

Научная статья

УДК 662.6/9

DOI: 10.37482/0536-1036-2025-3-155-168

Повышение эффективности использования побочных продуктов фанерного производства

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>

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

Поступила в редакцию 26.05.24 / Одобрена после рецензирования 07.08.24 / Принята к печати 11.08.24

Аннотация. Для применения отходов фанерного производства в целях получения энергии, обеспечивающей работу НАО «СВЕЗА Усть-Ижора», была смонтирована мини-теплоэлектроцентраль с 2 котлами Е-40-2.25-305ОР и турбиной. Предусмотрена 2-ступенчатая золоочистка продуктов сгорания. Первая ступень характеризуется удалением и возвратом крупных фракций на вибрационную решетку. На второй ступени продукты проходят через рукавные фильтры. Энергообследование котлоагрегатов выявило, что комплекс газоочистки является причиной их частых остановок и пусков, дополнительных теплопотерь и сокращения жизненного цикла оборудования. В связи с этим вместо рукавных фильтров установлен комплекс пыле- и золоулавливания (КПЗУ-10×6×2). Однако при этом степень улавливания твердых частиц комплексом составила не более 80 %, наблюдалось налипание золы на рабочее колесо дымососа, что вызывало дисбаланс и уменьшение жизненного цикла дымососа и необходимость остановки котла не реже чем 1 раз в неделю. Целью данной статьи стало установление причин повышенных выбросов твердых частиц и оксида углерода, ограниченного периода работы котлоагрегата между чистками, а также отсутствия возможности оперативного вывоза золы и шлака на полигон. Комплексный анализ работы котлоагрегата проводился на основе эксплуатационных и экологических показателей работы котла, теплотехнических, гранулометрических характеристик проб сжигаемого биотоплива и образующихся очаговых остатков, а также их элементного состава и термогравиметрических характеристик для дробленки фанеры. Модернизация газоочистного комплекса обеспечила функционирование котлоагрегата с номинальной паропроизводительностью и уменьшила количество его остановок между чистками в 7–21 раз. Однако использование котла с более высокой производительностью обусловило рост полидисперсности летучей золы и содержания в ней горючих веществ, что стало одной из причин ее тления в сборном контейнере. Периодические включения вибрационной решетки привели к значительной нестабильности экологических показателей. Исследование загрязняющей способности золы обрезков фанеры обнаружило, что они являются самым сильным загрязняющим компонентом сжигаемой смеси. Изучение термических процессов в дробленке фанеры в воздушной и инертной средах показало заметное влияние наличия клея на основе фенолоформальдегидной смолы.

Ключевые слова: фанерное производство, отходы фанерного производства, газоочистная установка, котел, биотопливо, вредные вещества, коэффициент полезного действия, очаговые остатки



Благодарности: Автор выражает благодарность ЦКП НО «Арктика» за возможность использования при проведении исследования рентгенофлуоресцентного спектрометра XRF-1800, анализатора Euro EA-3000 и синхронного термоанализатора STA 449 F3 Jupiter.

Для цитирования: Любов В.К. Повышение эффективности использования побочных продуктов фанерного производства // Изв. вузов. Лесн. журн. 2025. № 3. С. 155–168. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-3-155-168>

Original article

Improving the Efficiency of Using Plywood Production By-Products

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>

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

Received on May 26, 2024 / Approved after reviewing on August 07, 2024 / Accepted on August 11, 2024

Abstract. To use plywood production waste to generate energy ensuring the operation of the non-public limited liability company “SVEZA Ust-Izhora” a mini-heat-and-power plant with 2 E-40-2.25-305OP boilers and a turbine has been installed. A 2-stage ash clearing of combustion products has been provided. The 1st stage ensures the removal and return of coarse fractions to the vibrating grid. At the 2nd stage, the products pass through bag filters. An energy inspection of the boiler units has revealed that the gas cleaning system is the cause of their frequent shutdowns and starts, additional heat losses and a reduction in the equipment life cycle. In this regard, instead of bag filters, a dust and ash collection complex (KPZU-10×6×2) has been installed. However, the degree of solid particle capture by the complex has been no more than 80 %, ash has been observed sticking to the impeller of the smoke exhauster, which has caused and imbalance and a reduction in the life cycle of the smoke exhauster and the need to stop the boiler at least once a week. The aim of this article has been to establish the reasons for the increased emissions of solid particles and carbon monoxide, the limited period of operation of the boiler unit between cleanings, as well as the lack of the possibility of prompt removal of ash and slag to the landfill. A comprehensive analysis of the boiler unit operation has been carried out on the basis of the operational and environmental performance indicators of the boiler, thermal engineering and granulometric characteristics of samples of the combusted biofuel and the resulting focal residues, as well as their elemental composition and thermogravimetric characteristics for plywood chips. The modernization of the gas cleaning complex has ensured the functioning of the boiler with a nominal steam capacity and has reduced the number of its stops between cleanings by 7–21 times. However, the use of a boiler with a higher capacity has lead to an increase in the polydispersity of fly ash and the content of combustible substances in it, which has become one of the reasons for its smoldering in the collection container. Periodic switching on of the vibrating grid has resulted in significant instability of environmental indicators. A study of the polluting potential of plywood scrap ash has found it to be the most powerful polluting component in the combusted mixture. The study of thermal processes in plywood chips in air and inert environments has shown a noticeable influence of the presence of glue based on phenol-formaldehyde resin.



Keywords: plywood production, plywood production waste, gas cleaning unit, boiler, biofuel, harmful substances, efficiency, combustion residue

Acknowledgements: The author expresses gratitude to the Center for Collective Use of Scientific Equipment “Arktika” for the opportunity to use the XRF-1800 X-ray fluorescence spectrometer, the Euro EA-3000 analyzer and the STA 449 F3 Jupiter synchronous thermal analyzer during the study.

For citation: Lyubov V.K. Improving the Efficiency of Using Plywood Production By-Products. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2025, no. 3, pp. 155–168. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-3-155-168>

Введение

Производство фанеры характеризуется невысоким выходом основной продукции из древесного сырья. Так, объемный выход лиственной фанеры составляет 46–55 % (без включения в баланс коры). Значительная часть перерабатываемого сырья превращается в побочные продукты, которые можно полезно использовать в других отраслях промышленности [1–8, 13–17, 20–23]. Энергетическое применение образующихся побочных продуктов является одним из важнейших направлений снижения себестоимости готовой продукции и повышения эффективности фанерного производства. Кроме этого, оно позволяет устранить образование, а в ряде случаев и ликвидировать, свалки и отвалы, а также сохранить плодородные почвы.

Наиболее распространенным способом энергетического использования отходов фанерного производства является их сжигание с целью получения тепловой и электрической энергии, необходимой в технологическом цикле производства [2, 5–7, 9–11, 15–17, 23–26]. В 2020 г. в НАО «СВЕЗА Усть-Ижора» была построена и запущена мини-теплоэлектроцентраль (ТЭЦ) с 2 котлоагрегатами Е-40-2.25-305ОР (рис. 1) и турбиной. Для очистки продуктов сгорания от взвешенных частиц каждый котел оборудован 2-ступенчатой системой золоочистки [9]. Первой ступенью является мультициклон, обеспечивающий отделение частиц уноса из дымовых газов с их последующим аэродинамическим вводом на вибрационную решетку. Вторая ступень – рукавные фильтры. В ходе эксплуатации мини-ТЭЦ неоднократно наблюдались воспламенения в ступенях системы золоулавливания.

Энергетическое обследование мини-ТЭЦ позволило сделать вывод [9], что установленная система газоочистки является неудачной. Она лимитирует эксплуатацию котла между чистками рукавных фильтров, сокращая ее продолжительность до 8–24 ч ввиду ограничений по тяге. Работа котлов в нестационарных режимах приводит к появлению дополнительных энергопотерь, которые необходимо учитывать при определении коэффициента полезного действия (КПД) и удельных расходов топлива, а также значительно уменьшает жизненный цикл котлов. Данные обстоятельства сделали необходимой модернизацию системы золоочистки.

Цель данной работы – выявление причин повышенных выбросов твердых частиц и оксида углерода, ограниченного периода работы котла между остановками для его чистки, а также отсутствия возможности оперативного вывоза очаговых остатков на полигон.

Объекты и методы исследования

На стационарном котлоагрегате № 1 в 2021 г. была модифицирована система золоулавливания. При этом вместо рукавных фильтров установлен комплекс пыле- и золоулавливания (КПЗУ-10×6×2) производительностью 120 тыс. м³/ч, разработанный ООО «Томскгазоочистка». Данный комплекс представляет собой групповой золоуловитель из параллельно установленных пылеуловителей КПЗУ-10 (12 шт.), с диаметром корпуса 1500 мм, производительностью по газу 10 тыс. м³/ч каждый, объединенных в группу по 6 шт. в 2 яруса и разнесенных по высоте. Номинальное аэродинамическое сопротивление комплекса составляет 2,5 кПа. В состав каждого золоуловителя входят циклон, регулировочный шибер, раскручиватель, пылепровод, пылевой бункер, шлюзовый затвор и вибратор. Комплекс позволяет непрерывно улавливать тонкодисперсные материалы с учетом изменяющейся производительности котлоагрегата. Уловленные частицы с помощью шнековых конвейеров (2 шт.), к каждому из которых подключено по 6 пылевых бункеров, направляются в контейнер сбора пыли, оборудованный реверсивным шнеком для равномерного распределения золы-уноса по сечению контейнера.

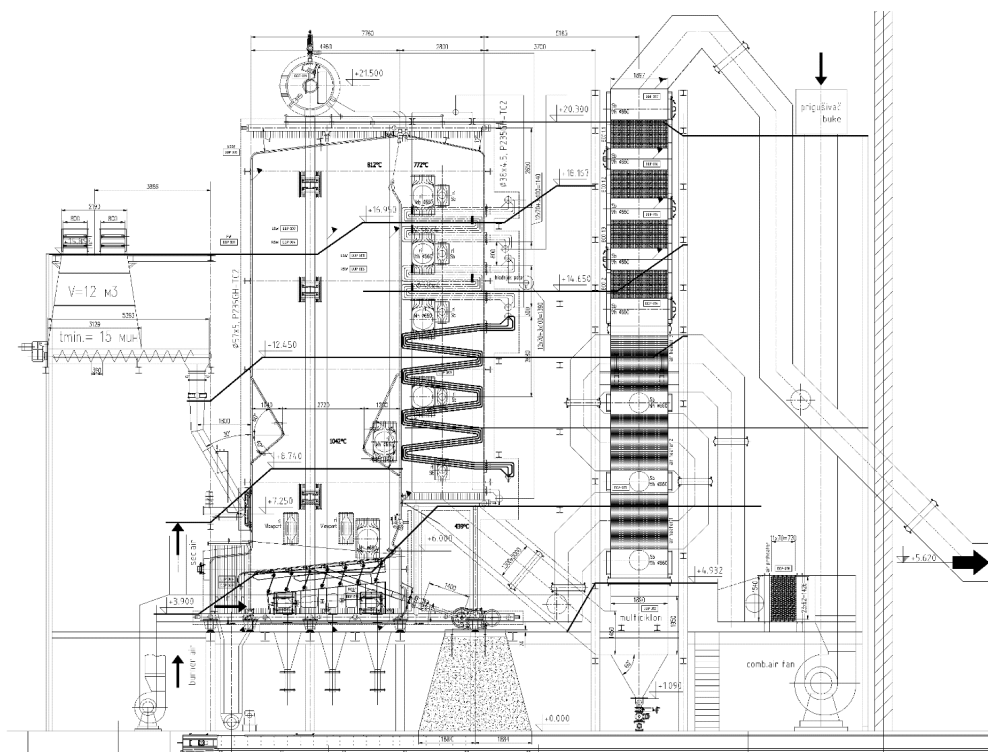


Рис. 1. Принципиальная схема котлоагрегата Е-40-2.25-305ОР

Fig. 1. The schematic diagram of the E-40-2.25-305OP boiler unit

Очищенный в циклоне газ поступает в раскручиватель, после чего собирается в общий газоход и с помощью дымососа направляется в трубу и далее в атмосферу. Для нормальной работы комплекса и обеспечения оптимальных условий сепарации твердых частиц реализована возможность плавного регулирования скорости запыленных газов на входе в циклоны с помощью шиберов.

В техническом задании на проектирование и изготовление комплекса пыле- и золоулавливания была принята концентрация твердых частиц на входе не более 10 г/м^3 . При этом разработчиками проекта взята завышенная эффективность очистки (98,0–99,9 %) для КПЗУ-10×6×2, что позволило бы достичь концентрации твердых частиц лучше целевого значения – 305 мг/м^3 . Учитывая, что инерционные пылеуловители не могут обеспечить такую степень очистки, в эксплуатационных условиях не удалось добиться стабильных концентраций твердых частиц ниже целевого показателя (рис. 2).

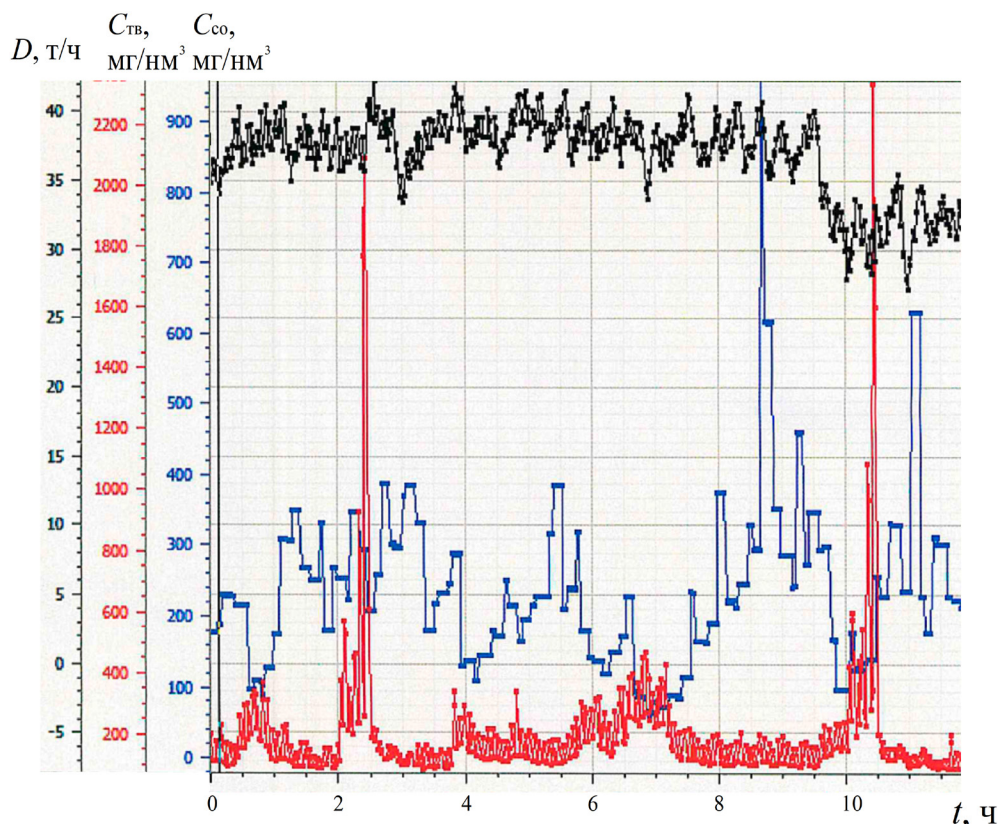


Рис. 2. Изменение паропроизводительности (D) и концентраций твердых частиц ($C_{\text{ТВ}}$) и оксида углерода ($C_{\text{СО}}$) для периода времени (t) работы котла. Черная линия – выход перегретого пара из котла в коллектор; красная и синяя – концентрации твердых частиц и монооксида углерода в дымовых газах соответственно

Fig. 2. The change in steam capacity (D) and concentrations of solid particles ($C_{\text{ТВ}}$) and carbon monoxide ($C_{\text{СО}}$) for the time period (t) of boiler operation. Black line – superheated steam output from the boiler into the collector; red – concentration of solid particles in flue gases; blue – concentration of carbon monoxide in flue gases

Необходимо отметить, что колебания концентрации твердых частиц в диапазоне $100\text{--}600 \text{ мг/м}^3$ вызваны работой вибрационной решетки и пульсациями, которые она создает в газовом тракте котлоагрегата [9].

Включение в работу системы паровой сажеобдувки влечет за собой резкий рост содержания твердых частиц в дымовых газах и, как следствие, увеличение концентрации твердых частиц в уходящих газах до $>2000 \text{ мг/м}^3$.

Исходя из эксплуатационных данных фактическая степень улавливания твердых частиц составляет не более 80 %. При этом наблюдается налипание

зола на рабочее колесо дымососа (со скоростью 2–8 мм в неделю), что вызывает дисбаланс в работе и уменьшение жизненного цикла дымососа. Налипание золовых частиц на лопатки рабочего колеса дымососа обуславливает необходимость остановки котлоагрегата не менее чем 1 раз в неделю, что негативно сказывается на технико-экономических показателях инвестиционного проекта.

Для проведения комплексного анализа работы котлоагрегата после модернизации системы газоочистки использовались эксплуатационные и экологические характеристики работы котла, полученные с помощью системы мониторинга АСУ ТП (автоматизированные системы управления технологическими процессами), а также результаты исследования проб сжигаемого биотоплива и образующихся очаговых остатков. Теплотехнические свойства топливной смеси определялись по ГОСТ Р 54186–2010, ГОСТ Р 54211–2010, ГОСТ Р 54185–2010 и ГОСТ Р 54191–2010, удельная теплота сгорания – с помощью калориметра IKA C 2000 basic Version 2 в соответствии с ISO 1928. Элементный состав биотопливной смеси и образующейся золы – рентгенофлуоресцентного спектрометра EDX-8000 и анализатора Euro EA-3000. Гранулометрический состав биотоплива и очаговых остатков устанавливались на анализаторах AS 400 и AS 200 Control по ГОСТ Р 54188–2010, ГОСТ Р 54189–2010. Использованы также молотковая мельница «Борей» для измельчения обрезков фанеры и аналитический ситовой анализатор Retzsch AS 200 Control для просеивания порошкообразного материала. Процессы, протекающие при нагреве биотоплива в инертной и окислительной средах, исследованы на синхронном термоанализаторе STA 449 F3 Jupiter. Обработка полученных данных проводилась с использованием программно-методического комплекса [10].

Результаты исследования и их обсуждение

Исследование гранулометрических характеристик летучей золы с лопаток рабочего колеса дымососа, выполненное в соответствии с требованиями [19], показало, что она имеет полидисперсный состав (коэффициент полидисперсности, $n = 1,756$; коэффициент, характеризующий крупность состава, $b = 4,452 \cdot 10^{-5}$) (рис. 3). В ней доминируют частицы размером $63 \leq x < 250$ мкм (92,58 %). Можно сделать вывод, что именно частицы указанного размера обладают наиболее высокой адгезионной способностью. Содержание горючих веществ в золе с лопаток рабочего колеса дымососа $C_{г\text{ун}} = 28,14$ %.

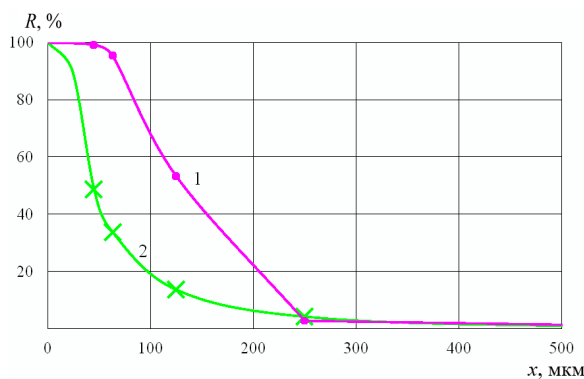


Рис. 3. Интегральные зерновые характеристики золы: 1 – с рабочих лопаток дымососа; 2 – уловленной комплексом КПЗУ-10×6×2

Fig. 3. The integral grain characteristics of ash: 1 – from the working blades of the smoke exhauster; 2 – captured by the KPZU-10×6×2 complex

Исследование летучей золы, уловленной комплексом КПЗУ-10×6×2, показало, что она имеет очень полидисперсный и тонкофракционный ($n = 0,608$; $b = 9,028 \cdot 10^{-2}$) гранулометрический состав (рис. 3). При этом в ней доминируют частицы размером менее 45 мкм (51,22 %).

Изучение распределения горючих веществ по фракциям в летучей золе, удержанной пылеулавливающим комплексом, выявило более высокое содержание горючих веществ для частиц размером менее 45 мкм и более 1000 мкм (рис. 4, а). Однако с учетом массового содержания различных фракций превалирующее влияние на механический недожог следует приписать горючим веществам в частицах менее 45 мкм (рис. 4, б; $C_{\text{ун}}^r F_i$ – произведение пофракционного содержания горючих веществ в летучей золе и фракционного остатка). Горючих веществ в золе из контейнера сбора, уловленных золы и пыли было $C_{\text{ун}}^r = 29,73$ %.

В процессе эксплуатации пыле- и золоулавливающего комплекса обнаружено тление оставшихся горючих веществ в контейнере сбора уловленной золы и пыли, что создает высокий риск пожара и исключает возможность оперативного вывоза содержимого контейнера на полигон размещения отходов. Возможной причиной данного процесса является высокий уровень нагрузок на котлоагрегат (табл. 1), что увеличило скорости продуктов сгорания, уменьшило время пребывания горючих веществ в топке, повысило крупность уноса и суммарную массу уносимых частиц. Все перечисленное привело к росту количества горючих веществ в летучей золе.

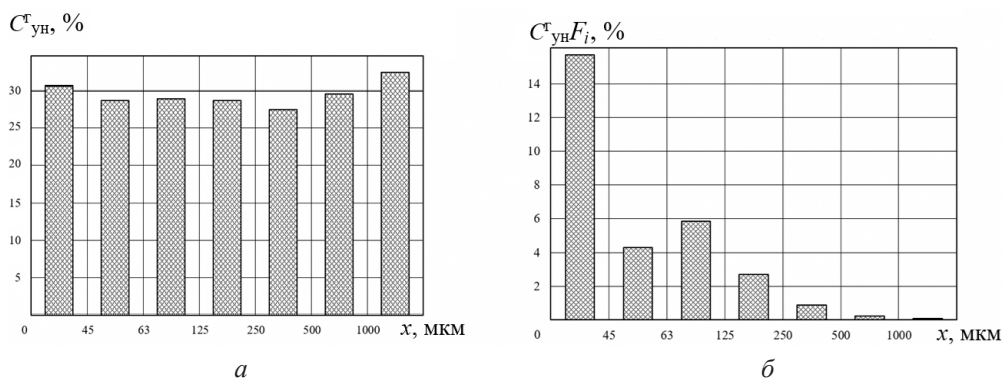


Рис. 4. Содержание горючих веществ в летучей золе, уловленной КПЗУ-10×6×2: а – пофракционное; б – с учетом массовых долей различных фракций

Fig. 4. The content of combustible substances in the fly ash captured by the KPZU-10×6×2: а – fractional; б – taking into account the mass fractions of various fractions

Первоначальными очагами горения являются частицы биотоплива в золе и шлаке, удаляемые с вибрационной решетки, которые, попадая в сборный контейнер, воспламеняются и вызывают последующее тление частиц уноса, находящихся поблизости [9]. Получается, что содержание горючих веществ в золе, отобранной из контейнера сбора, приведенное выше, может быть заниженным ввиду процесса тления.

Гарантированная концентрация оксида углерода в уходящих газах – 500 мг/м³. Существенная нестабильность экологических показателей и разрежения в верхней части топки вызваны работой вибрационной решетки. Ее включение вызывает встряхивание топливных частиц, сопровождающееся значительным увеличением реакционной поверхности биотоплива и объема

выделяющихся горючих веществ. Тягодутьевые установки не успевают «откликнуться» на данную ситуацию, результатом является резкое снижение разрежения в верхней части топки и рост концентраций оксида углерода в продуктах сгорания. В итоге концентрация угарного газа может превышать пороговое значение, даже при паропроизводительности котлоагрегата в 2,5 раза больше минимально допустимой (12 т/ч). Временной период колебаний концентраций вредных ингредиентов соответствует периоду включения вибрационной решетки.

Таблица 1

Основные параметры работы стационарного котлоагрегата № 1 Е-40-2.25-305ОР
The main operating parameters of the station boiler unit no. 1 Е-40-2.25-305ОР

Показатель	Опыт	
	1	2
Паропроизводительность, т/ч	39,90	36,70
Рабочее давление перегретого пара, МПа	2,07	2,15
Температура перегретого пара, °С	307,5	305,8
Температура питательной воды, °С	127,4	128,5
Влажность топлива, %	32,50	32,50
Зольность топлива, %	0,82	0,82
Минимальная теплота сгорания, МДж/кг	11,91	11,91
Температура воздуха после воздухоподогревателя, °С	224,5	225,0
Давление воздуха после воздухоподогревателя, кПа	7,70	7,20
Температура газов до/после 2-й ступени пароперегревателя, °С	699,0/529,0	647,0/508,0
Температура газов после 1-й ступени пароперегревателя, °С	460,0	448,0
Температура газов до/после воздухоподогревателя, °С	311,5/200,5	308,5/198,0
Сопротивление КПЗУ-10×6×2, кПа	1,82	1,46
Коэффициент избытка воздуха перед КПЗУ-10×6×2	1,17	1,37
Потери тепла:		
с уходящими газами, %	6,53	7,36
с химическим недожогом, %	0,12	0,17
с механическим недожогом, %	0,90	0,90
в окружающую среду, %	1,07	1,17
с физической теплотой шлака, %	0,03	0,03
Коэффициент полезного действия котла брутто, %	91,35	90,37
Полный расход топливной смеси, т/ч	9,209	8,526
Эмиссия СО, мг/МДж	184,8	209,8
Эмиссия взвешенных частиц, мг/МДж	70,86	55,95

Для установления загрязняющей способности золы, образующейся при сжигании обрезков фанеры, был исследован элементный состав дробленки фанеры и золы, получающейся при сгорании первой (табл. 2). Показано, что дробленка фанеры является самым сильным загрязняющим компонентом сжигаемой топливной смеси [9]. Так, содержание СаО в ее золе в 5 раз превышает пороговое значение [18], а окислов щелочных металлов $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} = 17,95\%$,

дающих плотные отложения на поверхностях нагрева, – почти в 5,8 раза. Исключение данной составляющей из топливной смеси позволит значительно снизить интенсивность загрязнения поверхностей нагрева котлоагрегата и увеличить временной интервал запуска системы сажеобдувки, что обеспечит ощутимое уменьшение залповых выбросов твердых частиц в атмосферный воздух.

Таблица 2

Основные элементы состава дробленки фанеры и ее золы, %
The main elements of the composition of plywood chips and its ash, %

Элемент	Дробленка	Зола	Элемент	Дробленка	Зола
CaO	0,777	65,000	ZnO	0,003	0,026
Fe ₂ O ₃	0,025	1,020	CuO	0,001	0,043
SO ₃	0,042	0,261	MnO	0,009	0,710
SiO ₂	0,046	4,980	Cr ₂ O ₃	0,002	0,034
P ₂ O ₅	0,021	0,643	Cl	0,077	0,556
NiO	0,001	0,012	Na ₂ O	0,521	15,900
K ₂ O	0,071	2,050	O	44,800	0,939
Al ₂ O ₃	0,015	0,735	N	1,510	0,189
MgO	0,035	2,880	C	46,50	3,36
SrO	0,002	0,134	H	5,550	0,471

Изучение гранулометрического состава дробленки обрезков фанеры показало, что она имеет полидисперсный ($n = 1,655$), крупнодисперсный состав ($b = 3,113 \cdot 10^{-8}$). При этом доминируют частицы размером $x \geq 30$ мкм (49,20 %). Такой состав полностью соответствует требованиям для котлов со слоевым сжиганием топлива.

В Архангельской области дробленка фанеры успешно сжигается в водотрубных котлах при ее добавке к топливной щепе. Данный побочный продукт фанерного производства имеет достаточно высокие энергетические показатели на рабочую массу (влажность – 5,00 %; зольность – 1,49 %; низшая удельная теплота сгорания – 17,71 МДж/кг и выход летучих веществ на горючую массу – 77,00 %).

Промышленно-эксплуатационные испытания котельных установок различного конструктивного исполнения и тепловой мощности показали, что наиболее трудно используемым отходом фанерного производства является дробленка фанеры, ввиду содержания в ней клея на основе фенолоформальдегидных смол. Поэтому при подготовке обрезков фанеры к исследованиям их измельчали в молотковой мельнице и затем просеивали на аналитическом ситовом анализаторе. При проведении опытов на совмещенном термоанализаторе использовали фракцию с размером частиц от 125 до 500 мкм. Термический анализ образцов дробленки фанеры проводили в среде азота с расходом газа 50 мл/мин и в воздушной среде. Пробы нагревали со скоростью 10 °С/мин до 700 °С в среде азота и до 975 °С в воздушной среде. Данные опыты позволили получить термограммы, одна из них приведена на рис. 5. Анализ процессов проводили с использованием кривых изменения массы (ТГ), скорости этого процесса (ДТГ) и тепловых эффектов в образцах (ДТА). Температуры для различных стадий термического разложения фанеры перечислены в табл. 3.

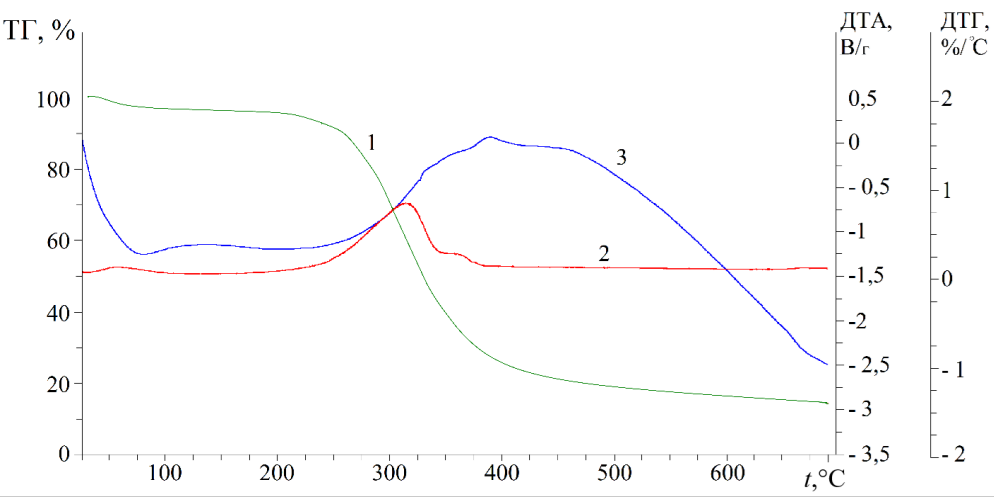


Рис. 5. Термограммы процесса термического разложения в среде азота дробленки фанеры при скорости нагрева 10 °С/мин: 1 – ТГ; 2 – ДТГ; 3 – ДТА

Fig. 5. The thermograms of the thermal decomposition process in a nitrogen environment of plywood chips at a heating rate of 10 °C/min: 1 – TG; 2 – DTG; 3 – DTA

Таблица 3

Результаты термогравиметрического анализа процесса термического разложения дробленки фанеры

The results of thermogravimetric analysis of the process of thermal decomposition of plywood chips

Стадия	Среда	Температурный диапазон, °С
Сушка	Инертная	30–110
Выход летучих веществ		190–270*–500 (315)**
Сушка	Воздушная	30–110
Выход и горение летучих веществ		175–210*–350 (277)***
Горение кокса		370–550 (413)****

*Температура начала интенсивного выхода летучих веществ. **, ***, ****Температура, соответствующая максимальной скорости выхода летучих веществ, их выхода и горения, выгорания коксового остатка соответственно.

Экспериментальные данные позволили сделать следующие выводы:

- сушка дробленки фанеры в инертной и воздушной средах протекает аналогично сушке других видов биотоплива [12];
- температура начала интенсивного выхода летучих веществ близка значениям для древесины березы, ели и сосны;
- температура, соответствующая максимальной скорости выхода летучих веществ в среде азота, для дробленки меньше, чем для других видов биотоплива [12];
- термическое разложение сильно растянуто во времени и продолжается даже по достижении температуры процесса 470 °С, при этом после 370 °С скорость убыли массы значительно уменьшается и с 380 °С зависимость потери массы имеет линейный характер;

терморазложение дробленки фанеры во всем исследованном диапазоне температур характеризуется как эндотермический процесс;

в среде воздуха интенсивный выход летучих веществ при максимальной скорости их выделения начинается значительно раньше при существенно более низких температурах;

наибольшая скорость выгорания коксового остатка для дробленки фанеры достигается при более низких температурах, чем для древесины березы, ели и сосны.

Данные существенные отличия, очевидно, связаны с наличием в исследуемом материале клея на основе фенолоформальдегидной смолы, который применяется в фанерном производстве.

Заключение

Модернизация 2-й ступени газоочистки обеспечила возможность работы котла с более высокой производительностью и увеличила период его эксплуатации между чистками в 7–21 раз – до модернизации он составлял 8–24 ч, а после – 168 ч.

Работа котлоагрегата с более высоким уровнем нагрузок повысила скорости движения продуктов сгорания и уменьшила время пребывания горючих веществ в топочной камере, что обусловило рост полидисперсности летучей золы и содержания в ней горючих веществ. Увеличение уровня горючих веществ в летучей золе стало одной из причин ее тления в сборном контейнере. Данное обстоятельство создает высокий риск пожара и исключает возможность оперативного вывоза содержимого контейнера на полигон размещения отходов.

Слое-факельная технология сжигания побочных продуктов фанерного производства, реализованная с помощью мембранной вибрационной решетки, является источником вибрации элементов основного и вспомогательного оборудования котла, что уменьшает их жизненный цикл и увеличивает энергозатраты.

Водоохлаждаемая вибрационная решетка выступает в качестве источника пульсаций в топочной камере и последующих элементах газового тракта котла. Следствием является нестабильность экологических показателей, уровня разрежения в топочной камере и невозможность достижения гарантированной концентрации монооксида углерода (500 мг/м^3) и золовых частиц (305 мг/м^3).

Данные эксплуатации мини-теплоэлектроцентрали свидетельствуют, что степень улавливания твердых частиц составляет не более 80 %. Наблюдается налипание золы на лопатки рабочего колеса дымососа, вызывающее дисбаланс и повышенную вибрацию. Это уменьшает жизненный цикл подшипников и дымососа в целом, а также обуславливает необходимость остановки котлоагрегата не реже чем 1 раз в неделю. Результаты исследования фракционного состава летучей золы с лопаток дымососа показали, что в ней доминируют частицы размером $63 \leq x < 250 \text{ мкм}$, обладающие наиболее высокой адгезионной способностью.

Анализ загрязняющей способности золы, образующейся при сжигании дробленки фанеры, выявил, что она является самым сильным загрязняющим

компонентом сжигаемой топливной смеси: содержание CaO и окислов $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ в золе значительно превышает предельные значения.

Изучение термических процессов для дробленки фанеры в инертной и воздушной средах в температурном диапазоне 25–975 °С позволило отметить, что наличие в исследуемом материале клея на основе фенолоформальдегидной смолы оказывает здесь существенное влияние.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Бирюков В.Г. Технология клееных материалов и древесных плит. М., 2012. 292 с. Biryukov V.G. *Technology of Glued Materials and Wood Boards*. Moscow, 2012. 292 p. (In Russ.).
2. Бобович Б.Б., Девяткин В.В. Переработка отходов производства и потребления. М.: Интермет Инжиниринг, 2000. 495 с. Bobovich B.B., Devyatkin V.V. *Recycling of Production and Consumption Waste*. Moscow, Intermet Inzhiniring Publ., 2000. 495 p. (In Russ.).
3. Варанкина Г.С., Чубинский А.Н. Основы комплексной переработки сырья. СПб.: СПб ГЛТУ, 2016. 56 с. Varankina G.S., Chubinskij A.N. *Fundamentals of Complex Processing of Raw Materials*. St. Petersburg, St. Petersburg State Forest Technical University, 2016. 56 p. (In Russ.).
4. Волынский В.Н. Технология клееных древесных материалов. Вологда: Инфра-Инженерия, 2022. Т. 1. 340 с. Volynskij V.N. *Technology of Glued Wood Materials*. Vologda, Infra-Inzheneriya Publ., 2022, vol. 1. 340 p. (In Russ.).
5. Головков С.И., Коперин И.Ф., Найденов В.И. Энергетическое использование древесных отходов. М.: Лесн. пром-сть, 1987. 224 с. Golovkov S.I., Koperin I.F., Najdenov V.I. *Energy Use of Wood Waste*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1987. 224 p. (In Russ.).
6. Дубинина Н.Н., Орлов А.А., Корчук Ю.А., Лях Н.И. Энергетическое использование древесных отходов лесопильного производства // Актуальн. проблемы лесн. комплекса. 2016. № 45. С. 17–21. Dubinina N.N., Orlov A.A., Korchuk Yu.A., Lyakh N.I. *Energy Use of Sawmill Waste. Aktual'nye problemy lesnogo kompleksa*, 2016, no. 45, pp. 17–21. (In Russ.).
7. Жучков П.А. Тепловые процессы в целлюлозно-бумажном производстве. М.: Лесн. пром-сть, 1978. 408 с. Zhuchkov P.A. *Thermal Processes in Pulp and Paper Production*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1978. 408 p. (In Russ.).
8. Колесникова А.А., Будаев В.А. Технологические расчеты в производстве фанеры: учебное пособие по курсовому проектированию. Йошкар-Ола: ПГТУ, 2010. 108 с. Kolesnikova A.A., Budaev V.A. *Technological Calculations in Plywood Production: Tutorial on Course Design*. Yoshkar-Ola, Volga State University of Technology Publ., 2010. 108 p. (In Russ.).
9. Любов В.К., Данилов В.Е. Экологическая и энергетическая эффективность сжигания отходов фанерного производства // Экология и промышленность России. 2023. Т. 27, № 5. С. 8–14. Lyubov V.K., Danilov V.E. *Environmental and Energy Efficiency of Plywood Production Waste Burning. Ekologiya i promyshlennost' Rossii = Ecology and Industry of Russia*, 2023, vol. 27, no. 5, pp. 8–14. (In Russ.). <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2023-5-8-14>
10. Любов В.К., Любова С.В. Повышение эффективности энергетического использования биотоплив. Архангельск: САФУ, 2017. 533 с. Lyubov V.K., Lyubova S.V. *Improving the Efficiency of Energy Use of Biofuels*. Arkhangelsk, Northern (Arctic) Federal University Publ., 2017. 533 p. (In Russ.).

11. Любов В.К., Попов А.Н., Ивуть А.Е., Кондаков С.О., Седлецкий Н.И. Повышение эффективности энергетического использования отходов фанерного производства // Вестник ЧГУ. Сер.: Техн. науки. 2016. № 4. С. 28–32.

Lyubov V.K., Popov A.N., Ivut' A.E., Kondakov S.O., Sedletskij N.I. Improving the Efficiency of Energy Use of Plywood Production Waste. *Vestnik Cherepovetskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnicheskie nauki* = Cherepovets State University Bulletin. Series: Technology, 2016, no. 4, pp. 28–32. (In Russ.).

12. Любов В.К., Цыпнятов И.И. Повышение эффективности энергетического использования биотоплива // Изв. вузов. Лесн. журн. 2023. № 1. С. 172–185.

Lyubov V.K., Tsypnyatov 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>

13. Мохирев А.П., Безруких Ю.А., Медведев С.О. Переработка древесных отходов предприятий лесопромышленного комплекса как фактор устойчивого природопользования // Инженер. вестн. Дона. 2015. № 2, ч. 2. Режим доступа: <http://ivdon.ru/magazine/archive/n2p2y2015/3011> (дата обращения: 21.04.25).

Mokhirev A.P., Bezrukikh J.A., Medvedev S.O. Recycling of Wood Wastes of Timber Industry, as a Factor of Sustainable Resource Management. *Inzhenernyj vestnik Dona* = Engineering Journal of Don, 2015, no. 2, part 2. (In Russ.).

14. Преснякова Е.А. Утилизация отходов древесного производства // Вестн. магистратуры. 2014. Т. 1, № 11(38). С. 15–18.

Presnyakova E.A. Disposal of Wood Production Waste. *Vestnik magistratury*, 2014, vol. 1, no. 11(38), pp. 15–18. (In Russ.).

15. Разинков Е.М., Ищенко Т.Л. Повышение эффективности фанерного производства // Лесотехн. журн. 2019. Т. 9, № 1(33). С. 140–146.

Razinkov E.M., Ishchenko T.L. Enhancing the Efficiency of Plywood Production. *Lesotekhnicheskij zhurnal* = Forestry Engineering Journal, 2019, vol. 9, no. 1(33), pp. 140–146. (In Russ.). https://doi.org/10.12737/article_5c9201701e8f75.87209710

16. 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.A., Besedovskaya D.S. *Low-Carbon Development Strategy for Russia: Opportunities and Benefits of Replacing Fossil Fuels with “Green” Energy Sources*. Moscow, TEIS Publ., 2016. 48 p. (In Russ.).

17. Семенов Ю.П., Хиллинг Б., Парикка М., Штерн Т., Сейсенбаева Г. Лесная биоэнергетика. М.: МГУЛ, 2008. 348 с.

Semenov Yu.P., Hilling B., Parikka M., Shtern T., Sejsenbaeva G. *Forest Bioenergetics*. Moscow, Moscow State Forest University Publ., 2008. 348 p. (In Russ.).

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

Thermal Calculation of Boilers (Standard Method). St. Petersburg, OAO Unified Energy System of Russia, All-Russian Thermal Engineering Institute, I.I. Polzunov Scientific and Development Association on Research and Design of Power Equipment, 1998. 257 p. (In Russ.).

19. Трёмбовля В.И., Фингер Е.Д., Авдеева А.А. Теплотехнические испытания котельных установок. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Энергоатомиздат, 1991. 416 с.

Trembovlya V.I., Finger E.D., Avdeeva A.A. *Thermal Engineering Tests of Boiler Installations*. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1991. 416 p. (In Russ.).

20. Федотов А.А. Технология и оборудование производства пиломатериалов, фанеры, строганого шпона и древесно-стружечных плит. Вологда: Инфра-Инженерия, 2022, 140 с.

Fedotov A.A. *Technology and Equipment for the Production of Sawn Timber, Plywood, Planed Veneer and Chipboard*. Vologda, Infra-Inzheneriya Publ., 2022. 140 p. (In Russ.).

21. Юрьев Ю.Л. Древесный уголь. Екатеринбург: Сократ, 2007. 184 с.

Yur'ev Yu.L. *Charcoal*. Ekaterinburg, Sokrat Publ., 2007. 184 p. (In Russ.).

22. García R., Pizarro C., Álvarez A., Lavín A.G., Bueno J.L. Study of Biomass Combustion Wastes. *Fuel*, 2015, vol. 148, pp. 152–159. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2015.01.079>

23. Moura P., Henriques J., Alexandre J., Oliveira A.C., Abreu M., Gírio F., Catarino J. Sustainable Value Methodology to Compare the Performance of Conversion Technologies for the Production of Electricity and Heat, Energy Vectors and Biofuels from Waste Biomass. *Cleaner Waste Systems*, 2022, vol. 3, art. no. 100029.

<https://doi.org/10.1016/j.clwas.2022.100029>

24. 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, pp. 433–440.

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

25. Priya, Deora P.S., Verma Y., Muhal R.A., Goswami C., Singh T. Biofuels: An Alternative to Conventional Fuel and Energy Source. *Materials Today: Proceedings*, 2022, vol. 48, part 5, pp. 1178–1184. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.08.227>

26. Wang L., Weller C.L., Jones D.D., Hanna M.A. Contemporary Issues in Thermal Gasification of Biomass and its Application to Electricity and Fuel Production. *Biomass Bioenergy*, vol. 32, iss. 7, pp. 573–581. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2007.12.007>

Конфликт интересов: Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов

Conflict of interest: The author declares that there is no conflict of interest