

УДК 662.6/9

DOI: 10.37482/0536-1036-2020-1-167-179

## ЭФФЕКТИВНОСТЬ СЖИГАНИЯ ДРЕВЕСНОГО ТОПЛИВА В ВОДОГРЕЙНЫХ КОТЛАХ КВУ-2000

*В.К. Любов, д-р техн. наук, проф.; ResearcherID: [AAF-8949-2019](#),*

*ORCID: [0000-0001-7050-1212](#)*

*А.Н. Попов, канд. техн. наук, доц.; ResearcherID: [N-5104-2019](#),*

*ORCID: [0000-0003-0144-1513](#)*

Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова, наб. Северной Двины, д. 17, г. Архангельск, Россия, 163002; e-mail: vk.lubov@mail.ru, a.n.porov@narfu.ru

Использование возобновляемых источников энергии – одно из приоритетных направлений развития современной энергетики. К возобновляемым источникам относится биомасса древесины, большие объемы которой в лесных регионах позволяют обеспечивать энергетическую независимость. Кроме того, применение древесной биомассы в энергетике способно решать целый ряд задач: получение сравнительно дешевой энергии, утилизация побочных продуктов лесозаготовительных и деревообрабатывающих предприятий, снижение негативного воздействия на окружающую среду и др. Ввиду наличия огромных запасов древесины для Северо-Запада России актуальны вопросы рационального и эффективного использования древесных ресурсов. Современные водогрейные котлы, сжигающие древесное топливо, позволяют комплексно решать энергетические и экологические проблемы при обеспечении отопительных нагрузок потребителей. Цель работы – определение теплотехнических и экологических показателей водогрейного котлоагрегата КВУ-2000 при сжигании побочных продуктов предприятий лесопромышленного комплекса. По результатам энергетического обследования определены составляющие теплового баланса котла, выбросы газообразных веществ, твердых и сажистых частиц. Установлено, что приемлемые технико-экономические и экологические показатели КВУ-2000 обеспечиваются при сжигании древесного топлива с неоднородным гранулометрическим составом. Однако ручная регулировка расхода вторичного воздуха и отсутствие контроля концентрации кислорода в уходящих газах не дают возможности поддерживать оптимальный воздушный режим процесса горения. Отсутствие приборов контроля сопротивления золоулавливающих устройств и тепловой изоляции на всех элементах газового тракта за котлом вызывает нерациональные энергетические потери, что противоречит требованиям действующих нормативных документов. Ограниченный период эксплуатации между чистками поверхности нагрева дымогарного теплообменника предъявляет повышенные требования к резервированию установленной мощности. Устранение выявленных недостатков сможет обеспечить существенное повышение энергоэкономических показателей работы водогрейных котлов, приведет к снижению выбросов вредных веществ при сжигании биотоплив, что позволит рекомендовать их для систем теплоснабжения Северо-Арктического региона.

**Для цитирования:** Любов В.К., Попов А.Н. Эффективность сжигания древесного топлива в водогрейных котлах КВУ-2000 // Изв. вузов. Лесн. журн. 2020. № 1. С. 167–179. DOI: 10.37482/0536-1036-2020-1-167-179

**Благодарность:** Авторы выражают благодарность Д.Г. Чухчину за выполнение исследований с использованием метода электронной растровой микроскопии.

**Ключевые слова:** водогрейный котел, древесное топливо, вредные вещества, топка, потери тепла, коэффициент полезного действия.

*Введение*

Развитие общества сопровождается увеличением спроса на энергоносители, однако запасы традиционных невозобновляемых энергоресурсов ограничены. Поэтому вовлечение в топливный баланс отходов лесозаготовок и побочных продуктов предприятий лесоперерабатывающей промышленности является актуальным направлением решения данной проблемы [3, 4, 7, 14–16, 18]. Ежегодно в России образуется порядка 35,5 млн м<sup>3</sup> древесных отходов [6], а общемировой объем побочных продуктов от заготовки, обработки и переработки ежегодного прироста биомассы составляет 220 млрд т [20].

Замена традиционных энергетических ресурсов древесным топливом приводит к снижению выбросов вредных веществ в атмосферу, так как при его сгорании выделяется такое же количество углекислого газа, какое связывается в процессе прироста биомассы, что не нарушает естественный баланс CO<sub>2</sub> в атмосфере Земли [3, 6].

Переход от ископаемых видов топлива к возобновляемым источникам энергии – ключевой пункт стратегии, направленной на сохранение климата, защиту окружающей среды, решение проблем с энергообеспечением, а также полностью соответствует положениям Парижского соглашения по сдерживанию климатических изменений, которое одобрили 195 стран. За последние десятилетия в России достигнуто значительное сокращение выбросов, тем не менее наша страна является четвертым крупнейшим эмитентом выбросов парниковых газов [1, 2, 5, 10, 19]: доля Российской Федерации (РФ) в глобальных антропогенных выбросах парниковых газов составляет 5 %.

Для энергетического использования древесной биомассы необходимо применять современные теплогенерирующие установки, к которым относятся и водогрейные котлы КВУ-2000, имеющие достаточно хорошие позиции в конкурентной борьбе с энергоустановками других отечественных и зарубежных фирм. В настоящее время на объектах малой энергетики РФ работает более 2 тыс. котлов данного типа, в Архангельской области – около 30.

*Объекты и методы исследования*

Исследования проводили в котельной с. Холмогоры, оборудованной 6 котлами КВУ-2000, рассчитанными на сжигание древесного топлива, поступающего из пос. Двинской Березник. Котельная имеет топливный склад с «живым дном». Подача биотоплива в индивидуальные бункера-дозаторы водогрейных котлов осуществляется скребковыми транспортерами. В бункерах-дозаторах, недалеко от толкателей, установлены датчики контроля уровня температуры, что позволяет исключить возможность «обратного» возгорания топлива. Из бункеров-дозаторов древесное топливо с помощью толкателя в режиме подача/пауза подается на наклонную колосниковую решетку. Регулирование расхода топлива, поступающего на решетку, осуществляется изменением продолжительности периодов подачи и паузы. При проведении обследования продолжительность подачи составляла 3 с, продолжительность паузы варьировалась.

Твердотопливный котел КВУ-2000 номинальной мощностью 2 МВт имеет модульную конструкцию и состоит из топки, газовой теплообменника, системы очистки дымовых газов, дымососа с системой газоходов и вентиляторов первичного и вторичного воздуха. Котельная оборудована

2 дымовыми трубами диаметром 0,8 м и высотой 18 м. С помощью системы газоходов к каждой из них подключено по 3 котла.

Топочное устройство «адиабатического» типа формируется из нескольких камер (рис. 1), позволяющих увеличить время пребывания газов в зоне высоких температур.

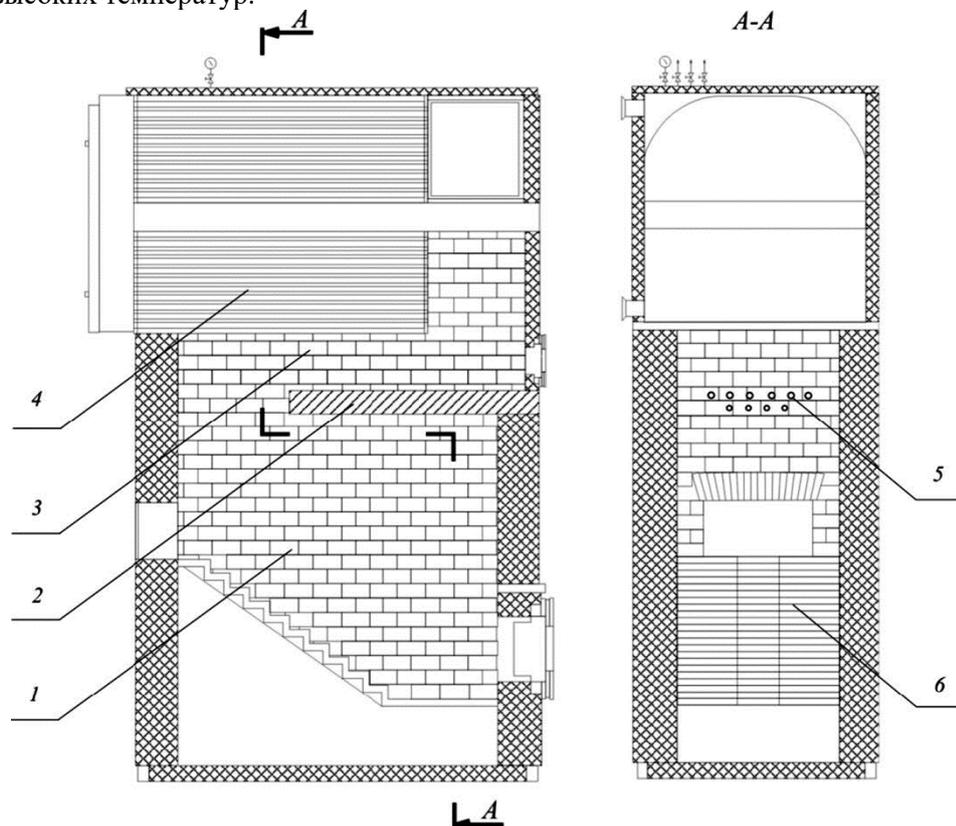


Рис. 1. Устройство твердотопливного водогрейного котла КВУ-2000: 1 – топка; 2 – арочный свод; 3 – камера дожига; 4 – двухходовой газовойодяной теплообменник; 5 – сопла вторичного воздуха; 6 – колосниковая решетка

Fig. 1. The construction of the solid fuel boiler KVU-2000: 1 – furnace; 2 – brick trimmer; 3 – afterburn chamber; 4 – two-pass gas-water heat exchanger; 5 – secondary air nozzles; 6 – grate

Тяжелая обмуровка топки обеспечивает возможность ее работы при температурах до 1300 °С. Использование арочного свода в конструкции топочного устройства в совокупности с принудительным вводом вторичного воздуха через 2 ряда цилиндрических сопел, выполненных на фронтальной стене котла, позволяет сжигать топливо с относительной влажностью до 55 %.

Наличие колосниковой решетки, имеющей наклонный и горизонтальный участки, и системы распределения первичного воздуха по ее длине допускают возможность использования топлива с широким диапазоном изменения гранулометрического состава и сжигания биотоплива повышенной зольности.

Комплект дутьевых вентиляторов и система воздушных каналов в обшивке котла обеспечивают поступление предварительно нагретого первичного воздуха под колосниковую решетку и вторичного воздуха в камеру дожигания.

Для подачи воздуха используются центробежные вентиляторы, при этом электропривод у вентилятора первичного воздуха имеет мощность 4,0 кВт, вторичного – 1,5 кВт. Воздухозаборные устройства расположены на наружной обшивке котла.

Камера дожига, футерованная шамотным кирпичом, увеличивая активный объем топочного устройства, обеспечивает возможность работы в высокотемпературном режиме и повышает полноту выгорания горючих компонент топлива.

Дымогарный теплообменник для обеспечения безопасной эксплуатации оснащен необходимыми предохранительными устройствами. Поверхность нагрева теплообменника – 172 м<sup>2</sup>.

Для очистки уходящих дымовых газов используется инерционный золоуловитель (ЦН-15). Транспортировка продуктов сгорания осуществляется с помощью дымососа ДН-8, оборудованного электродвигателем мощностью 15 кВт с частотным регулированием. Автоматизированная система АСУ-1 обеспечивает управление работой котла.

На всех газоходах от котлов до дымовых труб, а также на золоуловителях тепловая изоляция отсутствует (рис. 2), что не только противоречит требованиям [8, 9], но и вызывает дополнительные потери, которые приходится учитывать при расчете потерь тепла в окружающую среду.

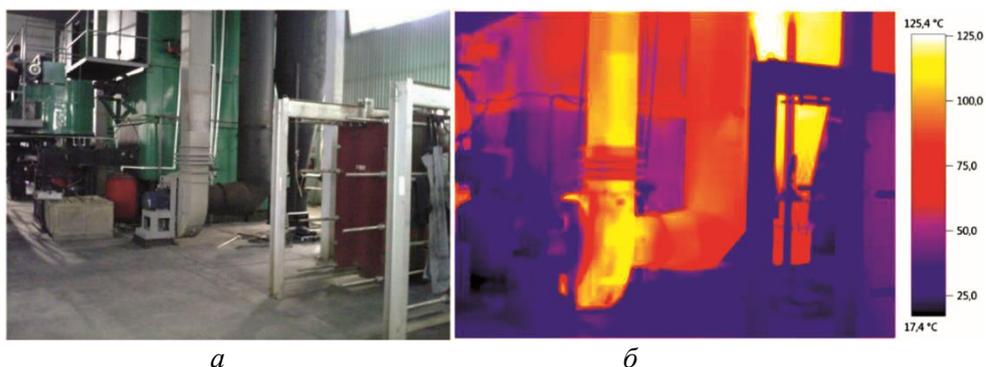


Рис. 2. Газоходы и золоуловитель котла КВУ-2000 № 1 (а) и результаты их тепловизионной съемки (б)

Fig 2. Gas ducts and ash collector of the KVU-2000 boiler No. 1 (a) and the results of their thermal imaging (b)

Осмотр системы газоходов показал, что с точки зрения аэродинамики они имеют не оптимальный профиль и их врезка под прямым углом в дымовую трубу вызывает дополнительные аэродинамические потери.

Установлено, что приборы учета тепла, выработанного водогрейными котлами, и приборы контроля разрежения до и после золоуловителей отсутствуют, чистка котлов осуществляется вручную, продолжительность работы между остановками для чистки труб дымогарного теплообменника составляет 2 недели.

В процессе комплексного энергетического обследования были проведены: внешний и внутренний осмотр элементов водогрейного котла; тарировка газохода; анализ работы основного и вспомогательного оборудования; балан-

совые опыты; анализ технико-экономических и экологических характеристик работы котла.

Энергообследование проводилось в соответствии с требованиями, предъявляемыми к промышленно-эксплуатационным испытаниям 3-й категории сложности [12]. При исследовании состава продуктов сгорания использовался газоанализатор Testo-350 XL. Диоксид серы в дымовых газах отсутствовал при всех режимах работы котла.

Для установления расходов дымовых газов применялись пневмометрическая трубка системы ВТИ и микроанометр прецизионного прибора Testo-435. Результаты исследования поля скоростей необходимы в процессе определения концентрации твердых частиц в дымовых газах методом внешней фильтрации, для реализации которого использовались аспирационная установка ОП-442 ТЦ с трубкой изокинетического отбора, фильтродержатель АФА и др.

Твердые частицы, уловленные из потока дымовых газов, исследовались на электронном растровом микроскопе Zeiss SIGMA VP (фирма «Carl Zeiss») в целях определения их структуры, размера, формы и количественного состава входящих элементов.

Теплотехнический анализ древесного топлива проводился в САФУ с помощью установок лаборатории комплексного термического анализа и калориметра ИКА С 2000 basic Version 2 с жидкостным криотермостатом LOIP FT-216-25.

Исследования гранулометрического состава топлива и очаговых остатков выполнялись с помощью анализаторов AS 200 Control и «029» в соответствии с [12].

При определении потерь тепла в окружающую среду использовались комбинированный относительный метод, при котором для установления температур ограждающих конструкций котла применялся пирометр, и тепловизионный метод. Для выполнения съемки использовался тепловизор Testo 885-2, позволяющий находить в реальном времени распределение температур по поверхности объекта с точностью  $\pm 2$  %. С помощью встроенной цифровой камеры были дополнительно получены изображения объектов в видимом спектре света.

Расход топлива определялся по уравнению обратного теплового баланса. Экспериментальные данные обрабатывались с помощью многомодульного программно-методического комплекса [3].

В качестве «балансового» измерительного сечения на котле КВУ-2000 был выбран прямой участок газохода после циклонного золоуловителя. Коэффициент неравномерности распределения скорости потока для данного сечения составил 0,98.

#### *Результаты исследования и их обсуждение*

При проведении энергообследования в топке котла КВУ-2000 № 1 сжигалось древесное топливо, основную долю которого составляла щепа (рис. 3), массовая доля опилок в составе – около 23 %.

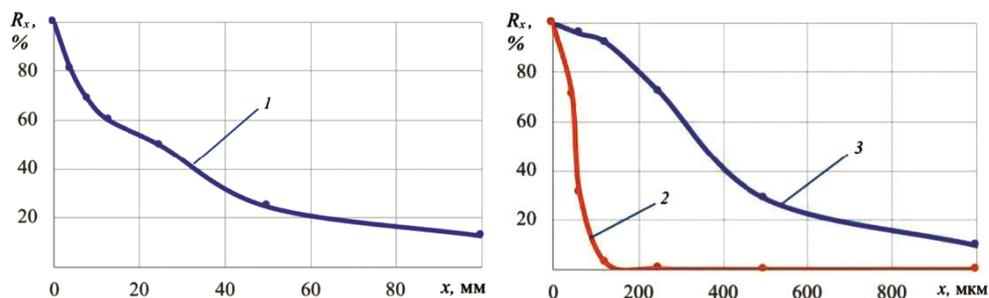


Рис. 3. Гранулометрический состав топлива (а) и очаговых остатков (б): 1 – топливо; 2 – уловленная зола; 3 – шлак с провалом

Fig. 3. Grain size distribution of fuel (a) and ash residues (b): 1 – fuel; 2 – collected ash; 3 – slag with ashpit

Значения полных остатков ( $R_x$ ), приведенные на рис. 3 (кривая 1), свидетельствует, что  $R_x$  на сите с размером ячеек  $x = 5$  мм составил 77 %. Сжигаемое топливо обладало высокой полидисперсностью (средний коэффициент неоднородности состава  $n = 0,703$ ; показатель крупности частиц  $b = 0,64 \cdot 10^{-3}$ ), что удовлетворяет требованиям, предъявляемым к топкам данного типа. Состав очаговых остатков (зола и шлак), образующихся при сгорании топлива, мелкодисперсный (кривые 2 и 3), что обеспечивало их нормальное удаление.

Влажность древесного топлива имела умеренные значения (табл. 1).

Таблица 1

#### Некоторые результаты энергетического обследования водогрейного котла

Показатель	Обозначение, размерность	Опыт	
		№ 1	№ 2
Теплопроизводительность	$Q$ , МВт	1,175	1,75
Рабочее давление воды на выходе	$P_{в}$ , МПа	0,15	0,15
Температура воды на выходе	$t_{вых}$ , °С	52,0	56,0
Влажность топлива	$W_t^r$ , %	46,20	
Зольность топлива	$A^r$ , %	0,99	
Выход летучих веществ	$V^{daf}$ , %	81,87	
Низшая теплота сгорания	$Q_{is}^r$ , МДж/кг	8,874	
Температура уходящих газов	$\vartheta_{вх}$ , °С	122,0	145,0
Избыток воздуха в уходящих газах	$\alpha_{вх}$	3,23	1,83
Потери тепла:			
с уходящими газами	$q_2$ , %	9,87	8,51
с химнедожогом	$q_3$ , %	0,89	0,41
с мехнедожогом	$q_4$ , %	0,26	0,28
в окружающую среду	$q_5$ , %	4,34	2,91
КПД котла брутто	$\eta_{бр}$ , %	84,59	87,84
Полный расход биотоплива	$B$ , кг/ч	562	807
Расход газов за дымососом	$G$ , м <sup>3</sup> /ч	5238	4597
Эмиссия:			
NO <sub>x</sub>	NO <sub>x</sub> , мг/МДж	81	84
СО	СО, мг/МДж	983	486
твердых частиц	$\Xi_{тв.ч}$ , мг/МДж	66,94	64,45

Порционная подача топлива в топочную камеру вызывает пульсации разрежения, для котла № 1 диапазон изменения разрежения в топке составлял 10...200 Па. Экспериментальные работы, выполненные на данном водогрейном котле, а также на других теплогенерирующих установках [3], показали, что не следует допускать работу котлов с разрежением в топке более 100 Па, так как при повышении разрежения ухудшаются условия выгорания топлива вследствие затягивания факела в конвективные поверхности нагрева и возникновения высокоамплитудных пульсаций в топке.

Теплопроизводительность котла КВУ-2000 при проведении энергообследования составляла 58,8...87,5 % от номинальной. При этом частотная характеристика дымососа изменялась в диапазоне 47,0...49,8 Гц. Значения полного расхода древесного топлива приведены в табл. 1.

Выполненные замеры показали, что наличие охлаждающих каналов в обшивке котла КВУ-2000 позволяет обеспечить подогрев первичного ( $t_{пер.в} = 40$  °С) и вторичного ( $t_{втор.в} = 58$  °С) воздуха, подаваемого в топку котла, и снизить температуру, а, соответственно, и потери тепла от ограждающих конструкций в окружающую среду. Однако полное отсутствие теплоизоляции на газоходах и золоуловителе повышало данные потери тепла, что учитывалось при обработке экспериментальных данных.

Отсутствие стационарных приборов контроля концентрации кислорода в уходящих газах и ручная регулировка расхода вторичного воздуха не позволяют поддерживать оптимальный воздушный режим горения, тем не менее наличие «адиабатической» топки и удовлетворительные теплотехнические характеристики сжигаемого топлива обеспечивают умеренные выбросы монооксида углерода и потери тепла с химическим недожогом топлива. При этом КПД брутто котла № 1 при его работе с нагрузкой, близкой к номинальной (опыт № 2), имел достаточно высокое значение.

Соппротивление котла по газовому тракту с учетом газохода и золоуловителя в исследованном диапазоне нагрузок составляло 0,55...0,97 кПа.

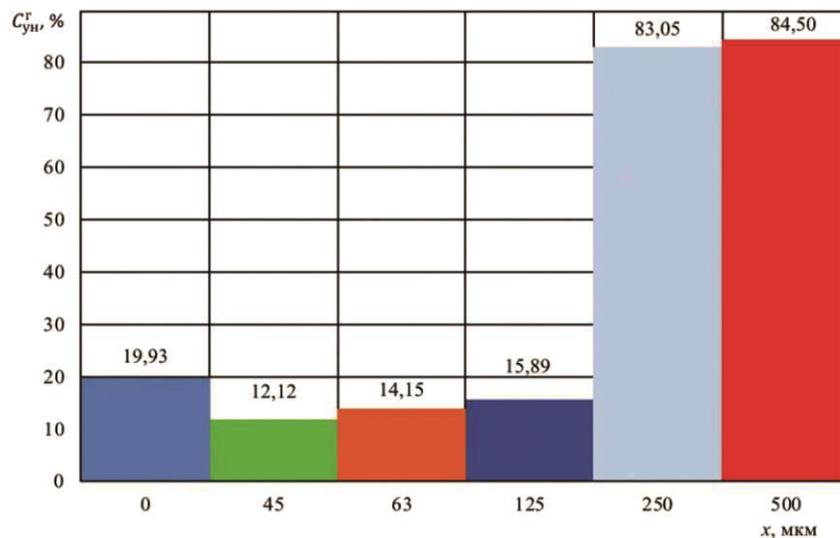
Результаты исследования работы котла показали, что повышенные значения потерь тепла с уходящими газами объясняются большими значениями коэффициента избытка воздуха в этих газах.

Эффективное перемешивание вторичного воздуха с горючими компонентами и ступенчатый ввод воздуха обеспечивают допустимые значения потерь тепла от химической неполноты сгорания топлива. Однако оптимизация воздушного баланса топочной камеры способствует значительному снижению выбросов оксида углерода и потерь тепла от химического недожога.

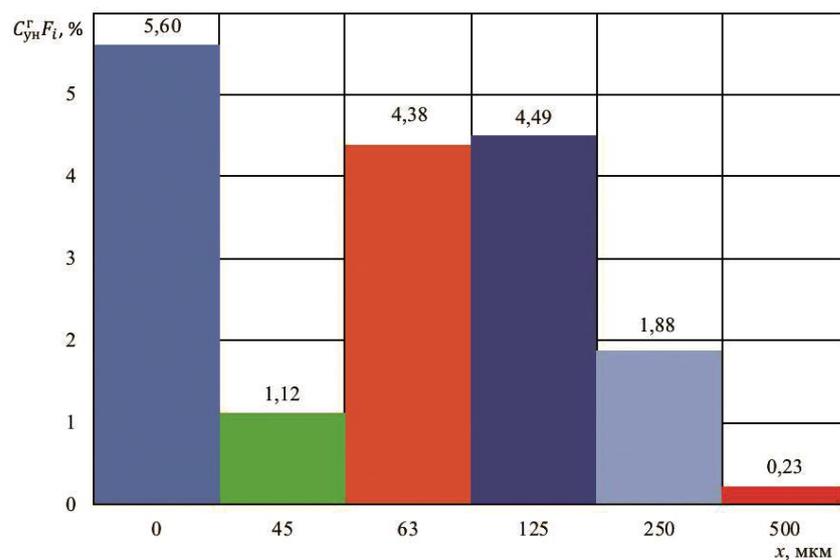
Низкая зольность сжигаемого древесного топлива и умеренное содержание горючих веществ в летучей золе ( $C_{ун}^r = 17,7...17,9$  %) и в шлаке ( $C_{шл}^r = 3,5...3,9$  %) сохранили низкий уровень потерь тепла с механической неполнотой сгорания. Тем не менее для летучей золы, уловленной в циклонном золоуловителе, было выполнено исследование гранулометрического состава (рис. 3) и пофракционного содержания горючих веществ (рис. 4).

Экспериментальные данные показали, что отобранная в золоуловителе циклонного типа зола имеет высокую степень полидисперсности ( $n = 0,975$ ) и относится к тонкодисперсным веществам ( $b = 0,0104$ ). Массовая доля в летучей золе частиц с размером менее 0,25 мм составляет более 97 % (см. рис. 3). Максимальное содержание горючих веществ имеют частицы с размером 0,25 мм и более (рис. 4, а), но массовое содержание которых невелико. Исходя

из этого механический недожог топлива определяет унос углеродосодержащих аэрозолей размером менее 0,25 мм (рис. 4, б).



*a*



*б*

Рис. 4. Содержание горючих веществ в уловленной золе: *a* – по фракциям; *б* – с учетом массовой доли различных фракций

Fig. 4. The content of combustibles in caught ash: *a* – by fractions; *б* – in reliance on the weight content of various fractions

Определение запыленности дымовых газов проводилось в газоходе после золоуловителя. Запыленный поток отбирался с учетом результатов предварительно проведенных тарировок. Концентрация твердой фазы в дымовых газах рассчитывалась в соответствии с требованиями [12].

Среднее значение эмиссии твердых частиц в дымовых газах после золоуловителя циклонного типа при нагрузке котла 87,5 % от номинальной составило 100,4 мг/нм<sup>3</sup>. Для сбора твердых частиц и регулирования расхода от-

бираемых газов была использована аспирационная установка ОП-442 ТЦ с трубкой изокINETического отбора.

Для определения потерь тепла в окружающую среду применялся относительный метод [12, 15], базирующийся на установлении температур ограждающих конструкций котлоагрегата. Для замера температур стенки обследованных котельных агрегатов делились на равные геометрические участки, в каждом из которых с помощью бесконтактного термометра определялась средняя температура. Кроме того, для реализации метода выполнен замер геометрических размеров элементов котлоагрегата, найдены фактическая нагрузка, температура воздуха в зоне, достаточно удаленной от теплоотдающих поверхностей. С использованием полученных данных рассчитывались коэффициенты теплоотдачи наружных поверхностей элементов котлоагрегатов и потери тепла в окружающую среду [15]. Для исключения возможных погрешностей относительный метод был дополнен результатами тепловизионной съемки. Экспериментально определенные потери тепла в окружающую среду для водогрейного котла КВУ-2000 № 1 составили  $q_5^{\text{НОМ}} = 2,55 \%$ , что меньше значений, полученных по обобщающим зависимостям [11]. Некоторые результаты тепловизионных съемок наружных поверхностей котла № 1 приведены на рис. 2 и 5.

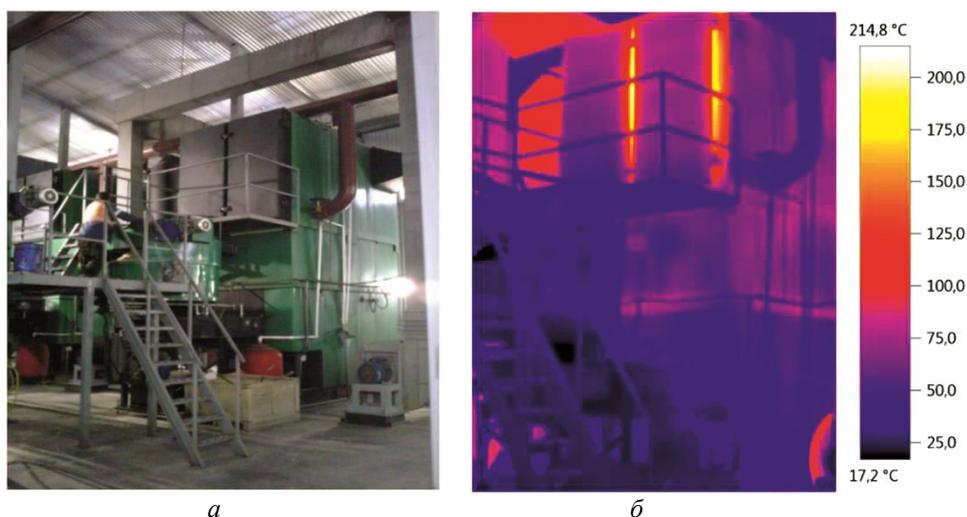


Рис. 5. Фронтальная и правая стены котла КВУ-2000 № 1 (а) и результаты их тепловизионной съемки (б)

Fig 5. Front and right walls of the KVVU-2000 boiler No. 1 (a) and the results of their thermal imaging (b)

Потери с физической теплотой шлака при работе котла на древесном топливе, имеющем достаточно благоприятные теплотехнические характеристики, не превышали  $q_6 = 0,05 \%$ . В шлаке с полидисперсным гранулометрическим составом ( $n = 1,185$ ) доминировали частицы размером менее 1,00 мм (см. рис. 3).

Удельный расход условного топлива на выработку 1 Гкал в исследованном диапазоне нагрузок у котла КВУ-2000 № 1 составил 162,6...168,9 кг.

Эмиссия оксидов азота имела умеренные значения (табл. 1), однако существует значительный резерв для их снижения путем оптимизации воздушного режима топочной камеры.

По результатам исследования выбросов сажевых частиц [4, 5, 7] среднее значение эмиссии при сжигании древесного топлива составило 19,330 г/ГДж (при фактической нагрузке 1,75 МВт), при этом эмиссия сажевых частиц размером менее 2,5 мкм при коэффициенте пересчета 0,14 [13, 17] – 2,706 г/ГДж.

В ходе исследования твердых частиц с помощью электронного растрового микроскопа установлено, что в отобранных пробах содержится 3 основных вида частиц: шарообразной формы; с аморфной структурой; кристаллические. При этом преобладают частицы неправильной формы размером 0,02...5,00 мкм (рис. 6).

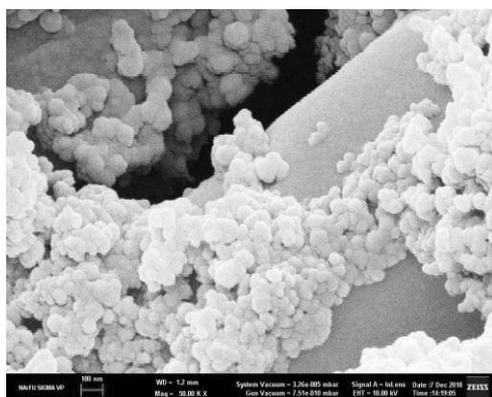


Рис. 6. Структура частиц, образующихся в результате сжигания древесного топлива

Fig 6. The structure of particles formed during the wood fuel combustion

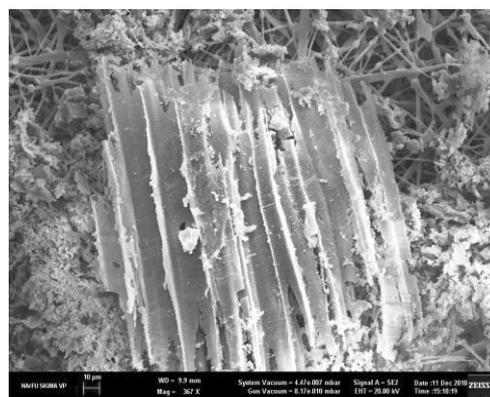


Рис. 7. Несгоревшие частицы древесины, уносимые в газовый тракт котла

Fig 7. Unburned wood particles carried into the boiler gas duct

Значительное количество избыточного воздуха, подаваемого в топку котла, снижает уровень температуры в ней и вызывает вынос невыгоревших древесных частиц за ее пределы. Так, в частицах, отобранных из газового потока до золоуловителя, в небольшом количестве содержатся частички древесины размером до 170 мкм, прошедшие только начальный этап термического разложения и горения (рис. 7).

Элементный состав сухой массы уловленных частиц различается, поэтому в табл. 2 он приведен в виде диапазона.

Таблица 2

**Основные элементы, входящие в состав твердых частиц, уносимых в дымовую трубу**

Элемент	Содержание элемента, %	Элемент	Содержание элемента, %
C	28,0...64,0	Fe	0,2...2,7
O	3,5...30,5	Mg	0,2...1,4
Ca	0,3...24,5	Mn	0,2...1,4
Si	0,4...5,7	K	0,2...3,6
S	0,0...0,5	Zn	0,0...0,6

Как известно, древесина хвойных пород состоит преимущественно из клеток одного типа – прозенхимных, которые представлены в основном трахеидами. Размеры трахеид зависят от вида древесины и других факторов, в их стенках имеются простые и окаймленные поры.

#### Заключение

Комплексное энергообследование показало, что котлоагрегаты КВУ-2000 обеспечивают приемлемые технико-экономические и экологические показатели при сжигании древесного топлива, имеющего неоднородный гранулометрический состав. Однако ручная регулировка расхода вторичного воздуха и отсутствие приборов контроля концентрации кислорода в уходящих газах не позволяют поддерживать оптимальный воздушный режим процесса горения. Отсутствие приборов контроля сопротивления золоулавливающих устройств и приборов, фиксирующих теплопроизводительность энергоисточника, а также тепловой изоляции на всех элементах газового тракта за котлом вызывает нерациональные энергетические потери и противоречит требованиям действующих нормативных документов. Ограниченный период эксплуатации между чистками поверхности нагрева газодыяного теплообменника предъявляет повышенные требования к резервированию установленной мощности энергоисточника. Устранение выявленных недостатков обеспечит существенное повышение технико-экономических показателей работы котлов, приведет к снижению выбросов вредных веществ при сжигании биотоплив, что позволит рекомендовать данные энергоустановки для систем теплоснабжения Северо-Арктического региона.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Башмаков И., Мышак А. Затраты и выгоды реализации стратегий низкоуглеродного развития России: перспективы до 2050 г. // *Вопр. экономики*. 2014. № 8. С. 70–91. [Bashmakov I., Myshak A. Costs and Benefits of the Transition to Low-Carbon Economy in Russia: Perspectives up to 2050. *Voprosy Ekonomiki*, 2014, no. 8, pp. 70–91]. DOI: [10.32609/0042-8736-2014-8-70-91](https://doi.org/10.32609/0042-8736-2014-8-70-91)
2. Кокорин А. Новые факторы и этапы глобальной и российской климатической политики // *Экономическая политика*. 2016. Т. 11, № 1. С. 157–176. [Kokorin A.O. New Factors of the Global and Russian Climate Policy. *Ekonomicheskaya Politika*, 2016, vol. 11, no. 1, pp. 157–176]. DOI: [10.18288/1994-5124-2016-1-10](https://doi.org/10.18288/1994-5124-2016-1-10)
3. Любов В.К., Любова С.В. Повышение эффективности энергетического использования биотоплив. Архангельск: САФУ, 2017. 533 с. [Lyubov V.K., Lyubova S.V. *Efficiency Improvement of the Biofuels Energy Use*. Arkhangelsk, NArFU Publ., 2017. 533 p.]
4. Любов В.К., Малыгин П.В., Попов А.Н., Попова Е.И. Исследование эффективности работы водогрейного котла при сжигании биотоплив // *Биотехнологии в химико-лесном комплексе: материалы междунар. науч. конф.*, Архангельск, 11–12 сент. 2014 г. Архангельск: САФУ, 2014. С. 201–205. [Lyubov V.K., Malygin P.V., Popov A.N., Popova E.I. Biofuel Combustion Efficiency of the Hot-Water Boiler. *Biotechnologies in the Chemical and Forest Complex: Proceedings of the International Scientific Conference, Arkhangelsk, September 11–12, 2014*. Arkhangelsk, NArFU, 2014, pp. 201–205].
5. Макаров И.А., Чен Х., Пальцев С.В. Последствия Парижского климатического соглашения для экономики России // *Вопр. экономики*. 2018. № 4. С. 76–94. [Makarov I.A., Chen H., Paltsev S.V. Impacts of Paris Agreement on Russian Economy. *Voprosy Ekonomiki*, 2018, no. 4, pp. 76–94]. DOI: [10.32609/0042-8736-2018-4-76-94](https://doi.org/10.32609/0042-8736-2018-4-76-94)

6. Мохирев А.П., Безруких Ю.А., Медведев С.О. Переработка древесных отходов предприятий лесопромышленного комплекса, как фактор устойчивого природопользования // Электрон. науч. журн. «Инж. вестн. Дона». 2015. № 2, ч. 2. С. 81. [Mokhirev A.P., Bezrukikh J.A., Medvedev S.O. Recycling of Wood Wastes of Timber Industry, as a Factor of Sustainable Resource Management. *Inzhenernyy vestnik Dona* [Engineering Journal of Don], 2015, no. 2, part 2, p. 81].

7. Попова Е.И., Попов А.Н., Любов В.К., Варакин Е.А. Сжигание твердых топлив в водогрейном котле Firematic 60 // Природопользование в Арктике: современное состояние и перспективы развития: сб. науч. тр. 1-й междунар. науч.-практ. конф., Якутск, 22–25 сент. 2015 г. Якутск: СВФУ, 2015. С. 464–473. [Popova E.I., Popov A.N., Lyubov V.K., Varakin E.A. Solid Fuels Combustion in the Boiler Firematic 60. *Proceedings of the 1st International Scientific and Practical Conference "Nature Management in the Arctic: Current State and Development Potential"*, Yakutsk, September 22–25, 2015. Yakutsk, NEFU Publ., 2015, pp. 464–473].

8. ПБ 10-574–03. Правила устройства и безопасной эксплуатации паровых и водогрейных котлов. М.: ПИО ОБТ, 2003. 215 с. [PB 10-574–03. *Rules for the Construction and Safe Operation of Steam and Water Boilers*. Moscow, PIO OBT Publ., 2003. 215 p.].

9. Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей Российской Федерации / Мин-во энергетики РФ. М.: Энергосервис, 2003. 368 с. [Rules for Technical Operation of Power Plants and Grids of the Russian Federation. Moscow, Energoservis Publ., 2003. 368 p.].

10. Сафонов Г.В., Стеценко А.В., Дорина А.Л., Авалиани С.Л., Сафонова Ю.Л., Беседовская Д.С. Стратегия низкоуглеродного развития России. Возможности и выгоды замещения ископаемого топлива «зелеными» источниками энергии М.: ТЕИС, 2016. 48 с. [Safonov G.V., Stetsenko A.V., Dorina A.L., Avaliani S.L., Safonova Yu.L., Besedovskaya D.S. The Strategy of Low-Carbon Development of Russia. *Opportunities and Benefits of Substitution of Fossil Fuels with "Green" Energy Sources*. Moscow, TEIS Publ., 2016. 48 p.].

11. Тепловой расчет котлов (нормативный метод) / ПАО «ЕЭС России», ВТИ, НПО ЦКТИ. СПб., 1998. 257 с. [Thermal Calculation of Boilers (Normative Method). Saint Petersburg, 1998. 257 p.].

12. Трёмбовля В.И., Фингер Е.Д., Авдеева А.А. Теплотехнические испытания котельных установок. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Энергоатомиздат, 1991. 416 с. [Trembovlya V.I., Finger E.D., Avdeyeva A.A. *Heating Tests of Boilers*. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1991. 416 p.].

13. Borchsenius H., Borgnes D. Black Carbon Emissions from the District Heating Sector in the Barents Region. *NORSK ENERGI. Ministry of Environment of Norway. Project Name: RUS-11/0060*. Norway, 2013. 56 p.

14. Flach B., Bendz K., Krautgartner R., Lieberz S. *EU-27. Biofuels Annual Report No. NL3034*. The Hague, USDA Foreign Agricultural Service, 2013. 34 p.

15. Lyubov V.K., Malygin P.V., Popov A.N., Popova E.I. Determining Heat Loss into the Environment Based on Comprehensive Investigation of Boiler Performance Characteristics. *Thermal Engineering*, 2015, vol. 62, iss. 8, pp. 572–576. DOI: [10.1134/S004060151506004X](https://doi.org/10.1134/S004060151506004X)

16. Magdziarz A., Wilk M., Straka R. Combustion Process of Torrefied Wood Biomass. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2017, vol. 127, pp. 1339–1349. DOI: [10.1007/s10973-016-5731-0](https://doi.org/10.1007/s10973-016-5731-0)

17. Petzold A., Ogren J.A., Fiebig M., Laj P., Li S-M., Baltensperger U. et al. Recommendations for Reporting "Black Carbon" Measurements. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2013, vol. 13, pp. 8365–8379. DOI: [10.5194/acp-13-8365-2013](https://doi.org/10.5194/acp-13-8365-2013)

18. Poletto M., Zattera A.J., Forte M.M.C., Santana R.M.C. Thermal Decomposition of Wood: Influence of Wood Components and Cellulose Crystallite Size. *Bioresource Technology*, 2012, vol. 109, pp. 148–153. DOI: [10.1016/j.biortech.2011.11.122](https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.11.122)

19. Porfiriev B.N., Roginko S.A. Energy on Renewable Sources: Prospects for the World and for Russia. *Herald of the Russian Academy of Sciences*, 2016, vol. 86, iss. 6, pp. 433–440. DOI: [10.1134/S101933161606006X](https://doi.org/10.1134/S101933161606006X)

20. *World Energy Resources: 2013 Survey*. Ch. 7. Bioenergy. London, World Energy Council, 2013. 24 p. Available at: [https://www.worldenergy.org/assets/images/imported/2013/10/WER\\_2013\\_7\\_Bioenergy.pdf](https://www.worldenergy.org/assets/images/imported/2013/10/WER_2013_7_Bioenergy.pdf) (accessed 27.12.18).

## COMBUSTION EFFICIENCY OF WOOD FUEL IN THE WATER BOILERS KVVU-2000

*V.K. Lyubov*, Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [AAF-8949-2019](https://orcid.org/0000-0001-7050-1212),

ORCID: [0000-0001-7050-1212](https://orcid.org/0000-0001-7050-1212)

*A.N. Popov*, Candidate of Engineering, Assoc. Prof.; ResearcherID: [N-5104-2019](https://orcid.org/0000-0003-0144-1513),

ORCID: [0000-0003-0144-1513](https://orcid.org/0000-0003-0144-1513)

Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Naberezhnaya Severnoy Dviny, 17, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation; e-mail: vk.lyubov@mail.ru, a.n.popov@narfu.ru

Renewable energy use is one of priority areas of power production development. One of the sources is wood biomass. Utilization of wood biomass in the regions with developed timber industry is a prospective decision in ensuring power independence. Wood biomass usage allows to recover by-products of logging and woodworking industries, generate cheaper electric power and reduce an impact on the environment. The North-West of Russia has huge wood reserves. As a result, the issues of efficient utilization of wood biomass are relevant for the region. An effective way of the complex solution of energetical and ecological problems with provision of heating loads is application of modern devices operating on wood fuel such as modern water boilers. This study aims to analyze heat engineering and environmental performance of the boiler KVVU-2000 during the combustion of by-products of timber industry. The components of the boiler's heat balance and gaseous effluents have been determined. Emissions of particulate matter and the content of soot particles have been studied. The study results have shown that the boiler KVVU-2000 provides high economic and environmental performance when operating on polydisperse wood fuel. However, a manual regulation of secondary air flow and absence of the flue gas oxygen control systems do not allow to keep optimum combustion air-blown mode. Absence of resistance control devices for ash collectors and thermal insulation of elements in post-combustion gas path lead to irrational heat losses, which conflicts with normative regulations. A limited operational period between cleaning of heating surfaces of a fire-tube boiler demands strict requirements to capacity redundancy. Elimination of identified flaws will ensure substantial increase of energetic and economic performance of the boilers; allow to minimize the emissions of harmful substances of biofuel burning, and recommend these boilers for application in heat supply systems in the Arctic region.

**For citation:** Lyubov V.K., Popov A.N. Combustion Efficiency of Wood Fuel in the Water Boilers KVVU-2000. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2020, no. 1, pp. 167–179. DOI: [10.37482/0536-1036-2020-1-167-179](https://doi.org/10.37482/0536-1036-2020-1-167-179)

**Acknowledgments:** The authors are grateful to D.G. Chukhchin for carrying out the research using the scanning electron microscopy method.

**Keywords:** water boiler, wood fuel, harmful substances, furnace, heat losses, efficiency.

Поступила 31.12.18 / Received on December 31, 2018