

Научная статья

УДК 662.6/9

DOI: 10.37482/0536-1036-2023-1-172-185

Повышение эффективности энергетического использования биотоплива

В.К. Любов[✉], *д-р техн. наук, проф.*; *ResearcherID: [AAF-8949-2019](https://orcid.org/0000-0001-7050-1212)*,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7050-1212>

И.И. Цыпнятов, *мл. науч. сотр.*; *ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8074-7934>*

Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова, наб. Северной Двины, д. 17, г. Архангельск, Россия, 163002; vk.lubov@mail.ru[✉], ilya.tsypniatov@list.ru

Поступила в редакцию 25.01.22 / Одобрена после рецензирования 28.04.22 / Принята к печати 30.04.22

Аннотация. В современном мире растет доля теплоэлектростанций, потребляющих возобновляемые энергоресурсы. В качестве топлива все чаще применяются древесные и биоугольные гранулы. В технологическом цикле целлюлозно-бумажного производства образуется большое количество древесных отходов, которые необходимо эффективно использовать. Однако кородревесные отходы относятся к трудносжигаемым видам топлива, что вызывает необходимость «подсветки» факела высококалорийным невозобновляемым топливом и сопровождается образованием углекислого газа, выбрасываемого в атмосферу. Для энергетического использования кородревесного топлива на российских предприятиях до сих пор используются котлоагрегаты КМ-75-40, снятые с производства в 1985 г. Энергетическое обследование котла КМ-75-40 при его работе на кородревесном топливе (кора хвойных и лиственных пород древесины, некондиционная щепа и опилки) показало, что конструкция и техническое состояние котлоагрегата не обеспечивают требуемую полноту выгорания горючих компонентов топлива и экологические показатели, соответствующие требованиям ГОСТ Р 50831–95. Целью данной работы является анализ возможностей комплексного повышения эффективности сжигания кородревесного топлива в котлоагрегатах КМ-75-40. По результатам выполненных исследований были разработаны первоочередные мероприятия для улучшения эффективности работы данных котлоагрегатов. Котлоагрегаты КМ-75-40 работают более 50 лет и требуют замены на современные низкоэмиссионные теплогенерирующие установки. Однако до замены рекомендуется модернизация котлоагрегатов: их перевод на работу по слое-вихревой технологии сжигания и использование в качестве добавки к кородревесному топливу биоугольных гранул для регулирования теплотехнических характеристик сжигаемого биотоплива и паропроизводительности котельных установок. Перспективными для этих целей биоугольными гранулами являются пеллеты, полученные из гидролизного лигнина, прошедшего мягкий пиролиз. Для оценки эффективности совместного сжигания кородревесного топлива и биоугольных гранул были выполнены тепловые и аэродинамические расчеты котла КМ-75-40 при разной доле гранул по тепловыделению, а также термогравиметрические исследования. При тепловом расчете учитывались: кратность циркуляции топливных частиц в вихревой зоне, гранулометрический состав сжигаемой топливной смеси, особенности расположения горелочных устройств, снижение загрязнения поверхности нагрева. Переход на сжигание данной топливной смеси по слое-вихревой технологии позволит отказаться от

использования невозобновляемых видов топлива в котлоагрегатах КМ-75-40 при сжигании высоковлажного кородревесного топлива, существенно повысит КПД котлов и уменьшит негативное влияние на окружающую среду.

Ключевые слова: котел, древесное топливо, биоугольные гранулы, гидролизный лигнин, вредные вещества, потери тепла, коэффициент полезного действия, слое-вихревое сжигание

Благодарности: Авторы выражают благодарность ЦКП НО «Арктика» за предоставление возможности проведения исследований на синхронном термоанализаторе STA 449 F3 Jupiter.

Для цитирования: Любов В.К., Цыпнятов И.И. Повышение эффективности энергетического использования биотоплива // Изв. вузов. Лесн. журн. 2023. № 1. С. 172–185. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-1-172-185>

Original article

Improving the Efficiency of Energy Use of Biofuels

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

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7050-1212>

Ilya I. Tsyppniatov, Junior Research Scientist; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8074-7934>

Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Naberezhnaya Severnoy Dviny, 17, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation; vk.lubov@mail.ru[✉], ilya.tsyppniatov@list.ru

Received on January 25, 2022 / Approved after reviewing on April 28, 2022 / Accepted on April 30, 2022

Abstract. The share of thermal power plants that consume renewable energy resources is growing worldwide. Wood and bio-coal pellets become more and more common as fuels. The technological cycle of pulp and paper production produces a large amount of wood waste, which must be used efficiently. However, bark-wood waste is hard-burning fuel, which causes the need to “light” the flare with high-calorie non-renewable fuel, is followed by the formation of carbon dioxide emitted into the atmosphere. Boilers KM-75-40, taken out of production in 1985, are still used at Russian enterprises for the use of bark-wood fuel as an energy source. Energy examination of the boiler KM-75-40 during its operation with bark-wood fuel (coniferous and deciduous wood bark, substandard chips and sawdust) showed that the design and technical condition of the boiler does not provide the required combustion rate of fuel components and environmental parameters that meet the requirements of the state standard, GOST. The present work aims at analyzing the possibilities of comprehensive improvement of efficiency of bark-wood fuel combustion in boilers KM-75-40. High-priority measures to improve the efficiency of these boilers were developed based on the research results. Boilers KM-75-40 have been in operation for more than 50 years and require replacement with modern low-emission heat generating systems. Prior to replacement, however, upgrading the boilers is recommended: their transition to the layer-vortex combustion technology and the use of bio-coal pellets, as an additive to the bark-wood fuel, in order to adjust the thermal characteristics of the combusted biofuel and steam capacity of the boilers. Bio-coal pellets produced from hydrolysis lignin, which has undergone soft pyrolysis, are promising for this purpose. Thermal and aerodynamic calculations of the boiler KM-75-40 with different proportion of pellets by



heat release, as well as thermogravimetric studies were carried out to assess the effectiveness of co-combustion of bark-wood fuel and bio-coal pellets. The thermal calculation included: the circulation rate of fuel particles in the vortex zone, the granulometric composition of the combusted fuel mixture, the location features of combustion equipment, reducing the contamination of the heating surface. The transition to the combustion of this fuel mixture using the layer-vortex technology will allow to refuse from using non-renewable fuels in the boiler KM-75-40 when combusting high-moisture bark-wood fuel, will significantly increase the boiler efficiency and reduce the negative impact on the environment.

Keywords: boiler, wood fuel, bio-coal pellets, hydrolysis lignin, harmful substances, heat losses, efficiency, layer-vortex combustion

Acknowledgements: The authors are grateful to the Shared Use of Equipment Center “Arktika” for providing the opportunity to carry out research using the STA 449 F3 Jupiter synchronous thermal analyzer.

For citation: Lyubov V.K., Tsyornyatov I.I. Improving the Efficiency of Energy Use of Biofuels. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2023, no. 1, pp. 172–185. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-1-172-185>

Введение

Ключевой стратегией наиболее развитых стран мира по сохранению климата, защите окружающей среды и решению проблем с энергообеспечением является переход от ископаемых топлив к возобновляемым источникам энергии. Данная стратегия соответствует положениям Парижского соглашения [7, 19, 23, 25].

Среди возобновляемых энергоресурсов для России и многих других лесных регионов мира исключительно важная роль отводится биомассе [1–7, 9, 11, 20, 26]. Кроме нейтральности выбросов углекислого газа, важной особенностью данного энергоресурса является значительное снижение выбросов оксидов серы, азота и летучей золы [6]. В странах Европы и Северной Америки расширяется использование древесных и биоугольных гранул совместно с невозобновляемым топливом. Теплоэлектростанции для выработки электроэнергии потребляют примерно половину ежегодно производимых гранул. Биотопливный рынок развивается.

Современный технологический цикл целлюлозного-бумажного производства предполагает образование большого количества отходов, пригодных для энергетической утилизации путем сжигания. Проблема сжигания данных отходов заключается в их высокой влажности и неоднородности granulometric composition. Эта проблема решается добавлением в топочный процесс высококалорийного невозобновляемого топлива. При добавлении такого топлива в процессе сжигания образуется углекислый газ из ископаемого углерода.

Одно из направлений для получения обогащенного биотоплива из древесной биомассы – пеллетирование [5–7, 9, 11, 17, 21]. В сочетании с предварительной торрефикацией биомассы оно позволяет повысить энергетическую плотность биотоплива и увеличивает его устойчивость к воздействию влаги, способствует появлению других важных потребительских свойств [18, 23].

В целлюлозно-бумажной промышленности до настоящего времени применяются котлоагрегаты, оборудованные предтопками и топками с накладными беспровальными колосниками [2, 3]. Первичный воздух, проходя через зазоры колосников, обеспечивает выгорание топлива, способствует переносу очаговых остатков к нижнему концу колосниковой решетки, где они удаляются из предтопка.

Котлоагрегаты КМ-75-40 выпускались отечественными заводами серийно. В данных котлоагрегатах в качестве топлива могут быть использованы отходы окорки и лесопиления, мазут, природный газ, каменный уголь, высококалорийные виды топлива с побочными продуктами лесопромышленного комплекса [2, 3]. В котлах КМ-75-40 осуществляется естественная циркуляция. Они характеризуются П-образной компоновкой и призматической топкой размерами в свету 6000×6600 мм, с твердым шлакоудалением. При номинальной производительности 75 т/ч давление перегретого пара с температурой 440 °С составляет 4 МПа. Температура питательной воды – 150 °С. Предтопок и основная топочная камера, отделенные друг от друга экраном, представляют собой единое комбинированное топочное устройство. Их соединяют окна, выполненные фестонированием экранных труб.

Кордревесное топливо по течке поступает на неподвижную наклонную колосниковую решетку предтопка, где подсушивается, воспламеняется и частично сгорает. Дожигание топлива с наклонной решетки происходит на 2 цепных горизонтальных механических решетках прямого хода (ТЧ-3.07/56), расположенных в нижней части предтопка. Первичный воздух подается под наклонную колосниковую решетку и под цепные механические решетки с температурой 340–410 и 250 °С соответственно [2]. Две газомазутные горелки в предтопке обеспечивают «подсветку» топлива. Четыре горелки установлены на боковых стенах основной топочной камеры, расположение встречно-смещенное, по 2 горелки с каждой стороны. Котлоагрегаты КМ-75-40 сняты с производства (в 1985 г.) по следующим причинам: ограничение нагрузки котлоагрегата в случаях отсутствия подсветки резервным топливом; низкая экономичность топочного процесса; низкая надежность цепной колосниковой решетки; неудовлетворительные экологические показатели. Несмотря на это их эксплуатация на предприятиях РФ продолжается.

Цель данной работы – анализ возможностей комплексного повышения эффективности сжигания кордревесного топлива (КДТ) в котлоагрегатах КМ-75-40.

Объекты и методы исследования

Энергетическое обследование котлоагрегата КМ-75-40 проводилось на базе филиала АО «Группа «Илим» в г. Коряжма в соответствии с методической базой и приборным парком, достаточно полно представленными в [5, 8, 12, 14]. При обследовании котлоагрегат работал на КДТ (кора хвойных и лиственных пород, некондиционная щепка и опилки) с отключенными газовыми горелками. Сжигаемое топливо характеризовалось высокой степенью неоднородности гранулометрического состава, зависимости полных остатков (R_x) на ситах с различным размером ячеек (x) представлены на рис. 1, при этом для КДТ средний коэффициент полидисперсности $n = 0,55$; коэффициент, характеризующий крупность состава, $b = 4,46 \cdot 10^{-3}$.

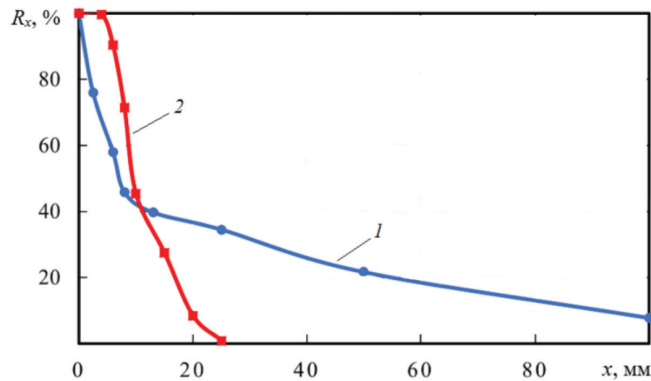


Рис. 1. Интегральные зерновые характеристики:
 1 – кородревесное топливо; 2 – биоугольные гранулы
 Fig. 1. Integral characteristics of grain: 1 – bark-wood fuel;
 2 – bio-coal pellets

Балансовые опыты показали, что при относительной влажности сжигаемого биотоплива $W_t^r = 56,65$ % приведенная паропроизводительность котла составляет 52 % от номинальной [22]. Конструкция данного котлоагрегата, техническое состояние и системы автоматического регулирования не соответствуют экологическим требованиям сегодняшнего дня, нет необходимой полноты выгорания горючих компонентов топлива. Так, концентрация оксида углерода в уходящих газах составила 9790 мг/нм³; концентрация кислорода – 6 %; потеря тепла с химическим недожогом – 4,28 %; средний КПД брутто котлоагрегата – 71,74 %; потери тепла с уходящими газами – 21,13 % [22].

По результатам выполненных исследований были разработаны первоочередные мероприятия для повышения эффективности работы котлоагрегата КМ-75-40 [22]. Установленные котлоагрегаты за более чем 50-летний срок службы устарели, необходимо запланировать их замену современными теплогенерирующими установками, в топочных камерах которых реализованы низкоэмиссионные схемы сжигания кородревесного топлива. До замены устаревших котлоагрегатов целесообразно обеспечить исключение использования высококалорийных невозобновляемых видов топлива в котлоагрегатах КМ-75-40 при сжигании высоковлажного КДТ. Для этого рекомендуются перевод данных котлов на слое-вихревую технологию сжигания [10] и применение в качестве добавки биоугольных гранул для регулирования теплотехнических характеристик сжигаемого древесного топлива и паропроизводительности котельной установки.

При использовании слое-вихревой технологии сжигания проявляются достоинства как слоевого, так и вихревого способов сжигания, она базируется на низкотемпературной (НТВ) технологии сжигания. Основные принципы построения такой технологии представлены в работах В.В. Померанцева и представителей его школы. При модернизации котлоагрегатов в Польше, РФ, Болгарии, США и Чехии были подтверждены достоинства и перспективность использования НТВ-технологии [6, 15, 16].

Современные низкоэмиссионные топочные устройства удовлетворяют следующим требованиям: обеспечивают низкотемпературный топочный про-

цесс; допускают рассредоточенную подачу воздуха и топлива, высоко экономичны при малых избытках воздуха; позволяют вводить сорбент, очищающий дымовые газы от оксидов серы [6, 15, 16]. Вихревые низкоэмиссионные топки (разновидность НТВ-технологии) сохраняют принципы традиционного прямоточного сжигания и за счет эффективной аэродинамики топочного процесса обеспечивают выполнение всех указанных требований. Данная схема не требует высоких затрат, поэтому возможно получить срок окупаемости не более 2 лет, в некоторых случаях – несколько месяцев.

Низкоэмиссионные вихревые топки имеют 2 зоны горения: вихревую низкотемпературную, занимающую нижнюю часть топки, и традиционную прямоточную. Аэродинамику вихревой зоны в рекомендуемом варианте реконструкции котлоагрегата [10] определяет взаимодействие 2 потоков – нижнего дутья, направленного вдоль заднего ската топочной воронки, и вторичного воздуха, вводимого через сопла, наклоненные вниз топки и расположенные на ее задней стене.

Наклонная неподвижная колосниковая решетка и 2 цепные горизонтальные механические решетки прямого хода, расположенные в предтопке, выполняют функцию устройств для термической подготовки КДТ и воспламенения наиболее мелких и сухих фракций топлива, обеспечивая подачу топлива в устройство нижнего дутья. Устройство нижнего дутья, выполненное в виде воздушно-каскадного классификатора (ВКК), обеспечивает постепенное снижение скорости горячего воздуха по мере его приближения к выходному сечению ВКК и последующего движения вдоль заднего ската топочной камеры. Термически подготовленное топливо с механических решеток поступает в нижнюю часть топочной воронки, при этом ВКК проводит его аэродинамическую классификацию по крупности частиц и их кажущейся плотности. Минеральные и инородные включения, плотность которых значительно больше, чем частиц древесного топлива, выводятся из топки. Крупные фракции древесного топлива, попадая в ВКК, проходят в нем дополнительную термическую подготовку, при этом в результате подсушки и термического разложения органических составляющих их кажущаяся плотность уменьшается, и они выносятся в топочную воронку вдоль ее заднего ската.

Мелкие и средние частицы древесного топлива, минуя ВКК, сразу направляются в топочную воронку. За счет вращательного движения газовых потоков, обеспечивающих многократную принудительную циркуляцию в вихревой зоне, увеличивается время пребывания топливных частиц в топке. Вследствие распределения горения топлива по всему объему топки, активной внутритопочной циркуляции газовых потоков выравниваются температурные и тепловые поля, повышается коэффициент тепловой эффективности топочных экранов. Все это снижает требования к качеству топлива, происходит выгорание даже немолотого топлива.

Избыток воздуха в предтопке и топочной воронке ниже стехиометрического. Это достигается интенсивной загрузкой вихревой зоны топливом с помощью цепных механических решеток прямого хода. Снижается образование оксидов азота в пониженном поле температур и при малых избытках воздуха. Образовавшиеся оксиды азота частично распадаются в зонах с полувосстановительной средой.

Таким образом, предлагаемая слое-вихревая технология сжигания реализует схему ступенчатого горения топлива, широко применяемую в мировой практике, но обладает существенной особенностью: хорошее перемешивание топлива и окислителя в нижней вихревой зоне и в зоне дожигания позволяет обеспечить экономичную работу котлов с более низкими, чем до модернизации, значениями коэффициента избытка воздуха на выходе из топки (1,12–1,15) без увеличения эмиссии оксида углерода.

Биоуголь получают в процессе торрефикации биомассы – низкотемпературной обработки (200–300 °С) без доступа кислорода – и используют как в порошкообразном, так и в обработанном (пеллеты, брикеты) виде. По энергетическим свойствам биоуголь максимально приближен к углю [18, 23]. Теплотворная способность готового продукта зависит от степени термической обработки: теплота сгорания может составлять от 18 до 31 МДж/кг (теплота сгорания древесного угля). Одна из задач, которую необходимо решить в процессе поиска режима торрефикации, – это нахождение режима, позволяющего при наименьшей потере исходной энергии добиться высокой теплотворной способности. Гранулы, прошедшие торрефикацию, подчиняются тем же законам измельчения, что и уголь, обладающий хорошей сыпучестью, гидрофобны и достаточно прочны. Транспортировка на большие расстояния такого топлива оправдана ввиду высокой энергетической плотности. По всем параметрам эти гранулы превосходят древесные пеллеты. В качестве объекта исследования взяты биоугольные гранулы из гидролизного лигнина, произведенные в ОАО «Бионет» (Архангельская область, г. Онега).

Результаты исследования и их обсуждение

В состав КДТ входит кора хвойных и лиственных пород, а один из 3 котлоагрегатов Котласского ЦБК работает только на лиственном КДТ, в составе которого доминирует осина, поэтому были осуществлены термогравиметрические анализы при динамическом режиме для коры осины и биоугольных гранул, полученных из гидролизного лигнина, прошедшего мягкий пиролиз при температурах 190–210 °С. Образцы исследуемого топлива размолоты молотковой мельницей «Борей», просеяны на аналитическом ситовом анализаторе Retsch AS 200 Control. Для выполнения работ на термоанализаторе использовалась фракция с размером частиц от 250 до 500 мкм.

Теплотехнические характеристики для коры осины имели следующие значения: влажность $W^a = 7,10$ %; зольность $A^a = 2,48$ %; $C^a = 50,48$ %; $H^a = 5,90$ %; $N^a = 0,72$ %; $O^a = 33,32$ %; низшая теплота сгорания $Q_{i}^a = 18,687$ МДж/кг и выход летучих веществ на горючую массу $V^{daf} = 76,68$ %.

Термический анализ биотоплива проводился в среде аргона с расходом газа 20 см³/мин и в воздушной среде на синхронном термоанализаторе STA 449 F3 Jupiter. Образцы нагревались со скоростью 10 °С/мин до 800 °С. По результатам исследований были получены термограммы, одна из которых показана на рис. 2. Для анализа процессов сушки, термического разложения, воспламенения и горения использовались кривые, характеризующие изменение массы (ТГ), скорости изменения массы (ДТГ); а также тепловые эффекты, происходящие в исследуемых образцах (ДТА). Полученные данные и результаты исследований [24] приведены в таблице.

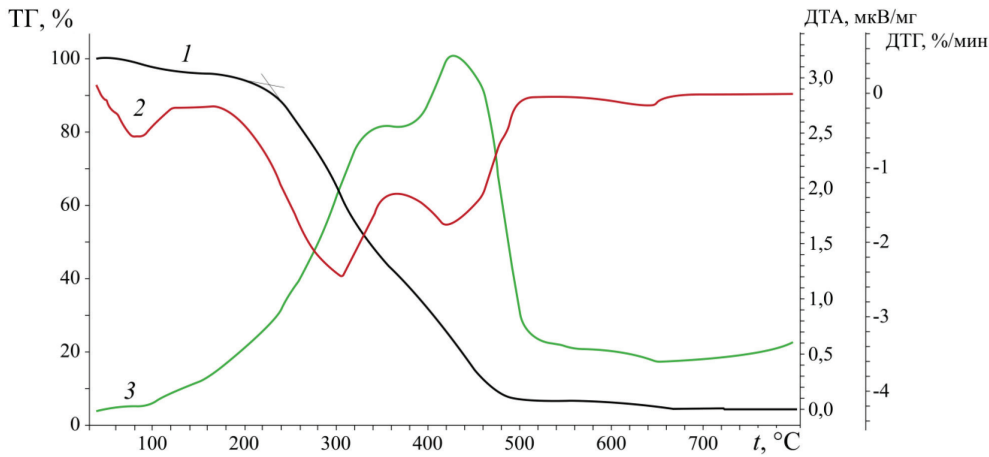


Рис. 2. Термограмма для коры осины при скорости нагрева 10 °С/мин в воздушной среде: 1 – ТГ; 2 – ДТГ; 3 – ДТА

Fig. 2. Thermogram for aspen bark at a heating rate of 10 °C/min in air. The curves describe: 1 – change in mass; 2 – rate of change in mass; 3 – thermal effects occurring in the studied samples

Результаты (°С) термогравиметрического анализа видов биотоплива
Results of thermogravimetric analysis of biofuels, °C

Образец	Температурные диапазоны при нагреве				
	в инертной среде		в воздушной среде		
	Сушка	Выход летучих веществ	Сушка	Выход и горение летучих веществ	Горение кокса
Древесина сосны	30–105	164–264*–400 (365) [#]	30–100	168–280*–373 (340) ^{##}	400–510 (477) ^{###}
Кора сосны	30–121	163–258*–400 (352)	30–108	168–263–355 (323)	382–514 (430)
Древесина ели	30–105	177–275*–400 (367)	30–101	180–280–368 (342)	374–500 (464)
Кора ели	30–106	140–225*–442 (347)	30–103	152–259–358 (320)	368–500 (423)
Биоугольные гранулы из лигнина	30–106	160–288*–480 (352)	30–102	160–251–356 (310)	360–540 (430)
Кора осины	30–130	165–245*–385 (334)	30–130	170–228–365 (307)	380–510 (414)

* Температура начала интенсивного выхода летучих веществ; температура, соответствующая: [#] – максимальной скорости выхода летучих веществ, ^{##} – максимальной скорости выхода и горения летучих веществ; ^{###} – максимальной скорости выгорания коксового остатка.

Полученные результаты позволяют сделать вывод, что для крупных фракций древесного топлива, попадающих в ВКК, будет происходить параллельное движение в глубь частицы 3 фронтов: испарения влаги, термического разложения органических составляющих биотоплива и горения углеродной основы топлива. Под действием термических процессов кажущаяся плотность биотоплива может снижаться более чем в 8 раз. Температура горячего воздуха, подаваемого в ВКК, превышает не только температуру, соответствующую максимальной скорости выхода и горения летучих веществ, но и температуру

воспламенения древесного кокса (см. таблицу), т. е. устройство нижнего дутья выполняет функции горелки. При обработке результатов опытов и экспериментов [24] были дополнительно определены температуры начала выхода летучих веществ и определяющие температуры для процесса горения кокса. Установление температур начала интенсивного выхода летучих веществ для всех видов биотоплива проводили с использованием одинакового методического подхода (метод касательных).

Положительный опыт эксплуатации котлоагрегатов, переведенных на низкоэмиссионную технологию сжигания [6, 15, 16], позволяет рекомендовать учитывать ее положительные стороны при реализации слое-вихревой схемы сжигания на котлоагрегатах КМ-75-40 [10]. Для отказа от применения высококалорийных невозобновляемых видов топлива при сжигании высоковлажного КДТ рекомендуется использование в качестве добавки биоугольных гранул. Это позволит регулировать теплотехнические характеристики сжигаемой биотопливной смеси и паропроизводительность котельной установки при минимальном воздействии на окружающую среду. В целях оценки эффективности совместного сжигания КДТ и биоугольных гранул были выполнены тепловые и аэродинамические расчеты котла КМ-75-40. Перспективными биоугольными гранулами являются пеллеты, полученные из гидролизного лигнина, подвергнутого мягкому пиролизу. Данные гранулы обладают хорошими гидрофобными свойствами и механической прочностью 85,5–95,2 %.

Элементный состав и низшая теплота сгорания на рабочую массу компонентов топливной смеси следующие: для КДТ $W^r = 56,0$ %; $A^r = 0,60$ %; $C^r = 22,02$ %; $H^r = 2,65$ %; $N^r = 0,30$ %; $O^r = 18,43$ %; $Q_i^r = 6,90$ МДж/кг; $V^{daf} = 84,80$ %; для биоугольных гранул $W^r = 6,50$ %; $A^r = 2,80$ %; органическая и колчеданная сера $S_{op+k}^r = 0,16$ %; $C^r = 55,07$ %; $H^r = 5,00$ %; $N^r = 0,25$ %; $O^r = 30,02$ %; $Q_i^r = 22,08$ МДж/кг; $V^{daf} = 63,85$ %.

Тепловые расчеты котлоагрегата при совместном сжигании КДТ и биоугольных гранул выполнялись при разной доле гранул по тепловыделению: $q_1 = 0$; 10; 20; 30; 40; 50; 60 %. Расчеты проводились при условии прямого совместного сжигания, предполагающего одновременную подачу КДТ и биоугольных гранул из гидролизного лигнина на наклонную неподвижную колосниковую решетку предтопка и далее с помощью механических решеток прямого хода в топочную камеру котла.

Предлагаемая слое-вихревая технология сжигания [10] не требует дополнительного измельчения биоугольных гранул. Исследование гранулометрического состава биоугольных гранул диаметром 8,0 мм (см. рис. 1), производимых из гидролизного лигнина, показало, что средние значения определяющих коэффициентов следующие: $n = 3,444$; $b = 5,57 \cdot 10^{-15}$. При этом массовое содержание гранул длиной $6,0 \leq l < 20,0$ мм составило 81,94 %. Таким образом, биоугольные гранулы имеют значительно более однородный и более мелкий гранулометрический состав, чем КДТ.

Тепловые расчеты исследуемого котлоагрегата выполнялись по методике [13]. В проведенных расчетах учитывались: совместное сжигание КДТ и биоугольных гранул; кратность циркуляции топливных частиц в вихревой зоне, расположение горелочных устройств; гранулометрический состав топлива; повышение коэффициента тепловой эффективности поверхностей нагрева [6]. Топочная воронка в расчетах учитывалась в активном объеме топочной камеры.

За счет увеличения доли биоугольных гранул в смеси общая влажность смеси снижается, низшая теплота сгорания и теоретическая температура горения (v_a) повышаются. При сжигании такой смеси с увеличением доли биоугольных гранул растет КПД брутто котлоагрегата до $\eta_{ка} = 91,6\%$ (при номинальной паропроизводительности), уменьшаются потери тепла с уходящими газами (q_2) и полный расход топливной смеси (B). Зольность топливной смеси возрастает, что связано с большей зольностью на сухую массу гидролизного лигнина по сравнению с КДТ (рис. 3). Критерий Стентона, характеризующий условия теплообмена, увеличивается с 0,42 до 0,55.

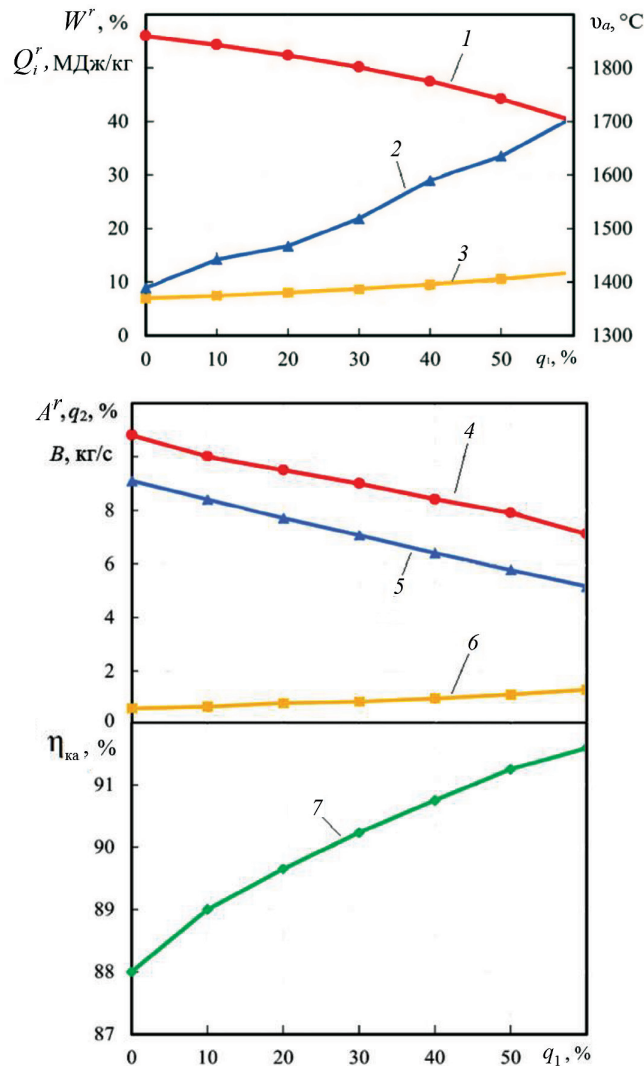


Рис. 3. Влияние доли биоугольных гранул в топливной смеси на ее теплотехнические характеристики и показатели работы котлоагрегата:

1 – W^r ; 2 – Q_i^r ; 3 – v_a ; 4 – A^r ; 5 – B ; 6 – q_2 ; 7 – $\eta_{ка}$

Fig. 3. The influence of the proportion of bio-coal pellets in the fuel mixture on its thermal characteristics and performance of the boiler: 1 – W^r ; 2 – Q_i^r ; 3 – v_a ;

4 – A^r ; 5 – B ; 6 – q_2 ; 7 – $\eta_{ка}$

Замещение биоугольными гранулами высококалорийных невозобновляемых видов топлива при сжигании высоковлажного КДТ позволяет значительно снизить выбросы углекислого газа. Для филиала АО «Группа «Илим» в г. Коряжма при среднегодовой нагрузке котлоагрегатов КМ-75-40, равной примерно 71 % от номинальной, и тепловой доле биоугольных гранул в топливной смеси 30 % снижение выбросов углекислого газа, исходя из расчета работы 3 котлов, составит более 69,805 тыс. т/год при использовании для подсветки природного газа и 98,244 тыс. т/год при сжигании мазута. Для этого потребуется закупка 57 238 т биоугольных гранул. Рынок биоугля в РФ только начинает формироваться: в 2015 г. ОАО «Бионет» был запущен первый в стране завод по производству торрефицированных гранул из гидролизного лигнина проектной мощностью 150 тыс. т/год. В соответствии с транспортной логистикой, возможным потребителем данной продукции мог бы быть целлюлозно-бумажный комбинат в г. Коряжма.

Добавка биоугольных гранул в топливную смесь оказывает значительное влияние на аэродинамическое сопротивление газового тракта котлоагрегата. Так, при тепловой доле биоугольных гранул в топливной смеси 60 % снижение сопротивления газового тракта при номинальной нагрузке котла составит более 42 %, что уменьшит затраты электроэнергии на обеспечение тяги и дополнительно повысит КПД нетто котлоагрегата.

Заключение

Энергетическое обследование показало, что конструкция и техническое состояние котлоагрегатов КМ-75-40 не обеспечивают требуемую полноту выгорания горючих компонентов топлива и приемлемые экологические показатели. Учитывая, что установленные котлоагрегаты эксплуатируются более 50 лет, характеризуются физическим износом и устаревшей конструкцией, необходимо запланировать замену данных котлоагрегатов на современные теплогенерирующие установки. До замены целесообразно обеспечить перевод котлоагрегатов на работу по слое-вихревой технологии сжигания и использовать в качестве добавки к кородревесному топливу биоугольные гранулы. Переход на сжигание данной топливной смеси по слое-вихревой технологии позволит отказаться от применения высококалорийных невозобновляемых видов топлива в котлоагрегатах КМ-75-40 при сжигании высоковлажного кородревесного топлива, существенно повысит КПД котлов и уменьшит негативное влияние на окружающую среду.

Термогравиметрические исследования, выполненные для разных видов биотоплива, входящих в состав сжигаемой смеси, а также тепловые и аэродинамические расчеты подтвердили перспективность разработанных рекомендаций, при этом в качестве добавки к кородревесному топливу следует использовать биоугольные гранулы, полученные из гидролизного лигнина, прошедшего мягкий пиролиз.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Башмаков И.А., Мышак А.Д. Затраты и выгоды реализации стратегий низкоуглеродного развития России: перспективы до 2050 г. // *Вопр. экономики*. 2014. № 8. С. 70–91.

Bashmakov I., Myshak A. Costs and Benefits of the Transition to Low-Carbon Economy in Russia: Perspectives up to 2050. *Voprosy Ekonomiki*, 2014, no. 8, pp. 70–91. (In Russ.). <https://doi.org/10.32609/0042-8736-2014-8-70-91>

2. Головкин С.И., Коперин И.Ф., Найденов В.И. Энергетическое использование древесных отходов. М.: Лесн. пром-сть, 1987. 221 с.

Golovkov S.I., Koperin I.F., Naydenov V.I. *Energy Use of Wood Waste*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1987. 221 p. (In Russ.).

3. Жучков П.А. Тепловые процессы в целлюлозно-бумажном производстве. М.: Лесн. пром-сть, 1978. 407 с.

Zhuchkov P.A. *Thermal Processes in Pulp and Paper Production*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1978. 407 p. (In Russ.).

4. Кокорин А. Новые факторы и этапы глобальной и российской климатической политики // Экон. политика. 2016. Т. 11, № 1. С. 157–176.

Kokorin A.O. New Factors and Stages of the Global and Russian Climate Policy. *Economic Policy*, 2016, vol. 11, no. 1, pp. 157–176. (In Russ.). <https://doi.org/10.18288/1994-5124-2016-1-10>

5. Любов В.К., Владимиров А.М. Комплексная эффективность применения древесных гранул в энергоустановках // Изв. вузов. Лесн. журн. 2021. № 1. С. 159–172.

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. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2021-1-159-172>

6. 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. (In Russ.).

7. 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. (In Russ.). <https://doi.org/10.32609/0042-8736-2018-4-76-94>

8. 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: Approved by ОАО Scientific Research Institute "Tekhuglerod". Yaroslavl, 2005. 10 p. (In Russ.).

9. 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. *Engineering Journal of Don*, 2015, no. 2, part 2, art. 81. (In Russ.).

10. Патент 2756712 С1 РФ. МПК F23В 10/00. Комбинированное топочное устройство для сжигания кородревесного топлива: № 2021106499: заявл. 12.03.2021: опубл. 04.10.2021 / В.К. Любов.

Liubov V.K. Combined Bark-Wood Firing Device. Patent RF, no. RU 2 756 712 C1, 2021. (In Russ.).

11. 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. (In Russ.). <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.1.2954.5200>

12. Сборник методик по определению концентраций загрязняющих веществ в промышленных выбросах. Л.: Гидрометеиздат, 1987. 272 с.

Collected Procedures for Determining the Concentrations of Pollutants in Industrial Emissions. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1987. 272 p. (In Russ.).

13. Тепловой расчет котлов (нормативный метод) / ПАО «ЕЭС России», ВТИ, НПО ЦКТИ. СПб., 1998. 257 с.

Thermal Calculation of Boilers (Standard Method). Saint Petersburg, 1998. 257 p. (In Russ.).

14. Трёмбовля В.И., Фингер Е.Д., Авдеева А.А. Теплотехнические испытания котельных установок. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Энергоатомиздат, 1991. 414 с.

Trembovlya V.I., Finger E.D., Avdeeva A.A. *Heating Tests of Boilers*. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1991. 414 p. (In Russ.).

15. Финкер Ф.З., Дульнева Л.Т., Кубышкин И.Б., Митрюхин А.Г., Дробышевский М.А. Результаты модернизации котла ПК-38 Назаровской ГРЭС с использованием ВИР-технологии «Политехэнерго» // Проблемы экономии топливно-энергетических ресурсов на промпредприятиях и ТЭС: межвуз. сб. науч. тр. СПб.: СПбГТУРП, 2005. С. 141–146.

Finker F.Z., Dul'neva L.T., Kubyshkin I.B., Mitryukhin A.G., Drobyshevskiy M.A. Results of Modernization of the Boiler PK-38 of the Nazarovo Power Station Using the Technology of Secondary Use of Roofing Felt "Politekhenergo". *Issues of Saving the Fuel and Energy Resources at the Industrial Enterprises and Thermal Power Stations: Collection of Academic Papers*. Saint Petersburg, SPb STUPP Publ., 2005, pp. 141–146. (In Russ.).

16. Финкер Ф.З., Кубышкин И.Б., Митрюхин А.Г., Шлегель А.Э., Сидоров Н.В., Царев С.А. Камерное сжигание дробленых назаровских углей на котле ПК-38 по схеме «Политехэнерго» // Новое в российской электроэнергетике. 2005. № 5. С. 34–41.

Finker F.Z., Kubyshkin I.B., Mitryukhin A.G., Shlegel' A.E., Sidorov N.V., Tsarev S.A. Chamber Combustion of Crushed Nazarovo Coals in a PK-38 Boiler According to the "Politekhenergo" Scheme. *Novoye v rossiyskoy elektroenergetike*, 2005, no. 5, pp. 34–41. (In Russ.).

17. 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. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2008.07.001>

18. Bergman P. *Torrefaction for Biomass Co-Firing in Existing Coal-Fired Power Stations BIOCOAL*. ECN Report No. ECNC-05-013. Netherlands, 2005. 75 p.

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

20. 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. <https://doi.org/10.1021/ef0200931>

21. 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. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2012.08.029>

22. Lyubov V.K., Popov A.N., Maryandyshev P.A. Research of Efficient Burning of Bark and Wood Fuel. *International Science and Technology Conference "EastConf"*. Vladivostok, 2019, pp. 1–5. <https://doi.org/10.1109/EastConf.2019.8725391>

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

24. Maryandyshev P.A., Chernov A.A., Popova E.I., Lyubov V.K. Thermal Decomposition and Combustion of Coals, Fuel Wood, and Hydrolytic Lignin, as Studied by Thermal Analysis. *Solid Fuel Chemistry*, 2016, vol. 50, iss. 3, pp. 167–176. <https://doi.org/10.3103/S0361521916030095>

25. 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. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.11.122>

26. 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. <https://doi.org/10.1134/S101933161606006X>

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