

УДК 621.311

Полина Васильевна Белявская

Новосибирский государственный технический университет, аспирант, кафедра тепловых электрических станций, Россия, Новосибирск, e-mail: polina.belyawska@gmail.com

Павел Александрович Щинников

Новосибирский государственный технический университет, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой тепловых электрических станций, Россия, Новосибирск, телефон +7(383)3461142, e-mail: shchinnikov@corp.nstu.ru

Модернизация котла КМ-75-40 путем установки предтопка с кипящим слоем при сжигании кородревесных отходов

Авторское резюме

Состояние вопроса. Паровые котлы марки КМ-75-40 широко применяются на предприятиях целлюлозно-бумажной промышленности России для утилизации кородревесных отходов. Конструкция с наклонными колосниковыми и механическими решетками при сжигании топлива влажностью более 50 % вызывает снижение паропроизводительности, необходимость подсвета мазутом, интенсивное шлакование поверхностей и частые остановы. В условиях перехода к углеродно-нейтральным технологиям требуется повышение эффективности и экологичности оборудования для сжигания биомассы. В связи с этим актуальной задачей является модернизация котла КМ-75-40 путем замены предтопка с колосниковой решеткой на кипящий слой для устойчивого сжигания кородревесных отходов повышенной влажности с одновременным ростом паропроизводительности и снижением выбросов.

Материалы и методы. Работа выполнена с использованием нормативного метода теплотехнического расчета, компьютерной программы (комплекса) ТРАКТ и данных натурных испытаний. Проанализированы решения по замене цепного предтопка на кипящий слой с проработкой подачи воздуха, системы воздухораспределительной решетки и оборудования для удаления песка и крупных фракций с учетом влажности топлива, состава золы, температурных режимов газоходов и показателей паропроизводительности в различных режимах работы котла.

Результаты. Предложен вариант модернизации котла КМ-75-40. Осуществлен теплотехнический расчет основных параметров работы котла в различных режимах. Установлено, что модернизация котла обеспечила рост КПД с 58,6 до 86,3 %, достижение паропроизводительности 90 т/ч при влажности кородревесных отходов 30–55 %, снижение выбросов NO_x в 2,1 раза и SO_x в 3,8 раза, устойчивую работу при влажности до 70 %, снижение температуры в топочном пространстве более чем на 200 °С, что повысило ресурс элементов и сократило образование NO_x.

Выводы. Предложенный вариант модернизации котла КМ-75-40 повышает эффективность, надежность и экологичность оборудования. Подтверждена возможность устойчивого сжигания кородревесных отходов влажностью до 70 % при минимальном использовании дополнительного топлива. Решение может применяться для модернизации аналогичных котлов и других установок, работающих на биомассе. В перспективе предполагается оптимизация конструкции и автоматизация систем управления.

Ключевые слова: котел КМ-75-40, кородревесные отходы, кипящий слой, модернизация котла, паропроизводительность, выбросы оксидов азота

Polina Vasilievna Belyavskaia

Novosibirsk State Technical University, Postgraduate Student of Thermal Power Plants Department, Russia Novosibirsk, e-mail: polina.belyawska@gmail.com

Pavel Alexandrovich Shchinnikov

Novosibirsk State Technical University, Doctor of Engineering Sciences (Post-doctoral degree), Professor, Head of Thermal Power Plants Department, Russia, Novosibirsk, telephone +7 (383) 346 11 42, e-mail: shchinnikov@corp.nstu.ru

Modernization of KM-75-40 boiler by installing a fluidized bed furnace for bark and wood waste combustion

Abstract

Background. KM-75-40 boilers have been widely used at pulp and paper mills in Russia for the utilization of bark and wood waste (BWW). Their design with inclined grates and chain stoker furnaces, when firing fuel with moisture content above 50 %, leads to reduced steam-rated capacity, the need for constant oil support firing, intensive slagging of heating surfaces, and frequent outages. Under the current transition to carbon-neutral technologies, there is a demand for higher efficiency, and environmental performance of biomass combustion equipment. Thus, the vital task of the study is to develop and justify a retrofit option for KM-75-40 boiler by replacing the grate furnace with a bubbling fluidized bed (BFB) furnace to ensure stable combustion of high-moisture BWW with simultaneous increase in steam-rated capacity and reduction of emissions.

Materials and methods. The study has been carried out using the normative method of boiler heat balance, the ТРАКТ computer program, and field test data. The analysis has covered design solutions for replacing the chain stoker with a BFB

furnace, including the arrangement of air supply, the air-distribution grate, and equipment for sand and large particle removal. The evaluation has accounted for fuel moisture, ash chemistry, gas-path temperature profiles, and steam generation rates under various operating modes.

Results. A modernization option for KM-75-40 boiler is proposed. Thermal engineering calculations of the basic operating parameters of the boiler under various modes have been carried out. It has been established that the retrofit has increased boiler efficiency from 58,6 % to 86,3 %, achieved a steam-rated capacity of 90 t/h for BWW moisture levels of 30–55 %, and reduced NO_x and SO_x emissions by 2,1 and 3,8, respectively. Stable operation has been achieved at up to 70 % fuel moisture. Furnace temperature has decreased by more than 200 °C, improving component lifetime and reducing NO_x formation.

Conclusions. The modernization of KM-75-40 boilers has significantly improved efficiency, reliability, and environmental safety of the equipment. Stable combustion of BWW with up to 70 % moisture has been demonstrated with minimal use of auxiliary fuel. The proposed solution is recommended for retrofitting similar boilers and other biomass-fired plants. Future work should focus on design optimization and automation of BFB control systems.

Key words: KM-75-40 boiler, bark and wood waste, fluidized bed, boiler modernization, steam-rated capacity, nitrogen oxide emissions

DOI: 10.17588/2072-2672.2026.1.012-020

Введение. Мировая энергетика переживает этап трансформации, связанный с необходимостью сокращения выбросов парниковых газов и перехода к углеродно-нейтральным технологиям, в основе которых лежат решения на основе возобновляемых источников (ВИЭ). Россия как участник Парижского соглашения¹ обязалась достичь углеродной нейтральности к 2060 году. Для этой цели предпринимаются шаги по развитию ВИЭ, среди которых особое место занимает биомасса².

Россия обладает значительными ресурсами биомассы, в первую очередь древесного происхождения. По данным Минэнерго РФ и аналитических агентств, до 18 % всех производимых в стране отходов потенциально пригодны для энергетического использования [1]. Из этого объема около 60–70 % составляют отходы древесины и лесопереработки, в том числе кора, опилки, древесная пыль и др. [2].

Однако фактическая доля использования биомассы в энергетике России остается низкой – менее 1,5 % от общего конечного энергопотребления, тогда как в странах ЕС этот показатель достигает 15–20 %, а в таких странах, как Швеция и Финляндия, – более 30 % [3].

Кроме отходов сельского хозяйства (солома, жмых, лузга и навоз), которые в отдельных аграрных регионах могут обеспечивать до 5–7 % регионального энергобаланса [4], значительным источником биоресурсов в России являются кородревесные отходы. Они составляют до 35 % всех отходов лесопромышленного комплекса страны [5], однако в энергетике используется лишь 10–12 % этого объема. В целом, ежегодно в России остается не утилизируемыми до 75 % лесных отходов, значительная часть которых сжигается на открытом воздухе, что сопровождается выбросами

загрязняющих веществ и увеличивает риск природных пожаров [6].

Сжигание биомассы условно считается углеродно-нейтральным, поскольку при ее сжигании высвобождается углерод, ранее полученный в процессе фотосинтеза растениями из атмосферы. При замещении традиционных углеродных видов топлива (уголь, мазут) биотопливом можно сократить валовые выбросы CO₂. В частности, замена угля биомассой на установке мощностью 10 МВт позволяет ежегодно сокращать выбросы парниковых газов на 75–90 % [7].

Применение биотоплива позволяет снизить энергетическую зависимость малых населенных пунктов, особенно в труднодоступных регионах. В частности, в более чем 30 % отдаленных поселений Сибири и Дальнего Востока отсутствует подключение к магистральным сетям, а поставки мазута дорогостоящи³. Перевод котельных с мазута на древесные отходы снижает себестоимость теплоснабжения на 25–35 % [8]. Даже частичное замещение угля биомассой может дать значительный эффект, например при добавлении биомассы на уровне 20–30 % в топливную смесь угольных котлов (co-firing) обеспечивает повышение углеродной нейтральности, при этом не требуется реконструкции котла [9]. При использовании биомассы получили распространение технологии кипящего слоя, которые позволяют использовать сырье с низшей теплотой сгорания и высокой влажностью (до 50 %) с КПД 80–85 % [10, 11]. Применяют когенерационные установки (СНП) на биотопливе, которые показывают высокие показатели эффективности (около 70–90 %) и могут обеспечивать значительную часть тепловой потребности поселков и небольших предприятий [12]. Применяют пеллетные котельные, особенно в европейской части России, где доля тепловой генерации на ВИЭ уже составляет около 3 %⁴.

¹ Парижское соглашение. ООН: меры по борьбе с изменением климата [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.un.org/ru/climatechange/hfris-agreement> (дата обращения: 07.08.2025).

² Указ Президента РФ от 31.10.2023 № 666 «О достижении углеродной нейтральности».

³ Министерство энергетики Российской Федерации. Энергетическая стратегия Российской Федерации на период до 2035 года. – М.: Минэнерго РФ, 2020. – 112 с.

⁴ Системный оператор Единой энергетической системы. Отчет о функционировании ЕЭС России в 2023 г. [Электронный ресурс]. – URL: https://www.so-eps.ru/fileadmin/files/company/reports/disclosure/2024/ups_rep2023.pdf (дата обращения: 10.08.2025).

Наиболее широко в энергетике России биоресурсы вовлечены в региональные энергобалансы через энергетику промышленных предприятий, в первую очередь при лесопереработке [13, 14]. На них сжигают часть кородревесных отходов предприятия при генерации технологического пара, предназначенного для основного производства. Вместе с тем котельная техника таких предприятий эксплуатируется в тяжелых условиях быстрого шлакования конвективных поверхностей нагрева, снижения паропроизводительности, необходимости подсвета мазутом, низких коэффициентах готовности. Устранение таких технических недостатков является важной задачей.

Материалы и методы. Рассмотрим сжигание кородревесных отходов (КДО) в утилизационных котлах типа КМ-75-40, расположенных на корьевых котельных ТЭС. Данный тип котлов оснащен наклонными колосниковыми и механическими цепными решетками (рис. 1).

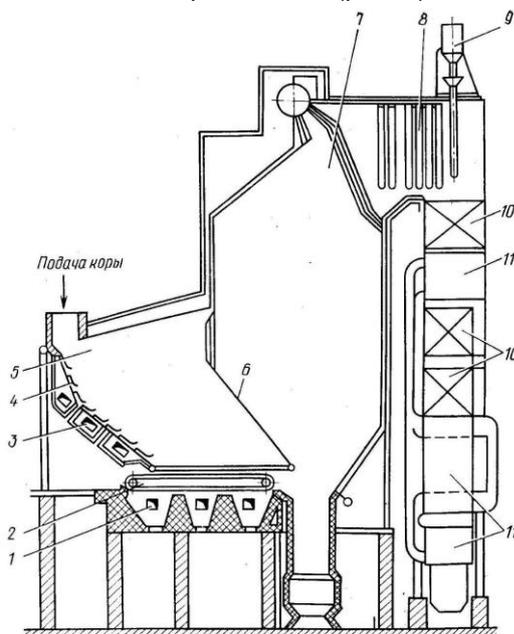


Рис. 1. Компоновка котлоагрегата КМ-75-40: 1 – подача воздуха под механическую решетку; 2 – цепная механическая решетка; 3 – подача воздуха под наклонную неподвижную решетку; 4 – наклонная колосниковая решетка; 5 – предтопок; 6 – экранные трубы, отделяющие предтопокот топки; 7 – топка; 8 – пароперегреватель; 9 – дробеочистка; 10 – водяной экономайзер; 11 – воздухоподогреватель

Корьевые котельные располагаются, как правило, на предприятиях лесопереработки с производством целлюлозы, где в качестве топлива используют кородревесные отходы с добавлением мазута, пека и талового масла (последние два, как побочный продукт производства целлюлозы) [15]. При работе на КДО фактическая производительность подобных котлов составляет, как правило, 50–80 % от проектной величины, что и требует добавления дорогого мазута или других добавок при сжигании. Кроме

того, котлы требуют частой остановки для проведения ремонтно-профилактических работ из-за низкой надежности цепной механической решетки.

В прежние годы производство котлоагрегатов марки КМ-75-40 позволило частично решить проблему утилизации влажных древесных отходов на многих российских предприятиях целлюлозно-бумажной промышленности. Но в процессе их эксплуатации выявился ряд общих существенных недостатков:

- ограничение нагрузки котла в случаях уменьшения подсветки резервным топливом;
- низкая экономичность топочного процесса вследствие неравномерности горения топлива на колосниковых решетках, что вызывало рост избытка воздуха и потерь тепла от неполноты сгорания;
- низкая надежность цепной механической решетки, что обуславливало частые остановки котла;
- низкие экологические показатели.

Впоследствии конструкция котлоагрегатов была признана неудачной и они были сняты с производства, но до сих пор продолжают эксплуатироваться на многих предприятиях отрасли. Белгородский котлостроительный завод поставил целлюлозно-бумажным комбинатам более 40 котлов КМ-75-40, предназначенных для работы с кородревесными отходами. Устранение указанных недостатков предлагается путем замены предтопка с колосниковой решеткой на предтопок кипящего слоя (рис. 2).

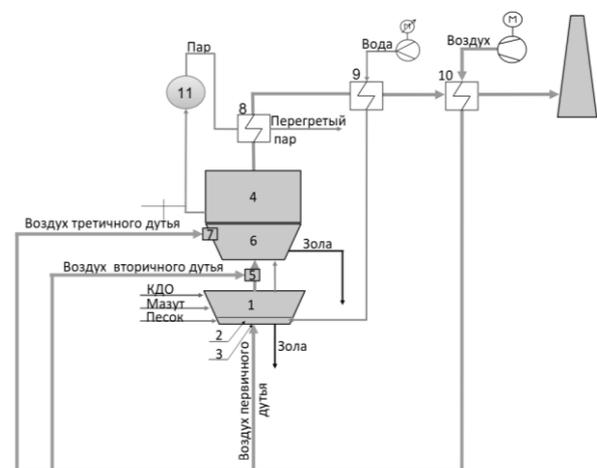


Рис. 2. Схема работы котла КМ-75-40 после его модернизации с установкой предтопка кипящего слоя: 1 – предтопок котла с кипящим слоем; 2 – кипящий слой; 3 – воздуховораспределительная решетка; 4 – топка котла; 5 – сопла вторичного дутья; 6 – холодная воронка топки котла; 7 – сопла третичного дутья; 8 – пароперегреватель; 9 – экономайзер; 10 – воздухоподогреватель; 11 – барабан

В предтопке котла 1 при температуре 750–950 °С протекает процесс неполного горения топлива в кипящем слое 2 инертного наполнителя (кварцевый песок 0,5–2 мм) при его

взаимодействии с воздухом первичного дутья. Воздух первичного дутья подается на воздухо-распределительную решетку 3 с коэффициентом избытка воздуха 0,3–0,4 (при номинальной производительности котла), что обеспечивает бесшлаковый режим работы кипящего слоя. В ходе неполного горения топлива в кипящем слое, сопровождающегося процессами его пиролиза и газификации, образуется низкокалорийная парогазовая смесь, которая вместе с мелкофракционными частицами активного древесного полукокса поступает в надслоевой объем предтопка. Отсюда, смешиваясь с продуктами термической обработки отдуваемых мелкофракционных частиц топлива (парогазовая смесь и мелкофракционные частицы активного полукокса), продукты термической обработки топлива поступают в топку котла 4.

В топке происходит их смешение со струями вторичного воздушного дутья 5. Сопла

вторичного дутья сориентированы вниз, в сторону холодной воронки котла 6. Поэтому при смешении продуктов термической обработки топлива со струями вторичного воздушного дутья формируется факел, частично затягиваемый в холодную воронку. Не сгоревшие в факеле частицы древесного полукокса сепарируются вместе с мелкофракционным песком, выносимым из предтопка в холодную воронку котла, где дожигаются в узле донного дутья 7 в воздушных струях третичного дутья.

Представленный вариант модернизации котла позволяет сохранить существующую схему подготовки и подачи КДО в котельную на сжигание (рис. 3). Производительность существующих трактов подачи коры и древесных отходов достаточно для обеспечения подачи древесного топлива в котельную в необходимом объеме и после модернизации.

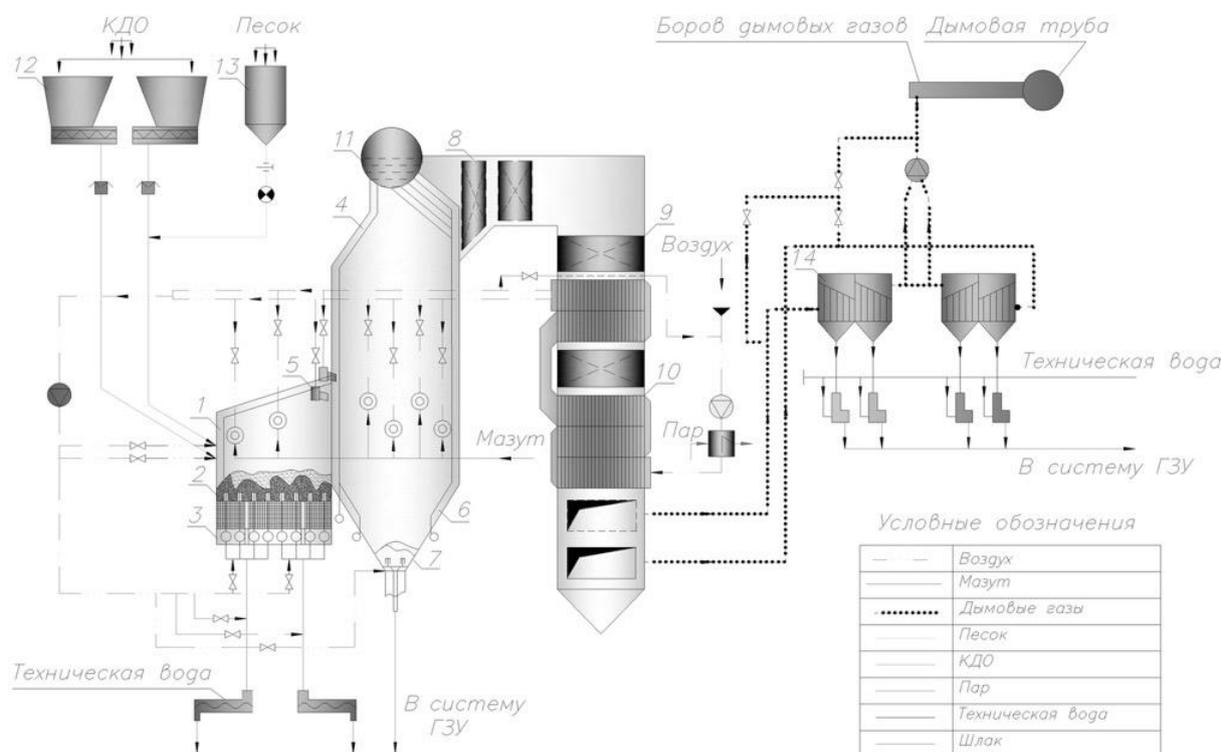


Рис. 3. Принципиальная технологическая схема модернизации котла КМ-75-40: 1 – предтопок; 2 – кипящий слой; 3 – решетка воздухо-распределительная; 4 – топка; 5 – сопла вторичного дутья; 6 – холодная воронка; 7 – сопла третичного дутья; 8 – пароперегреватель; 9 – экономайзер; 10 – воздухоподогреватель; 11 – барабан; 12 – бункер КДО с «подвижным дном»; 13 – бункер песка; 14 – рукавный фильтр

Для модернизации котла следует демонтировать предтопок с колосниковыми и наклонной решетками, холодную воронку котла, существующие батарейные циклоны, дымосос, газопроводы и трубопроводы котла в границах реконструкции. Затем необходимо установить воздухо-распределительную решетку с системой коллекторов, газоплотные экранные поверхности и обшивку предтопка, горелки предтопка, элементы фронтального

экрана и элементы фестонной разводки, коллекторы вторичного дутья с соплами, оборудование системы удаления крупных фракций из предтопка и системы удаления песка из холодных воронок, высоконапорный вентилятор горячего дутья с коллекторами подачи воздуха и дымосос котла с газоходами, устройства подачи песка для топки кипящего слоя. Кроме того, необходимо обеспечить все необходимые монтажные соединения.

Подобная модернизация реализована на паровых котлах № 1 и № 2 на Усть-Илимском целлюлозно-бумажном комбинате в целях решения проблем низкой надежности цепной решетки при ее демонтаже, эффективности сжигания КДО с высокой влажностью из-за неустойчивости горения, следовательно, в целях обеспечения максимальных производительностей котлов без подсвета, улучшения экологических характеристик котлов [16].

Расчетная часть исследования выполнена с использованием нормативного метода теплотехнического расчета котлов, компьютерной программы (комплекса) ТРАКТ, а также данных натуральных испытаний модернизированных котлов. В ходе работы проведен анализ конструктивных решений по замене предтопка с цепным устройством на предтопок с кипящим слоем, включающий проработку схем подачи первичного, вторичного и третичного воздуха, системы воздухораспределительной решетки, а также оборудования для удаления песка и крупных фракций из слоя. При оценке эксплуатационных характеристик учитывались влажность топлива, химический состав золы, температурные режимы газового тракта и показатели паропроизводительности в различных режимах работы котла.

Результаты исследования. При налаженных испытаниях основное внимание уделялось оценке надежности работы кипящего слоя, влиянию химического состава золы на стабильность псевдоожижения, т. е. способность слоя равномерно «кипеть» под действием воздуха без образования застойных зон, слипания частиц и нарушения теплообмена. Результаты испытаний показали, что надежность и эффективность работы котла напрямую связаны с устойчивостью процессов в топке и кипящем слое. Процессы горения топлива, взаимодействия золы с материалом слоя, теплообмена и аэродинамики в зоне псевдоожижения являются взаимосвязанными и сложными по своей природе. Практика эксплуатации подобных установок подтверждает, что при длительной работе в слое образуются агломераты – спекшиеся частицы, ухудшающие псевдоожижение и, как следствие, теплообмен в топке и в последующих конвективных поверхностях котла [17].

Сжигание кородревесных отходов с содержанием щелочей (соединений калия и натрия, что характерно для КДО) в золе свыше 5 % делает агломерацию неизбежной. В этих условиях требуется постоянное дренирование слоя – замещение его части свежим песком.

В ходе налаженных испытаний было установлено, что критическая концентрация соедине-

ний калия и натрия в золе, при которой наблюдается неустойчивое поведение кипящего слоя, составляет 1 %. При превышении этого уровня нарушается псевдоожижение и, как следствие, ухудшается общий тепловой режим котла. Для обеспечения устойчивой работы котла при номинальной нагрузке в таких условиях требуется подача свежего песка с расходом 2,6 т/ч, что соответствует соотношению песок/зола на уровне 0,31 [18].

Кроме химического состава, важным параметром, существенно влияющим на работу котла, является влажность КДО. Этот показатель оказывает влияние на теплонапряжение топки, расход топлива и паропроизводительность в широком диапазоне.

С использованием нормативного метода расчета котлов⁵ и компьютерной программы (комплекса) ТРАКТ⁶ получены температуры в слое, топке и далее по всему газовому тракту котла. Можно видеть, что наибольшие изменения температурного режима характерны для предтопка и топки, при этом модернизация ведет к заметному (более чем на 200°C) снижению температуры в топочном пространстве (рис. 4). Это, в свою очередь, способствует увеличению эффективности котла, повышению его надежности и экологичности.

Важной характеристикой работы котла является влажность КДО. Так, ее рост до 57% и выше ведет к резкому снижению паропроизводительности (рис. 5). Это связано с двумя факторами. Во-первых, увеличение влажности топлива ведет к росту затрат энергии на испарение влаги (сопровождается дополнительными затратами топлива) и, во-вторых, увеличение доли пара в продуктах сгорания «наталкивается» на ограничение по пропускной способности конвективных газоходов котла, что снижает тепловой поток, подводимый к этим поверхностям нагрева. Более того, рост влажности топлива сопровождается необходимостью «подсвета» основного факела мазутом, что еще более увеличивает объем продуктов сгорания и ведет к лавинообразному снижению паропроизводительности. На обычной наклонной колосниковой решетке кородревесные отходы можно сжигать только при влажности до 50 %, иначе снижается паропроизводительность и ухудшается горение. В котле с кипящим слоем допустимую влажность можно повысить до 60–70 % благодаря высокой интенсивности теплообмена и устойчивому режиму слоя. Подобные результаты получены и в компании Babcock [19]. Следует отметить, что подобные эксплуатационные режимы возможны, однако они сопровождаются увеличенными расходами топлива (рис. 5).

⁵ Тепловой расчет котельных агрегатов: нормативный метод / под ред. Н.В. Кузнецова [и др.]. – 2-е изд., перераб. – М.: Энергия, 1973.

⁶ Компьютерная программа (комплекс) ТРАКТ: расчет тепловых схем котельных установок.

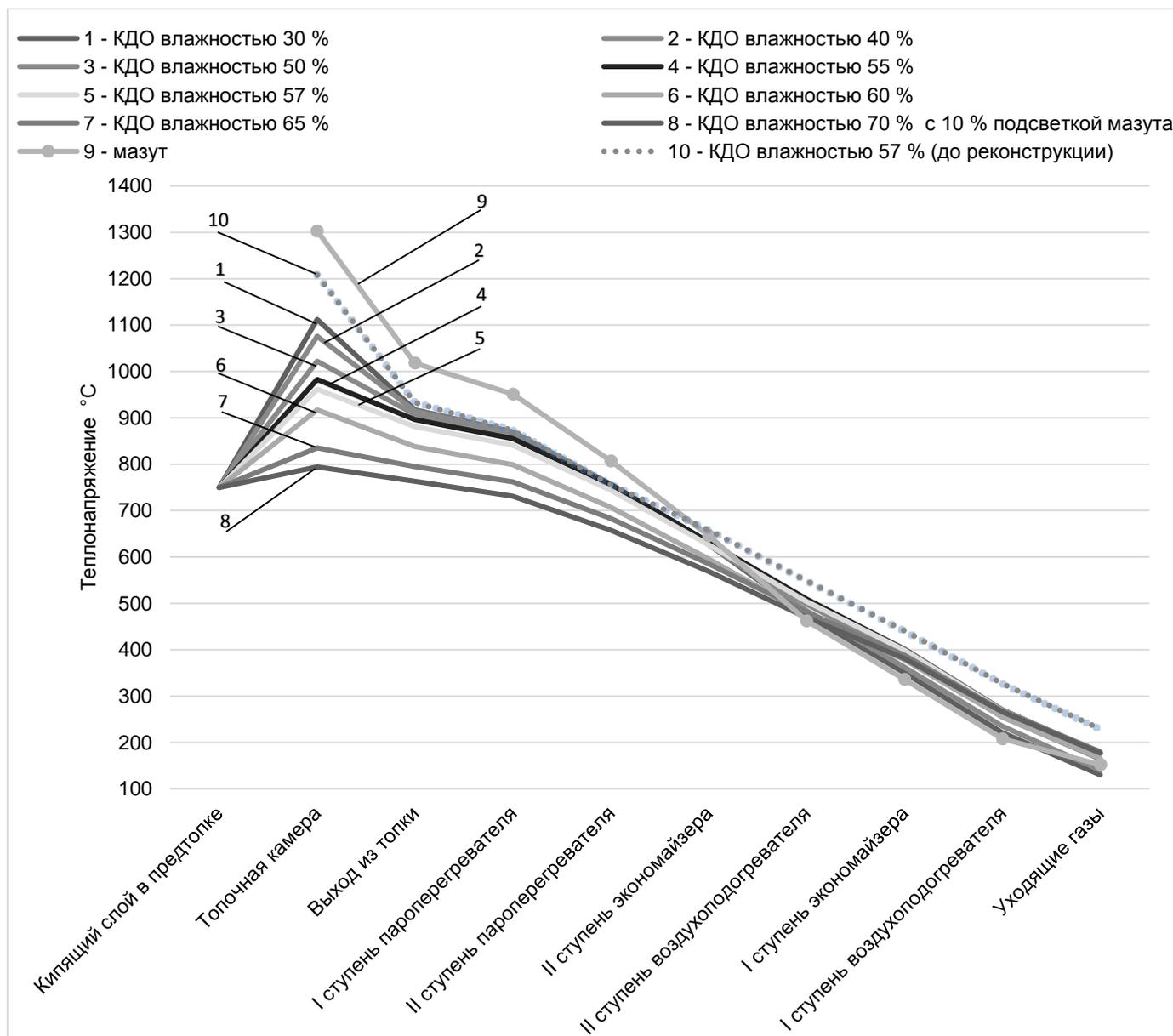


Рис. 4. Распределение температур по трактам котла КМ-75-40 до и после модернизации в зависимости от влажности КДО

Можно видеть, что с ростом влажности КДО с 30 до 57 % его расход возрастает почти вдвое – с 22,7 до 40,5 т/ч, что обусловлено снижением теплотворной способности топлива. При дальнейшем увеличении влажности до 70 % расход КДО достигает 48 т/ч, при этом паропроизводительность котла снижается до 60 т/ч. В таких условиях дополнительно требуется 0,54 т/ч мазута для стабилизации горения. При пересчете всех видов топлива в энергетическом эквиваленте доля мазута составляет 11,5 % от общего теплового баланса, несмотря на его небольшой массовый расход, что связано с высокой теплотой сгорания мазута по сравнению с КДО. При проведении испытаний котла при сжигании КДО с низшей теплотой сгорания 1594 ккал/кг и паропроизводительности 80 т/ч фактический расход топлива составил

39,8 т/ч. При этом был достигнут КПД на уровне 86,34 %, что значительно выше по сравнению с КПД 58,6 %, зафиксированным до модернизации котла. Значительный рост КПД котла (с 58,6 до 86,3 %) после модернизации обусловлен совокупным действием нескольких факторов, связанных с заменой колосникового предтопка на предтопок с кипящим слоем. Во-первых, в кипящем слое обеспечивается интенсивный тепло- и массообмен, а также высокая степень выгорания топлива за счет длительного пребывания частиц в зоне горения и их многократной циркуляции. Это приводит к снижению потерь от химической и механической неполноты сгорания, характерных для колосниковых решеток при сжигании влажных кородревесных отходов. Во-вторых, организация ступенчатой подачи воздуха (первичного, вторичного и

третичного) позволяет снизить коэффициент избытка воздуха по сравнению с исходной схемой. Это уменьшает объем уходящих газов и, соответственно, потери теплоты с уходящими газами, которые в исходном варианте были значительными из-за необходимости повышенного дутья для стабилизации горения на решетке. В-третьих, модернизация приводит к снижению температуры в топочном пространстве более чем на 200 °С (к устранению локальных перегретых зон), что уменьшает лучистые тепловые потери, снижает тепловую нагрузку на экраны и способствует более равномерному распределению

тепловых потоков по газовому тракту котла. При этом температурный режим конвективных поверхностей нагрева становится более стабильным для теплообмена (без перегревов). В-четвертых, за счет устойчивого горения топлива с высокой влажностью существенно сокращается или практически исключается подсвет мазутом, обладающим высокой теплотой сгорания и формирующим дополнительный объем продуктов сгорания. Снижение доли вспомогательного топлива напрямую уменьшает энергетические и тепловые потери котла.

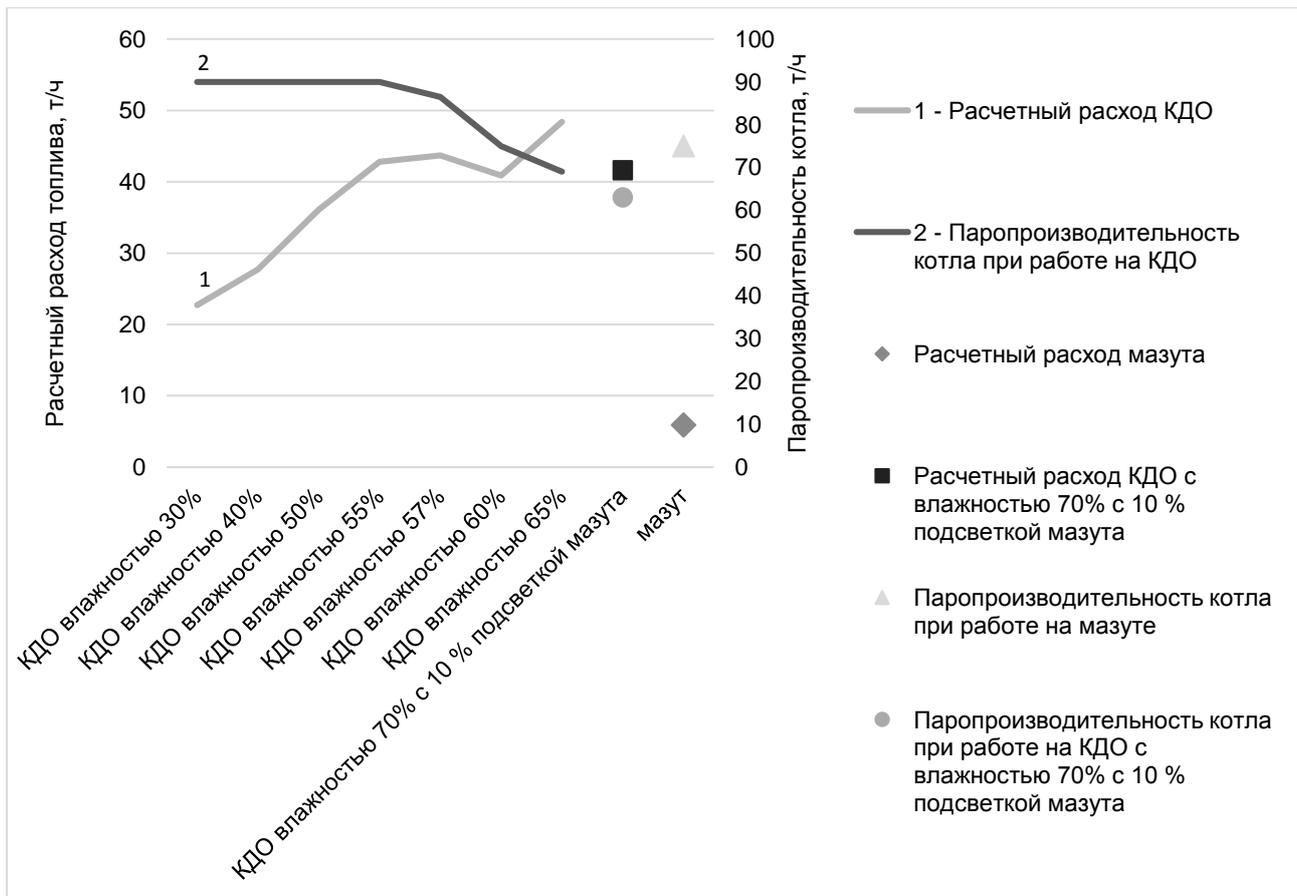


Рис. 5. Паропроизводительность и расход топлива котла КМ-75-40 в зависимости от влажности КДО после его модернизации

Проведенные расчеты показывают, что при модернизации котла его паропроизводительность может быть обеспечена на уровне 90 т/ч в широком диапазоне влажности КДО от 30 до 55 % при увеличении удельной выработки пара на 11 % (см. таблицу). Изменение влажности топлива при организации кипящего слоя мало влияет на температурный режим конвективных поверхностей опускной шахты газохода. Экологические показатели котла по выбросам NO_x и SO_x улучшаются в 2,11 и 3,8 раза соответственно, а выбросы пентоксида

ванадия присутствуют на уровне следов. Снижение выбросов оксидов серы обусловлено в первую очередь резким уменьшением доли мазута в тепловом балансе котла. До модернизации требовалась постоянная подсветка, сами же кородеревесные отходы содержат крайне низкие концентрации серы. Косвенным фактором снижения выбросов SO_x является также понижение температуры в топке, что ограничивает вторичные реакции окисления сернистых соединений в газовой фазе.

Показатели работы котла КМ-75-40

Показатель	До модернизации	После модернизации
Паропроизводительность, т/ч	50*	90
Расход КДО, т/ч	~24 ***	38,69**
Расход мазута***, т/ч	0,127	<0,001
Таловое масло***, т/ч	0,792	0
Пек***, т/ч	0,028	0
Удельная выработка пара на КДО, т пара/т КДО	2,083	2,326
Температуры, °С:		
– в слое	–	750
– в топке	1208	959
– на выходе из топки	933	873
– перед пароперегревателем 1-й ступени	873	835
– перед пароперегревателем 2-й ступени	756	737
– перед экономайзером 2-й ступени	658	621
– перед воздухоподогревателем 2-й ступени	548	490
– перед экономайзером 1-й ступени	441	393
– перед воздухоподогревателем 1-й ступени	327	241
Температура уходящих газов	229	161
КПД, %	58,6	86,5
Выброс NO _x , г/с	3,21	1,52
Выброс SO ₂ , г/с	0,2	0,03
Выброс SO _x , г/с	30,63	7,98
Выброс V ₂ O ₅ , г/с	~0,003****	Следы****

* Проектное значение 50 т/ч (не обеспечивается фактическими условиями эксплуатации).

** При влажности КДО 30 %.

*** Среднегодовое значение при 5000 часов использования.

**** Определено⁷.

Выводы. Проведенный анализ влияния влажности кородревесных отходов на работу котла показал, что при увеличении влажности КДО с 30 до 57 % их расход возрастает почти вдвое, с 22,7 до 40,5 т/ч, а при влажности 70 % расход достигает 48 т/ч при одновременном снижении паропроизводительности до 60 т/ч.

Для стабилизации горения при высокой влажности топлива требуется дополнительный расход мазута 0,54 т/ч, что в энергетическом эквиваленте составляет 11,5 % теплового баланса котла.

После модернизации топки котла (замена на кипящий слой) обеспечивается устойчивое сжигание КДО с низшей теплотой сгорания 1594 ккал/кг, достигается паропроизводительность 80 т/ч при суммарном расходе топлива 39,8 т/ч и повышается КПД до 86,34 % (по сравнению с 58,6 % до модернизации).

Установлено, что при содержании в золе соединений натрия и калия выше 1 % нарушается стабильность псевдоожиженного слоя. Для обеспечения устойчивой работы требуется дренирование слоя с подачей свежего песка в количестве 2,6 т/ч, что соответствует соотношению песок/зола 0,31.

Экологические показатели котла по выбросам NO_x и SO_x улучшаются в 2,11 и 3,8 раза соответственно, а выбросы пентоксида ванадия присутствуют на уровне следов.

Список литературы

- 1. International** Renewable Energy Agency. Renewable Energy Prospects for the Russian Federation: REmap 2030. – Abu Dhabi: IRENA, 2017. – 108 p.
- 2. Дорожная** карта развития биоэнергетики Технологической платформы «Биоэнергетика» до 2035 г. [Электронный ресурс]. – URL: https://tp-bioenergy.ru/upload/file/dorozhnaya_karta_tp_bioenergetika.pdf (дата обращения: 21.07.2025).
- 3. International** Energy Agency. Renewables 2024 – Analysis and Forecast to 2029 [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.iea.org/reports/renewables-2024> (дата обращения: 20.06.2025).
- 4. Энергетический** потенциал отходов растениеводства (на примере Крыма) / А.А. Исаков, Т.И. Андреев, С.В. Киселёва и др. // СОК. – 2022. – № 8. – С. 68–73.
- 5. Колесников А.В.** Анализ образования и использования древесных отходов на предприятиях лесопромышленного комплекса России // СОК. – 2013. – № 8. – С. 68–73.
- 6. Bioenergy** in Russia: potential and technologies / Z.B. Namsaraev, B.B. Namsaraev, S.A. Bychkov, et al. // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2018. – Vol. 81, Part 1. – P. 1672–1689.
- 7. IEA Bioenergy.** Biomass for heat and power: technology, environmental impacts, and market prospects // IEA Bioenergy: Task 32 Report. – Paris: International Energy Agency, 2009. – 44 p.
- 8. Голубев В.А., Пузырев Е.М., Пузырев М.Е.** Перспективы применения котлов с топками циркуляционного кипящего слоя в коммунальной энергетике // Новости теплоснабжения. – 2016. – № 10. – С. 31–33.
- 9. Liu W.** Co-firing coal with biomass: Effects on combustion performance and pollutant emissions // Cleaner Energy Systems. – 2023. – Vol. 3, 100040. – DOI: 10.1016/j.cles.2023.100040.
- 10. IEA Bioenergy.** Fluidised bed combustion of biomass. – Paris: International Energy Agency, 2018. – 44 с.
- 11. Рябов Г.А.** Научное обоснование использования технологии сжигания твердых топлив в циркулирующем кипящем слое: дис. ... канд. техн. наук: 05.14.01. – М.: ВТИ, 2016.
- 12. IEA Bioenergy.** Combined Heat and Power from Biomass [Электронный ресурс]. – Paris: International Energy Agency, 2018. – URL: <https://www.ieabioenergy.com/publications/combined-heat-and-power-from-biomass/> (дата обращения: 10.08.2025)

⁷ Методика определения валовых и удельных выбросов в атмосферу от котельных установок ТЭС: РД 34.02.205-98. – М.: АООТ ВТИ, 1998. – 43 с.

13. **Pristupa A.O., Mol A.P.J.** The take off in solid bioenergy // *Energy Policy*. – 2015. – Vol. 83. – P. 24–36. – DOI: 10.1016/j.enpol.2015.03.019.

14. **Технология** целлюлозно-бумажного и картонного производства: Т. I. Сырье и производство полуфабрикатов. Ч. 2. Производство полуфабрикатов. – СПб.: Политехника, 2003. – С. 513–528.

15. **Котлы** КМ-75-40: метод. пособие по энерготехнологическому оборудованию. – Белгород: Белгородский котлостроительный завод, 1975. – С. 12.

16. **Пузырев Е.М., Голубев В.А., Пузырев М.Е.** Перспективы применения котлов с топками циркуляционного кипящего слоя в коммунальной энергетике // *Новости теплоснабжения*. – 2016. – № 10. – С. 31–33.

17. **Филиппов А.Н., Киселев С.Ю.** Исследование причин агломерации слоя при сжигании древесных отходов в котле ТЭЦ-3 Архангельского ЦБК // *Теплоэнергетика*. – 2019. – № 11. – С. 48–54.

18. **Obernberger I., Brunner T., Bärnthaler G.** Agglomeration in fluidized bed combustion of biomass: Operational experiences and laboratory investigations // *Fuel Processing Technology*. – 2006. – Vol. 87, No. 10. – P. 993–1007.

19. **Babcock Power.** Efficient – low emission stoker-fired biomass systems // *Babcock Power White Paper*. – 2018.

References

1. International Renewable Energy Agency. *Renewable Energy Prospects for the Russian Federation: REMap 2030*. Abu Dhabi: IRENA, 2017. 108 p.

2. **Dorozhnaya karta razvitiya bioenergetiki Tekhnologicheskoy platformy «Bioenergetika» do 2035 g.** [Roadmap for the Development of the Bioenergy Technological Platform until 2035]. Available at: https://tp-bioenergy.ru/upload/file/dorozhnaya_karta_tp_bioenergetika.pdf (accessed 21 July 2025).

3. International Energy Agency. *Renewables 2024 – Analysis and Forecast to 2029*. Available at: <https://www.iea.org/reports/renewables-2024> (accessed 20 June 2025).

4. Isakov, A.A., Andreenko, T.I., Kiseleva, S.V., Rafikova, Yu.Yu., Trofimova, I.L. Energeticheskiy potentsial otkhodov rastenievodstva (na primere Kryma) [Energy potential of crop production waste (on the example of Crimea)]. *SOK*, 2022, no. 8, pp. 68–73.

5. Kolesnikov, A.V. Analiz obrazovaniya i ispol'zovaniya drevesnykh otkhodov na predpriyatiyakh lesopromyshlennogo kompleksa Rossii [Analysis of the generation and utilization of wood waste at enterprises of the Russian forest industry]. *SOK*, 2013, no. 8, pp. 68–73.

6. Namsaraev, Z.B., Namsaraev, B.B., Bychkov, S.A., Zueva, S.B., Nozhevnikova, A.N. Bioenergy in Russia: potential and technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, vol. 81, part 1, pp. 1672–1689.

7. IEA Bioenergy. Biomass for heat and power: technology, environmental impacts, and market prospects. *IEA*

Bioenergy: Task 32 Report. Paris: International Energy Agency, 2009. 44 p.

8. Golubev, V.A., Puzyrev, E.M., Puzyrev, M.E. Perspektivy primeneniya kotlov s topkami tsirkulyatsionnogo kipiyashchego sloya v kommunal'noy energetike [Prospects for the use of boilers with circulating fluidized bed furnaces in municipal energy supply]. *Novosti teplosnabzheniya*, 2016, no. 10, pp. 31–33.

9. Liu, W. Co-firing coal with biomass: Effects on combustion performance and pollutant emissions. *Cleaner Energy Systems*, 2023, vol. 3, 100040. DOI: 10.1016/j.cles.2023.100040.

10. IEA Bioenergy. *Fluidised bed combustion of biomass*. Paris: International Energy Agency, 2018. 44 p.

11. Ryabov, G.A. *Nauchnoe obosnovanie ispol'zovaniya tekhnologii szhiganiya tverdykh topliv v tsirkuliruyushchem kipiyashchem sloe*. Diss. ... kand. tekhn. nauk [Scientific substantiation of the use of solid fuel combustion technology in a circulating fluidized bed. Cand. tech. sci. diss.]. Moscow: VTI, 2016.

12. IEA Bioenergy. *Combined Heat and Power from Biomass*. Paris: International Energy Agency, 2018. Available at: <https://www.ieabioenergy.com/publications/combined-heat-and-power-from-biomass/> (accessed 10 August 2025).

13. Pristupa, A.O., Mol, A.P.J. The take off in solid bioenergy. *Energy Policy*, 2015, vol. 83, pp. 24–36. DOI: 10.1016/j.enpol.2015.03.019.

14. **Tekhnologiya tsellyulozno-bumazhnogo i kartonnogo proizvodstva: T. I. Syr'e i proizvodstvo polufabrikatov. Ch. 2. Proizvodstvo polufabrikatov** [Technology of Pulp and Paper and Cardboard Production. Vol. I. Raw Materials and Production of Semifinished Products. Part 2. Production of Semifinished Products]. Saint-Petersburg: Politekhnik, 2003, pp. 513–528.

15. **Kotly KM-75-40: metodicheskoe posobie po energotekhnologicheskomu oborudovaniyu** [KM-75-40 Boilers. Methodological Manual on Energy-Technological Equipment]. Belgorod: Belgorodskiy kotlostroitel'nyy zavod, 1975, p. 12.

16. Puzyrev, E.M., Golubev, V.A., Puzyrev, M.E. Perspektivy primeneniya kotlov s topkami tsirkulyatsionnogo kipiyashchego sloya v kommunal'noy energetike [Prospects for the use of boilers with circulating fluidized bed furnaces in municipal energy supply]. *Novosti teplosnabzheniya*, 2016, no. 10, pp. 31–33.

17. Filippov, A.N., Kiselev, S.Yu. Issledovanie prichin aglomeratsii sloya pri szhigani drevesnykh otkhodov v kotle TETS-3 Arkhangel'skogo TSBK [Study of the causes of bed agglomeration during combustion of wood waste in the boiler of Arkhangel'sk PPM CHP-3]. *Teploenergetika*, 2019, no. 11, pp. 48–54.

18. Obernberger, I., Brunner, T., Bärnthaler, G. Agglomeration in fluidized bed combustion of biomass: Operational experiences and laboratory investigations. *Fuel Processing Technology*, 2006, vol. 87, no. 10, pp. 993–1007.

19. Babcock Power. Efficient – low emission stoker-fired biomass systems. *Babcock Power White Paper*, 2018.