированного торфа и смеси кускового торфа с углем, показало, что в первом случае преобладают частицы с более равномерным соотношением размеров, т. е. имеющие форму, близкую к сферической. Это позволяет выстраивать политику в части выбора, модернизации оборудования и совершенствования его режимов работы для снижения выбросов мелкодисперсных частиц в атмосферный воздух.

Применение максимально простых и физически изношенных инерционных золоуловителей у котлов КВр-0,4К является причиной высокой концентрации в уходящих газах частиц размером 10 мкм и более (рис. 8). Среднее значение эмиссии твердых веществ в продуктах сгорания, выбрасываемых в атмосферный воздух, при сжигании брикетированного торфа 28,96 мг/МДж, эмиссии сажевых частиц 9,719 мг/МДж.

При проведении энергетических обследований температура воды на входе в водогрейные котлы составляла 44–59 °С, что ниже рекомендуемой. В совокупности с отсутствием тепловой изоляции на золоуловителях, дымососах и большинстве газоходов это вызывает конденсацию водяных паров на элементах основного и вспомогательного оборудования, сокращает его жизненный цикл и влечет перерасход электроэнергии на собственные нужды.

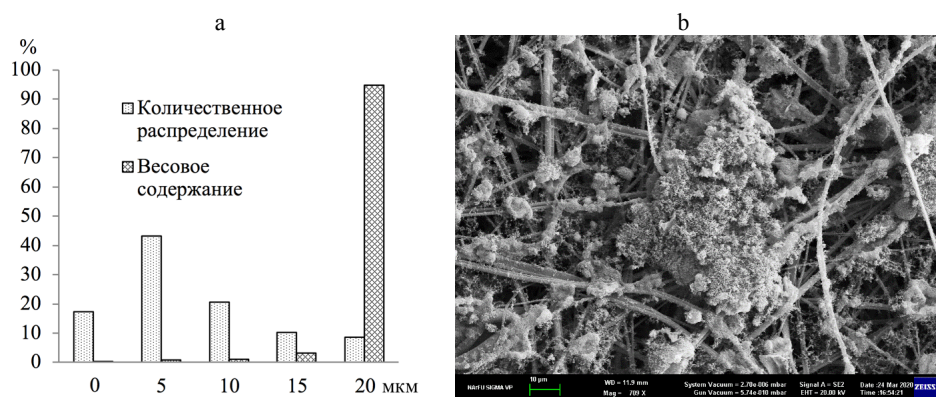


Рис. 8. Микрочастицы в уходящих газах котла КВр-0,4 при сжигании торфяных брикетов: а – количественное распределение и весовое содержание частиц разного размера; б – микрофотография частиц на фоне фильтра АФА-ВП (увеличение 700:1)

Fig. 8. Microparticles in the exhaust gases of the KBp-0,4 boiler during the burning of peat briquettes: a – quantitative distribution and weight content of particles of different sizes; b – micrography of particles against the background of the АФА-ВП filter (magnification 700:1)

## ВЫВОДЫ

1. Комплексные экспериментальные исследования, проведенные на действующих водогрейных котлах номинальной теплопроизводительностью 0,4 и 2,0 МВт, показали возможность и энергоэкологическую эффективность сжигания брикетированного и кускового торфа.

2. Эмиссии оксидов азота составили 70,0–199,0 мг/МДж, наилучшие результаты получены при сжигании торфяных брикетов и обеспечении нормальных избытков воздуха в топочных камерах котлоагрегатов. По выбросам диоксида серы наилучшие экологические результаты также получены при сжигании торфяных брикетов, что связано с более низким содержанием серы в данном топливе. Эмиссии оксида углерода изменялись в широком диапазоне (182–2079 мг/МДж) в зависимости от характеристик сжигаемых топлив и режима работы котлов. Наилучшие результаты получены при сжигании длиннопламенного каменного угля в котле КВм-2,0. Однако у котлов, оборудованных топками с шурующими планками, имеется значительный резерв по оптимизации конструктивных и режимных параметров, реализация которого позволит снизить выбросы оксида углерода до значений, характерных при сжигании качественных углей.

3. Перевод теплогенерирующих установок на сжигание торфяного топлива открывает возможность существенного снижения выбросов твердых и сажевых частиц без модернизации золоулавливающих установок.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Любов, В. К. Повышение эффективности энергетического использования биотоплив / В. К. Любов, С. В. Любова. Архангельск: САФУ, 2017. 533 с.
2. Правила устройства и безопасной эксплуатации паровых и водогрейных котлов. М.: ПИО ОБТ, 1996.
3. Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей. 14-е изд., перераб. и доп. М.: Энергоатомиздат, 1989. 288 с.
4. Трёмбовля, В. И. Теплотехнические испытания котельных установок / В. И. Трёмбовля, Е. Д. Фингер, А. А. Авдеева. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Энергоатомиздат, 1991. 416 с.
5. Сборник методик по определению концентраций загрязняющих веществ в промышленных выбросах. Л.: Гидрометеониздат, 1987. 269 с.
6. Тепловой расчет котлов (нормативный метод) / изд. 3-е, перераб. и доп. СПб.: НПО ЦКТИ, 1998. 256 с.
7. Определение потерь тепла в окружающую среду на основе комплексного исследования эффективности работы котлов / В. К. Любов [и др.] // Теплоэнергетика. 2015. № 8. С. 36–40.
8. Exosomes in the Phloem and Xylem of Woody Plants / D. G. Chukhchin [et al.] // *Planta*. 2019. Vol. 251, Iss. 1. Art. 12. <https://doi.org/10.1007/s00425-019-03315-y>.
9. Fractionation of Wood with Binary Solvent 1-Butyl-3-Methylimidazolium Acetate + Dimethyl Sulfoxide / A. V. Ladesov [et al.] // *Russian Journal of Applied Chemistry*. 2018. Vol. 91, Iss. 4. P. 663–670. <https://doi.org/10.1134/S1070427218040201>.
10. Любов, В. К. Программно-методический комплекс для обработки результатов испытаний теплоэнергетического оборудования и расчета вредных выбросов / В. К. Любов, В. А. Дьячков // Труды 2-й рос. нац. конф. по теплообмену. М.: МЭИ, 1998. Т. 3: Свободная конвекция. Теплообмен при химических превращениях. С. 225–228.
11. Комбинированное сжигание потоков различных промышленных отходов в топках котлов. Ч. 1 / Ю. П. Ярмольчик [и др.] // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2020. Т. 63, № 3. С. 236–252. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-3-236-252>.
12. Комбинированное сжигание потоков различных промышленных отходов в топках котлов. Ч. 2 / Ю. П. Ярмольчик [и др.] // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2020. Т. 63, № 6. С. 526–540. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-6-526-540>.

13. Контроль вредных выбросов ТЭС в атмосферу / под ред. П. В. Рослякова. М.: МЭИ, 2004. 228 с.
14. Повышение экологической безопасности тепловых электростанций / под ред. А. С. Седлова. М.: МЭИ, 2001. 378 с.

Поступила 15.11.2021 Подписана в печать 29.03.2022 Опубликована онлайн 30.09.2022

#### REFERENCES

1. Lyubov V. K., Lyubova S. V. (2017) *Improving the Efficiency of Energy Use of Biofuels*. Arkhangelsk, NArFU, 2017. 533 (in Russian).
2. *Rules for the Preparation and Safe Operation of Steam and Hot Water Boilers*. Moscow, PPA OBT, 1996 (in Russian).
3. *Rules of Technical Operation of Power Plants and Electric Networks*. 14<sup>th</sup> ed. Moscow, Energoatomizdat Publ. 1989. 288 (in Russian).
4. Trembovlya V. I., Finger E. D., Avdeeva A. A. (1991) *Thermal Engineering Tests of Boiler Installations*. 2<sup>nd</sup> ed. Moscow, Energoatomizdat Publ. 416 (in Russian).
5. *Collection of Techniques for Determining Concentrations of Pollutants in Industrial Emissions*. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ. 1987. 269 (in Russian).
6. *Thermal Calculation of Boilers (Normative Method)*. 3<sup>rd</sup> ed. St. Petersburg, SDA RDPE, 1998. 256 (in Russian).
7. Lyubov V. K., Malygin P. V., Popov A. N., Popova E. I. (2015) Determining Heat Loss Into the Environment Based on Comprehensive Investigation of Boiler Performance Characteristics. *Thermal Engineering*, 62 (8), 572–576. <https://doi.org/10.1134/S004060151506004X>.
8. Chukhchin D. G., Bolotova K., Sinelnikov I., Churilov D., Novozhilov E. (2019) Exosomes in the Phloem and Xylem of Woody Plants. *Planta*, 251 (1), Article12. <https://doi.org/10.1007/s00425-019-03315-y>.
9. Ladesov A. V., Belesov A. V., Kuznetsova M. V., Pochtovalova A. V., Malkov A. S., Shestakov S. L., Kosyakov D. S. (2018) Fractionation of Wood with Binary Solvent 1-Butyl-3-Methylimidazolium Acetate + Dimethyl Sulfoxide. *Russian Journal of Applied Chemistry*, 91 (4), 663–670. <https://doi.org/10.1134/S1070427218040201>.
10. Lyubov V. K., D'yachkov V. A. (1998) Software-and-Methodological Complex for Processing Test Results of Thermal Power Equipment and Calculation of Harmful Emissions. *Trudy 2-i Ros. Konf. po Teploobmenu. T. 3: Svobodnaya Konvektsiya. Teplomassoobmen pri Khimicheskikh Prevrashcheniyakh* [Proceedings of the 2<sup>nd</sup> Russian National Conference on Heat Exchange. Vol. 3: Free Convection. Heat and Mass Transfer in Chemical Transformations]. Moscow, MPEI, 225–228 (in Russian).
11. Yarmolchick Yu. P., Schröger R., Habermelner H., Pichler M., Kostić D., Moroz G. V. (2020) Combined Combustion of Various Industrial Waste Flows in Boiler Furnaces. Part 1. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 63 (3), 236–252. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-3-236-252> (in Russian).
12. Yarmolchick Yu. P., Schröger R., Habermelner H., Pichler M., Kostić D., Moroz G. V. (2020) Combined Combustion of Various Industrial Waste Flows in Boiler Furnaces. Part 2. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 63 (6), 526–540. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-6-526-540> (in Russian).
13. Roslyakov P. V. [ed.] (2004) *Control of Harmful Emissions of Thermal Power Plants Into the Atmosphere*. Moscow, MPEI. 228 (in Russian).
14. Sedlov A. S. (2001) *Improving the Environmental Safety of Thermal Power Plants*. Moscow, MPEI. 378 (in Russian).

Received: 15 November 2021 Accepted: 29 March 2022 Published online: 30 September 2022