

ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ РАБОТЫ КИПЯЩЕГО СЛОЯ ПРИ СЖИГАНИИ ОСАДКА СТОЧНЫХ ВОД И КОРОДРЕВЕСНОГО ТОПЛИВА

Терехин А.П., Марьяндышев П.А.

Северный (Арктический) Федеральный Университет им. М.В. Ломоносова,
г. Архангельск, Россия
Terehin.a@edu.narfu.ru

Резюме: **АКТУАЛЬНОСТЬ:** Актуальность исследования заключается в разработке технических мероприятий для увеличения надежности (длительности) работы материала кипящего слоя при сжигании осадка сточных вод и кородревесного топлива. **ЦЕЛЬ:** рассмотреть основную проблему (агломерацию кипящего слоя), влияющую на надежность и длительность работы котлоагрегата с кипящим слоем Е-75-3,9-440 ДФТ. Провести испытания режимных мероприятий, направленных на увеличение надежности и длительности работы котлоагрегата с кипящим слоем Е-75-3,9-440 ДФТ. **МЕТОДЫ:** Пробы донной золы и агломератов отбирались на протяжении всего периода эксплуатации кипящего слоя. Отбор проб кородревесного топлива и осадка сточных вод производился с тракта топливоподачи котельного агрегата Е-75-3,9-440 ДФТ. При подготовке проб использовались шаровая барабанная мельница РМ 200 фирмы Retzsch и ситовый анализатор Retzsch AS 200 Control. Элементный анализ кородревесного топлива, осадка сточных вод и донной золы проведен методом рентгенофлуоресцентной спектроскопии на спектрометре EDX-8000. Испытания режимных мероприятий проводились на протяжении всего срока эксплуатации материала слоя до его полной замены. **РЕЗУЛЬТАТЫ:** Результаты исследований показали, что в процессе сжигания в материале кипящего слоя накапливаются щелочные соединения интенсифицирующие процессы агломерации. Режимные мероприятия такие как увеличение скорости ожигания слоя и снижение температуры слоя увеличивают срок службы материала слоя, однако не позволяют полностью исключить процесс агломерации.

Ключевые слова: Кипящий слой; агломерация; материал слоя; донная зола; первичный воздух; температура слоя; калий.

Благодарности: Исследование, приведшее к этим результатам, финансировалось за счет средств Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, проект № FSRU-2024-0007. Авторы выражают признательность АО "Архангельский ЦБК" за помощь в исследовании проблемы агломерации слоя парового котла Е-75-3,9-440 ДФТ.

Для цитирования: Терехин А.П., Марьяндышев П.А. Повышение надежности работы кипящего слоя при сжигании осадка сточных вод и кородревесного топлива // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2026. Т. 28. № 4. С. 139-148. doi: 10.30724/1998-9903-2026-28-4-139-148.

INCREASING THE RELIABILITY OF FLUIDIZED BED OPERATION DURING THE COMBUSTION OF SEWAGE SLUDGE AND BARK WOOD FUEL

Terekhin A.P., Maryandyshev P.A.

Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Arkhangelsk, Russia
Terehin.a@edu.narfu.ru

Abstract: **THE PURPOSE:** The relevance of the research lies in the development of technical measures to increase the reliability (duration) of the fluidized bed material during the combustion of sewage sludge and crusty wood fuel. **PURPOSE:** To consider the main problem (fluidized bed agglomeration) affecting the reliability and duration of operation of a fluidized bed boiler. E -75-3,9-440 DFT. To test routine measures aimed at increasing the reliability and duration of operation of the fluidized bed boiler E-75-3,9-440 DFT. **METHODS:** Samples of bottom ash and

agglomerates were taken throughout the entire period of operation of the fluidized bed. The sampling of crusty wood fuel and sewage sludge was carried out from the fuel supply path of the boiler unit E-75-3,9-440 DFT. A Retzsch RM 200 ball drum mill and a Retzsch AS 200 Control sieve analyzer were used in sample preparation. The elemental analysis of crusty wood fuel, sewage sludge and bottom ash was carried out using X-ray fluorescence spectroscopy on an EDX-8000 spectrometer. Tests of routine measures were carried out throughout the entire service life of the bed material until it was completely replaced. results: The research results have shown that during combustion, alkaline compounds accumulate in the fluidized bed material, intensifying agglomeration processes. Routine measures such as increasing the rate of liquefaction of the layer and lowering the temperature of the bed increase the service life of the layer material, but do not exclude the agglomeration process.

Keywords: Fluidized bed; agglomeration; bed material; bottom ash; primary air; bed temperature; potassium.

Acknowledgments: The Ministry of Science funded Research that led to these results and Higher Education of the Russian Federation, project № FSRU-2024-0007. The authors express their gratitude to Arkhangelsk Pulp and Paper Mill JSC for their help in researching the bed agglomeration problem of the steam boiler E-75-3,9-440 DFT.

For citation: Terekhin A.P., Maryandyshev P.A. Increasing the reliability of fluidized bed operation during the combustion of sewage sludge and bark wood fuel. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2026; 28 (4): 139-148. doi: 10.30724/1998-9903-2026-28-4-139-148.

Введение и литературный обзор (Introduction)

Растущая энергозависимость от ископаемого топлива, особенно нефти, угля и газа, ведет к снижению энергетической безопасности и снижению экологической устойчивости. Невозобновляемые углеводородные ресурсы способствуют выбросам парниковых газов, что приводит к изменению климата и загрязнению воздуха. Переход к устойчивым возобновляемым источникам энергии, способным удовлетворить потребности в энергии это один из способов снизить зависимость от традиционных видов топлив. Интерес к энергетическому использованию биотоплив для производства тепла и электроэнергии также растет по мере ужесточения норм выбросов вредных веществ. Биомасса считается нейтральной по отношению к выбросам диоксида углерода, поскольку CO₂, выделяющийся при сжигании поглощается растущими растениями [1-5]. Острая потребность в биомассе как альтернативном источнике низкоуглеродной энергии привела к большому вниманию к технологиям преобразования низкокалорийного топлива в энергию. Среди таких технологий сжигание в псевдооживленном (кипящем) слое особенно перспективна из-за ее относительно низких капитальных затрат [6, 7].

Кипящий слой (КС) - эффективная технология сжигания топлива, которая характеризуется низким уровнем выбросов загрязняющих веществ и широкими возможностями регулирования нагрузки. Благодаря этим преимуществам КС все чаще используется для получения энергии из биомассы и отходов. Также данная технология благодаря большому количеству инертного материала обеспечивает высокую топливную гибкость. Котлоагрегаты с КС имеют различные типы, обычно включающие стационарный слой (FB), пузырьковый слой (BFB), турбулентный слой (TFB) и циркулирующий слой (CFB). Однако, несмотря на значительные преимущества кипящего слоя, из-за сложного взаимодействия частиц топливной золы и частиц слоя происходит спекание и агломерация частиц, что является одной из главных проблем снижающей надежность работы котлов с кипящим слоем [8-10]. Основной причиной агломерации в псевдооживленном слое является образование легкоплавких эвтектик в межфазных границах. Продолжающиеся процессы агломерации в конечном итоге приводят к прекращению псевдооживления и, как следствие, к вынужденной остановке котла, за которой следует трудоемкий процесс расшлаковки и повторный запуск. Для повышения надежности работы котлов с кипящим слоем очень важно предотвращать процесс агломерации на ранней стадии. Это сократит время простоя энергооборудования, а также избавит от необходимости проводить длительную расшлаковку и чистку [11-14]. Механизм образования агломератов в кипящем слое делится на два типа: агломерацию, вызванную расплавом, когда щелочные элементы (калий и натрий) при высокой температуре образуют эвтектический расплав с кварцевым песком – наполнителем слоя, и агломерация, вызванная нанесением покрытия, которая происходит в результате взаимодействия щелочных металлов, содержащихся в топливной золе, с

материалом слоя, что приводит к образованию липкого слоя на поверхности частицы кварцевого песка, липкий слой служит связующим элементом между частицами слоя [3, 15, 16].

Процесс агломерации кипящего слоя изучался как отечественными учеными [17, 18], так и зарубежными специалистами [6-13, 15, 16, 19, 20]. В [20] авторы изучали агломерацию частиц в слое при газификации в псевдоожиженном слое травяных гранул и древесных гранул и обнаружили, что критическое количество накопленной золы варьировалось от 3 до 10% при сжигании травяных гранул и от 0,8 до 1,5% по весу для древесных гранул. В [21] авторы изучали процесс агломерации при сжигании рисовой и древесной биомассы и обнаружили, что агломерация наиболее вероятна в местах накопления в слое калия. В [18] Рябов и соавторы обнаружили, что при повышении концентрации калия и натрия в слое более 1% резко возрастает вероятность спекания частиц топливной золы с материалом слоя. Гао и соавторы [16] изучали влияние температуры и расхода оживающего газа на скорость агломерации и обнаружили, что низкая скорость оживающего и высокая температура приводят к ускорению агломерации.

Целью данной работы является увеличение надежности работы кипящего слоя при помощи режимных мероприятий, позволяющих снизить скорость процесса агломерации в слое. Для этого проведены энергообследования котельного агрегата Е-75-3,9-440 ДФТ, а также проведены рентгенофлуоресцентные и микроскопические исследования донной золы, рассмотрен элементный состав минеральной части кородревесного топлива и осадка сточных вод. На основе данных исследований разработаны рекомендации по повышению надежности (длительности) работы котельного агрегата Е-75-3,9-440 ДФТ, сжигающего смесь из осадка сточных вод и кородревесного топлива.

Материалы и методы (Materials and methods)

Изучалась работа кипящего слоя парового котла с пузырьковым кипящим слоем Е-75-3,9-440 ДФТ установленного на энерготехнологической ТЭС-3 АО Архангельского ЦБК. Котел стационарный, водотрубный, с естественной циркуляцией, с уравновешенной тягой, газоплотный, трехходовой по дымовым газам. В нижней части котла расположена воздухораспределительная решетка "НУВEX", слоя инертного материала (кварцевый песок) в количестве 60 тонн (масса активного песка составляет ~30 тонн) и обмуровки. Решётка кипящего слоя состоит из водоохлаждаемых труб диаметром 60,3х7,1 мм, сваренных в форме балки с шагом 304,8 мм, а также из стальных листов толщиной 6 мм, соединяющих их. Первичный воздух вводится в конец воздушных балок со стороны заднего экрана и через дутьевые сопла, установленные на балках, в топку. Пассивный кварцевый песок, располагающийся ниже сопел первичного воздуха, защищает балки от эрозии. Топливом для котельного агрегата является смесь из лиственного или хвойного кородревесного топлива с осадком сточных вод доля которого в топливной смеси составляет 25% по массе. Для предотвращения агломерации кипящего слоя при сжигании кородревесного топлива и осадка сточных вод предусмотрен ежедневный слив донной золы и засыпка свежего кварцевого песка. Средний расход дренаруемого материала слоя составляет 1 т/день, а добавки свежего кварцевого песка 0,5 т/день. Средний срок между заменами материала слоя составляет 2,5 месяца.

Энергетические обследования проводились при помощи стационарных эксплуатационных измерительных приборов. Снимались основные характеристики влияющие на процесс агломерации кипящего слоя – расход первичного воздуха и температура материала кипящего слоя в различных зонах котельного агрегата.

Образцы донной золы и агломераты были отобраны в процессе слива отработанного материала слоя с дренажных труб, находящихся под котлом. Отбор проб осадка сточных вод и кородревесного топлива производился с тракта топливоподачи. Отбор донной золы для рентгенофлуоресцентного анализа производился два раза в месяц с пуска котельного агрегата после замены активной части кипящего слоя до следующего останова котла для обновления слоя. Визуальный осмотр донной золы проводился каждую неделю. Отбор и обработка проб выполнены согласно ГОСТ 33563-2015, ГОСТ Р 54187-2010, ГОСТ 33255-2015, ГОСТ 33104-2014. Элементный анализ донной золы и минеральной части кородревесного топлива и осадка сточных вод проведен методом рентгенофлуоресцентной спектроскопии (спектрометр EDX-8000). Микроскопические исследования агломерированных частиц проведены при помощи сканирующего электронного микроскопа TESCAN VEGA.

Теплотехнические характеристики сжигаемого в котлоагрегате топлива Е-75-3,9-440 ДФТ представлены в [14]. Сжигаемое топливо обладает крайне высокой влажностью, низкой теплотворной способностью и высоким выходом летучих веществ. Зольность осадка сточных вод составляет примерно 18%.

Результаты рентгенофлуоресцентного анализа минеральной части кородревесного топлива и осадка сточных вод представлены в таблице 1.

Как показано в таблице 1 осадок сточных вод содержит высокое количество соединений кальция, кремния, алюминия, железа и натрия. Кордревесное топливо обладает повышенным содержанием щелочных элементов и кальция. Содержание щелочных элементов в листовном КДТ выше, чем в хвойном. Минеральная часть осадка содержит значительно меньше соединений калия и натрия, чем КДТ.

Таблица 1

Table 1

Рентгенофлуоресцентный анализ (в оксидной форме) минеральной части кордревесного топлива и осадка сточных вод, %

X-ray fluorescence analysis (in oxide form) of the mineral component of wood-based fuel and wastewater sludge, %

Элемент	Осадок сточных вод	Кордревесное топливо листовное	Кордревесное топливо хвойное
Fe ₂ O ₃	8,400	3,466	4,342
K ₂ O	2,789	20,732	14,358
CaO	34,887	33,649	37,655
CuO	0,057	0,131	0,158
SiO ₂	16,227	5,036	5,642
Al ₂ O ₃	22,034	4,938	7,417
Cr ₂ O ₃	0,069	0,098	0,095
MnO	1,182	1,635	2,060
NiO	0,034	0,033	0,032
ZnO	0,448	0,458	0,444
Na ₂ O	8,045	21,321	19,081
MgO	2,926	4,840	5,261
SrO	0,147	0,033	0,032
TiO ₂	0,321	0,229	0,254
Cl	2,272	3,270	3,169
V ₂ O ₅	0,161	0,130	0,128

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Результаты (Results)

На рисунках 1 и 2 представлены данные о средних температурах кипящего слоя в течение трех месяцев эксплуатации котельного агрегата. Как видно из графиков, температура слоя в начале эксплуатационного периода имеет низкие температурные разверки, что свидетельствует о стабильной работе и хорошем перемешивании кипящего слоя. Через некоторое время можно отчетливо увидеть, что разница температур по слою растет. На протяжении всего периода эксплуатации температура в передней части кипящего слоя была выше, чем в задней части.

Средний расход первичного воздуха на ожигание кипящего выдерживался постоянным в пределах 16-16,5 м/с. Падение средней температуры 21 января на графиках связано с остановом котла в горячий резерв при отключении всех потребителей технологического пара.

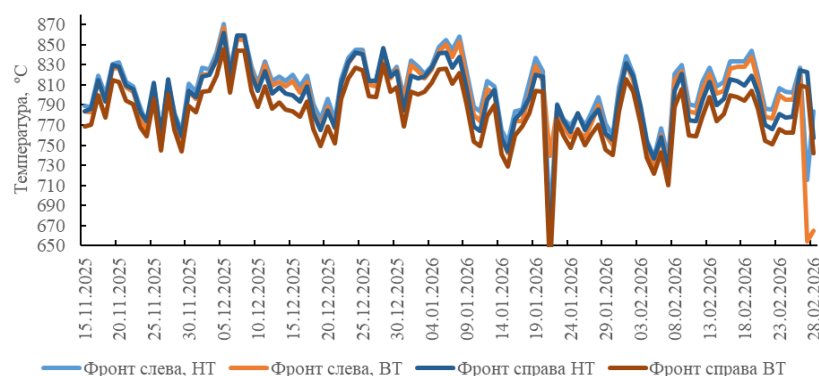


Рис. 1. Температура кипящего слоя в передней части котла BT – верхняя термопара (500 мм); HT – нижняя термопара (300 мм)

Fig. 1. The temperature of the fluidized bed in the front of the boiler BT – upper thermocouple (500 mm); HT – lower thermocouple (300 mm)

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

На рисунке 2 представлены данные о температуре кипящего слоя в задней части котельного агрегата Е-75-3,9-440 ДФТ.

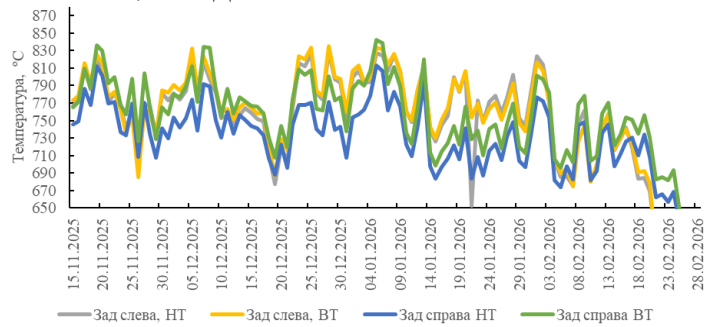


Рис. 2. Температура кипящего слоя в задней части котла ВТ – верхняя термопара (500 мм); НТ – нижняя термопара (300 мм)

Fig. 2. The temperature of the fluidized bed in the back of the boiler ВТ – upper thermocouple (500 mm); НТ – lower thermocouple (300 mm)

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

В таблице 2 представлены данные о концентрации щелочных элементов в кипящем слое во время его эксплуатации.

Таблица 2

Среднее содержание калия в материале слоя котельного агрегата, %						
Элемент	4 нед.	6 нед.	8 нед.	10 нед.	12 нед.	14 нед.
K ₂ O	2,58	3,54	6,29	6,05	7,19	7,75

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Как видно из таблицы 2 в процессе работы котельного агрегата в материале слоя накапливается оксид калия, взаимодействие которого с кварцем приводит образованию легкоплавких эвтектик [17, 18].

На рисунке 3 представлены некоторые агломераты отобранные на 11 неделе эксплуатации котельного агрегата.



Рис. 3. Агломераты, отобранные на 11 неделе эксплуатации кипящего слоя

Fig. 3. Agglomerates selected during the 11th week of fluidized bed operation

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

На рисунке 4 представлены некоторые агломераты отобранные на 11 неделе эксплуатации котельного агрегата.



Рис. 4. Агломераты, отобранные после останова котельного агрегата

Fig. 4. Agglomerates selected after shut-down of the boiler unit

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

На рисунках 5 и 6 представлены СЭМ изображения агломерированных частиц слоя и топливной золы.

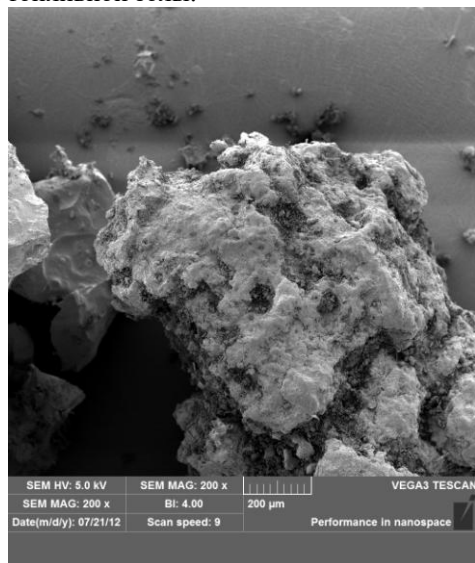


Рис. 5. СЭМ изображение агломерированных частиц слоя в конце эксплуатационного цикла котла

Fig. 5. SEM image of the agglomerated particles of the layer at the end of the operational cycle of the boiler

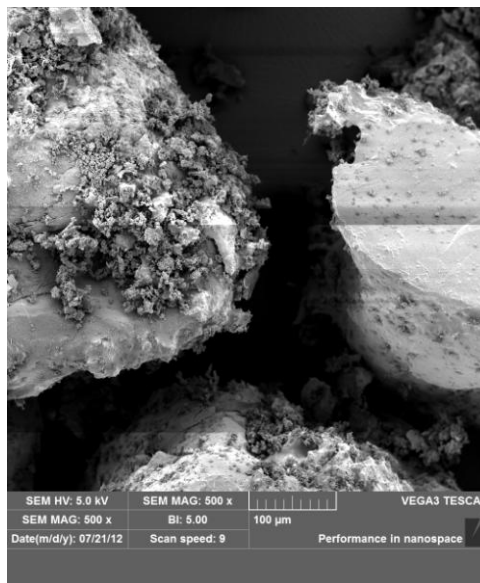


Рис. 6. СЭМ изображение агломерированных частиц слоя в конце эксплуатационного цикла котла

Fig. 6. SEM image of agglomerated fuel ash particles at the end of the boiler's operational cycle.

**Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.*

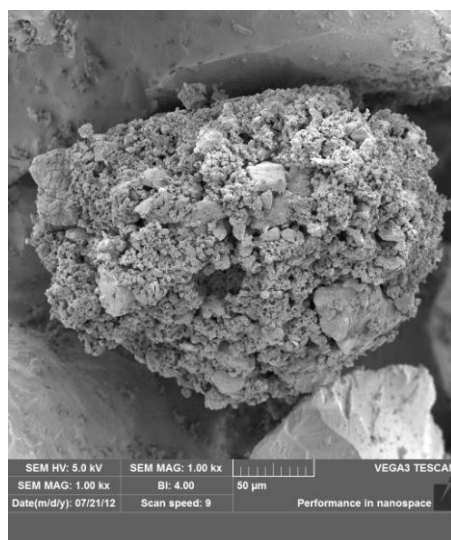


Рис. 7. СЭМ изображение агломерированных частиц слоя в конце эксплуатационного цикла котла

Fig. 7. SEM image of the agglomerated particles of the bed at the end of the operational cycle of the boiler

**Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.*

Отчетливо видно, что на СЭМ изображениях агломерированных частиц материала слоя и топливной золы показана агломерация, вызванная покрытием.

Обсуждение (Discussions)

Агломерирование частиц топливной золы с частицами слоя происходит из-за образования легкоплавких эвтектик при температурах свыше 764 °С. Так как режимная карта котельного агрегата Е-75-3,9-440 ДФТ позволяет работать со средней температурой слоя 750 °С были проведены опытно-промышленные испытания работы кипящего слоя при сниженной температуре. При этом для исключения работы котла со сниженным КПД температуру слоя удалось регулировать не снижением количества кислорода в первичном воздухе (за счет добавки газов рециркуляции), а путем снижения высоты кипящего слоя на 100 мм.

Снижение высоты слоя приводит к снижению общей теплоемкости слоя, что снижает его инерционность при колебаниях нагрузки, однако эффективно снижает температуру материала слоя путем увеличения доли топлива в слое. Согласно [20] снижение высоты слоя также должно снижать скорость агломерации.

Как видно по графикам (рис. 1 и 2) температура в передней и задней части кипящего слоя в начале эксплуатационного цикла отличалась незначительно.

По таблице 2 видно, что в процессе эксплуатации в материале слоя растет содержание оксида калия. Уже через 4 недели эксплуатации кипящего слоя концентрация калия превысила 2%. Рост содержания калия в слое продолжался на протяжении всей эксплуатации, что говорит о необходимости увеличения расходов дренируемого и свежего кварцевого песка. По мере роста концентрации калия в материале слоя и укрупнении частиц слоя росла разница температур и после месяца эксплуатации температуры в задней части котла снизились на 70 °С. С 5 недели эксплуатации с задней части котельного агрегата дренировались небольшие агломераты (размером до 30 мм), с 7 недели с передней части (размером до 20 мм).

С 11 недели работы кипящего слоя с кипящего слоя уже дренировались крупные агломераты шириной до 200 мм (рис. 3). На 15 недели эксплуатации произошла дефлюидизация задней части кипящего слоя, что можно отчетливо увидеть по снижению температуры на рисунке 1.

В процессе осмотра кипящего слоя во время его замены было обнаружено множество крупных агломератов в задней части слоя. Большая часть агломератов была образована агломерацией, вызванной покрытием. Однако в слое также были обнаружены образцы агломерации, вызванной расплавом (рис. 4).

На рисунке 5 представлено СЭМ изображение агломерата, отобранного в процессе работы котла. Видно, что агломерированная частица песка состоит из нескольких частей, которые связывает между собой топливная зола.

При увеличении разрешения (рис. 6) можно отчетливо увидеть, что частица кварцевого песка имеет небольшие углубления, в которые попадает и застревает топливная зола. Это можно назвать первой стадией агломерации – укрупнение частиц кварцевого песка. Налипание золы в неровностях кварцевого песка влияет на ее форму, делая её более округлой, что ухудшает кипение слоя [21], снижая минимальную скорость ожигения.

Рисунок 7 показывает агломерированные частицы слоя в конце эксплуатации котла (максимальное содержание калия). Видно, что небольшие частицы песка связаны между собой мостиком из золы. Это связано с двумя явлениями. Первое - ухудшение минимальной скорости псевдоожигения приводит к тому, что частицы золы ударяясь друг о друга с небольшой скоростью прилипают друг к другу. Второе – ухудшение ожигения слоя приводит к тому, что частицы кварцевого песка практически не ударяют топливо, горение которого будет проходить по законам слоевого сжигания.

Налипшая на кварцевый песок зола состоит преимущественно из калия [19]. Данный слой при столкновении частиц в процессе интенсивного кипения приводит к слипанию песчинок и их постепенному увеличению, что можно назвать второй стадией агломерации. В процессе эксплуатации при увеличении содержания калия в слое увеличивается количество частиц, налипающих на песок, что со временем резко ускоряет их укрупнение вплоть до размера, когда агломерированные частицы не будут ожигаться.

Выводы (Conclusion)

Исследован процесс агломерации кипящего слоя котельного агрегата Е-75-3,9-440 ДФТ. Для увеличения надежности и длительности работы кипящего слоя предложено увеличить расход первичного воздуха и снизить рабочую температуру кипящего слоя. Проведенное испытание показало, что данное мероприятие является эффективным способом снижения агломерации кипящего слоя так как замена слоя была произведена на 4 неделе позже. Однако данный способ имеет несколько проблем в реализации: снижается инерционность котельного агрегата из-за меньшего количества материала слоя и необходимости поддерживать большой расход первичного воздуха, снижается КПД из-за увеличения нагрузки вентилятора первичного воздуха, процесс агломерации резко ускоряется при накоплении калия в слое вплоть до его дефлюидизации. Агломераты, вызванные расплавом, свидетельствуют о том, что даже при высоких скоростях ожигения возможны локальные перегревы кипящего слоя.

Литература

1. Демин А.В., Демина Г.В. Влияние состава генераторного газа на выбросы

загрязняющих веществ. Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2026;28(1):131-140. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2026-28-1-131-140>.

2. Зверева Э.Р., Мингалеева Г.Р., Валиуллин Б.Р., Зверев Л.О., Липатов М.С. Исследование реологических свойств композиционных суспензионных топлив. Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2023;25(1):143-153. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2023-25-1-143-153>.

3. Terekhin, A. P., Maryandyshev, P. A., & Brillard, A. (2026). Operation factors influencing bed agglomeration in an industrial fluidized bed boiler. *Fuel*, 425, 139421. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.fuel.2026.139421>.

4. Sofán-Germán, S. J., Doria-Oviedo, M. E., & Rhenals-Julio, J. D. (2025). Mechanical and energy assessment of hybrid biofuels: Integrating agro-industrial coconut and rice husk biomass with mineral coal for sustainable energy in Córdoba, Colombia. *South African Journal of Chemical Engineering*, 52, 303–310. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.sajce.2025.03.010>.

5. Dalbanjan, N. P., Korgaonkar, K., Kadapure, A. J., Halladamani, S. B., Ramangouda, G., & Kumar S. K, P. (2025). Green energy from waste: Evaluating the sustainability of anaerobic biofuel technologies. *The Microbe*, 7, 100410. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.microb.2025.100410>.

6. Sapariya, D. D., Patdiwala, U., Makwana, J., Dhass, A. D., Makwana, J., Patel, D., Parikh, R., Abidi, M. H., Saeed, K., & Alkhalefah, H. (2026). Waste to energy: performance evaluation of a bubbling fluidized bed gasifier using biomass blends and facemask. *Thermal Science and Engineering Progress*, 69, 104470. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.tsep.2025.104470>.

7. Nicolucci, E., Palone, O., Wu, S., Xiao, R., Markides, C. N., & Borello, D. (2026). From waste to wealth: Can fluidized-bed gasification transform industrial practices? *Applied Thermal Engineering*, 286, 129246. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2025.129246>.

8. Shabanian, J., Sauriol, P., & Chaouki, J. (2017). A simple and robust approach for early detection of defluidization. *Chemical Engineering Journal*, 313, 144–156. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cej.2016.12.002>.

9. Nascimento, F. R. M., González, A. M., Silva Lora, E. E., Ratner, A., Escobar Palacio, J. C., & Reinaldo, R. (2021). Bench-scale bubbling fluidized bed systems around the world - Bed agglomeration and collapse: A comprehensive review. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(36), 18740–18766. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.03.036>.

10. Sevonius, C., Yrjas, P., Lindberg, D., & Hupa, L. (2020). Agglomeration tendency of a fluidized bed during addition of different phosphate compounds. *Fuel*, 268, 117300. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.117300>.

11. Liu, Z., Li, J., Long, X., & Lu, X. (2022). Mechanisms and characteristics of ash layer formation on bed particles during circulating fluidized bed combustion of Zhundong lignite. *Energy*, 245, 123313. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.123313>.

12. Kuba, M., Skoglund, N., Öhman, M., & Hofbauer, H. (2021). A review on bed material particle layer formation and its positive influence on the performance of thermo-chemical biomass conversion in fluidized beds. *Fuel*, 291, 120214. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.120214>.

13. Long, X., Li, J., Wu, Q., Lu, X., Zhang, Y., Li, D., Jeon, C.-H., & Zhang, D. (2024). Inhibiting agglomeration of bed particles in CFB burning high-alkali fuel: Experiment, mechanisms and criteria for recirculating bottom ash or selecting alternative bed materials. *Energy*, 289, 130026. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.130026>.

14. Терехин А.П., Марьяндышев П.А. Проблемы энергетического использования осадка сточных вод в котлоагрегате с кипящим слоем Е-75-3,9-440 ДФТ // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2025. Т. 27. № 5. С. 106-117. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-5-106-117.

15. Morris, J. D., Daoood, S. S., Chilton, S., & Nimmo, W. (2018). Mechanisms and mitigation of agglomeration during fluidized bed combustion of biomass: A review. *Fuel*, 230, 452–473. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.04.098>.

16. Gao, W., Chen, H., Liao, Y., Wu, Y., Zhu, H., Zhang, H., Weng, J., Guo, X., Hu, X., Lin, X., Karnowo, & Zhang, S. (2025). Experimental and numerical investigation on effect of fluidization degree and temperature on bed agglomeration during bioslurry fast pyrolysis in a fluidized bed. *Fuel Processing Technology*, 273, 108229. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2025.108229>.

17. Результаты испытания оливинового песка как наполнителя топки с кипящим слоем при сжигании лузги подсолнечника / О. Ю. Милованов, Д. В. Климов, С. Н. Кузьмин [и др.] // Теплоэнергетика. – 2024. – № 9. – С. 28-35. – DOI 10.56304/S004036362470019X. –

EDN BUAXMO.

18. Исследование влияния различных факторов на изменение концентрации щелочных элементов, вызывающих агломерацию слоя / Г. А. Рябов, О. М. Фоломеев, О. А. Смирнова, Д. С. Литун // Теплоэнергетика. – 2021. – № 1. – С. 85-94. – DOI 10.1134/S0040363621010173. – EDN XVYYEA.

19. Furuvik, N. C. I. S., Wang, L., Jaiswal, R., Thapa, R., Eikeland, M. S., & Moldestad, B. M. E. (2022). Experimental study and SEM-EDS analysis of agglomerates from gasification of biomass in fluidized beds. *Energy*, 252, 124034. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.124034>.

20. Thy, P., Jenkins, B. M., Williams, R. B., Leshner, C. E., & Bakker, R. R. (2010). Bed agglomeration in fluidized combustor fueled by wood and rice straw blends. *Fuel Processing Technology*, 91(11), 1464–1485. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2010.05.024>.

21. Баскаков, А. П. Расчет аппаратов кипящего слоя / А. П. Баскаков, Б. П. Лукачевский, И. П. Мухленов и др. — Ленинград: Химия, 1986. — 352 с.

Авторы публикации

Терехин Алексей Павлович – младший научный сотрудник Северного (Арктического) Федерального Университета им. М.В. Ломоносова. ORCID*: <http://orcid.org/0009-0005-1737-1881>. Email terehin.a@edu.narfu.ru.

Марьяндышев Павел Андреевич – д-р техн. наук, доцент, первый проректор по стратегическому развитию и науке Северного (Арктического) Федерального Университета им. М.В. Ломоносова. ORCID*: <http://orcid.org/0000-0002-3880-8289>. Email p.marjyandishev@narfu.ru.

References

1. Demin A.V., Demina G.V. The influence of generator gas composition on pollutant emissions. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2026;28(1):131-140. (In Russ.) <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2026-28-1-131-140>.

2. Zvereva E.R., Mingaleeva G.R., Valiullin B.R., Zverev L.O., Lipatov M.S. Investigation of rheological properties of composite suspension fuels. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2023;25(1):143-153. (In Russ.) <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2023-25-1-143-153>.

3. Terekhin, A. P., Maryandyshev, P. A., & Brillard, A. (2026). Operation factors influencing bed agglomeration in an industrial fluidized bed boiler. *Fuel*, 425, 139421. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.fuel.2026.139421..>

4. Sofán-Germán, S. J., Doria-Oviedo, M. E., & Rhenals-Julio, J. D. (2025). Mechanical and energy assessment of hybrid biofuels: Integrating agro-industrial coconut and rice husk biomass with mineral coal for sustainable energy in Córdoba, Colombia. *South African Journal of Chemical Engineering*, 52, 303–310. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.sajce.2025.03.010>

5. Dalbanjan, N. P., Korgaonkar, K., Kadapure, A. J., Halladamani, S. B., Ramangouda, G., & Kumar S. K, P. (2025). Green energy from waste: Evaluating the sustainability of anaerobic biofuel technologies. *The Microbe*, 7, 100410. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.microb.2025.100410>.

6. Sapariya, D. D., Patdiwala, U., Makwana, J., Dhass, A. D., Makwana, J., Patel, D., Parikh, R., Abidi, M. H., Saeed, K., & Alkhalefah, H. (2026). Waste to energy: performance evaluation of a bubbling fluidized bed gasifier using biomass blends and facemask. *Thermal Science and Engineering Progress*, 69, 104470. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.tsep.2025.104470>.

7. Nicolucci, E., Palone, O., Wu, S., Xiao, R., Markides, C. N., & Borello, D. (2026). From waste to wealth: Can fluidized-bed gasification transform industrial practices? *Applied Thermal Engineering*, 286, 129246. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2025.129246>

8. Shabanian, J., Sauriol, P., & Chaouki, J. (2017). A simple and robust approach for early detection of defluidization. *Chemical Engineering Journal*, 313, 144–156. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cej.2016.12.002>.

9. Nascimento, F. R. M., González, A. M., Silva Lora, E. E., Ratner, A., Escobar Palacio, J. C., & Reinaldo, R. (2021). Bench-scale bubbling fluidized bed systems around the world - Bed agglomeration and collapse: A comprehensive review. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(36), 18740–18766. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.03.036>.

10. Sevoni, C., Yrjas, P., Lindberg, D., & Hupa, L. (2020). Agglomeration tendency of a

fluidized bed during addition of different phosphate compounds. *Fuel*, 268, 117300. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.117300>.

11. Liu, Z., Li, J., Long, X., & Lu, X. (2022). Mechanisms and characteristics of ash layer formation on bed particles during circulating fluidized bed combustion of Zhundong lignite. *Energy*, 245, 123313. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.123313>.

12. Kuba, M., Skoglund, N., Öhman, M., & Hofbauer, H. (2021). A review on bed material particle layer formation and its positive influence on the performance of thermo-chemical biomass conversion in fluidized beds. *Fuel*, 291, 120214. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.120214>.

13. Long, X., Li, J., Wu, Q., Lu, X., Zhang, Y., Li, D., Jeon, C.-H., & Zhang, D. (2024). Inhibiting agglomeration of bed particles in CFB burning high-alkali fuel: Experiment, mechanisms and criteria for recirculating bottom ash or selecting alternative bed materials. *Energy*, 289, 130026. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.130026>.

14. Terekhin A.P., Maryandyshev P.A. Problems of sewage sludge energy utilization in a fluidized bed boiler E-75-3,9-440 DFT. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2025;27(5):106-117. (In Russ.) <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2025-27-5-106-117>.

15. Morris, J. D., Daoood, S. S., Chilton, S., & Nimmo, W. (2018). Mechanisms and mitigation of agglomeration during fluidized bed combustion of biomass: A review. *Fuel*, 230, 452–473. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.04.098>.

16. Gao, W., Chen, H., Liao, Y., Wu, Y., Zhu, H., Zhang, H., Weng, J., Guo, X., Hu, X., Lin, X., Karnowo, & Zhang, S. (2025). Experimental and numerical investigation on effect of fluidization degree and temperature on bed agglomeration during bioslurry fast pyrolysis in a fluidized bed. *Fuel Processing Technology*, 273, 108229. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2025.108229>.

17. Milovanov, O.Y., Klimov, D.V., Kuzmin, S.N. et al. Results of Testing Olivine Sand As a Filler for a Furnisher with a Fluidized Bed When Burning Sunflower Husks. *Therm. Eng.* 71, 734–740 (2024). <https://doi.org/10.1134/S0040601524700265>.

18. Ryabov, G.A., Folomeev, O.M., Smirnova, O.A. et al. A Study into the Influence of Different Factors on the Behavior of Alkaline Element Concentrations that Cause Bed Agglomeration. *Therm. Eng.* 68, 72–81 (2021). <https://doi.org/10.1134/S0040601521010171>.

19. Furuvik, N. C. I. S., Wang, L., Jaiswal, R., Thapa, R., Eikeland, M. S., & Moldestad, B. M. E. (2022). Experimental study and SEM-EDS analysis of agglomerates from gasification of biomass in fluidized beds. *Energy*, 252, 124034. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.124034>.

20. Thy, P., Jenkins, B. M., Williams, R. B., Leshner, C. E., & Bakker, R. R. (2010). Bed agglomeration in fluidized combustor fueled by wood and rice straw blends. *Fuel Processing Technology*, 91(11), 1464–1485. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2010.05.024>.

21. Baskakov, A. P. Calculation of fluidized bed apparatuses / A. P. Baskakov, B. P. Lukachevsky, I. P. Mukhlenov et al. Leningrad: Khimiya Publ., 1986. 352 p.

Authors of the publication

Alexey P. Terekhin - Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov. ORCID*: <http://orcid.org/0009-0005-1737-1881>. Email terehin.a@edu.narfu.ru.

Pavel A. Maryandyshev - Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov. ORCID*: <http://orcid.org/0000-0002-3880-8289>. Email p.marjyandishev@narfu.ru.

Шифр научной специальности: 2.4.5. Энергетические системы и комплексы

Получено 20.04.2026 г.

Отредактировано 21.05.2026 г.

Принято 26.05.2026 г.