

# ЭНЕРГОЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ВОДОГРЕЙНОГО КОТЛА ПРИ СЖИГАНИИ БИОТОПЛИВ И ТОРФА

**В.К. Любов, А.Н. Попов, Е.И. Попова**

**Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова, г. Архангельск**

Экспериментально исследованы энергоэкологические показатели водогрейного котла "Firematic 60" при сжигании древесных гранул, коры, прессованной древесно-шлифовальной пыли, гранулированного и кускового торфа и торрефицированных гранул из гидролизного лигнина. Определены составляющие теплового баланса котла и эмиссии газообразных выбросов при сжигании твердых топлив. Исследованы выбросы твердых частиц и содержание в них частиц сажи. Энергетическое обследование показало, что котел обеспечивает высокие энергоэкологические показатели при сжигании биотоплив, а также гранулированного торфа и его следует использовать для теплоснабжения зданий, особенно в условиях Северо-Арктического региона. Организация производства торрефицированных гранул из гидролизного лигнина позволила получить качественное топливо из биомассы, которая находилась в отвалах 40–60 лет.

*Ключевые слова: водогрейный котел, древесное топливо, вредные вещества, выбросы сажевых частиц, потери тепла, коэффициент полезного действия*

## Study the Efficiency of the Boiler Burning Biofuels and Peat

**V.K. Lyubov, A.N. Popov, E.I. Popova**

**Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, 163002 Arkhangelsk, Russia**

The results of experimental research thermal and environmental performance of the boiler "Firematic 60" burning pellets, bark, pressed wood sanding dust, granulated peat and sod peat and black pellets of hydrolytic lignin are presented. The research identified the heat balance components of the boiler and gaseous emissions during burning solid fuels. The emissions of solid particles and the content of soot particles are studied. Energy survey found boiler provides high thermal and environmental performance during burning biofuels and granulated peat that should be used for buildings heating; especially in the conditions of North-Arctic region. The organization of production of black pellets of hydrolytic lignin allowed to obtain high-quality fuel from biomass wasted 40–60 years ago.

*Key words: boiler, wood fuel, hazardous substances, emissions of soot particles, heat losses, efficiency*

DOI: 10.18412/1816-0395-2019-03-20-25

Одним из приоритетных направлений развития энергетики является использование возобновляемых источников энергии. К таким источникам относится древесная биомасса, использование которой в регионах с развитым лесопромышленным комплексом является перспективным решением, обеспечивающим их энергетическую независимость. Кроме того, использование ее позволяет утилизировать побочные продукты лесозаготовительных и деревообрабатывающих предприятий, получить более дешевую энергию, снизить вредное воздействие на окружающую среду и др.

Исследовательские работы проводились в Учебно-научном центре энергетических иннова-

ций Высшей школы энергетики, нефти и газа САФУ имени М.В. Ломоносова, подключенном к системе централизованного теплоснабжения. Резервным источником теплоснабжения является водогрейный котел "Firematic 60" австрийской фирмы Herz Energietechnik GmbH, который также используется при выполнении лабораторного практикума и проведении исследовательских работ. Котел рассчитан для работы на древесных гранулах и щепе [1]. По данным фирмы-изготовителя, номинальная мощность котла (60 кВт) обеспечивается при сжигании биотоплива с относительной влажностью  $W_f \leq 25\%$ .

Водогрейный котел имеет топливный бункер со шнековой системой подачи биотоплива в промежуточную емкость с устрой-

ством защиты от обратного возгорания. Из промежуточной емкости топливо шнековым питателем подается в нижнюю часть горелки объемного типа. Горелка имеет сложный профиль, в ее нижней части установлена колосниковая решетка, состоящая из двух частей. Для очистки решетки предусмотрена возможность ее поворота на 90°. Подача топлива осуществляется в режиме рабочий цикл/пауза. Для автоматического розжига топлива используется электрический тепловентилятор. За счет разрежения, создаваемого дымососом, в горелочное устройство поступает первичный и вторичный воздух. Основная часть вторичного воздуха подается через восемь тангенциальных сопел и обеспечивает догорание горючих компонентов топлива.

Рабочее давление теплоносителя на выходе из котла не должно превышать 0,3 МПа, а температура — 95 °С. Водогрейный котел имеет два контура, при этом в первом, оборудованном буферной емкостью, циркулирует очищенная химическим методом деаэрированная вода. Расчетный температурный режим для рабочей среды первого контура составляет 95/60 °С. Нагрев сетевой воды второго контура осуществляется с помощью пластинчатого теплообменника.

Из объемной горелки продукты сгорания поступают в камеру догорания, где отдают часть тепла и покидают ее через выходное окно, расположенное на задней стенке. Дымовые газы обеспечивают нагрев котловой воды первого контура, совершая два хода в дымогарных трубах, после чего дымососом направляются в дымовую трубу. Для повышения эффективности теплообмена в трубах установлены турбулизаторы-очистители. Продукты сгорания после первого хода в дымогарных трубах поворачиваются на 180°, при этом наиболее крупные фракции золы сепарируются в зольник и шнеком удаляются в сборную емкость. Зола и шлак из топочной камеры индивидуальным шнеком выводятся в сборную емкость.

Для обеспечения плавного регулирования производительности котла привод дымососа имеет частотное регулирование. Водогрейный котел оборудован необходимыми приборами безопасности [1]. Система автоматического регулирования с интегрированным микропроцессорным модулем Bio-Control 3000 (Австрия), оснащена датчиками контроля содержания кислорода в уходящих газах, температуры в камере догорания и в газоходе после котла, а также температуры воды на входе и выходе и др. Она обеспечивает погодозависимое регулирование отопительных контуров и управление другими важнейшими параметрами работы котельной установки.

### Экспериментальная часть

Комплексное исследование эффективности работы котла проводилось в пять этапов (результаты приведены в табл. 1–4). В ходе первого этапа выполнялись балансовые опыты при подаче в топку котла древесных гранул диаметром

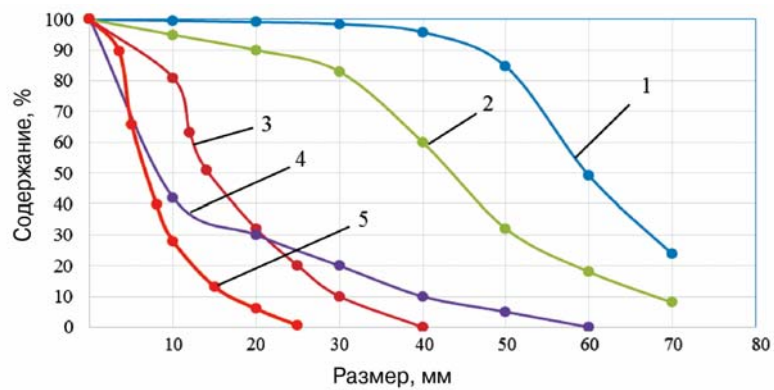


Рис. 1. Гранулометрический состав сжигаемых топлив:

1 – кора ели; 2 – кора сосны; 3 – древесные гранулы диаметром 8 мм; 4 – кусковой торф; 5 – торрефицированные гранулы из гидролизного лигнина

Fig. 1. Particle size distribution of burned fuels:

1 – fir bark; 2 – pine tree bark; 3 – wood pellets with a diameter 8 mm; 4 – lump peat; 5 – black pellets from hydrolyzed lignin

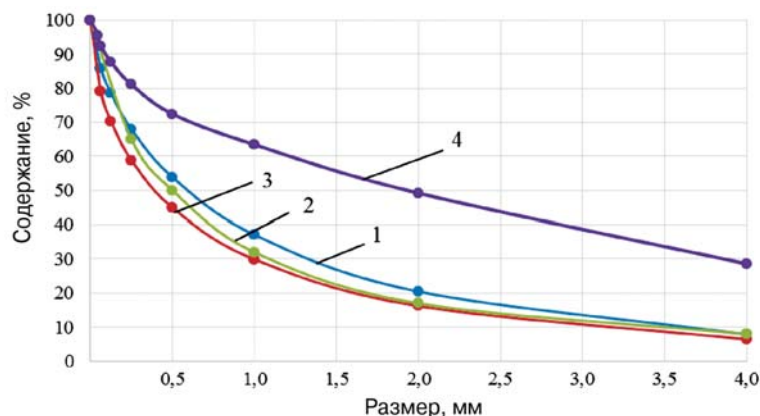
8 мм, имеющих достаточно однородный гранулометрический состав и теплотехнические характеристики (табл. 1, опыты № 1, № 2), отвечающие требованиям действующих стандартов. На втором этапе энергообследования в котле сжигали кору сосны (табл. 1, опыты № 3, № 4), различного гранулометрического состава. В ходе третьего этапа выполнялись балансовые опыты при подаче в топку торфяных гранул диаметром 10 мм (табл. 2, опыты № 1, № 2), имеющих достаточно однородный гранулометрический состав, и кускового торфа (табл. 2, опыты № 3, № 4). Кусковой торф имел высокую степень неоднородности гра-

нулометрического состава (средний коэффициент полидисперсности  $n = 0,772$ , а коэффициент, характеризующий крупность состава,  $b = 0,661 \cdot 10^{-3}$ ) (рис. 1). На четвертом этапе энергообследования в топке котла сжигалась кора ели (табл. 3, опыты № 1, № 2) и прессованная древесно-шлифовальная пыль и опилки с линии обрезки фанеры (табл. 3, опыты № 3, № 4). Брикеты из мелкодисперсных побочных продуктов фанерного производства предварительно были разделены на части, удовлетворяющие требованиям системы подачи топлива при ее работе на щепе (G50). На пятом этапе в топке котла сжигались дре-

Таблица 1. Основные показатели работы котла при сжигании древесных гранул и коры сосны

Table 1. The main indicators of the boiler run when burning wood pellets and pine bark

Показатель	Опыт			
	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4
Теплопроизводительность $Q$ , кВт	64,0	103,5	47,6	40,7
Рабочее давление воды на выходе $P_b$ , МПа	0,27	0,27	0,18	0,17
Температура воды на выходе $t_{\text{вых}}$ , °С	50,0	79,0	68,5	68,1
Влажность гранул $W_f$ , %	8,38		13,72	
Зольность гранул $A_f$ , %	0,50		2,52	
Выход летучих веществ $V^{\text{лат}}$ , %	85,10		76,88	
Низшая теплота сгорания $Q_{\text{н}}$ , МДж/кг	17,30		17,98	
Температура уходящих газов $\vartheta_{\text{гв}}$ , °С	106,0	151,0	116,0	106,0
Избыток воздуха в уходящих газах $\alpha_{\text{гв}}$	1,39	1,42	1,57	1,79
Потери тепла, %:				
с уходящими газами $q_2$	4,17	6,71	4,61	4,55
с химнедожогом $q_3$	0,02	0,01	0,09	0,14
с мехнедожогом $q_4$	0,12	0,11	1,46	1,46
в окружающую среду $q_5$	0,47	0,29	0,63	0,74
КПД котла брутто $\eta_{\text{бр}}$ , %	95,20	92,87	93,15	93,06
Полный расход биотоплива $B$ , кг/ч	14,0	23,0	10,0	9,0
Эмиссия, мг/МДж:				
NO <sub>x</sub>	52	52	57	92
CO	21	12	85	126



**Рис. 2. Гранулометрический состав очаговых остатков, отобранных из зольников топки при сжигании:**

1 – коры ели; 2 – коры сосны; 3 – прессованной ДШП; 4 – торрефицированных гранул из гидролизованного лигнина

**Fig. 2. Particle size distribution of combustion residues, collected from ash pits during combustion:**

1 – fir bark; 2 – pine tree bark; 3 – pressed chipboard; 4 – black pellets from hydrolyzed lignin

весные гранулы диаметром 6 мм (табл. 4, опыты № 1, № 2) и пеллеты, полученные из торрефицированного гидролизованного лигнина в ОАО "Бионет" (табл. 4, опыты № 3, № 4). Для каждого вида топлива приведены результаты только двух опытов, отражающие полученные энергоэкологические показатели работы котла.

Теплотехнический анализ топлива проводился с помощью установок лаборатории термического

анализа и калориметра ИКА С 2000 basic Version 2 (Германия) с жидкостным криотермостатом LOIP FT-216-25 (Россия). Исследование фракционного состава гранулированных топлив и очаговых остатков проводилось с помощью анализаторов AS 200 Control (Германия) и Microtrac S3500 (США). Определение полей скоростей и расходов дымовых газов выполнялось с помощью пневмометрической трубки и микроманометра

прецизионного прибора "Testo-435" (Германия). Результаты исследования поля скоростей использовались для определения концентрации твердых частиц в дымовых газах после котла. При этом применялся метод внешней фильтрации, для реализации которого использовалась аспирационная установка "ОП-442 ТЦ", пылезаборная трубка, фильтродержатель АФА и др. Для исследования состава продуктов сгорания применялся газоанализатор "Testo-350 XL" (Германия). Расход топлива определялся по уравнению обратного теплового баланса. Обработка экспериментальных данных проводилась с помощью многомодульного программно-методического комплекса [1].

После автоматического запуска котла время его выхода на номинальную мощность не превышало 20 мин, а через 33–38 мин система автоматики обеспечивала температуру воды на входе в котел они увеличиваются (см. табл. 1–4).

### Результаты и обсуждение

Анализ условий тепловой работы котла показал, что потери тепла с уходящими газами составляют  $q_2 = 4,17 \div 7,68 \%$ , при этом с ростом нагрузки и повышением температуры воды на входе в котел они увеличиваются (см. табл. 1–4).

Ступенчатая схема сжигания топлива и эффективное перемешивание вторичного воздуха с горючими компонентами топлива, а также поддержание коэффициента избытка воздуха в топке в диапазоне 1,24–1,61 позволили обеспечить низкие значения потерь тепла от химической неполноты сгорания топлива (см. табл. 1–4). Значения концентраций оксида углерода, приведенные к коэффициенту избытка воздуха 1,4, составили 8–116 мг/нм<sup>3</sup>.

При работе котла на коре сосны избыточная подача воздуха в горелку вызвала уменьшение температурного уровня и времени пребывания горючих компонент топлива в топочной камере, при этом значения концентраций оксида углерода выросли до 246–954 мг/нм<sup>3</sup>, а потери тепла с химическим недожогом до  $q_3 = 0,09 \div 0,35 \%$ . Поддержание коэффициента избытка воздуха, близкого к оптимальному, при сжигании коры ели, имеющей похожие

**Таблица 2. Основные показатели работы котла при сжигании торфяных гранул и кускового торфа**

**Table 2. The main indicators of the boiler run when burning peat pellets and lumpy peat**

Показатель	Опыт			
	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4
Теплопроизводительность $Q$ , кВт	79,7	79,7	74,8	74,8
Рабочее давление воды на выходе $P_B$ , МПа	0,15	0,20	0,27	0,27
Температура воды на выходе $t_{\text{вых}}$ , °С	74,0	75,0	78,0	78,0
Влажность топлива $W_f$ , %	16,50		8,20	
Зольность топлива $A_f$ , %	9,95		11,76	
Содержание серы $S_f$ , %	0,22		0,19	
Выход летучих веществ $V^{\text{лет}}$ , %	74,56		67,88	
Низшая теплота сгорания $Q_{f, \text{н}}$ , МДж/кг	14,875		15,469	
Температура уходящих газов $\vartheta_{\text{гк}}$ , °С	137,2	137,5	135,2	133,0
Избыток воздуха в уходящих газах $\alpha_{\text{гк}}$	1,38	1,41	1,27	1,24
Потери тепла, %:				
с уходящими газами $q_2$	5,77	5,88	5,29	5,07
с химнедожогом $q_3$	0,01	0,02	0,00	0,01
с мехнедожогом $q_4$	2,17	2,17	13,00	13,00
в окружающую среду $q_5$	0,38	0,38	0,40	0,40
КПД котла брутто $\eta_{\text{бр}}$ , %	91,37	91,24	81,01	81,22
Полный расход биотоплива $B$ , кг/ч	21	21	21	21
Эмиссия, мг/МДж:				
$\text{NO}_x$	169	177	156	136
CO	7	23	4	11
$\text{SO}_2$	338	331	272	278
твердых частиц $\text{Э}_{\text{тв.ч}}$	12,6	12,8	32,4	32,5

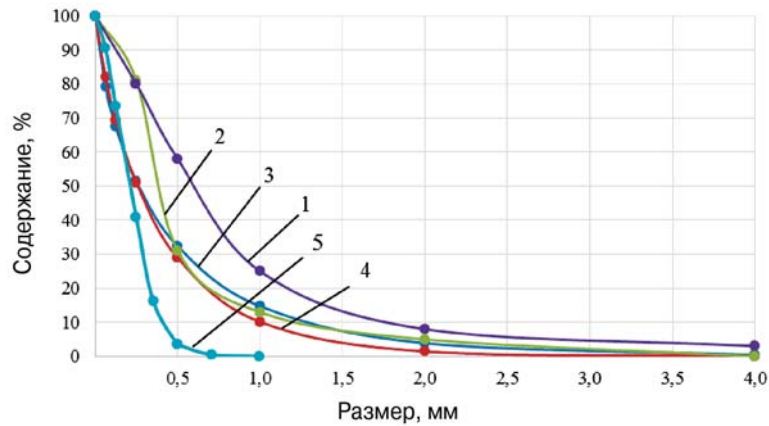
теплотехнические и гранулометрические характеристики с коры сосны, позволило обеспечить меньшую эмиссию оксида углерода и соответственно потери тепла с химическим недожогом (см. табл. 3, опыты № 1, № 2).

Потери тепла с механической неполнотой сгорания при работе котла на древесных гранулах диаметром 8 мм (см. табл. 1, опыты № 1, № 2) и 6 мм (см. табл. 4, опыты № 1, № 2) имели очень низкий уровень, что объясняется однородностью гранулометрического состава сжигаемого топлива, его низкой зольностью, а также достаточно высокой теплотой сгорания. Данные факторы обеспечили высокую полноту выгорания горючих компонентов в очаговых остатках.

Кора сосны и ели, в отличие от древесных гранул, имеет более высокую зольность (см. табл. 1, 3) и менее однородный гранулометрический состав (рис. 1), что вызвало увеличение потерь тепла с механической неполнотой сгорания, при этом содержание горючих веществ в уносе твердых частиц из топki выросло до  $C_{\text{ун}}^r = 24,5 \div 56,5 \%$  (меньшие значения для коры ели). Гранулометрический состав очаговых остатков, отобранных из зольников топki и теплообменника, показан на рис. 2, 3.

При работе котла на торфяных гранулах, зольность которых почти в четыре раза больше чем коры, потери тепла в результате механической неполноты сгорания увеличились до  $q_4 = 2,17 \%$  ( $C_{\text{ун}}^r = 19,50 \%$ ).

Переход на сжигание кускового торфа с большим содержанием мелких высокопарусных частиц вызвал резкое повышение потерь тепла до  $q_4 = 13 \%$  ( $C_{\text{ун}}^r = 20,70 \%$ ,  $C_{\text{ун}}^r = 53,17 \%$ ). При развороте продуктов сгорания на  $180^\circ$  после первого хода в дымогарных трубах твердая фракция, преимущественно с частицами размером 125 мкм и более, сепарирует в зольник, откуда шнеком удаляется в сборную емкость. ПДФракционный анализ показал, что наибольшее количество горючих веществ содержится в частицах размером 0,5 мм и более (рис. 4, а). Анализ экспериментальных данных с учетом массового содержания разных фракций показал, что определяющую роль в потере тепла с механической неполнотой сгорания



**Рис. 3. Гранулометрический состав очаговых остатков; отобранных из-под теплообменника при сжигании:**

1 – коры сосны; 2 – кускового торфа; 3 – прессованной ДШП; 4 – коры ели; 5 – торрефицированных гранул из гидролизного лигнина

**Fig. 3. Particle size distribution of combustion residues; collected from the heat exchanger during combustion:**

1 – pine tree bark; 2 – lump peat; 3 – pressed chipboard; 4 – fir bark; 5 – black pellets from hydrolyzed lignin

играет унос недогоревших частиц торфа с размером  $0,25 \leq \delta < 2$  мм (рис. 4, б).

Более высокая зольность (примерно в 20 раз, см. табл. 2) и высокая неоднородность гранулометрического состава кускового торфа (см. рис. 1) по сравнению с биотопливами, на которые рассчитан котел, не позволяют рекомендовать его для сжигания кускового торфа без внесения существенных изменений в систему сбора и удаления очаговых остатков с организацией системы защиты от их воз-

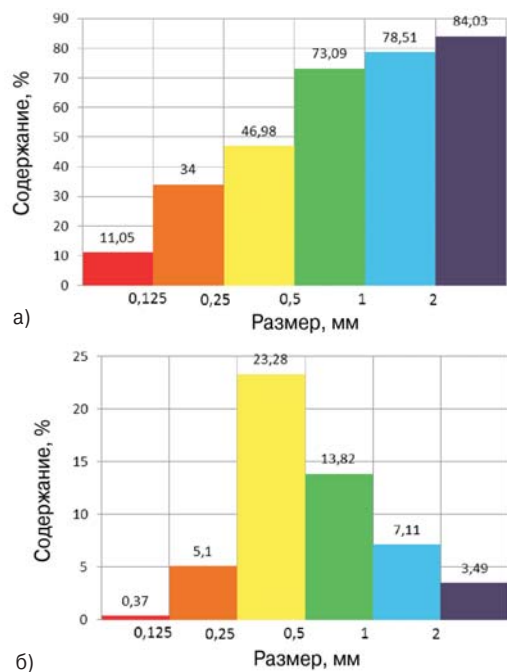
горания. Кроме этого, переход со сжигания торфяных гранул на кусковой торф вызвал увеличение концентрации твердых частиц в удаляемых дымовых газах почти в три раза (см. табл. 2), что указывает на целесообразность установки золоуловителя.

Экспериментальные исследования показали, что конструкция котла позволяет обеспечить достаточно эффективное сжигание прессованной древесно-шлифовальной пыли и опилок с линии обрезки фанеры (см. табл. 3,

**Таблица 3. Основные показатели работы котла при сжигании коры ели и прессованной ДШП**

**Table 3. The main indicators of the boiler run when burning fir bark and pressed chipboard**

Показатель	Опыт			
	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4
Теплопроизводительность $Q$ , кВт	71,1	75,0	43,8	39,9
Рабочее давление воды на выходе $P_{\text{в}}$ , МПа	0,32	0,32	0,25	0,25
Температура воды на выходе $t_{\text{вых}}$ , °С	77,0	80,0	69,0	68,0
Влажность топлива $W_f$ , %	11,52		5,85	
Зольность топлива $A^r$ , %	2,23		0,82	
Выход летучих веществ $V^{\text{лат}}$ , %	76,56		82,12	
Низшая теплота сгорания $Q_{\text{н}}$ , МДж/кг	16,88		16,90	
Температура уходящих газов $\vartheta_{\text{ух}}$ , °С	148,0	155,0	123,0	117,0
Избыток воздуха в уходящих газах $\alpha_{\text{ух}}$	1,40	1,35	1,54	1,62
Потери тепла, %:				
с уходящими газами $q_2$	6,31	6,49	5,98	5,85
с химнедожогом $q_3$	0,03	0,02	0,03	0,04
с мехнедожогом $q_4$	0,89	0,89	0,85	0,85
в окружающую среду $q_5$	0,42	0,40	0,68	0,75
КПД котла брутто $\eta_{\text{бр}}$ , %	92,30	92,14	92,43	92,49
Полный расход биотоплива $B$ , кг/ч	16,0	17,0	10,0	9,0
Эмиссия, мг/МДж:				
$\text{NO}_x$	64	78	167	209
СО	27	24	35	49
твердых частиц $\text{Э}_{\text{тв.ч}}$	10,34	10,18	10,65	11,04



**Рис. 4. Содержание горючих веществ в частицах, отсепарированных в зольник теплообменника, при сжигании кускового торфа:** а – пофракционное; б – с учетом массовых долей различных фракций

**Fig. 4. The content of combustible substances in the particles separated in the ash pit of the heat exchanger when burning lumpy peat:** a – fractional; b – taking into account the mass portion of different fractions

опыты № 3, № 4). Однако в процессе подачи прессованного материала в горелку происходит его частичное разрушение, что увеличивает выбросы твердых частиц,

включая сажевые, в атмосферный воздух.

Перспективным направлением получения обогащенного биотоплива является производство торрефицированных гранул [2]. Так, организация производства торрефицированных гранул из гидролизного лигнина позволила получить качественное топливо из биомассы, которая находилась в отвалах 40–60 лет. Переход котла со сжигания древесных гранул на торрефицированные гранулы из гидролизного лигнина повысил КПД котла (см. табл. 4), несмотря на более высокую зольность последних (в 5,56 раза). Кроме того, при сжигании торрефицированных гранул (диаметром 8 мм) были достигнуты минимальные эмиссии оксидов азота и монооксида углерода (см. табл. 1–4).

Для отечественных теплогенерирующих установок при выполнении поверочных и конструкторских расчетов, а также проведении типовых испытаний значение потери тепла в окружающую среду для номинальной нагрузки определяют по обобщающим зависимостям [3]. Для импортных установок правомерность применения обобщающих зависимостей [3] должна быть подтверждена экспериментально. Поэтому для определения потерь тепла в окружающую среду была разработана уточ-

ненная методика, базирующаяся на совмещении относительного и калориметрического методов, дополненных тепловизионной съемкой [1].

Экспериментальные исследования показали, что потери тепла в окружающую среду при номинальной теплопроизводительности (60 кВт) водогрейного котла не превышают 0,5 %, что значительно меньше, чем по российским нормам [3]. Низкие значения данной потери определяются умеренными габаритными показателями котла и высоким качеством обмуровочных и теплоизоляционных материалов.

Потери с физической теплотой шлака при работе котла на древесных гранулах не превышали  $q_6 = 0,01$  %; при сжигании коры сосны и ели  $q_6 = 0,06$  %; при работе на торфе  $q_6 = 0,30 \div 0,31$  %; при сжигании прессованных отходов фанерного производства  $q_6 = 0,02$  %; а при работе на торрефицированных гранулах  $q_6 = 0,05$  %.

Результаты энергетического обследования при работе котла на древесных гранулах и торрефицированных гранулах показали (см. табл. 1, 4), что он способен обеспечивать эффективную работу с нагрузкой значительно выше номинальной.

При проведении балансовых опытов, в соответствии с требованиями [4], наибольший КПД брутто водогрейного котла был получен при сжигании гранулированных топлив, предварительно подготовленной коры сосны и ели, а также прессованных отходов фанерного производства (см. табл. 1–4).

Низкие значения эмиссий оксидов азота (см. табл. 1–4) объясняются умеренным уровнем максимальных температур и избытка кислорода в топочной камере, а также двухступенчатой схемой сжигания топлива.

Диоксид серы в продуктах сгорания при сжигании биотоплива отсутствовал при всех режимах работы котла. При сжигании торфяных гранул и кускового торфа его концентрация не превышала 853 мг/м<sup>3</sup> (при O<sub>2</sub> = 6 %).

Ступенчатая схема сжигания топлива и интенсивное перемешивание вторичного воздуха с горючими компонентами топлива позволяют обеспечить эффективную работу котла при малых концентрациях кислорода 4,0–6,0 %.

**Таблица 4. Основные показатели работы котла при сжигании гранул, полученных из ели и торрефицированного гидролизного лигнина**  
**Table 4. The main indicators of the boiler run when burning pellets obtaining from fir and torrefied hydrolytic lignin**

Показатель	Опыт			
	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4
Теплопроизводительность Q, кВт	71,3	83,5	87,2	91,4
Рабочее давление воды на выходе P <sub>в</sub> , МПа	2,2	2,4	3,0	3,0
Температура воды на выходе t <sub>вых</sub> , °С	78,0	78,0	80,0	79,0
Влажность топлива W <sub>f</sub> , %	8,60		6,27	
Зольность топлива A <sub>f</sub> , %	0,43		2,45	
Выход летучих веществ V <sup>лат</sup> , %	84,75		63,85	
Низшая теплота сгорания Q <sub>f</sub> , МДж/кг	16,97		21,34	
Температура уходящих газов θ <sub>гк</sub> , °С	154	155	160	157
Избыток воздуха в уходящих газах α <sub>гк</sub>	1,46	1,43	1,45	1,42
Потери тепла, %:				
с уходящими газами q <sub>2</sub>	7,68	7,61	6,88	6,60
с химнедожогом q <sub>3</sub>	0,01	0,01	0,00	0,00
с мехнедожогом q <sub>4</sub>	0,22	0,22	0,47	0,47
в окружающую среду q <sub>5</sub>	0,42	0,36	0,34	0,33
КПД котла брутто η <sub>бр</sub> , %	91,67	91,80	92,25	92,55
Полный расход биотоплива B, кг/ч	16,0	19,0	16,0	17,0
Эмиссия, мг/МДж:				
NO <sub>x</sub>	56,0	54,0	46,0	44,0
СО	6,0	6,0	3,0	3,0
твердых частиц θ <sub>в.ч</sub>	4,84	4,39	9,59	9,34

Повышение концентрации кислорода более 6 % приводит к увеличению выбросов вредных ингредиентов в окружающую среду. Исходя из этого, пороговое значение концентрации кислорода в системе автоматического регулирования следует снизить до 4 %.

Результаты исследований выбросов сажевых частиц с использованием метода внешней фильтрации при изокинетических условиях отбора газовых проб [5], с определением содержания сажевых частиц по методике [6] показали, что коэффициент выбросов сажи на 1 ГДж теплоты древесных гранул составил 1,74–5,95 г/ГДж (при теплопроизводительности 72–104 кВт). Коэффициент выбросов мелких сажевых частиц PM<sub>2.5</sub> (при коэффициенте пересчета 0,14 [7]) составил 0,243–0,834 г/ГДж. Для сравнения, средний коэффициент выбросов сажи для водогрейных котлов Arimax Bio Energy (Финляндия) номинальной мощностью 1,5 МВт, работающих на древесных гранулах и оборудованных инерционными золоуловителями, составил 5,75 г/ГДж, и соответственно коэффициент выбросов мелких частиц PM<sub>2.5</sub> — 0,805 г/ГДж.

#### Литература

1. Любов В.К., Малыгин П.В., Попов А.Н., Попова Е.И. Определение потерь тепла в окружающую среду на основе комплексного исследования эффективности работы котлов. Теплоэнергетика. 2015. № 8. С. 36–40.
2. Разумов Е.Ю., Назипова Ф.В. Биоуголь: современное представление. Вестник Казанского гос. техн. ун-та. 2015. № 2. Т. 18. С. 220–222.
3. Тепловой расчет котлов (нормативный метод). СПб., НПО ЦКТИ, 1998. 256 с.
4. Трёмбовля В.И., Фингер Е.Д., Авдеева А.А. Теплотехнические испытания котельных установок. М., Энергоатомиздат, 1991. 416 с.
5. Сборник методик по определению концентраций загрязняющих веществ в промышленных выбросах. Л., Гидрометеоздат, 1987. 248 с.
6. Методика измерения массовой концентрации сажи в промышленных выбросах и в воздухе рабочей зоны. ОАО НИИ "ТЕХУГЛЕРОД", 2005. 10 с. [Электронный ресурс]. URL: <http://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293804/4293804994.htm> (дата обращения 21.12.2018).
7. H. Borchsenius, D. Borgnes. 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.

При сжигании коры сосны выбросы сажевых частиц увеличились до 9,324 г/ГДж. Коэффициент выбросов мелких сажевых частиц PM<sub>2.5</sub> составил 1,305 г/ГДж. Сжигание коры ели, имеющей более крупный гранулометрический состав (см. рис. 1), обеспечивалось при более низких коэффициентах избытка воздуха, что значительно уменьшило выбросы сажевых частиц (до 2,494–2,533 г/ГДж). Средний коэффициент выбросов мелких сажевых частиц PM<sub>2.5</sub> составил 0,352 г/ГДж.

При работе котла на торфяных гранулах средний коэффициент выбросов сажевых частиц составил 2,477 г/ГДж, а мелких частиц PM<sub>2.5</sub> — 0,347 г/ГДж. Переход на сжигание кускового торфа сопровождался резким увеличением выбросов сажевых частиц до 17,254 г/ГДж и соответственно коэффициента выбросов частиц PM<sub>2.5</sub> до 2,416 г/ГДж.

Средний коэффициент выбросов сажевых частиц при сжигании прессованных отходов фанерного производства 5,255 г/ГДж, а мелких частиц PM<sub>2.5</sub> — 0,946 г/ГДж.

При работе котла на торрефицированных гранулах из гидролизного лигнина средний коэффи-

циент выбросов сажевых частиц составил 2,467 г/ГДж, а мелких частиц PM<sub>2.5</sub> — 0,345 г/ГДж. Исследования показали, что в атмосферный воздух преимущественно выбрасываются твердые частицы с размером менее 13 мкм.

#### Заключение

Комплексное энергетическое обследование показало, что водогрейный котел "Firematic 60" обеспечивает высокие технико-экономические показатели и минимальные выбросы вредных веществ в окружающую среду при сжигании биотоплив и гранулированного торфа, его следует использовать для теплоснабжения малоэтажных зданий, особенно в условиях Северо-Арктического региона.

При сжигании торрефицированных гранул из гидролизного лигнина достигнуты высокие энергетические и экологические показатели работы котла, при этом эмиссии оксидов азота и монооксида углерода имели минимальные значения. Организация производства торрефицированных гранул из гидролизного лигнина позволила получить качественное топливо из биомассы, которая находилась в отвалах 40–60 лет.

#### References

1. Lyubov V.K., Malygin P.V., Popov A.N., Popova E.I. Opredelenie poter' tepla v okruzhayushchuyu sredu na osnove kompleksnogo issledovaniya effektivnosti raboty kotlov. Teploenergetika. 2015. № 8. S. 36–40.
2. Razumov E.Yu., Nazipova F.V. Biougol': sovremennoe predstavlenie. Vestnik Kazanskogo gos. tekhn. un-ta. 2015. № 2. T. 18. S. 220–222.
3. Teplovoi raschet kotlov (normativnyi metod). SPb., NPO TsKTI, 1998. 256 s.
4. Trembovlya V.I., Finger E.D., Avdeeva A.A. Teplotekhnicheskie ispytaniya kotel'nykh ustanovok. M., Energoatomizdat, 1991. 416 s.
5. Sbornik metodik po opredeleniyu kontsentratsii zagryaznyayushchikh veshchestv v promyshlennykh vybrosakh. L., Gidrometeoizdat, 1987. 248 s.
6. Metodika izmereniya massovoi kontsentratsii sazhi v promyshlennykh vybrosakh i v vozdukhke rabochei zony. OAO NII "TEKUGLEROD", 2005. 10 s. [Elektronnyi resurs]. URL: <http://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293804/4293804994.htm> (data obrashcheniya 21.12.2018).
7. H. Borchsenius, D. Borgnes. 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.