УДК 662.6/9
DOI: 10.37482/0536-1036-2021-1-159-172

КОМПЛЕКСНАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ ДРЕВЕСНЫХ ГРАНУЛ В ЭНЕРГОУСТАНОВКАХ

В.К. Любов*[1]*, д-р техн. наук, проф.; *ResearcherID: AAF-8949-2019,*
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7050-1212
А.М. Владимиров*[2]*, инж.; *ResearcherID: AAB-8889-2021*
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0469-1104
[1]Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова, наб. Северной Двины, д. 17, г. Архангельск, Россия, 163002; e-mail: vk.lubov@mail.ru
[2]Акционерное общество «Архангельский ЦБК», ул. Мельникова д. 1, г. Новодвинск, Архангельская область, Россия, 164900; e-mail: vladimirovaleksandr23@gmail.com

Аннотация. В индустриально развитых странах для уменьшения воздействия «парниковых» газов на климат планеты активно поощряется замена ископаемого топлива биотопливом. Однако побочные продукты заготовки, обработки и переработки древесины ввиду их высокой влажности, низкой энергетической плотности и крайне неоднородного гранулометрического состава относятся к трудносжигаемым видам топлива. Перспективным направлением повышения энергетической плотности и транспортабельных показателей побочных продуктов лесопромышленного комплекса является их гранулирование. Сжигание гранулированного топлива в теплогенерирующих установках позволяет значительно повысить их энергетические и экологические показатели. Цель работы – экспериментальное и расчетное исследование энергетических и экологических показателей водогрейных котлов мощностью 4 МВт фирмы Polytechnik Luft- und Feuerungstechnik GmbH при сжигании полученных из побочных продуктов деревообработки древесных гранул из сосны и ели. В ходе исследования определены составляющие теплового баланса котлов, эмиссии газообразных выбросов и твердых частиц. С использованием программного продукта трехмерного моделирования Ansys Fluent проведено численное моделирование термохимических и аэродинамических процессов, происходящих в топочной камере котла. Оно в совокупности с промышленно-эксплуатационными испытаниями показало возможность снижения суммарной доли рециркуляции дымовых газов в топочные камеры котлоагрегатов до значений, не превышающих 0,45, при обеспечении допустимой температуры продуктов сгорания на выходе из камеры догорания и поддержании минимально низких эмиссий оксидов углерода и азота. При этом доля газов, подаваемых дымососами рециркуляции в надслоевую область топки, должна быть больше, чем доля подаваемых под наклонно-переталкивающие решетки котлов. Разработаны и внедрены рекомендации по комплексному повышению эффективности сжигания древесных гранул в топках водогрейных котлов мощностью 4 МВт. Первоочередными являются: использование воздуха, прошедшего по каналам охлаждения обмуровки, в качестве вторичного; снижение разрежения в топочных камерах до 30…70 Па; оптимизация соотношения первичного и вторичного воздуха, при этом доля первичного в общем расходе должна составлять 0,26–0,35. Внедрение разработанных рекомендаций позволило поднять КПД брутто котлов на 0,5…1,8 %, снизить аэродинамическое сопротивление газового тракта на 15…20 % и обеспечить стабильно низкие эмиссии оксидов углерода, азота и сажевых частиц. При проектировании котлоагрегатов для сжигания гранулированного древесного топлива целесообразно размещать в топочной камере поверхности нагрева, включенные в циркуляционный контур котла, что увеличит эффективность работы и жизненный цикл котлоагрегата.

Для цитирования: Любов В.К., Владимиров А.М. Комплексная эффективность применения древесных гранул в энергоустановках // Изв. вузов. Лесн. журн. 2021. № 1. С. 159–172. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-1-159-172

Ключевые слова: котел, гранулированное древесное топливо, вредные вещества, численное моделирование, потери тепла, коэффициент полезного действия.

Введение

Переход от ископаемых видов топлива к возобновляемым источникам энергии является ключевой стратегией, направленной на сохранение климата, защиту окружающей среды, решение проблем с энергообеспечением и полностью соответствует положениям Парижского соглашения по сдерживанию климатических изменений, которое было принято консенсусом 12.12.2015 г. и подписано 22.04.2016 г. [16, 20, 22]. Современные проблемы энергетики могут быть решены только при рациональном использовании всех существующих источников энергии. Среди них биомасса как постоянно возобновляемый источник энергии занимает существенное место [1–3, 6, 8, 10, 23].

В России необходимость совершенствования систем энергоснабжения и повышения энергетической безопасности богатых лесными ресурсами регионов делает актуальной проблему расширения масштабов использования возобновляемых источников энергии и в первую очередь энергии биомассы. Однако побочные продукты лесопромышленного комплекса относятся к трудносжигаемым видам топлива. Перспективным направлением облагораживания отходов переработки биомассы является их гранулирование, которое позволяет в 2,5–3,5 раза увеличить их удельную теплоту сгорания, в 3–4 раза – их транспортабельные характеристики [3, 14]. По этому пути пошли страны Скандинавии, Австрия, Германия, Италия, Канада, США и другие, где гранулы используются как в промышленных котельных и на тепловых электрических станциях, так и в быту. С начала XXI в. данное направление интенсивно развивается и в нашей стране, имеющей огромные сырьевые ресурсы. Оценка объемов органических отходов в лесо- и агропромышленном комплексах, проведенная Институтом энергетической стратегии, позволила установить, что гранулы и брикеты – универсальные виды твердого биотоплива для всех регионов России.

Для уменьшения техногенного влияния объектов энергетики на окружающую среду и повышения эффективности их работы в Архангельской области в 2010–2012 гг. были смонтированы и введены в эксплуатацию восемь котельных, оборудованных полностью автоматизированными теплогенерирующими установками, работающими на древесных гранулах. Данное обстоятельство позволило сформировать внутренний рынок облагороженного биотоплива [3].

Цель работы – экспериментальное и расчетное исследование энергетических и экологических показателей водогрейных котлов мощностью 4 МВт фирмы Polytechnik Luft- und Feuerungstechnik GmbH при сжигании полученных из побочных продуктов деревообработки древесных гранул из сосны и ели.

Объекты и методы исследования

Исследовательские работы проводились на теплогенерирующих установках самой мощной из смонтированных котельных, расположенной в пос. Кату-

нино Архангельской области. Запуск в работу (в 2011 г.) котельной, имеющей 3 водогрейных котлоагрегата мощностью по 4 МВт фирмы Polytechnik Luft- und Feuerungstechnik GmbH, позволил вывести из эксплуатации энергоисточник, работавший на высокосернистом мазуте.

Установленные котлы одинаковы по конструкции и номенклатуре основного и вспомогательного оборудования, рассчитаны на выработку горячей воды давлением до 0,6 МПа и температурой до 110 °С, имеют 2 контура, при этом в первом с помощью насоса производительностью 135 м^3/ч циркулирует химочищенная вода. Система водоподготовки включает установки: GENO-mat FE-Z – для удаления железа и марганца; GENO-mat duo WF – для умягчения воды; GENODOS – для дозирования реагентов. Расчетный температурный режим для рабочей среды первого контура составляет 100/80 °С. Нагрев сетевой воды второго контура (70/95 °С) осуществляется с помощью 2 пластинчатых теплообменников. На обратной линии теплосети установлены (параллельно) 3 циркуляционных насоса и 1 подпиточный. В топочных камерах котлоагрегатов реализована 3-ступенчатая схема сжигания топлива, для дополнительного снижения выбросов оксидов азота, продления жизненного цикла колосников и обмуровки камеры оборудованы 2 системами рециркуляции продуктов сгорания. Изменением расхода рециркулирующих газов обеспечивается поддержание оптимальной температуры в топочной камере. Все тягодутьевые установки котлоагрегатов имеют частотное регулирование производительности.

Котлоагрегаты оборудованы 2-ходовыми дымогарными газоводяными теплообменниками, расположенными горизонтально, вдоль продольной оси, непосредственно над камерами догорания. Продукты сгорания, совершив два хода в каналах топочной камеры, поступают в поворотную камеру, в которой разворачиваются и проходят по дымогарным трубам первого хода (194 шт.). В поворотной камере у задней стены котла они разворачиваются на 180° и проходят по дымогарным трубам второго хода (168 шт.). Суммарная поверхность нагрева котлоагрегата составляет 245 м^2.

Котлы оборудованы необходимыми приборами безопасности, обеспечивающими защиту от закипания рабочей среды, и предохранительными клапанами. Система автоматического регулирования поддерживает требуемое соотношение топливо/воздух, заданный уровень разрежения в топке и концентрации кислорода в продуктах сгорания, температуру воды на выходе из котла в соответствии с установленной. Каждый котел оборудован комплексным щитом управления с автоматическими предохранителями и автоматикой управления, обеспечивающим визуализацию параметров работы всех трактов. Система автоматики предусматривает 5 ступеней регулирования нагрузки котла и предполагает ее постепенное изменение от 1-й к 5-й и наоборот.

Из газоводяного теплообменника котла дымовые газы направляются в мультициклон, где очищаются от твердых частиц, поступающих в сборный контейнер. Для очистки от золовых частиц внутренних поверхностей дымогарных труб котлоагрегат оборудован системой пневмообдувки. Эта система состоит из баллона со сжатым воздухом, из которого воздух поступает к группе клапанов, управляемых электронным модулем. Каждый котел оснащен 44 клапанами, открывающимися по очереди автоматически и обеспечивающими очистку определенной группы труб поверхности нагрева.

Балансовые опыты, предполагающие выполнение замеров при установившемся тепловом состоянии котла и определение всех составляющих теплового баланса, проводились в соответствии с требованиями, предъявляемыми к промышленно-эксплуатационным испытаниям второй категории сложности [13]. При исследовании состава продуктов сгорания использовался газоанализатор Testo-350 XL. Теплотехнический анализ топлива проводился с помощью установок лаборатории термического анализа и калориметра IKA C 2000 basic Version 2 с жидкостным криотермостатом, исследование гранулометрического состава топлива и очаговых остатков – на анализаторах AS 200 Control и ВС 1С-15-01. Механическая прочность и истираемость гранулированного топлива определялись в соответствии со стандартом EN 15210-1 с использованием портативного тестера NHP 100 фирмы Holmen, поля скоростей и расход дымовых газов – прецизионным прибором Testo-435 с пневмометрической трубкой и микроманометром. Результаты исследования поля скоростей требуются для определения концентрации твердых частиц в дымовых газах. При этом применялся метод внешней фильтрации [11, 13], для реализации которого использовались аспирационная установка ОП-442 ТЦ, пылезаборная трубка, фильтродержатель АФА и др. Температуры наружных поверхностей основного и вспомогательного оборудования котлов измерялись с помощью пирометра. Расход топлива вычислялся по уравнению обратного теплового баланса. Экспериментальные данные обрабатывались многомодульным программно-методическим комплексом [3].

Результаты исследования и их обсуждение

Комплексное исследование эффективности работы водогрейных котлов проводилось в два этапа. В ходе первого был выполнен анализ энергетической и экологической эффективности реализованного проекта. По его результатам были разработаны рекомендации, подтвержденные, в том числе, данными численного моделирования. После частичного внедрения разработанных рекомендаций была осуществлена вторая часть исследований (второй этап), позволившая определить эффективность реализации этих рекомендаций и создать режимные карты.

На первом этапе было проведено 10 опытов при различных режимах работы котлоагрегатов. При этом в топки котлов подавались древесные гранулы (диаметром 8 мм, ЗАО «Лесозавод 25»), качественные показатели которых соответствовали требованиям международных и российских стандартов (см. таблицу). При производстве гранул использовалась древесина ели (опилок – 80 %, рубленная щепа – 20 %). Механическая прочность гранул имела довольно высокие значения (*DU* = 98,47 %), средняя кажущаяся плотность составляла 1,21 т/м^3, насыпная – 0,67 т/м^3.

Балансовые опыты проведились в диапазоне нагрузок от 42 до 90 % от номинальной, при этом температура воды на входе в котлы изменялась от 58,2 до 60,0 °С, что позволяло обеспечивать достаточно глубокое охлаждение дымовых газов (см. таблицу). Диапазон возможного изменения нагрузки котлов был ограничен потребностями в тепловой энергии объектов пос. Катунино. Полный расход древесных гранул в исследованном диапазоне нагрузок на котлах № 2, 3 составлял 0,405…0,831 т/ч.

Основные показатели работы котлов при сжигании древесных гранул

Показатель	Обозначение, размерность	Котел № 2		Котел № 3	
		Опыт 2	Опыт 5	Опыт 1	Опыт 2
Теплопроизводительность	Q, МВт	2,93	3,65	3,25	2,97
Рабочее давление воды на выходе	$P_в$, МПа	0,33	0,33	0,35	0,35
Температура воды на выходе	$t_{вых}$, °С	73,1	77,0	73,8	72,7
Влажность гранул	W_t^r, %	5,82		6,83	
Зольность гранул	A^r, %	0,64		0,62	
Выход летучих веществ	V^{daf}, %	84,97		84,64	
Низшая теплота сгорания	Q^r_i, МДж/кг	17,46		17,23	
Доля вторичного воздуха	$r_{вт}$, %	65,6	71,9	70,6	68,6
Разрежение в топке	$S_т$, Па	106	53	100	110
Сопротивление котла	$\Delta S_к$, Па	484	787	430	390
Температура уходящих газов	J	169,0	188,4	165,0	162,0
Избыток воздуха в уходящих газах	a	1,50	1,45	1,83	1,56
Потери тепла:					
с уходящими газами	q_2, %	7,23	8,12	8,49	7,11
с химнедожогом	q_3, %	0,02	0,02	0,01	0,00
с мехнедожогом	q_4, %	0,18	0,18	0,17	0,16
в окружающую среду	q_5, %	1,50	1,21	1,35	1,48
КПД брутто котла	$\eta_{бр}$, %	89,70	90,45	89,97	91,23
Полный расход биотоплива	B, т/ч	0,666	0,831	0,752	0,681
Теплонапряжение объема топки	q_v, кВт/м^3	198,67	248,26	221,62	200,63
Эмиссия:					
NO_x	NO_x, мг/МДж	71,2	80,1	113,9	82,5
CO	CO, мг/МДж	15,3	16,2	5,1	4,1
сажевых частиц	$Э_с$, мг/МДж	4,72	5,31	5,02	4,68

Анализ результатов балансовых опытов показал, что конструкция котлоагрегатов и систем автоматического регулирования режимов их работы обеспечивают высокую полноту выгорания монооксида углерода даже при повышенных коэффициентах избытка воздуха в топочных камерах. Концентрация угарного газа составляла 9…270 мг/нм^3 (при K_{O2} = 6 %), а потери тепла с химическим недожогом топлива изменялись в диапазоне 0…0,16 %. КПД брутто: $\eta_{ка}$ = 88,17…91,23 % – для котлоагрегата № 3; 89,00…91,06 % – для № 2.

Суммарная доля рециркуляции дымовых газов в топочную камеру имела очень большие значения: 0,640–0,660 – для котла № 2, 0,500–0,520 – для котла № 3. При этом доля газов, подаваемых дымососами рециркуляции в надслоевую область топки, особенно у котлоагрегата № 2, была выше (0,285–0,464), чем под наклонно-переталкивающую решетку (0,228–0,193). Учитывая, что температура дымовых газов, забираемых дымососами, составляла 122… 183 °С, их ввод вызывал значительное снижение температурного уровня в топочных камерах и их балластирование избыточным кислородом и продуктами полного горения. Температура обмуровки топочных камер не превышала

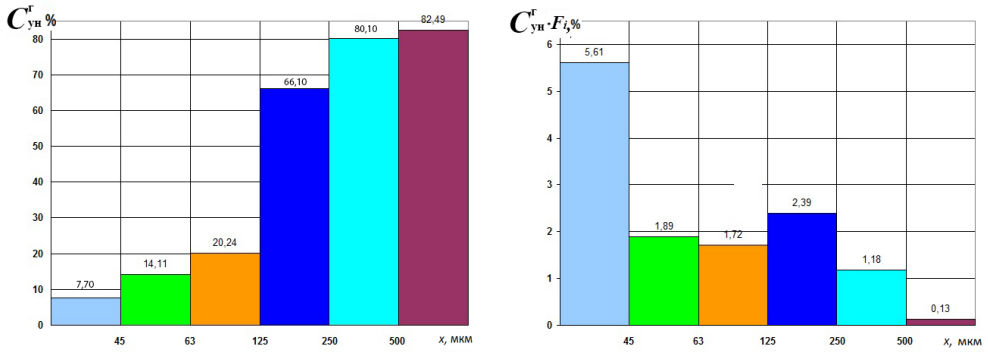
701 °С, температура продуктов сгорания на выходе из камеры догорания котла № 3 составляла 825…870 °С, у котла № 2 – 872…896 °С, что существенно ниже допустимой.

Суммарное сопротивление котлоагрегата с газоводяным теплообменником изменялось в диапазоне: 300…787 Па – для котла № 2, 130…430 Па – для котла № 3. Более высокое сопротивление газового тракта котла № 2 объясняется большими нагрузкой и долей рециркуляции продуктов сгорания.

Изучение гранулометрического состава летучей золы, оставшейся в золоуловителях, показало, что она имеет высокую степень полидисперсности (n = 0,66–0,681) и относится к тонкодисперсным материалам (b = 0,115–0,084) [13]. В ней преобладает фракция с размером частиц менее 45 мкм, на которую приходится более 72 % (по массе) для котла № 3 и более 63 % для котла № 2.

Отбор запыленного потока проводился при изокинетических условиях [11], при этом использовались данные предварительно проведенных тарировок. Выполненные исследования позволили определить степень очистки дымовых газов при их прохождении через золоуловитель и систему отбора газов в линии рециркуляции. Максимальное суммарное значение степени очистки продуктов сгорания получено для котла № 3 – 79,84 %, для котла № 2 этот показатель составил 79,45 %.

На основании исследования распределения горючих веществ по фракциям в летучей золе установлено, что максимальное содержание этих веществ имеют частицы размером 500 мкм и более (рис. 1, *а*). Однако их массовая доля в летучей золе мала, поэтому определяющее влияние на величину механического недожога топлива оказывает содержание горючих веществ в частицах менее 45 мкм (рис. 1, *б*).



а *б*

Рис. 1. Содержание горючих веществ в летучей золе котла № 3: *а* – по фракциям; *б* – с учетом массовых долей различных фракций, F_i

Fig. 1. The content of combustible substances in fly ash of the boiler No. 3: *а* – by fractions; *б* – taking into account the mass fractions of various size fractions, F_i

Анализ условий тепловой работы котлов показал, что потери тепла с уходящими газами составляют 5,94…8,49 %. Однако имеется резерв для их уменьшения за счет дополнительной настройки системы автоматики, снижения коэффициента избытка воздуха и доли рециркуляции газов в топочные камеры. Потери тепла с механической неполнотой сгорания составили 0,16…0,18 %,

с физической теплотой шлака – $q_6 \leq 0{,}02$ %. Низкий уровень потерь с механической неполнотой сгорания объясняется наличием системы позонного распределения воздуха, ступенчатой схемой подачи окислителя, повышенной сепарационной способностью топочной камеры и низкой зольностью древесных гранул. Данные факторы обеспечили высокую полноту выгорания углеродной основы топлива ($C^{т}_{шл} = 12{,}00…13{,}71$ %, $C^{т}_{ун} = 11{,}28…11{,}96$ %). Конструкция наклонной переталкивающей решетки, а также системы охлаждения ее рамы создает условия для отсутствия шлаковых наростов и надежной работы установки шлакоудаления. Шлак имеет полифракционный мелкодисперсный гранулометрический состав.

Для определения потерь тепла в окружающую среду была разработана уточненная методика, базирующаяся на применении относительного метода, дополненного тепловизионной съемкой [5]. Экспериментальные исследования показали, что потери тепла в окружающую среду при номинальной производительности водогрейного котла не превышают 1,1 %, что значительно меньше, чем по российским нормам [12]. Низкие значения данной потери (см. таблицу) определяются умеренными габаритными показателями котла, высоким качеством обмуровочных и теплоизоляционных материалов, а также наличием охлаждаемых каналов. Организация полезного использования тепла, полученного воздухом в каналах охлаждения обмуровки, позволила повысить КПД брутто данных котлов не менее чем на 1,3 %.

Удельный расход условного топлива на выработку 1 ГДж для котлов № 2, 3 составил 37,37…38,67 кг/ГДж, эмиссия вредных веществ – $Э_{CO} = 4{,}1…77{,}5$ мг/МДж и $Э_{NOx} = 71{,}2…114{,}0$ мг/МДж.

Для разработки максимально обоснованных рекомендаций по дальнейшему комплексному повышению эффективности работы исследованных водогрейных котлов было выполнено численное моделирование с использованием программного продукта трехмерного моделирования Ansys Fluent. На начальном этапе была построена трехмерная модель топочной камеры котла (рис. 2) с помощью встроенного модуля Ansys Icem Cfd. Учитывая специфическую геометрию топки, было принято решение выполнить построение неструктурированной тетраэдральной сетки с количеством расчетных элементов 8 млн. Анализ качества созданной сетки показал ее приемлемость для задач данного уровня. В целях упрощения расчета было принято решение отказаться от построения подколосниковой области топочной камеры, а также снизить

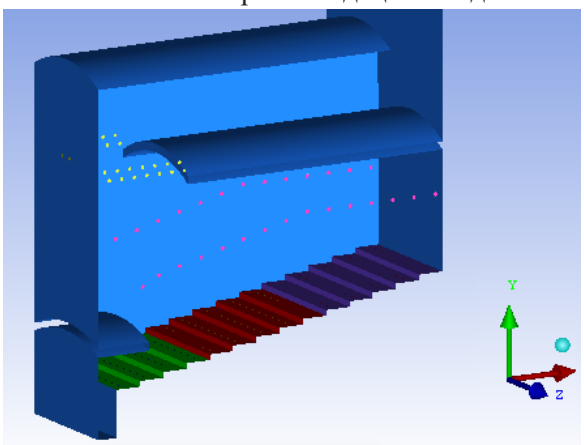


Рис. 2. Трехмерная геометрия топки котла с разделением наклонно-переталкивающей решетки по зонам (третья зона выделена зеленым цветом)

Fig. 2. Three-dimensional geometry of the boiler furnace with division of the reciprocating grate into zones (the third zone is highlighted in green)

число межколосниковых зазоров в несколько раз, соответственно увеличив их размеры в заданных пропорциях. Данное упрощение не вызывает появления существенных погрешностей [19, 24].

Все топочные процессы (аэродинамика, воспламенение, выгорание, тепломассообмен, химические реакции) рассмотрены в их взаимосвязи. Принимается, что газовая среда состоит из диоксида углерода, молекулярного азота, водяных паров, кислорода и летучих веществ. Расчет траекторий движения твердых частиц биотоплива был выполнен в лагранжевой постановке [18, 25]. Для дисперсной фазы описывались тепло- и массообмен, определялись траектории движения частиц. Влияние турбулентности потока на движение топливных частиц учитывалось с использованием Realizable k-ε модели.

Расчет твердой фазы биотоплива производился при помощи Discrete Phase Model, при этом гранулометрический состав топлива учитывался по уравнению Розина–Раммлера:

$$R = 100 \exp(-bxn),$$

где R – полный остаток на сите с размером ячейки x; b – коэффициент, характеризующий тонкость гранулометрического состава; n – коэффициент полидисперсности.

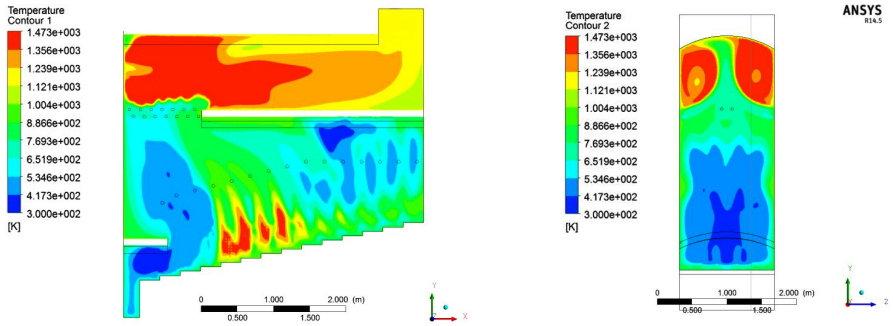
Определяющие коэффициенты для данного уравнения были найдены ситовым методом [3, 13]. Принималось, что топливные частицы имеют сферическую форму и состоят из древесного кокса и зольного остатка. В расчете учитывались следующие стадии термической подготовки и горения этих частиц: прогрев, испарение влаги, воспламенение и горение летучих веществ, выгорание коксового остатка. В топке топливная частица подвергается термообработке за счет радиационно-конвективного теплообмена.

При моделировании лучистого теплообмена в топочной камере применялась модель Discrete Ordinates [19, 25]. При расчете процесса образования оксидов азота учитывались все известные механизмы образования термических, «быстрых» и топливных оксидов, а также процессы, протекающие с участием N_2O и восстановлением оксида азота на поверхности коксовых частиц [3].

В граничных условиях на входе задавались расходы первичного и вторичного воздуха, рециркулирующих газов, а также их состав. При проведении моделирования учитывалось, что наибольшая доля топлива выгорает во второй зоне, наименьшая – в зоне догорания коксового остатка (зона 3).

Для повышения точности результатов решения изменялась схема дискретизации конвективных членов основных уравнений. На первом этапе была выбрана схема дискретизации первого порядка (First Order Upwind), которая обеспечила быструю сходимость итерационного процесса, но недостаточную точность, на втором этапе – схема дискретизации второго порядка (Second Order Upwind) с использованием алгоритма связывания полей скорости и давления SIMPLE [17–19, 25].

Результаты моделирования показали, что в топке водогрейного котла поддерживается стабильное горение древесных гранул. Основной факел локализован выше промежуточного свода, над соплами вторичного воздуха (рис. 3). Компоновка сопл вторичного воздуха обеспечивает формирование двух вихревых потоков, занимающих большую часть поперечного сечения (рис. 3, *б*). Над соплами вторичного воздуха, в зоне вихревых потоков, температурный уровень



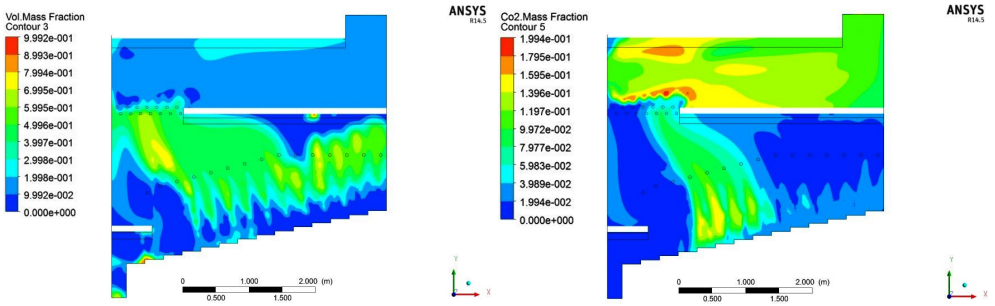
а *б*

Рис. 3. Поля температур (K): в продольном (*а*) и в поперечном (*б*) сечении топки на расстоянии 1 м от задней стенки

Fig. 3. Temperature fields (K): in the longitudinal (*а*) and cross (*б*) sections of the furnace at a distance of 1 m from the rear wall

имеет максимальные значения (~1200 °C). Наличие вихревых зон подтверждается результатами расчета концентраций летучих веществ (рис. 4, *а*), углекислого газа (рис. 4, *б*) и аэродинамикой движения топливных частиц (рис. 5).

Температура продуктов сгорания на выходе из камеры догорания котла составила 848 °C, что является допустимым и хорошо согласуется с экспериментальными данными, полученными в ходе промышленно-эксплуатационных испытаний. Концентрация монооксида углерода имеет минимальные значения. Численное моделирование показало, что наиболее активное горение биотоплива на наклонно-переталкивающей решетке происходит над ее центральной частью (рис. 3, *а*), где температура составляет около 1200 °C. Полученные результаты полностью согласуются с расчетными значениями концентраций углекислого газа (рис. 4, *б*).



а *б*

Рис. 4. Расчетные концентрации (моль/м^3) летучих веществ (*а*) и диоксида углерода (*б*)

Fig. 4. Calculated concentrations (mol/m^3) volatile substances (*а*) and carbon dioxide (*б*)

При работе котла в диапазоне нагрузок 45…100 % от номинальной обеспечивается высокая полнота выгорания горючих компонентов топлива. Топочный процесс имеет устойчивый характер и гарантирует высокий уровень выгорания монооксида углерода при низкой генерации оксидов азота.

Аэродинамика факела (рис. 5) в области подвода вторичного воздуха, а также над промежуточным сводом благодаря арочному типу потолка

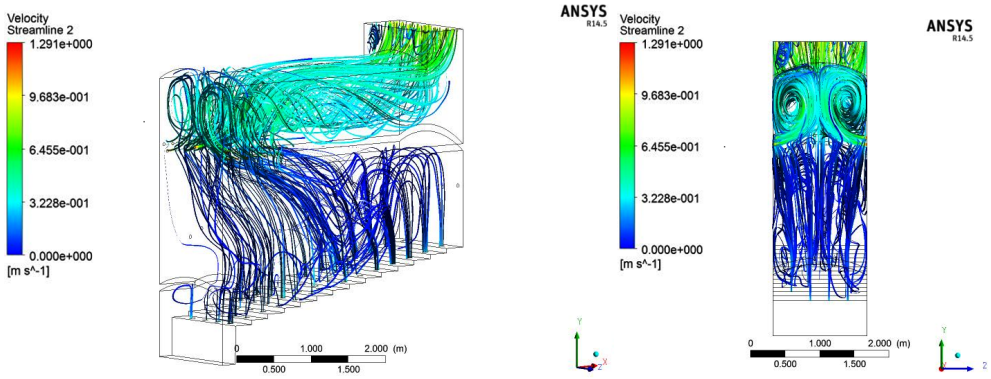


Рис. 5. Траектории движения топливных частиц (м/с)

Fig. 5. Trajectories of fuel particles, m/s

топки и встречному расположению цилиндрических сопл характеризуется зоной завихрения потока, где происходит интенсивное догорание летучих компонентов, не выгоревших в надслоевой области топки ввиду малой доли первичного воздуха.

Как следует из результатов расчетов и сопоставления численных исследований с экспериментальными данными, выбранная модель горения может быть использована при изучении работы котлоагрегатов со слоевым сжиганием твердого топлива различного состава.

Численное моделирование и промышленно-эксплуатационные испытания показали возможность снижения суммарной доли рециркуляции дымовых газов в топочную камеру до 0,40 (котел № 3) и 0,45 (котел № 2) при обеспечении допустимой температуры продуктов сгорания на выходе из камеры догорания (до 950 °С) и поддержании минимально низких эмиссий оксидов углерода 2…23 и азота 42…57 мг/МДж. При этом доля газов, подаваемых дымососами рециркуляции в надслоевую область топки, должна быть больше, чем доля подаваемых под наклонно-переталкивающие решетки котлов.

Исходя из энергетических показателей работы данных водогрейных котлов, было бы целесообразно снизить суммарную долю рециркуляции дымовых газов в топочную камеру до 0,30. Однако при нагрузках близких к номинальной температура продуктов сгорания на выходе из камеры догорания превысит допустимые значения, поэтому при проектировании котлоагрегатов для сжигания гранулированного биотоплива целесообразно размещать в топочной камере поверхности нагрева, охлаждаемые рабочей средой, что позволит повысить эффективность и жизненный цикл работы котлов при оптимальной доле рециркуляции продуктов сгорания.

Промышленно-эксплуатационные испытания водогрейных котлов показали, что снижение рециркуляции дымовых газов и разрежения в топочной камере, а также оптимизация распределения первичного и вторичного воздуха позволили поднять КПД брутто котлов на 0,5…1,8 %, снизить аэродинамическое сопротивление газового тракта на 15…20 % и обеспечить стабильно низкие эмиссии оксидов углерода, азота и твердых частиц.

Определение количества выбросов сажевых частиц проводилось в соответствии с [4, 7, 9, 11], при этом эмиссия частиц размером 2,5 мкм и менее с использованием коэффициентов пересчета, предложенных в [15, 21], изменялась в диапазоне 0,52…0,75 г/ГДж.

Заключение

Комплексное исследование эффективности работы водогрейных котлов в диапазоне нагрузок 42…90 % от номинальной (4 МВт) показало, что они обеспечивают достаточно экономичное сжигание древесных гранул. Результаты промышленно-эксплуатационных испытаний и данные численного моделирования, выполненного с помощью программного пакета Ansys Fluent, позволили разработать следующие рекомендации по дальнейшему повышению энергоэкологических показателей работы данных котлоагрегатов:

снизить суммарную долю рециркулирующих дымовых газов до значений, не превышающих 0,45;

использовать воздух, прошедший по каналам охлаждения обмуровки, в качестве вторичного;

уменьшить разрежение в топочных камерах до 30…70 Па;

оптимизировать соотношение первичного и вторичного воздуха, при этом доля первичного в общем расходе должна составлять 0,26–0,35.

Внедрение разработанных рекомендаций позволило поднять КПД брутто котлов на 0,5…1,8 %, снизить аэродинамическое сопротивление газового тракта на 15…20 % и обеспечить стабильно низкие эмиссии оксидов углерода, азота и сажевых частиц.

При проектировании котлоагрегатов для сжигания гранулированного древесного топлива целесообразно размещать в топочной камере поверхности нагрева, включенные в циркуляционный контур котла, что повысит эффективность и жизненный цикл его работы и обеспечит оптимальную долю рециркуляции продуктов сгорания с энергоэкологических позиций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. *Башмаков И.А., Мышак А.Д.* Затраты и выгоды реализации стратегий низкоуглеродного развития России: перспективы до 2050 года // Вопр. экономики. 2014. № 8. С. 70–91. [Bashmakov I.A., Myshak A.D. 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

2. *Кокорин А.* Новые факторы и этапы глобальной и российской климатической политики // Экон. политика. 2016. Т. 11, № 1. С. 157–176. [Kokorin A. New Factors and Stages 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

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 хими-

ко-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. *Biotechnology in the Chemical and Forest Complex: Proceedings of the International Scientific Conference, Arkhangelsk, September 11–12, 2014*. Arkhangelsk, NArFu Publ., 2014, pp. 201–205].

5. *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. 36–41. [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. *Teploenergetika* [Thermal Engineering], 2015, no. 8, pp. 36–41]. DOI: 10.1134/S004060151506004X

6. *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

7. Методика измерения массовой концентрации сажи в промышленных выбросах и в воздухе рабочей зоны: утв. ОАО НИИ «Техуглерод». Ярославль, 2005. 10 с. [*Measurement Procedure of the Mass Concentration of Soot in Industrial Emissions and in the Air of the Working Area*. OAO Scientific Research Institute “TEKhUGLEROD”, 2005. 10 p.].

8. *Мохирев А.П., Безруких Ю.А., Медведев С.О.* Переработка древесных отходов предприятий лесопромышленного комплекса, как фактор устойчивого природопользования // 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, art. 81].

9. *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 Рос. 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 Hot Water 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].

10. *Сафонов Г.В., Стеценко А.В., Дорина А.Л., Авалиани С.Л., Сафонова Ю.А., 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. Сборник методик по определению концентраций загрязняющих веществ в промышленных выбросах. Л.: Гидрометеоиздат, 1987. 270 с. [*Collection of Methods for Determining the Concentrations of Pollutants in Industrial Emissions*. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1987. 270 p.].

12. Тепловой расчет котлов (нормативный метод) / РАО «ЕЭС России», ВТИ, НПО ЦКТИ. СПб., 1998. 257 с. [*Thermal Calculation of Boilers (Standard Method)*. Saint Petersburg, OAO Unified Energy System of Russia, 1998. 257 p.].

13. *Трембовля В.И., Фингер Е.Д., Авдеева А.А.* Теплотехнические испытания котельных установок. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Энергоатомиздат, 1991. 416 с. [Trem-

bovlya V.I., Finger E.D., Avdeyeva A.A. *Heating Tests of Boilers*. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1991. 416 p.].

14. Arshadi M., Gref R., Geladi P., Dahlqvist S.-A., Lestander T. The Influence of Raw Material Characteristics on the Industrial Pelletizing Process and Pellet Quality. *Fuel Processing Technology*, 2008, vol. 89, iss. 12, pp. 1442–1447. DOI: 10.1016/j.fuproc.2008.07.001

15. 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.

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

17. Gera D., Mathur M.P., Freeman M.C., Robinson A. Effect of Large Aspect Ratio of Biomass Particles on Carbon Burnout in a Utility Boiler. *Energy & Fuels*, 2002, vol. 16, iss. 6, pp. 1523–1532. DOI: 10.1021/ef0200931

18. Kruggel-Emden H., Wirtz S., Scherer V. An Experimental Investigation of Mixing of Wood Pellets on a Forward Acting Grate in Discontinuous Operation. *Powder Technology*, 2013, vol. 233, pp. 261–277. DOI: 10.1016/j.powtec.2012.08.029

19. Kurz D., Schnell U., Scheffknecht G. CFD Simulation of Wood Chip Combustion on a Grate Using an Euler-Euler Approach. *Combustion Theory and Modelling*, 2012, vol. 16, iss. 2, pp. 251–273. DOI: 10.1080/13647830.2011.610903

20. 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

21. Petzold A., Ogren J.A., Fiebig M., Laj P., Li S.-M., Baltensperger U., Holzer-Popp T., Kinne S., Pappalardo G., Sugimoto N., Wehrli C., Wiedensohler A., Zhang X.-Y. Recommendations for Reporting "Black Carbon" Measurements. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2013, vol. 13, iss. 16, pp. 8365–8379. DOI: 10.5194/acp-13-8365-2013

22. 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

23. 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

24. Scharler R., Obernberger I. Numerical Modelling of Biomass Grate Furnaces. *Industrial Furnaces and Boilers: Proceedings of the 5th European Conference, April 11–14, 2000, Porto, Portugal*. Porto, 2000. 17 p.

25. Simsek E., Brosch B., Wirtz S., Scherer V., Krüll F. Numerical Simulation of Grate Firing Systems Using a Coupled CFD/Discrete Element Method (DEM). *Powder Technology*, 2009, vol. 193, iss. 3, pp. 266–273. DOI: 10.1016/j.powtec.2009.03.011

COMPLEX EFFICIENCY OF USING WOOD PELLETS IN POWER PLANTS

***Victor K. Lyubov*[1]**, *Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: AAF-8949-2019, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7050-1212*
***Aleksandr M. Vladimirov*[2]**, *Engineer; ResearcherID: AAB-8889-2021, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0469-1104*
[1]Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Naberezhnaya Severnoy Dviny, 17, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation; e-mail: vk.lubov@mail.ru
[2]Arkhangelsk Pulp and Paper Mill, ul. Mel'nikova, 1, Novodvinsk, Arkhangelsk region, 164900, Russian Federation; e-mail: vladimirovaleksandr23@gmail.com

Abstract. In advanced countries, the dramatic impact of greenhouse gases on the global climate is reduced by replacing fossil fuels with biofuels. This method is being actively encouraged. However, by-products of logging, processing and conversion of wood are classified as difficult to burn fuels due to their high moisture content, low energy density and extremely heterogeneous granulometric composition. A promising direction to increase the energy density and transportability of the timber industry by-products is their granulation. Wood pellet fuel burning in heat-generating plants results in significant increase in their energy and environmental performance. The purpose of the paper is an experimental and calculation study of the energy and environmental performance of 4 MW hot water boilers produced by Polytechnik Luft- und Feuerungstechnik GmbH in the process of burning pine and spruce wood pellets obtained from by-products woodworking. When performing studies, the components of the boiler's heat balance, gas release, and particulate emissions were determined. Numerical modeling of thermochemical and aerodynamic processes taking place in the boiler combustion chamber was carried out by using the Ansys Fluent three-dimensional simulation software. Together with industrial-operational tests it showed the possibility to reduce the total share of flue gas recirculation into combustion chambers of boiler units to values not exceeding 0.45, in providing an acceptable temperature of combustion products at the combustion chamber outlet and maintaining minimum emissions of carbon and nitrogen monoxides. At the same time, the share of gases fed by recirculation smoke exhausters to the over-bed area of the burner should have higher values than under the reciprocating grates of boilers. Guidelines for comprehensive improvement of wood pellet combustion efficiency in combustion chamber of 4 MW hot water boilers have been developed and implemented. The priorities are: using the air passed through the cooling channels of the setting as secondary air; reducing the rarefaction in the combustion chambers to 30–70 Pa; optimizing the ratio of primary and secondary air, herewith, the share of primary air in the total flow should be 0.26–0.35. Implementation of the developed guidelines allowed to increase the boiler gross efficiency by 0.5–1.8 %, to reduce the aerodynamic resistance of the gas path by 15–20 % and to ensure consistently low emissions of carbon and nitrogen monoxides and soot particles. When designing boiler units for burning wood pellet fuel it is advisable to place heating surfaces in the combustion chamber, included in the circulation circuit of the boiler. This will increase the efficiency and life cycle of the boiler unit.

For citation: Lyubov V.K., Vladimirov A.M. Complex Efficiency of Using Wood Pellets in Power Plants. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2021, no. 1, pp. 159–172. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-1-159-172

Keywords: boiler, wood pellet fuel, harmful substances, numerical modeling, heat losses, efficiency.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов
The authors declare that there is no conflict of interest

Поступила 25.10.19 / Received on October 25, 2019