

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И КОМПЛЕКСЫ



УДК 62-67

DOI:10.30724/1998-9903-2025-27-5-106-117

ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ОСАДКА СТОЧНЫХ ВОД В КОТЛОАГРЕГАТЕ С КИПАЩИМ СЛОЕМ Е-75-3,9-440 ДФТ

Терехин А.П., Марьяндышев П.А.

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

Резюме: АКТУАЛЬНОСТЬ исследования заключается в разработке рекомендаций для эффективного энергетического использования осадка сточных вод в котлоагрегатах с пузырьковым кипящим слоем. ЦЕЛЬ. Рассмотреть проблемы энергетического использования осадка сточных вод. Провести энергообследование котлоагрегата с кипящим слоем Е-75-3,9-440 ДФТ при сжигании осадка сточных вод совместно с древесными отходами целлюлозно-бумажного производства. Проведение теплотехнического анализа осадка сточных вод и древесных отходов. Проведение элементного анализа материала кипящего слоя. МЕТОДЫ. Образцы осадка сточных вод и древесных отходов были отобраны на тракте топливоподачи котла Е-75-3,9-440 ДФТ. Для подготовки проб использовались шаровая барабанная мельница РМ 200 фирмы Retzsch и ситовый анализатор Retzsch AS 200 Control. Элементный анализ осадка сточных вод был проведен методом рентгенофлуоресцентной спектроскопии на спектрометре EDX-8000. Метод идентифицирует металлы и элементы объекта путем детектирования их энергетических сигнатур. Содержание водорода, азота и углерода определено с помощью анализатора EuroVector EA-3000. Теплотворная способность исследуемых образцов была определена с помощью калориметра IKA C 2000 Basic Version 2 с жидкостным криотермостатом LOIP FT-216-25. Энергетические обследования проводились при установившемся тепловом режиме котлоагрегата. РЕЗУЛЬТАТЫ. Результаты исследований показали, что в процессе сжигания осадка сточных вод в котле с кипящим слоем Е-75-3,9-440 ДФТ условия его работы сильно отличаются от расчетных, что связано с проблемами шлакования, эрозии из-за высокой зольности осадка, а также проблем, связанных с эксплуатацией кипящего слоя из-за высокой влажности топлива. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Даны рекомендации по повышению энергетической эффективности сжигания осадка сточных вод в котлоагрегате с кипящим слоем Е-75-3,9-440 ДФТ.

Ключевые слова: осадок сточных вод; кипящий слой; котлоагрегат; энергоэффективность; биомасса.

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 проведении энергетического обследования парового котла с кипящим слоем Е-75-3,9-440 ДФТ.

Для цитирования: 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.

PROBLEMS OF SEWAGE SLUDGE ENERGY UTILIZATION IN A FLUIDIZED BED BOILER E-75-3,9-440 DFT

Terekhin A.P., Maryandyshev P.A.

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

Abstract: *RELEVANCE* of the study means the recommendations development for the efficient energy utilization of sewage sludge in the fluidized bed boilers. *THE PURPOSE.* To consider problems of energy utilization of sewage sludge. Conduct an energy audit of the fluidized bed boiler E-75-3,9-440 DFT during the combustion of sewage sludge together with wood waste from pulp and paper industry. Conducting a proximate analysis of sewage sludge and wood waste. Conducting an elemental analysis of the fluidized bed material. *METHODS.* Samples of sewage sludge and wood waste were taken from the fuel supply line of boiler E-75-3,9-440 DFT. Retzsch RM 200 ball drum mill and a Retzsch AS 200 Control sieve analyzer were used to prepare samples. Ultimate analysis of sewage sludge was performed by X-ray fluorescence spectroscopy on an EDX-8000 spectrometer. This method identifies metals and elements of the sample by detecting their energy signatures. Hydrogen, nitrogen and carbon content was determined using the EuroVector EA-3000 analyzer. Calorific value of the studied samples was determined using an IKA C 2000 Basic Version 2 calorimeter with a LOIP FT-216-25 liquid cryothermostat. Energy audits were carried out under the established thermal regime of the boiler. *RESULTS.* Research results have shown that during the combustion of sewage sludge in a fluidized bed boiler E-75-3,9-440 DFT operating conditions are very different from the calculated ones, which is associated with the problems of slag formation, erosion due to the high ash content of the sludge, as well as problems associated with the operation of the fluidized bed due to the high humidity of the fuel. *CONCLUSION.* Recommendations are given on improving the energy efficiency of wastewater sludge combustion in a fluidized bed boiler E-75-3,9-440 DFT.

Keywords: sewage sludge; fluidized bed; boiler; energy efficiency; biomass.

Acknowledgments: The Ministry of Science funded Research that led to these results and Higher Education of the Russian Federation, project № FSRU-2024-0007. Authors express their gratitude to Arkhangelsk Pulp and Paper Mill JSC for their assistance in conducting an energy survey of a fluidized bed steam boiler E-75-3,9-440 DFT.

For citation: 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. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-5-106-117.

Введение и литературный обзор (Introduction and Literature Review)

Традиционные виды топлива, такие как природный газ и уголь, обеспечивают значительную долю мировой выработки электроэнергии. Постепенное снижение запасов ископаемых топлив увеличивает интерес к получению энергии из вторичных энергоресурсов, таких как биомасса и различные отходы. Использование вторичных энергоресурсов имеет как ряд преимуществ, таких как снижение выбросов CO₂ при сжигании биомассы, снижение зависимости от ограниченных запасов ископаемого топлива, так и ряд недостатков – низкую теплотворную способность, высокую влажность и зольность [1, 12, 3, 4].

Часто, в качестве вторичных энергоресурсов, можно использовать для производства энергии отходы или побочные продукты производств [5]. В настоящее время в мире производится огромное количество осадка сточных вод, так, например, в Китае производство осадка составляет 12 миллионов тонн в год, в ЕС 10,3 миллиона тонн в год, а в Индии 2,3 миллиона тонн в год [6, 7]. Осадок сточных вод (ОСВ) – это основной вид отходов, образующихся в процессе очистки производственных и городских сточных вод, который содержит не только большое количество органических веществ, но и тяжелые металлы, органические загрязнители и патогенные микроорганизмы. В настоящее время осадок утилизируют несколькими способами. Наиболее распространёнными способами являются: сжигание, использование в сельском хозяйстве,

захоронение на полигонах и мелиорация [7-10]. Однако эти методы, за исключением метода сжигания, ограничены из-за большого спроса на земельные участки и высокой стоимости утилизации [6]. Основная проблема при сжигании осадка заключается в высоком содержании золы и довольно сложном её составе, который обычно включает большое количество фосфора, кремния, железа, кальция, алюминия и серы. Это может привести к серьёзным проблемам, связанным с выбросами вредных веществ, шлакованием и агломерацией [11].

Сжигание осадка изучалось во многих работах [11-18]. Так в [12] авторы моделировали установку для переработки 400 тонн осадка в день путем его сушки и сжигания и пришли к выводу, что энергетический баланс сушки и сжигания осадка достигается при 50-60% влажности. В [11] Ханнл и соавторы изучали совместное сжигание в псевдоожиженном слое осадка сточных вод с сельскохозяйственными отходами, авторам удалось добиться стабильной работы установки по сжиганию при температуре около 950°C, однако это вызвало агломерацию материала слоя. Большинство исследований [11, 15-18] сосредоточены на эффективности сжигания осадка в кипящем слое.

Кипящий или псевдоожиженный слой – это система, в которой твёрдые частицы находятся во взвешенном состоянии и ведут себя как жидкость при воздействии потока воздуха определённой скорости. Ключевыми преимуществами кипящих слоёв являются высокая интенсивность смешивания и высокая теплопередача. Эти уникальные свойства псевдоожиженных слоёв определяют широкий спектр их применения, например, в газификации и сжигании. Сжигание в кипящем слое также признано экологически более эффективным способом сжигания твёрдого топлива, такого как уголь, биомасса и отходы. Добавление различных добавок в кипящий слой улучшает смешивание и интенсивность турбулентности, снижая выбросы загрязняющих веществ и повышая эффективность сжигания [19-22].

Целью данной работы является рассмотрение проблем, возникающих при сжигании осадка сточных вод в котлоагрегате с кипящим слоем, в котором осадок сжигается совместно с кородревесными отходами. Для этого изучены теплотехнические характеристики, элементный состав осадка сточных вод и проведена оценка эффективности его энергетического использования в котельном агрегате с пузырьковым кипящим слоем – Е-75-3,9-440 ДФТ, установленном на ТЭС-3 АО Архангельский ЦБК.

Материалы и методы (Materials and methods)

Получение осадка сточных вод на Архангельском ЦБК происходит на производстве биологической очистки в количестве около 11-13 тонн осадка в час. В состав этого производства входит оборудование для очистки производственных и хозяйственно-бытовых сточных вод целлюлозно-бумажного предприятия (~97% от общего объема сточных вод) и хозяйственно-бытовых сточных вод города населением около 35 тыс. человек (~3% от общего объема сточных вод). Получение осадка из сточных вод состоит из следующих стадий: механической очистки, насыщение кислородом, биологической очистки в три ступени на биореакторе и аэротенках. Избыточный активный ил и осадок от механической очистки сточных вод направляются для уплотнения на илоуплотнители и далее на обезвоживание на декантерные центрифуги. Далее осадок сточных вод грузовыми машинами вывозится на сжигание.

Образцы осадка сточных вод были отобраны из бункера подачи осадка на топливоподачу котла Е-75-3,9-440 ДФТ. Образцы кородревесных отходов были отобраны с конвейера, подающего кородревесные отходы в топливный бункер Е-75-3,9-440 ДФТ. Для определения зольности и низшей теплоты сгорания образцы были подвергнуты размолу в шаровой барабанной мельнице РМ 200 фирмы Retzsch, просеяны на ситовом анализаторе Retzsch AS 200 Control до гранулометрического состава от 63 до 125 мкм. Дополнительной сушке образцы не подвергались, так как происходила фактическая сушка при размолу и просеивании топлива. Отбор первичных проб топливной смеси, формирование объединенных проб, их сокращение, измельчение и деление выполнялись в полном соответствии с действующими ГОСТ 33563-2015, ГОСТ Р 54187-2010, ГОСТ 33255-2015, ГОСТ 33104-2014. Элементный анализ осадка сточных вод был проведен методом рентгенофлуоресцентной спектроскопии на спектрометре EDX-8000. Метод идентифицирует металлы и элементы объекта путем детектирования их энергетических сигнатур. Содержание водорода, азота и углерода определено с помощью анализатора EuroVector EA-3000. Теплотворная способность исследуемых образцов была определена с помощью калориметра ИКА С 2000 Basic Version 2 с жидкостным криотермостатом LOIP FT-216-25. Результаты теплотехнического анализа представлены в таблице 1. Элементный

анализ осадка представлен в таблице 2.

Энергетические обследования проводились при установившемся тепловом режиме котлоагрегата. Нагрузка, давление пара, температура перегрева, коэффициент избытка воздуха, температура питательной воды и подача ее в котел выдерживались примерно постоянными. Кроме того, чтобы избежать потерь тепла на неустоявшийся режим работы, обследование котельных агрегатов проводили не ранее чем через 48 часов работы с нагрузкой, близкой к той, на которой предполагалось делать испытание. В течение последних трех часов перед началом опыта нагрузка отличалась не более, чем на 5%. Обдувка поверхностей нагрева была проведена за 3 часа до начала испытаний. Параметры пароводяного, газозооушного трактов и температуру кипящего слоя котлов измеряли с помощью стационарных эксплуатационных расходомеров и термопар.

Таблица 1

Table 1

Результаты теплотехнического анализа древесных отходов и осадка сточных вод

Results of thermal analysis of wood waste and sewage sludge

Топливо	Влажность рабочей массы	Летучие вещества горючей массы	Зольность на сухую массу	Низшая теплота сгорания на рабочую массу
Лиственные отходы	53,95%	79,48%	1,72%	8426 кДж/кг
Осадок сточных вод	75,97%	77,94%	17,98%	1843 кДж/кг

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

Как видно из таблицы 1, сжигаемое топливо обладает крайне высокой влажностью, низкой теплотворной способностью и высоким выходом летучих веществ. Высокая зольность осадка говорит о том, что в сжигаемой топливной смеси зола осадка оказывает главное влияние на работу кипящего слоя.

Таблица 2

Table 2

Результаты элементного анализа осадка сточных вод, %

Results of elemental analysis of sewage sludge, %

C	H	N	O	S	Cl	Cu
35,600	6,100	2,400	50,500	0,830	0,200	0,004
Cr	Mn	Ti	Zn	Sr	Al	P
0,002	0,080	0,017	0,031	0,011	0,508	0,245
V	Mg	Si	K	Ca	Na	Fe
0,004	0,154	0,661	0,104	2,170	0,260	0,256

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

Как показано в таблице 2 проба осадка сточных вод содержала высокое количество кальция, кремния, алюминия и фосфора. Осадок также отличается повышенным содержанием щелочных элементов – натрия и калия.

Паровой котел с пузырьковым кипящим слоем Е-75-3,9-440 ДФТ (рис. 1) стационарный, водотрубный, с естественной циркуляцией, с уравновешенной тягой, газоплотный, трехходовой по дымовым газам предназначен для совместного сжигания кородревесных отходов с осадком сточных вод. Топка, переходный горизонтальный газоход, опускающий газоход и отдельно стоящий конвективный газоход составляют основной блок котла. На фронтальной стене топки установлены две топливные точки. Размеры топки котла составляют: ширина – 6,35 м, глубина – 5,85 м, высота – 17,95 м. Поперечное сечение топки – 37,14 м². В нижней части котла расположена камера сжигания, которая состоит из воздухооуасредительной решетки "НУВЕХ", слоя инертного материала (кварцевый песок) в количестве 60 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. Неподвижный песок, располагающийся ниже сопел первичного воздуха, защищает балки от эрозии. Для подачи вторичного воздуха на боковых стенах топки над уровнем футеровки расположена

система воздушных сопел с устройствами регулирования напора воздуха. Подача вторичного воздуха через воздушные сопла в топку котла производится вентилятором ВД – 15,5.

Пароперегреватель первой ступени ширмовый, трехзаходный, с коридорным расположением труб. Пароперегреватель второй ступени ширмовый с двухзаходным, коридорным расположением труб. Между первой и второй ступенью производится впрыск собственного конденсата для охлаждения перегретого пара. Водяной экономайзер состоит из двух ступеней, которые выполнены из гладкотрубных двухзаходных змеевиков с коридорным расположением труб. Воздухоподогреватель состоит из двух ступеней: первичного воздуха и вторичного воздуха.

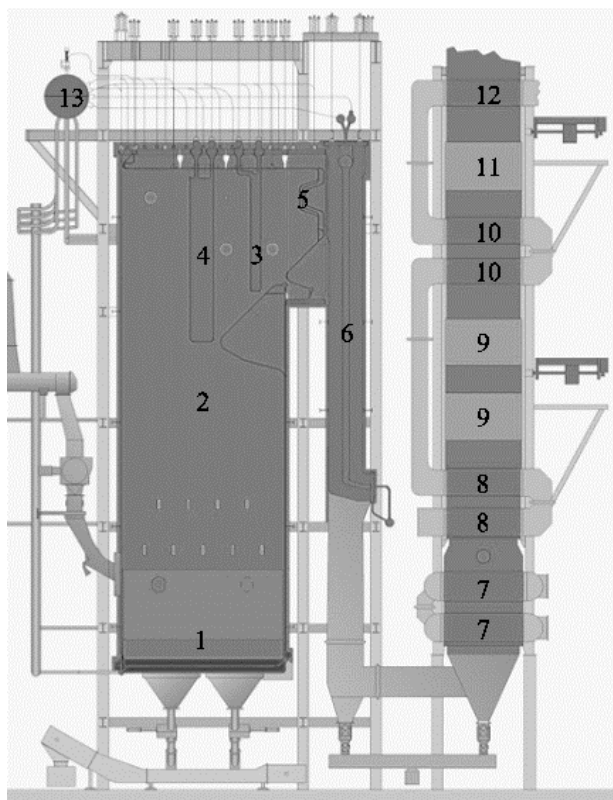


Рис. 1. Е-75-3,9-440 ДФТ. 1 – Решетка кипящего слоя; 2 – Топка; 3 – Пароперегреватель 1 ступени; 4 – Пароперегреватель 2 ступени; 5 – Фестон; 6 – Испарительные ширмы; 7, 8, 10, 12 – Воздухоподогреватель; 9, 11 – Водяной экономайзер; 13 – Барабан

Fig. 1. E-75-3,9-440 DFT. 1 – Fluidized bed grate; 2 – Furnace; 3 – Superheater 1st stage; 4 – Superheater 2nd stage; 5 – Festoon; 6 – Evaporation screens; 7, 8, 10, 12 – Air heater; 9, 11 – Water economizer; 13 – Drum

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

Результаты (Results)

На котельном агрегате Е-75-3,9-440 ДФТ проведено два испытания. Котел работал на смеси из лиственной коры и осадка сточных в режиме пузырькового кипящего слоя, производительностью 60-62 тонны перегретого пара в час при давлении 3,6 МПа и температуре перегретого пара 420°C. Доля осадка сточных вод в топливной смеси составляла 25%. КПД котла во время опытов составлял 83,5-84,0%.

В таблице 3 представлены результаты обследования пароводяного тракта котлоагрегата Е-75-3,9-440 ДФТ. Температура питательной воды в обоих опытах была 105°C. Нагрев воды после экономайзера 1 ступени и конденсатора собственных нужд составлял 24°C и 21°C, после 2 ступени экономайзера 57°C и 55°C, парообразования в экономайзере не происходило.

Перегрев пара у котлоагрегата Е-75-3,9-440 ДФТ после 1 ступени пароперегревателя составлял 168-173°C, после второй ступени 109-110°C, в впрыскивающем пароохладителе между 1 и 2 ступенями пароперегревателя охлаждение пара составило 87-95°C.

Таблица 3
Table 3Результаты обследования пароводяного тракта Е-75-3,9-440 ДФТ
Results of the steam-water tract inspection E-75-3,9-440 DFT

Параметр	Ед. изм.	Номер обследования	
		№1	№2
Паропроизводительность	т/ч	60	62
Давление перегретого пара	МПа	3,6	3,6
Температура перегретого пара	°С	420	422
Расход питательной воды	т/ч	65	66
Температура питательной воды	°С	105	105
Температура питательной воды после конденсатора	°С	118	115
Температура питательной воды после 1 ст. ВЭ	°С	129	126
Температура питательной воды после 2 ст. ВЭ	°С	186	181
Температура насыщенного пара в барабане	°С	232	232
Температура перегретого пара после 1 ст. ПП	°С	405	400
Температура перегретого пара после пароохладителя	°С	310	313

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

В таблице 4 представлены результаты мониторинга параметров газозвдушного тракта котла.

Доля воздуха, идущего на ожижение слоя составляла 41-45%. Кипящий слой работал в режиме газификации топлива. Данный режим работы с недостатком кислорода в слое снижает образование оксидов азота, образующихся из азотистых соединений топлива. Полное окисление вредных выбросов и эффективное дожигание горючих компонентов топлива происходило с помощью вторичного и третичного воздуха в надслоевом пространстве.

Температуры первичного и вторичного воздуха на котлоагрегате Е-75-3,9-440 ДФТ во время проведения испытаний была намного ниже режимных параметров (по режимной карте температура первичного воздуха составляет 250-350°С, вторичного воздуха 270-330°С). Нагрев вторичного воздуха во 2 блоке воздухоподогревателя второй ступени составляет всего 10°С (проектный нагрев 40°С). Температура вторичного воздуха на 40°С ниже режимного показателя. Также в конвективных газоходах наблюдались большие температурные разверки.

Таблица 4
Table 4Результаты обследования газозвдушного тракта Е-75-3,9-440 ДФТ
Results of the gas-air tract inspection E-75-3,9-440 DFT

Параметр	Ед. изм.	Номер обследования	
		№1	№2
Расход первичного воздуха	м ³ /с	15,77	13,39
Температура первичного воздуха	°С	205	213
Расход вторичного воздуха	м ³ /с	18,89	18,89
Температура вторичного воздуха после калорифера	°С	84	83
Температура вторичного воздуха после 1 секции ВЗП 1 ступени	°С	152	152
Температура вторичного воздуха после 2 секции ВЗП 1 ступени	°С	162	164
Температура вторичного воздуха после ВЗП 2 ступени	°С	261	265
Температура воздуха на всас вентилятора первичного воздуха	°С	23	49
Температура воздуха на всас вентилятора вторичного воздуха	°С	18	18
Расход дымовых газов рециркуляции	м ³ /с	0	2,67
Доля воздуха на ожижение кипящего слоя	%	0,45	0,41
Содержание кислорода на выходе из топки	%	8,0	7,8
Разряжение в топке (слева/справа)	Па	-0,4	-0,5
Разряжение до испарительных ширм (слева/справа)	Па	-0,2	-0,6
Разряжение до ВЗП первичного воздуха (слева/справа)	Па	-10,0	-10,0

Разряжение до 2 ст. ВЭ (слева/справа)	кПа	-2,50/-2,50	-2,50/-2,50
Разряжение до ВЗП ВВ (слева/справа)	кПа	-2,06/-2,50	-2,0,0/-2,50
Разряжение до 1 ст. ВЭ (слева/справа)	кПа	-2,50/-2,50	-2,5,0/-2,50
Разряжение до ЭФ	кПа	-2,50	-2,50
Разряжение после ЭФ	кПа	-3,73	-3,76
Температура дымовых газов:			
До ПП 2 ст. (слева/справа)	°С	650/697	687/719
До ПП 1 ст. (слева/справа)	°С	451/676	461/695
До испарительных ширм (слева/справа)	°С	651/565	649/579
До ВЗП ВП (слева/справа)	°С	453/451	460/457
До 2 ст. ВЗП ВВ (слева/справа)	°С	356/289	361/300
До 2 ст. ВЭ (слева/справа)	°С	316/259	320/270
До 1 ст. ВЗП ВВ (слева/справа)	°С	240/219	243/223
До 1 ст. ВЭ (слева/справа)	°С	210/189	218/194
До 1 ст. ВЗП ВВ (слева/справа)	°С	182/126	185/127
До ЭФ	°С	171	173
После ЭФ	°С	141	143

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

В таблице 5 представлены результаты мониторинга параметров кипящего слоя. При обследовании обнаружили, что в задней части котла дренируемые агломераты достигали размеров 200х300 мм (рис. 2).

Таблица 5

Table 5

Результаты обследования кипящего слоя Е-75-3,9-440 ДФТ

Fluidized bed survey results E-75-3,9-440 DFT

Параметр	Ед. изм.	Номер обследования	
		№1	№2
Температура кипящего слоя в точках (верхняя/нижняя термопара):			
Передняя левая воронка	°С	829/825	887/883
Задняя левая воронка	°С	806/810	873/877
Задняя правая воронка	°С	761/789	817/857
Передняя правая воронка	°С	804/824	881/884

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

Так как донная зола с котлоагрегата Е-75-3,9-440 ДФТ содержала большое количество агломератов, с помощью рентгенофлуоресцентной спектроскопии выполнили элементный анализ образца донной золы отобранного в процессе обследования. Результаты элементного анализа представлены в таблице 6.

Таблица 6

Table 6

Результаты элементного анализа донной золы котлоагрегата Е-75-3,9-440 ДФТ

Results of elemental analysis of boiler bottom ash E-75-3,9-440 DFT

SO ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	NiO	ZnO	MgO	Rb ₂ O
0,109	0,267	13,7	0,003	0,057	0,734	0,003
Cr ₂ O ₃	MnO	CuO	SrO	N	C	H
0,019	0,23	0,013	0,059	0,1	0,254	0,1
K ₂ O	TiO ₂	BaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃		
2,08	0,123	0,243	81,1	1,05		

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



Рис. 2. Агломераты, обнаруженные в донной золе котлоагрегата Е-75-3,9-440 ДФТ

Fig. 2. Agglomerates found in the bottom ash of boiler unit E-75-3,9-440 DFT

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

Обсуждение (Discussions)

Сжигание осадка сточных вод в котле Е-75-3,9-440 ДФТ приводит к изменениям условий его работы от номинальных параметров. Это связано как с изменением нагрузок котлов, работающих совместно с исследуемым в одну паровую магистраль, так и с колебаниями температуры питательной воды, изменением качества топлива и параметров газоздушного режима котлоагрегата. Однако основное влияние на отклонение параметров работы котла от номинальных являются сложности, возникающие из-за высокой влажности и зольности осадка.

Результаты энергообследования показали, что при энергетической утилизации осадка сточных вод возникают проблемы, связанные со шлакованием конвективных поверхностей нагрева. Это приводило к низкому тепловосприятию водяного экономайзера, где питательная вода не нагревалась до минимального режимного значения (190°C). Воздухоподогреватель также не обеспечивал необходимый нагрев первичного и вторичного воздуха до режимных параметров, что приводило к снижению температуры кипящего слоя и температуры в надслоевом пространстве.

В процессе обследования котла было обнаружено, что температура дымовых газов по правой стороне была значительно ниже, вместе с тем дымосос котлоагрегата был нагружен на 100%, а нагрузка котла была ниже номинальной на 20%. При останове котлоагрегата в ремонт было обнаружено, что правая сторона переходного газохода (между 2 и 3 газоходами) и правая воронка под испарительными ширмами были сильно зашлакованы вследствие цементирования золы. Явление цементации золы возникло из-за повышенной влажности дымовых газов, ввиду высокой влажности сжигаемой смеси и появления свища на испарительных ширмах, причиной образования которого послужил эрозионный износ золой осадка сточных вод.

Дымосос котлоагрегата Е-75-3,9-440 ДФТ во время опытов был нагружен на 100 процентов, при этом котел работал с задымлением и выбиванием дымовых газов в помещение котельной, тяги не хватало. Причиной является как сильное шлакование и загрязнение поверхностей нагрева летучей золой, так и повышенный расход топлива из-за сжигания низкокалорийного влажного топлива.

При мониторинге температуры кипящего слоя и визуальном осмотре донной золы котлоагрегата отметили, что температура в передней левой части котла значительно выше, чем в остальных точках. Температура кипящего слоя в правой задней части котла была на $40\text{--}56^{\circ}\text{C}$ ниже, чем в левой задней точке. Визуально донная зола с передних точек котла содержала мало агломератов. Согласно [22] на скорость укрупнения донной золы, образование агломератов и дефлюидизацию слоя влияет содержание калия и натрия в золе топлива, а именно превышение их суммарного содержания в слое свыше 1% [22]. В исследуемой донной золе содержание натрия и калия составило более 2 процентов. При высоком содержании калия рекомендуется увеличить количество дренируемого материала слоя и количество засыпаемого свежего кварцевого песка.

Выводы (Conclusions)

Исследован процесс сжигания осадка сточных вод в котлоагрегате Е-75-3,9-440 ДФТ. Результаты показали, что котлоагрегат с кипящим слоем обеспечивает эффективное энергетическое использование осадка сточных вод (КПД котлоагрегата во время обоих опытов был свыше 80%). При этом продолжительное сжигание осадка привело к следующим трудностям в работе котла:

1. Высокая зольность осадка сточных вод приводит к сильному шлакованию и загрязнению конвективных поверхностей нагрева летучей золой.

2. Высокая влажность осадка сточных вод приводит к увеличению расхода топлива, что в совокупности со шлакованием испарительных ширм приводит к максимальной нагрузке дымососа даже при 80% нагрузке котла по пару.

3. Использование кипящего слоя для сжигания осадка сточных вод приводит к агломерации частиц золы с кварцевым песком.

Для улучшения энергетической эффективности котлоагрегата необходимо:

1. Расшлаковать конвективные поверхности нагрева Е-75-3,9-440 ДФТ для увеличения тепловосприятости воздухоподогревателей вторичного и первичного воздуха. Это позволит стабилизировать режим горения, снизить расход топлива и уменьшить эрозионный износ труб испарительных ширм.

2. Увеличить интенсивность смешивания вторичного и третичного воздуха с продуктами сгорания. Данное мероприятие даст возможность снизить расход вторичного воздуха, повысить КПД котельного агрегата.

3. Увеличить дренаж материала слоя и добавку свежего кварцевого песка на Е-75-3,9-440 ДФТ для устранения агломерации материала слоя.

Литература

1. Макеева Е.Н., Зверева Э.Р., Морозова О.Ю. Перевод котельных на альтернативное топливо // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2024. Т.26. № 1. С. 107-117. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-1-107-117.

2. Singh, V., Nimalipuri, P., Das, H. C., & Vitankar, V. (2025). An Eulerian-Eulerian multifluid simulation for co-combustion of coal and sawdust in industrial scale circulating fluidized bed boiler. *Cleaner Energy Systems*, 10, 100169. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cles.2025.100169>

3. Patro, B. (2016). Efficiency studies of combination tube boilers. *Alexandria Engineering Journal*, 55(1), 193–202. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.aej.2015.12.007>

4. Sekyere, C. K. K., Opoku, R., Asaaga, B., Baah, B., Andoh, P. Y., Obeng, G. Y., & Agbogla, J. (2025). Techno-environmental assessment of the fuel properties of a variety of briquettes for biomass boiler applications. *Cleaner Energy Systems*, 10, 100185. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cles.2025.100185>

5. Petrovič, A., Cenčič Predikaka, T., Parlov Vuković, J., Jednačak, T., Hribernik, S., Vohl, S., Urbanc, D., Tišma, M., & Čuček, L. (2024). Sustainable hydrothermal co-carbonization of residues from the vegetable oil industry and sewage sludge: Hydrochar production and liquid fraction valorisation. *Energy*, 307, 132760. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.132760>

6. Shen, X., Yan, H., Shi, J., Tan, Y., Yang, H., Hu, H., & Li, S. (2025). Experimental investigation on smoldering combustion for sewage sludge treatment: Influence of key parameters and self-sustaining limit. *Case Studies in Thermal Engineering*, 65, 105673. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.csite.2024.105673>

7. Jobodwana, L., & Sithole, N. T. (2025). From waste to resource: Cleaner production of geopolymers bricks from sewage sludge via production parameter optimization. *Construction and Building Materials*, 489, 142341. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.142341>

8. Wilk, M., Śliz, M., & Lubieniecki, B. (2021). Hydrothermal co-carbonization of sewage sludge and fuel additives: Combustion performance of hydrochar. *Renewable Energy*, 178, 1046–1056. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.06.101>

9. Corre, S., Gorete Ribeiro Domingos, M. E., Florez-Orrego, D., Magnaval, G., Margni, M., & Maréchal, F. (2025). Life cycle assessment and techno-economic comparison of methane production routes from sewage sludge: Incineration vs. Hydrothermal Gasification and Anaerobic Digestion. *Energy Conversion and Management*, 341, 120015. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enconman.2025.120015>

10. Hoang, Q. N., Vanierschot, M., Blondeau, J., Croymans, T., Pittoors, R., & van Caneghem, J. (2021). Review of numerical studies on thermal treatment of municipal solid waste in packed bed combustion. *Fuel Communications*, 7, 100013. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jfueco.2021.100013>

11. Hannl, T. K., Skoglund, N., Prišćák, J., Öhman, M., & Kuba, M. (2024). Bubbling fluidized bed co-combustion and co-gasification of sewage sludge with agricultural residues with a focus on the fate of phosphorus. *Fuel*, 357, 129822. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.129822>

12. Ben Ali, M., el Hazzat, M., Flayou, M., Moussadik, A., Belekbir, S., Sifou, A., Dahhou, M., Kacimi, M., Benzaouak, A., & el Hamidi, A. (2025). Advanced kinetic and thermodynamic analysis of sewage sludge combustion: A study of non-isothermal reaction mechanisms and energy recovery. *FirePhysChem*. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.fpc.2025.04.002>

13. Ortner, B., Schmidberger, C., Gerhardt, H., Prieler, R., Schröttner, H., & Hochenauer, C.

(2023). Application of computationally inexpensive CFD model in steady-state and transient simulations of pulverized sewage sludge combustion. *Advanced Powder Technology*, 34(12), 104260. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.appt.2023.104260>

14. Ortner, B., Peham, L., Schmidberger, C., Prieler, R., & Hochenauer, C. (2025). CFD modeling of sewage sludge combustion in an experimental entrained flow reactor with integrated slag flow dynamics. *Applied Thermal Engineering*, 267, 125779. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2025.125779>

15. Dubinin, Yu. V., Yazykov, N. A., Lyulyukin, A. P., & Yakovlev, V. A. (2025). Combustion of sewage sludge in a fluidized bed of catalyst: from laboratory to the pilot plant. *Waste Management*, 204, 114944. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.wasman.2025.114944>

16. Peltola, P., Ruottu, L., Larkimo, M., Laasonen, A., & Myöhänen, K. (2023). A novel dual circulating fluidized bed technology for thermal treatment of municipal sewage sludge with recovery of nutrients and energy. *Waste Management*, 155, 329–337. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.wasman.2022.11.017>

17. Alobaid, F., Kuhn, A., Vakkilainen, E., & Eppe, B. (2024). Recent progress in the operational flexibility of 1 MW circulating fluidized bed combustion. *Energy*, 306, 132287. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.132287>

18. Brachi, P., di Fraia, S., Massarotti, N., & Vanoli, L. (2022). Combined heat and power production based on sewage sludge gasification: An energy-efficient solution for wastewater treatment plants. *Energy Conversion and Management*, 255, 100171. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2021.100171>

19. Jena, S., Singh, V., Nimalipuri, P., Das, H. C., Pradhan, M. K., Vitankar, V., & Hotta, T. K. (2025). Hydrodynamics and Mixing analysis of different bed materials with coal in an industrial scale bubbling fluidized bed boiler. *Case Studies in Thermal Engineering*, 69, 105989. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.csite.2025.105989>

20. Stenberg, V., Rydén, M., & Lind, F. (2023). Evaluation of bed-to-tube heat transfer in a fluidized bed heat exchanger in a 75 MWth CFB boiler for municipal solid waste fuels. *Fuel*, 339, 127375. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.127375>

21. Рябов, Г. А. Обзор результатов зарубежных и отечественных исследований в области использования технологии сжигания твердых топлив в циркулирующем кипящем слое / Г. А. Рябов // Теплоэнергетика. – 2021. – № 2. – С. 41-60. – DOI 10.1134/S0040363621020053. – EDN AFKXUZ.

22. Г. А. Рябов. 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.

Авторы публикации

Терехин Алексей Павлович – мл. науч. сотр. Северного (Арктического) Федерального Университета им. М.В. Ломоносова, г. Архангельск, Россия. *ORCID**: <http://orcid.org/0009-0005-1737-1881>. terehin.a@edu.narfu.ru

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

References

1. Makeeva E.N., Zvereva E.R., Morozova O.Yu. Conversion of boiler houses to alternative fuel. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2024;26(1):107-117. (In Russ.) <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2024-26-1-107-117>

2. Singh, V., Nimalipuri, P., Das, H. C., & Vitankar, V. (2025). An Eulerian-Eulerian multifluid simulation for co-combustion of coal and sawdust in industrial scale circulating fluidized bed boiler. *Cleaner Energy Systems*, 10, 100169. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cles.2025.100169>

3. Patro, B. (2016). Efficiency studies of combination tube boilers. *Alexandria Engineering Journal*, 55(1), 193–202. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.aej.2015.12.007>

4. Sekyere, C. K. K., Opoku, R., Asaaga, B., Baah, B., Andoh, P. Y., Obeng, G. Y., & Agbogla, J. (2025). Techno-environmental assessment of the fuel properties of a variety of briquettes for biomass boiler applications. *Cleaner Energy Systems*, 10, 100185. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cles.2025.100185>

5. Petrovič, A., Cenčič Predikaka, T., Parlov Vuković, J., Jednačak, T., Hribernik, S., Vohl, S.,

- Urbanc, D., Tišma, M., & Čuček, L. (2024). Sustainable hydrothermal co-carbonization of residues from the vegetable oil industry and sewage sludge: Hydrochar production and liquid fraction valorisation. *Energy*, 307, 132760. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.132760>
6. Shen, X., Yan, H., Shi, J., Tan, Y., Yang, H., Hu, H., & Li, S. (2025). Experimental investigation on smoldering combustion for sewage sludge treatment: Influence of key parameters and self-sustaining limit. *Case Studies in Thermal Engineering*, 65, 105673. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.csite.2024.105673>
7. Jobodwana, L., & Sithole, N. T. (2025). From waste to resource: Cleaner production of geopolymers bricks from sewage sludge via production parameter optimization. *Construction and Building Materials*, 489, 142341. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.142341>
8. Wilk, M., Śliz, M., & Lubieniecki, B. (2021). Hydrothermal co-carbonization of sewage sludge and fuel additives: Combustion performance of hydrochar. *Renewable Energy*, 178, 1046–1056. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.06.101>
9. Corre, S., Gorete Ribeiro Domingos, M. E., Florez-Orrego, D., Magnaval, G., Margni, M., & Maréchal, F. (2025). Life cycle assessment and techno-economic comparison of methane production routes from sewage sludge: Incineration vs. Hydrothermal Gasification and Anaerobic Digestion. *Energy Conversion and Management*, 341, 120015. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enconman.2025.120015>
10. Hoang, Q. N., Vanierschot, M., Blondeau, J., Croymans, T., Pittoors, R., & van Caneghem, J. (2021). Review of numerical studies on thermal treatment of municipal solid waste in packed bed combustion. *Fuel Communications*, 7, 100013. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jfueco.2021.100013>
11. Hannl, T. K., Skoglund, N., Priščák, J., Öhman, M., & Kuba, M. (2024). Bubbling fluidized bed co-combustion and co-gasification of sewage sludge with agricultural residues with a focus on the fate of phosphorus. *Fuel*, 357, 129822. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.129822>
12. Ben Ali, M., el Hazzat, M., Flayou, M., Moussadik, A., Belekbir, S., Sifou, A., Dahhou, M., Kacimi, M., Benzaouak, A., & el Hamidi, A. (2025). Advanced kinetic and thermodynamic analysis of sewage sludge combustion: A study of non-isothermal reaction mechanisms and energy recovery. *FirePhysChem*. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.fpc.2025.04.002>
13. Ortner, B., Schmidberger, C., Gerhardt, H., Prieler, R., Schröttner, H., & Hochenauer, C. (2023). Application of computationally inexpensive CFD model in steady-state and transient simulations of pulverized sewage sludge combustion. *Advanced Powder Technology*, 34(12), 104260. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.appt.2023.104260>
14. Ortner, B., Peham, L., Schmidberger, C., Prieler, R., & Hochenauer, C. (2025). CFD modeling of sewage sludge combustion in an experimental entrained flow reactor with integrated slag flow dynamics. *Applied Thermal Engineering*, 267, 125779. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2025.125779>
15. Dubinin, Yu. V., Yazykov, N. A., Lyulyukin, A. P., & Yakovlev, V. A. (2025). Combustion of sewage sludge in a fluidized bed of catalyst: from laboratory to the pilot plant. *Waste Management*, 204, 114944. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.wasman.2025.114944>
16. Peltola, P., Ruottu, L., Larkimo, M., Laasonen, A., & Myöhänen, K. (2023). A novel dual circulating fluidized bed technology for thermal treatment of municipal sewage sludge with recovery of nutrients and energy. *Waste Management*, 155, 329–337. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.wasman.2022.11.017>
17. Alobaid, F., Kuhn, A., Vakkilainen, E., & Eppe, B. (2024). Recent progress in the operational flexibility of 1 MW circulating fluidized bed combustion. *Energy*, 306, 132287. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.132287>
18. Brachi, P., di Fraia, S., Massarotti, N., & Vanoli, L. (2022). Combined heat and power production based on sewage sludge gasification: An energy-efficient solution for wastewater treatment plants. *Energy Conversion and Management*: X, 13, 100171. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2021.100171>
19. Jena, S., Singh, V., Nimalipuri, P., Das, H. C., Pradhan, M. K., Vitankar, V., & Hotta, T. K. (2025). Hydrodynamics and Mixing analysis of different bed materials with coal in an industrial scale bubbling fluidized bed boiler. *Case Studies in Thermal Engineering*, 69, 105989. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.csite.2025.105989>
20. Stenberg, V., Rydén, M., & Lind, F. (2023). Evaluation of bed-to-tube heat transfer in a fluidized bed heat exchanger in a 75 MWth CFB boiler for municipal solid waste fuels. *Fuel*, 339, 127375. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.127375>
21. Ryabov, G. A. A Review of the Research Results into the Technologies of Solid-Fuel Combustion in a Circulating Fluidized Bed Conducted Abroad and in Russia / G. A. Ryabov // *Thermal Engineering*. – 2021. – Vol. 68, No. 2. – P. 117-135. – DOI 10.1134/S0040601521020051. – EDN XTYBYH.

22. A Study into the Influence of Different Factors on the Behavior of Alkaline Element Concentrations that Cause Bed Agglomeration / G. A. Ryabov, O. M. Folomeev, O. A. Smirnova, D. S. Litun // Thermal Engineering. – 2021. – Vol. 68, No. 1. – P. 72-81. – DOI 10.1134/S0040601521010171. – EDN TPYJKF.

Authors of the publication

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

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

Шифр научной специальности: 2.4.5. Энергетические системы и комплексы

Получено **24.08.2025 г.**

Отредактировано **15.09.2025 г.**

Принято **15.10.2025 г.**