

УДК 662.6/9

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2017.4.149

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СЖИГАНИЯ ДРЕВЕСНОГО БИОТОПЛИВА В ТЕПЛОГЕНЕРИРУЮЩЕЙ УСТАНОВКЕ

В.К. Любов, д-р техн. наук, проф.

А.Н. Попов, ассист.

Е.И. Попова, ассист.

П.В. Малыгин, ассист.

Л.М. Солнышкова, студ.

Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова, наб. Северной Двины, д. 17, г. Архангельск, Россия, 163002; e-mail: vk.lubov@mail.ru, wav1@inbox.ru, ev.popova@narfu.ru, PeterPen13@rambler.ru, solnyshkva@yandex.ru

Северо-запад России обладает огромными запасами древесины, поэтому для этого региона актуальны вопросы максимально эффективного использования древесной биомассы. Вовлечение в топливно-энергетический баланс древесного биотоплива позволяет уменьшить негативное влияние объектов энергетики на окружающую среду и сохранить потенциал невозобновляемых видов топлива для будущих поколений. Эффективным направлением комплексного решения энергетических и экологических проблем при обеспечении отопительных нагрузок потребителей коммунально-бытового сектора является применение современных устройств, работающих на торфе и твердых видах биотоплива. В этом направлении большая роль принадлежит высокоэффективному отопительному оборудованию. Цель работы – изучение теплотехнических и экологических показателей водогрейного котла Firematic 60 (фирма «Herz Energietechnik GmbH», Австрия) при сжигании древесных гранул, коры, прессованной древесно-шлифовальной пыли, гранулированного и кускового торфа. В ходе экспериментов определены составляющие теплового баланса котла и эмиссии газообразных выбросов при сжигании твердых топлив, исследованы выбросы твердых частиц и содержание в них частиц сажи. Комплексное энергетическое обследование показало, что котел Firematic 60 обеспечивает высокие эколого-экономические показатели при сжигании биотоплива, а также гранулированного торфа. Его следует использовать для теплоснабжения малоэтажных зданий в условиях Северо-Арктического региона.

Ключевые слова: водогрейный котел, древесное топливо, вредные вещества, выбросы сажевых частиц, топка, горелка, потери тепла, коэффициент полезного действия, теплотехнические и гранулометрические характеристики топлива.

Для цитирования: Любов В.К., Попов А.Н., Попова Е.И., Малыгин П.В., Солнышкова Л.М. Исследование эффективности сжигания древесного биотоплива в теплогенерирующей установке // Лесн. журн. 2017. № 4. С.149–161. (Изв. высш. учеб. заведений). DOI: 10.17238/issn0536-1036.2017.4.149

Введение

Одно из приоритетных направлений развития энергетики – использование возобновляемых источников энергии [1]. К таким источникам относится древесная биомасса, применение которой в регионах с развитым лесопромышленным комплексом является перспективным решением, обеспечивающим энергетическую независимость территории. Кроме того, использование древесной биомассы в энергетике позволяет утилизировать побочные продукты лесозаготовительных и деревообрабатывающих предприятий, получать более дешевую энергию, снижать вредное воздействие на окружающую среду и др. [1, 7].

Объекты и методы исследования

Исследования проводили в учебно-научном центре энергетических инноваций Высшей школы энергетики, нефти и газа САФУ им. М.В. Ломоносова. Система централизованного теплоснабжения здания центра горизонтальная двухтрубная с попутным движением теплоносителя. Приточно-вытяжная система вентиляции оснащена теплорекуператорами, что обеспечивает предварительный подогрев приточного воздуха. Резервным источником теплоснабжения является водогрейный котел Figematic 60 австрийской фирмы «Herz Energietechnik GmbH», который также используется для проведения лабораторного практикума и научно-исследовательских работ. Котел установлен в лаборатории котельно-топочного оборудования, рассчитан для работы на древесных гранулах и щепе. По данным фирмы, номинальная мощность котла (60 кВт) обеспечивается при сжигании биотоплива с относительной влажностью $W_r' \leq 25\%$.

Водогрейный котел оснащен топливным бункером со шнековой системой подачи биотоплива в промежуточную емкость и устройством защиты от обратного возгорания (УЗОВ). Клапан-отсекатель УЗОВ обеспечивает поступление топлива в приемный бункер, из которого 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 следующем режиме: рабочий цикл–пауза. Для автоматического розжига топлива используется электрический тепловентилятор. За счет разрежения, создаваемого дымососом, в горелочное устройство поступает как первичный, так и вторичный воздух. Основная часть вторичного воздуха подается через 8 тангенциальных сопел, что и обеспечивает догорание горючих компонентов топлива.

Рабочее давление теплоносителя на выходе из котла не должно превышать 0,3 МПа, температура – 95°C . Водогрейный котел имеет два контура. В первом, оборудованном буферной емкостью, циркулирует химически очищенная деаэрированная вода. Расчетный температурный режим для рабочей среды этого контура – $95/60^\circ\text{C}$. 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 стене. 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 дымогарных трубах установлены турбулизаторы-очистители. Продукты сгорания после первого хода в дымогарных трубах совершают поворот на 180° , при этом наиболее крупные фракции золы сепарируются в зольник, откуда 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 [2, 3]. Система автоматического регулирования с интегрированным микропроцессорным модулем BioControl 3000 оснащена датчиками контроля содержания кислорода в уходящих газах, датчиками температуры в камере догорания и в газоходе после котла, а также датчиками температуры воды на входе и выходе и др. Она обеспечивает эффективное сжигание биотоплива, погодозависимое регулирование отопительных контуров и управление другими важнейшими параметрами работы котельной установки.

Энергообследование котла проводили в четыре этапа. В ходе первого этапа выполнялись балансовые опыты при подаче в топку котла древесных гранул диаметром 8 мм, имеющих достаточно однородный гранулометрический состав (рис. 1) и теплотехнические характеристики, отвечающие требованиям европейских стандартов (табл. 1, опыты № 1, 2). На втором этапе энергообследования котел работал на коре сосны (табл. 1, опыты № 3, 4), гранулометрический состав которой приведен на рис. 1. В ходе третьего этапа

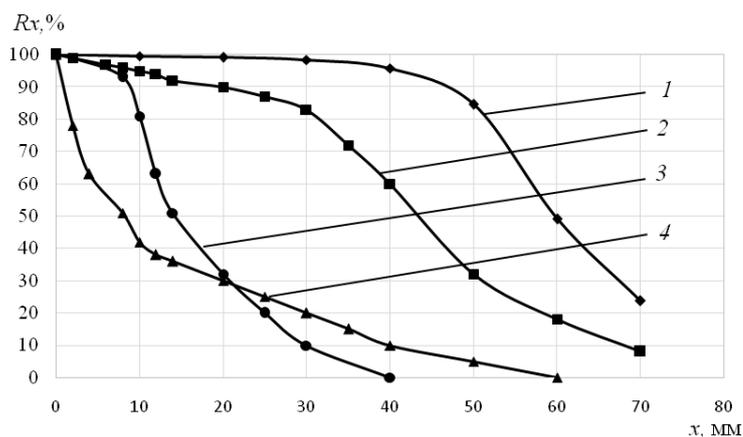


Рис. 1. Гранулометрический состав сжигаемых топлив: 1 – кора ели; 2 – кора сосны; 3 – древесные гранулы диаметром 8 мм; 4 – кусковой торф

выполнялись балансовые опыты при подаче в топку торфяных гранул диаметром 10 мм (табл. 2, опыты № 1, 2) с достаточно однородным гранулометрическим составом и кускового торфа (табл. 2, опыты № 3, 4). Кусковой торф имел высокую степень неоднородности гранулометрического состава (средний коэффициент полидисперсности $n = 0,772$, 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 (ДШП) 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 (G 50) к системе подачи топлива при работе на щепе. Для каждого вида топлива приведены результаты только двух опытов, отражающие полученные энергоэкологические показатели работы котла.

Таблица 1

Результаты энергетического обследования водогрейного котла при работе на древесных гранулах и коре сосны

Показатель	Обозначение, размерность	Номер опыта			
		1	2	3	4
Теплопроизводительность	Q , кВт	64,0	103,5	47,6	40,7
Рабочее давление воды на выходе	P_v , 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_t^r , %	8,38		13,72	
Зольность гранул	A^r , %	0,50		2,52	
Выход летучих веществ	V^{daf} , %	85,10		76,88	
Низшая теплота сгорания	Q_i^r , МДж/кг	17,30		17,98	
Температура уходящих газов	$\vartheta_{\text{ух}}$, °С	106,0	151,0	116,0	106,0
Избыток воздуха в уходящих газах	$\alpha_{\text{ух}}$	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
Расход газов за дымососом	G , м ³ /ч	94,1	157,6	69,6	70,5
Эмиссия, мг/МДж:					
NO _x	NO _x	52	52	57	92
CO	CO	21	12	85	126

Таблица 2

**Результаты энергетического обследования водогрейного котла
при работе на торфяных гранулах и кусковом торфе**

Показатель	Обозначение, размерность	Номер опыта			
		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_t^r , %	16,50		8,20	
Зольность топлива	A^r , %	9,95		11,76	
Содержание серы	S_t^r , %	0,22		0,19	
Выход летучих веществ	V^{daf} , %	74,56		67,88	
Низшая теплота сгорания	Q_i^r , МДж/кг	14,875		15,469	
Температура уходящих газов	ϑ_{yx} , °С	137,2	137,5	135,2	133,0
Избыток воздуха в уходящих газах	α_{yx}	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	$\eta_{бр}$, %	91,37	91,24	81,01	81,22
Полный расход биотоплива	B , кг/ч	21	21	21	21
Расход газов за дымососом	G , м ³ /ч	121,6	123,9	120,7	118,2
Эмиссия, мг/МДж:					
NO _x	NO _x	169	177	156	136
CO	CO	7	23	4	11
SO ₂	SO ₂	338	331	272	278
твердых частиц	$\Xi_{тв.ч}$	12,6	12,8	32,4	32,5

Теплотехнический анализ топлив проводили с помощью установок лаборатории термического анализа и калориметра IKA C 2000 basic Version 2 с жидкостным криотермостатом LOIP FT-216-25, исследование гранулометрического состава сжигаемых топлив и очаговых остатков – анализатора AS 200 Control. Для определения механической прочности и истираемости гранул применяли лигнотестер NHP 100.

Поле скоростей и расходов дымовых газов фиксировали пневмометрической трубкой и микроанометром прецизионного прибора Testo-435. Результаты исследования поля скоростей использовали для определения концентрации твердых частиц в дымовых газах после котла. При этом применяли метод внешней фильтрации, для реализации которого использовали аспирационную установку ОП-442 ТЦ, пылезаборную трубку, фильтродержатель АФА и др. Состав продуктов сгорания исследовали на газоанализаторе Testo-350 XL.

Таблица 3

**Результаты энергетического обследования водогрейного котла
при работе на коре ели и прессованной ДШП**

Показатель	Обозначение, размерность	Номер опыта			
		1	2	3	4
Теплопроизводительность	Q , кВт	71,1	75,0	43,8	39,9
Рабочее давление воды на выходе	P_v , 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_t^r , %	11,52		5,85	
Зольность топлива	A^r , %	2,23		0,82	
Выход летучих веществ	V^{daf} , %	76,56		82,12	
Нижшая теплота сгорания	Q_{is}^r , 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
Расход газов за дымососом	G , м ³ /ч	103,50	106,50	78,68	74,12
Эмиссия, мг/МДж:					
NO _x	NO _x	64	78	167	209
СО	СО	27	24	35	49
твердых частиц	$\Xi_{\text{тв.ч}}$	10,34	10,18	10,65	11,04

Расход топлива определяли по уравнению обратного теплового баланса. Экспериментальные данные обрабатывали с помощью многомодульного программно-методического комплекса [1].

После автоматического запуска время выхода котла на номинальную мощность не превышало 20 мин, через 33...38 мин система автоматики обеспечивала оптимальную температуру воды на входе в котел ~60 °С.

Результаты исследования и их обсуждение

Анализ условий тепловой работы котла показал, что потери тепла с уходящими газами $q_2 = 4,17...6,71$ %, при этом с ростом нагрузки и повышением температуры воды на входе в котел они увеличиваются (табл. 1–3).

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 (табл. 1–3). Концентрации оксида углерода (СО), приведенные к коэффициенту избытка воздуха 1,4, составили 9...116 мг/м³.

При работе котла на коре сосны избыточная подача воздуха в горелку вызвала уменьшение температурного уровня и времени пребывания горючих компонентов топлива в топочной камере, при этом концентрация СО выросла до 246...954 мг/м³, потери тепла с химическим недожогом – до $q_3 = 0,09...0,35$ %. Поддержание коэффициента избытка воздуха на уровне, близком к оптимальному, при сжигании коры ели, имеющей похожие теплотехнические и гранулометрические характеристики с корой сосны, позволило обеспечить меньшую эмиссию СО и снизить потери тепла с химическим недожогом (табл. 3, опыты № 1, 2).

Потери тепла с механической неполнотой сгорания при работе котла на древесных гранулах имели очень низкий уровень (см. табл. 1, опыты № 1, 2), что объясняется однородностью гранулометрического состава сжигаемого топлива, его низкой зольностью и достаточно высокой теплотой сгорания. Данные факторы обеспечили высокую полноту выгорания горючих компонентов в очаговых остатках ($C_{\text{шл}}^r = 8,00...10,10$ %, $C_{\text{ун}}^r \leq 17,50$ %).

Кора сосны и ели, в отличие от древесных гранул, имеет более высокую зольность (табл. 1–3) и менее однородный гранулометрический состав (рис. 1), что вызвало увеличение потерь теплоты с механической неполнотой сгорания до $q_4 = 0,89...1,46$ %, при этом содержание горючих веществ в уносе твердых частиц из топки выросло до $C_{\text{ун}}^r = 24,5...56,5$ % (меньшие значения для коры ели).

Гранулометрический состав очаговых остатков, отобранных из зольников топки и теплообменника, приведен на рис. 2, 3.

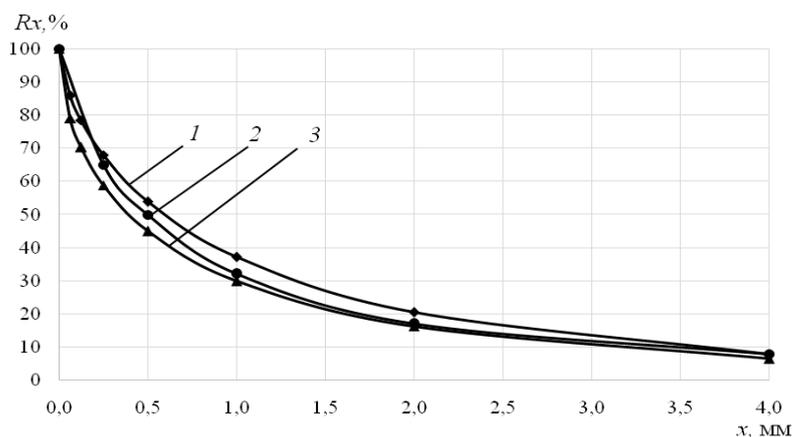


Рис. 2. Гранулометрический состав очаговых остатков, отобранных из зольников топки при сжигании: 1 – кора ели; 2 – кора сосны; 3 – прессованная ДШП

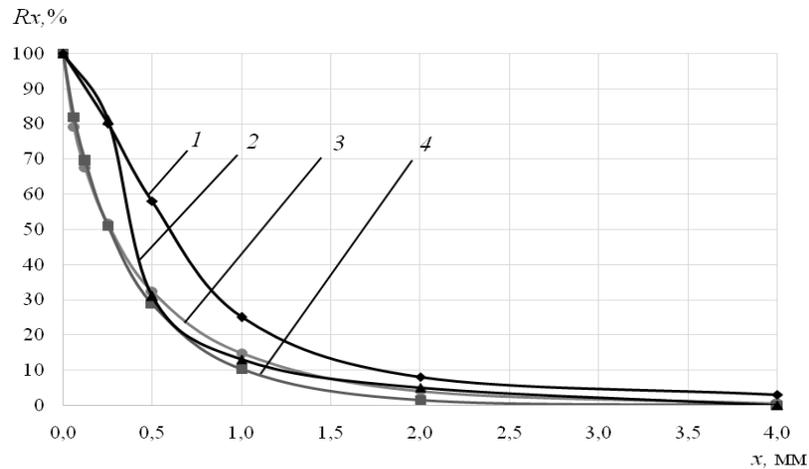


Рис. 3. Гранулометрический состав очаговых остатков, отобранных из теплообменника при сжигании: 1 – кора сосны; 2 – кусковой торф; 3 – прессованная ДШП; 4 – кора ели

При работе котла на торфяных гранулах, зольность которых почти в 4 раза больше, чем коры, потеря тепла с механической неполнотой сгорания увеличилась до $q_4 = 2,17\%$ ($C_{\text{ун}}^x = 19,50\%$).

Переход на сжигание кускового торфа с большим содержанием мелких «высокопарусных» частиц вызвал резкое повышение потери тепла с механической неполнотой сгорания: $q_4 = 13,00\%$ ($C_{\text{шл}}^x = 20,70\%$, $C_{\text{ун}}^x = 53,17\%$). При развороте продуктов сгорания на 180° после первого хода в дымогарных трубах твердая фракция, преимущественно с размером частиц 125 мкм и более, сепарирует в зольник, откуда шнеком удаляется в сборную емкость. Пофракционный анализ показал, что наибольшее количество горючих веществ содержится в частицах размером 0,5 мм и более (рис. 4, а). Согласно анализу экспериментальных данных с учетом массового содержания разных фракций, определяющую долю в потере тепла с механической неполнотой сгорания играет унос недогоревших частиц торфа размером $0,25 \leq x < 2,0$ мм (рис. 4, б).

Более высокая (по сравнению с биотопливами) зольность (примерно в 20 раз, см. табл. 2) и высокая неоднородность гранулометрического состава кускового торфа (см. рис. 1), 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 возгорания. Кроме того, переход от сжигания торфяных гранул на кусковой торф вызвал увеличение концентрации твердых частиц в удаляемых дымовых газах почти в 3 раза (табл. 2), что указывает на целесообразность установки золоуловителя.

Экспериментальные исследования показали, что конструкция котла позволяет обеспечивать достаточно эффективное сжигание прессованной ДШП и опилок с линии обрезки фанеры (табл. 3, опыты № 3, 4). Однако в

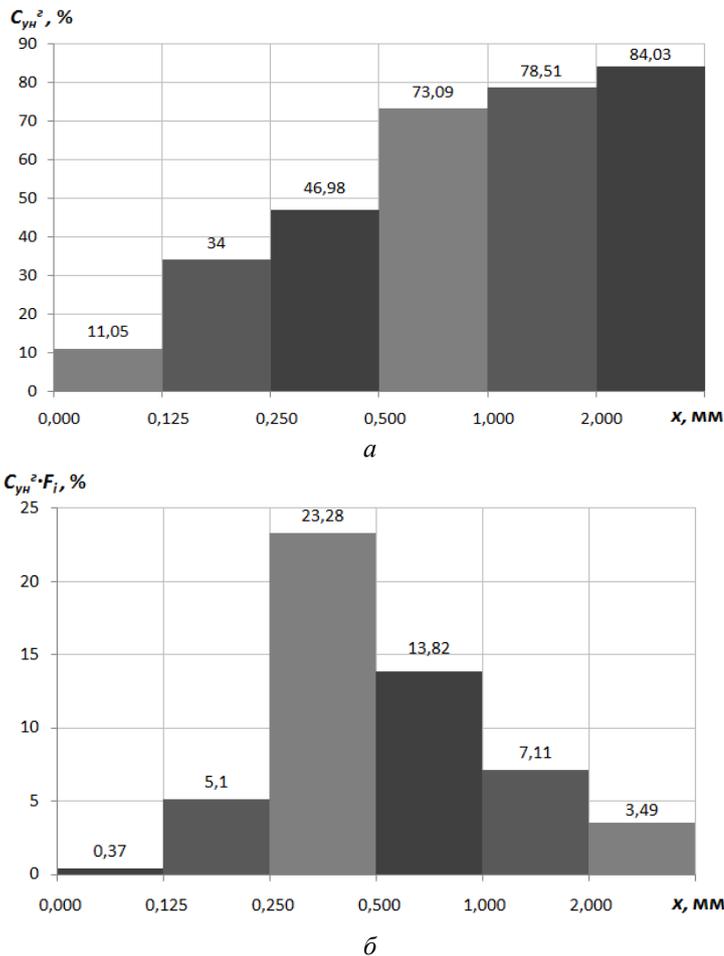


Рис. 4. Содержание горючих веществ в частицах, отсепарированных в зольник теплообменника при сжигании кускового торфа: *а* – содержание горючих веществ по фракциям; *б* – содержание горючих веществ с учетом массовых долей различных фракций

процессе подачи прессованного материала в горелку происходит его частичное разрушение, что увеличивает выбросы твердых частиц, включая сажевые, в атмосферу.

Для отечественных теплогенерирующих установок при выполнении поверочных и конструкторских расчетов, а также при проведении типовых испытаний потери тепла в окружающую среду для номинальной нагрузки определяют по обобщающим зависимостям [5]. Для импортных установок правомерность применения обобщающих зависимостей [5] должна быть подтверждена экспериментально. Поэтому для определения потерь тепла в окружающую

щую среду была разработана уточненная методика, базирующаяся на совмещении относительного и калориметрического методов, дополненных тепловизионной съемкой [3]. В ходе эксперимента было установлено, что потери тепла в окружающую среду при номинальной теплопроизводительности (60 кВт) водогрейного котла не превышают 0,5 %, что значительно меньше, чем указано в российских нормах [5]. Низкие потери определяются умеренными габаритными размерами котла и высоким качеством обмуровочных и теплоизоляционных материалов.

Потери с физической теплотой шлака при работе котла на древесных гранулах не превышали $q_6 = 0,01$ %, на коре сосны и ели – 0,06 %, на торфе – 0,30...0,31 %, на прессованных мелкодисперсных отходах фанерного производства (опилки от обрезки фанеры) – 0,02 %.

Результаты энергетического обследования работы котла на древесных гранулах показали (см. табл. 1, опыты № 1, 2), что он способен обеспечивать эффективную работу с нагрузкой значительно выше номинальной [2–4].

При проведении балансовых опытов КПД брутто водогрейного котла при работе на древесных гранулах изменялся в диапазоне 92,86...95,20 %, на коре сосны и ели – 92,14...93,15 %, на торфяных гранулах – 91,24...91,37 %, на кусковом торфе – 81,01...81,22 %, на прессованных мелкодисперсных отходах фанерного производства – 92,43...92,49 %.

Низкие значения концентраций оксидов азота (табл. 1–3) можно объяснить умеренным уровнем максимальных температур и избытком кислорода в топочной камере, а также применением двухступенчатой схемы сжигания топлива.

Диоксид серы в продуктах сгорания при сжигании биотоплив отсутствовал на всех режимах работы котла. При сжигании торфяных гранул и кускового торфа его концентрация не превышала 853 мг/м^3 (при концентрации кислорода – 6,0 %).

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 %). Повышение концентрации кислорода более 6,0 % приводит к увеличению выбросов вредных веществ в окружающую среду. Исходя из этого пороговое значение концентрации кислорода в системе автоматического регулирования следует снизить до 4,0 %.

Результаты исследования выбросов сажевых частиц [4, 6, 8] с использованием метода внешней фильтрации при изокинетических условиях отбора газовых проб показывают, что коэффициент выбросов сажи на 1 ГДж теплоты древесных гранул составляет $5,954 \text{ г/ГДж}$ (при теплопроизводительности 104 кВт), коэффициент выбросов мелких сажевых частиц PM_{2,5} (при коэффициенте пересчета 0,14 [4, 6]) – $0,834 \text{ г/ГДж}$. Для сравнения, средний коэффициент выбросов сажи для водогрейных котлов Arimax Bio Energy номинальной мощностью 1,5 МВт, работающих на древесных гранулах и оборудо-

ванных инерционными золоуловителями, составляет 5,75 г/ГДж, коэффициент выбросов мелких частиц PM_{2,5} – 0,805 г/ГДж.

При сжигании коры сосны выбросы сажевых частиц увеличиваются до 9,324 г/ГДж, коэффициент выбросов мелких сажевых частиц PM_{2,5} – до 1,305 г/ГДж. Сжигание коры ели, имеющей более крупный гранулометрический состав (см. рис. 1), обеспечивается при более низких коэффициентах избытка воздуха, что значительно снижает выбросы сажевых частиц (2,494... ..2,533 г/ГДж). Среднее значение коэффициента выбросов мелких сажевых частиц PM_{2,5} – 0,352 г/ГДж.

При работе котла на торфяных гранулах средний коэффициент выбросов сажевых частиц составляет 2,477 г/ГДж, мелких частиц PM_{2,5} – 0,347 г/ГДж. Переход на сжигание кускового торфа сопровождается резким увеличением выбросов сажевых частиц до 17,254 г/ГДж, коэффициента выбросов частиц PM_{2,5} – до 2,416 г/ГДж. Среднее значение коэффициента выбросов сажевых частиц при сжигании прессованных отходов фанерного производства – 5,255 г/ГДж, мелких частиц PM_{2,5} – 0,946 г/ГДж.

Заключение

Проведенное 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 в условиях Северо-Арктического региона.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Любов В.К., Любова С.В.* Повышение эффективности энергетического использования биотоплив: учеб. пособие. Архангельск: Солти, 2010. 496 с.
2. *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.
3. *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.
4. *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.
5. *Тепловой расчет котлов (нормативный метод).* СПб.: НПО ЦКТИ, 1998. 256 с.
6. *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.

7. Flach B., Bendz K., Krautgartner R., Lieberz S. EU-27 Biofuels Annual Report // USDA Foreign Agricultural Service GAIN. 2013. Report No.: NL3034.

8. Petzold A., Ogren J.A., Fiebig M., Laj P., Li Sh., Baltensperger U., Holzer-Popp T., Kinne S., Pappalardo G., Sugimoto N., Wehrli C., Wiedensohler A., Zhang X. Recommendations for Reporting "Black Carbon" Measurements // Atmospheric Chemistry and Physics. 2013. Vol. 13. Pp. 8365–8379.

Поступила 21.10.16

UDC 662.6/9

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2017.4.149

Wood-Based Biofuel Efficiency in the Heat Producing Installation

V.K. Lyubov, Doctor of Engineering Sciences, Professor

A.N. Popov, Assistant

E.I. Popova, Assistant

P.V. Malygin, Assistant

L.M. Solnyshkova, Student

Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Naberezhnaya Severnoy Dviny, 17, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation; e-mail: vk.lubov@mail.ru, wav1@inbox.ru, ev.popova@narfu.ru, peterpen13@rambler.ru, solnyshkva@yandex.ru

The north-west of Russia possesses huge amount of timber resources; and the issues of the most effective use of woody biomass are relevant for this region. Involving of wood biofuel in the fuel and energy balance can reduce the negative impact of energy facilities on the environment and preserve the potential of non-renewable fuels for future generations. The efficient way for comprehensive solution of the energy and environmental problems of heat load supplying of the domestic household sector is the use of modern solid biofuels and peat-fired units. The high-efficiency heating equipment is of great importance. The work objective is to study thermal and ecological characteristics of the hot water boiler Firematic 60 ("Herz Energietechnik GmbH", Austria) when wood pellets, bark, pressed wood-grinding dust, granulate and sod peat combustion. In the course of the experiments, we determine the components of the boiler's heat balance and gaseous emissions when solid fuels combustion, and study the particulate emissions and their content of soot particles. The boiler Firematic 60 provides high environmental and economic performance when biofuels and granulate peat combustion. It should be used in the heat supply systems of low-rise buildings in the North-Arctic region.

Keywords: hot-water boiler, wood fuel, hazardous substance, soot particles emission, furnace, burner, heat loss, efficiency factor, fuel thermotechnical and particle-size characteristics.

For citation: Lyubov V.K., Popov A.N., Popova E.I., Malygin P.V., Solnyshkova L.M. Wood-Based Biofuel Efficiency in the Heat Producing Installation. *Lesnoy zhurnal* [Forestry journal], 2017, no. 4, pp. 149–161. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2017.4.149

REFERENCES

1. Lyubov V.K., Lyubova S.V. *Povyshenie effektivnosti energeticheskogo ispol'zovaniya biotopliv* [Improvement of Effectiveness of the Biofuels Energy Use]. Arkhangelsk, 2010. 496 p.
2. Lyubov V.K., Malygin P.V., Popov A.N., Popova E.I. Issledovanie effektivnosti raboty vodogreynogo kotla pri szhiganii biotopliv [Biofuel Combustion Efficiency of the Hot-Water Boiler]. *Biotekhnologii v khimiko-lesnom komplekse: materialy mezhdunar. nauch. konf., Arkhangel'sk, 11–12 sent. 2014 g.* [Biotechnology in the Chemical and Forest Complex: Proc. Intern. Sci. Conf., Arkhangelsk, 11–12 September 2014]. Arkhangelsk, 2014, pp. 201–205.
3. Lyubov V.K., Malygin P.V., Popov A.N., Popova E.I. Opredelenie poter' tepla v okruzhayushchuyu sredyu na osnove kompleksnogo issledovaniya effektivnosti raboty kotlov [Determining Heat Loss Into the Environment Based on Comprehensive Investigation of Boiler Performance Characteristics]. *Teploenergetika* [Thermal Engineering], 2015, vol. 62, no. 8, pp. 36–40.
4. Popova E.I., Popov A.N., Lyubov V.K., Varakin E.A. Szhiganie tverdykh topliv v vodogreynom kotle Firematic 60 [Solid Fuels Combustion in the Boiler Firematic 60]. *Prirodopol'zovanie v Arktike: sovremennoe sostoyanie i perspektivy razvitiya: sb. nauch. tr. 1-y Mezhdunar. nauch.-prakt. konf., Yakutsk, 22–25 sent. 2015 g.* [Nature Management in the Arctic: the State of the Art and Development Prospects: Proc. 1st Intern. Sci. Pract. Conf., Yakutsk, 22–25 September 2015]. Yakutsk, 2015, pp. 464–473.
5. *Teplovoy raschet kotlov (normativnyy metod)* [Thermal Calculation of Boilers (Normative Method)]. Saint Petersburg, 1998. 256 p.
6. 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.
7. Flach B., Bendz K., Krautgartner R., Lieberz S. EU-27 Biofuels Annual Report. *USDA Foreign Agricultural Service GAIN; 2013. Report No.: NL3034*.
8. Petzold A., Ogren J.A., Fiebig M., Laj P., Li Sh., Baltensperger U., Holzer-Popp T., Kinne S., Pappalardo G., Sugimoto N., Wehrli C., Wiedensohler A., Zhang X. Recommendations for Reporting "Black Carbon" Measurements. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2013, vol. 13, pp. 8365–8379.

Received on October 21, 2016