

УДК 620-92

Алексей Павлович Терехин

Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова, аспирант кафедры теплоэнергетики и теплотехники, Россия, Архангельск, e-mail: trhnlx@yandex.ru

Павел Андреевич Марьяндышев

Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова, доктор технических наук, первый проректор по стратегическому развитию и науке, профессор кафедры теплоэнергетики и теплотехники, Россия, Архангельск, телефон (8182) 21-61-75, e-mail: p.marjyandishev@narfu.ru

Виктор Константинович Любов

Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова, доктор технических наук, профессор кафедры теплоэнергетики и теплотехники, Россия, Архангельск, телефон (8182) 21-61-75, e-mail: v.lubov@narfu.ru

Влияние химического состава биомассы на процесс агломерации в псевдоожиженном слое котлоагрегата Е-75-3,9-440 ДФТ**Авторское резюме**

Состояние вопроса. Сжигание биотоплива в кипящем слое является привлекательной технологией утилизации биомассы. Однако технология сжигания биомассы в кипящих слоях характеризуется рядом проблем, связанных с агломерацией материала слоя. Целью исследования является изучение влияния химического состава биомассы на процесс агломерации кипящего слоя котлоагрегата Е-75-3,9-440 ДФТ, сжигающего смесь из побочных продуктов целлюлозно-бумажного производства, в целях повышения стабильности работы кипящего слоя и увеличения длительности работы котлоагрегата между периодами его расшлаковки.

Материалы и методы. Исследованы два типа биомассы, сжигаемые в смеси в котлоагрегате с кипящим слоем Е-75-3,9-440 ДФТ. В целях изучения процесса агломерации исследованы образцы агломератов, донной и летучей золы.

Результаты. Исследован элементный состав образцов кородревесных отходов, осадка сточных вод, агломератов и золы. Выделены элементы, влияющие на процесс агломерации кипящего слоя. В результате анализа элементного состава образцов установлено, что основные золо- и шлакообразующие компоненты в осадке сточных вод – кремний, кальций, сера и калий, а в кородревесных отходах – кальций, калий и натрий, основные элементы, оказывающие влияние на процесс агломерации кипящего слоя, – щелочные элементы калий и натрий.

Выводы. Полученные результаты позволяют прогнозировать агломерацию кипящего слоя, подбирать топливную смесь в пропорции, необходимой для снижения процесса агломерации.

Ключевые слова: биомасса, донная зола, летучая зола, газификация, агломерация кипящего слоя, рентгенофлуоресцентный анализ образцов

Alexey Pavlovich Terekhin

Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Post-graduate student of Thermal Power Engineering and Heat Engineering Department, Russia, Arkhangelsk, e-mail: trhnlx@yandex.ru

Pavel Andreevich Maryandyshev

Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Doctor of Engineering Sciences (Post-doctoral degree), First Vice-Rector for Strategic Development and Science, Professor of Thermal Power Engineering and Heat Engineering Department, Russia, Arkhangelsk, telephone (8182) 21-61-75, e-mail: p.marjyandishev@narfu.ru

Viktor Konstantinovich Lyubov

Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Doctor of Engineering Sciences (Post-doctoral degree), Professor of Thermal Power Engineering and Heat Engineering Department, Russia, Arkhangelsk, telephone (8182) 21-61-75, e-mail: v.lubov@narfu.ru

Influence of chemical composition of biomass on agglomeration process in fluidized bed of boiler E-75-3,9-440 DFT**Abstract**

Background. The combustion of biofuels in the fluidized bed is an attractive technology to process biomass. However, the technology of biomass combustion in fluidized beds is characterized by several problems associated with the agglomeration of bed material. The aim of the research is to study the influence of the chemical composition of biomass on the

agglomeration process of the fluidized bed of the boiler unit E-75-3,9-440 DFT. The boiler burns a mixture of by-products of pulp and paper production to increase stability of the fluidized bed and the duration of boiler operation between periods of its deslagging.

Materials and methods. The study has tested two types of biomass burned in a mixture in a steam boiler unit E-75-3,9-440 DFT with a fluidized bed. The authors also have studied the samples of agglomerates, bed, and fly ash to find out more about the agglomeration process.

Results. The elemental composition of samples of bark-wood waste, sewage sludge, agglomerates and ash has been studied. Elements affecting the process of agglomeration of the fluidized bed have been identified. The results of the analysis have showed that essential ash- and slag-forming components in the sewage sludge are silicon, calcium, sulfur, and potassium, and in the bark wood waste the essential ash- and slag-forming components are calcium, potassium, and sodium. The main elements influencing the process of agglomeration of the fluidized bed are alkaline elements of potassium and sodium.

Conclusion. The results obtained make it possible to predict the agglomeration of the fluidized bed, to select the fuel mixture in the proportion necessary to reduce the agglomeration process.

Key words: biomass, bed ash, fly ash, gasification, agglomeration of fluidized bed, X-ray fluorescence analysis

DOI: 10.17588/2072-2672.2024.1.020-027

Введение. Биомасса в качестве углеродно-нейтрального топлива считается перспективной заменой угля, используемого на электростанциях, и безопасным энергетическим ресурсом, имеющим экологические преимущества. Снижение запасов ископаемых энергетических ресурсов и негативное влияние вредных выбросов на климат побуждают энергетиков искать альтернативы традиционным видам топлива. Среди энергетических ресурсов биомасса, являясь углеродно-нейтральным источником энергии, привлекает огромное внимание как академического, так и инженерного сообществ [1].

Газификация биомассы представляет собой термохимический процесс, который превращает биомассу в пригодные для использования газообразные продукты, предпочтительно высококалорийный синтез-газ, состоящий в основном из монооксида углерода (CO) и водорода (H₂) [2]. Синтез-газ может быть непосредственно использован для получения тепла и электроэнергии или же дополнительно синтезирован в пригодные для хранения энергоносители, такие как газообразное и жидкое транспортное топливо [3].

Псевдоожиженные слои широко использовались для газификации биомассы в течение последних десятилетий, интерес к этим возможностям быстро вырос в энергетической промышленности [4, 5]. Основным преимуществом кипящего слоя является равномерный температурный профиль, который обеспечивает процесс газификации с улучшенным преобразованием энергии и получением синтез-газа с высокой теплотворной способностью. Благодаря таким важным характеристикам, как низкие рабочие температуры, эффективное перемешивание материала и отличная теплопередача, псевдоожиженные слои считаются особенно подходящими для обработки широкого спектра топлива из различных видов биомассы [1, 5, 6]. Котлоагрегаты с псевдоожиженным слоем бывают различных типов: обычно включают стационарный слой (FB), пузырьковый слой (BFB), турбулентный

псевдоожиженный слой (TFB) и циркулирующий псевдоожиженный слой (CFB) [1].

Несмотря на многочисленные преимущества технологии псевдоожиженного слоя, ее промышленному применению для переработки биомассы по-прежнему препятствуют проблемы, связанные с высокой шлакообразующей способностью биомассы [1, 7–9]. В промышленных котлоагрегатах с псевдоожиженным слоем основной проблемой является образование агломератов, которые могут привести к частичному или полному прекращению оживления слоя. Агломерация слоя происходит, когда частицы слоя склеиваются расплавленной золой [8]. Если этому не противодействовать, то в результате получаем плохие параметры газификации и прекращение псевдоожижения [1, 7–11].

Задачами исследования являются изучение химического состава агломератов, образующихся в котлоагрегате при сжигании смеси двух видов биомассы, а также изучение химического состава золы и топлива. Целью исследования является составление рекомендаций по снижению агломерации кипящего слоя котлоагрегата E-75-3,9-440 ДФТ для увеличения продолжительности работы котлоагрегата и, соответственно, снижению зависимости целлюлозно-бумажного производства от традиционных видов топлив.

В течение последних десятилетий древесные отходы и осадок сточных вод (ОСВ) были основным видом топлива из биомассы для целлюлозно-бумажной промышленности. Однако высокая зольность осадка сточных вод (примерно в 5–12 раз выше, чем у кородревесных отходов (КДО)) при сжигании в котлоагрегатах с кипящим слоем может привести к агломерации и прекращению оживления слоя. Явление агломерации при сжигании биомассы в псевдоожиженных слоях широко изучалось как проблема, присутствующая щелочным и щелочноземельным металлам, вызванная присоединением расплавленной золы или реакцией летучей золы с частицами материала слоя. Считается, что высокая

температура слоя и низкое ожигание являются основными предварительными условиями для быстрой агломерации. Было обнаружено, что такие факторы, как температура плавления золы, соотношение избытка воздуха, высота слоя и другие, имеют незначительное отношение к процессу агломерации.

Основной причиной агломерации кипящего слоя является высокое содержание щелочных элементов в биомассе, приводящее к снижению температуры плавления золы [12–15]. Проблемы, связанные с термической конверсией биомассы (агломерация, осаждение, коррозия, эрозия и выбросы) в основном связаны с характеристиками золы, особенно концентрации в ней таких элементов, как Na, Mg, Al, Si, P, S, Cl, K и Ca [9]. В качестве наиболее действенного способа инициирования агломерации слоя было предложено образование низкоплавкой топливной золы и низкоплавких слоев покрытия на поверхности частиц слоя. Частично расплавленная зола, полученная из топлива, может привести к прямому сцеплению частиц слоя. В литературе это называется «агломерация, вызванная расплавом». Агломерация, вызванная покрытием, состоит в образовании липких слоев покрытия в результате химических реакций твердое вещество–газ между частицами слоя и газообразными веществами, например соединениями калия. При агломерации, вызванной расплавом, образование частично расплавленной золы в первую очередь зависит от характеристик топлива, тогда как при агломерации, вызванной покрытием, учитываются как характеристики топлива, так и материал слоя [15].

При повышенных температурах соединения щелочных металлов в первую очередь вступают в реакцию с другими золообразующими элементами, такими как Si, Cl и S. Выделение щелочных металлов происходит в результате ряда сложных реакций, на которые влияют физические характеристики и химический состав биомассы, а также условия псевдоожиганного слоя, включая температуру кипящего слоя и показатель избытка воздуха [6, 15, 16]. В ряде исследований утверждается, что критическими компонентами золы, вызывающими агломерацию слоя, являются Ca, Mg, K, Na, Si и P. Как только органические материалы окисляются, оставшиеся вещества образуют оксиды, которые соответствуют основным золообразующим элементам в биомассе [8].

Методы исследования. Были исследованы два типа биомассы, сжигаемые в смеси в котлоагрегате с кипящим слоем на целлюлозно-бумажном заводе. Паровой котел E-75-3,9-440 ДФТ стационарный, водотрубный, с естественной циркуляцией, с уравновешенной тягой, газоплотный, трехходовой по дымовым газам предназначен для совместного сжигания кородревесных от-

ходов с осадком сточных вод по технологии «кипящего слоя» (КС). Топка, переходный горизонтальный газоход, опускающий газоход и отдельно стоящий конвективный газоход составляют основную блок котла. На фронтальной стене топки установлены две топливные точки. Топливная смесь из топливопровода поступает в точки и далее в топку.

В нижней части котла расположена камера сжигания высокой тепловой мощности, которая состоит из воздухораспределительной решетки НУВЕР, слоя инертного материала (кварцевый песок) в количестве 60 тонн и обмуровки. Рабочая температура кипящего слоя по режимной карте составляет 750–900 °С, при этом во время эксплуатации температура держится в пределах 770–830 °С и регулируется путем открытия/закрытия клапана рециркуляции дымовых газов или изменения количества подаваемого под слой первичного воздуха. Температура в верхней и нижней частях кипящего слоя контролируется четырьмя двухуровневыми термометрами, действующими на отключение топливоподдачи при температуре ниже 650 °С или выше 950 °С.

Решетка кипящего слоя состоит из водоохлаждаемых труб диаметром 60,3×7,1 мм, сваренных в форме балки с шагом 304,8 мм, а также из стальных листов толщиной 6 мм, соединяющих их. Трубы являются частью испарительного контура циркуляции котла, через них подводится вода в распределительный коллектор заднего экрана.

Первичный воздух вводится в конец воздушных балок со стороны заднего экрана и через дутьевые сопла, установленные на балки, в топку. Неподвижный песок, располагающийся ниже сопел первичного воздуха, защищает балки от эрозии.

Под решеткой кипящего слоя предусмотрены четыре воронки, которые образуют газоплотную подовую конструкцию. Неизолированные воронки снабжены трубами для отвода крупной фракции отработанного материала слоя. В процессе работы котла периодически производится удаление балласта, состоящего из шлака и донной золы, накапливающихся в нижней части слоя в процессе сжигания, а также удаление части материала слоя при существенных отклонениях температуры в отдельных зонах слоя.

Образцы осадка сточных вод были отобраны с узла приема осадка сточных вод производства биологической очистки, образцы кородревесных отходов были отобраны с конвейера, подающего кородревесные отходы в топливный бункер котлоагрегата E-75-3,9-440 ДФТ до их смешивания с осадком сточных вод. Летучая зола с электрофилтра была отобрана при ее поступлении в бункер золы в период, когда сажеобдувка котлоагрегата не проводилась.

Донная зола (рис. 1) была отобрана во время ее поступления с транспортера в передвижной контейнер отработанного песка в период дренажа нижней части кипящего слоя.

Агломераты (рис. 2) были отобраны из верхней части кипящего слоя в период расшлаковки котлоагрегата. Отбор первичных проб, формирование объединенных проб, их сокращение, измельчение и деление выполнялись в полном соответствии с действующими ГОСТами (ГОСТ 33563-2015 (EN 14778:2011) и ГОСТ 33255-2015).

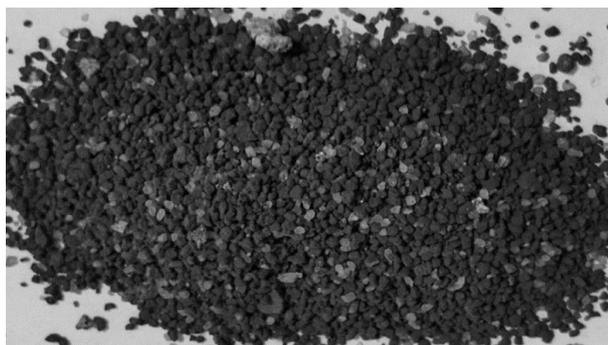


Рис. 1. Образец донной золы котлоагрегата Е-75-3,9-440 ДФТ

Элементный анализ проб был проведен методом рентгенофлуоресцентной спектроскопии на спектрометре EDX-8000. Метод идентифи-

цирует металлы и элементы объекта путем детектирования их энергетических сигнатур. Содержание водорода, азота и углерода определено с помощью анализатора EuroVector EA-3000.

Визуальный осмотр проб показывает, что агломераты имеют полую структуру с большими неровностями поверхности. Структура, размеры и форма агломератов сильно различаются.

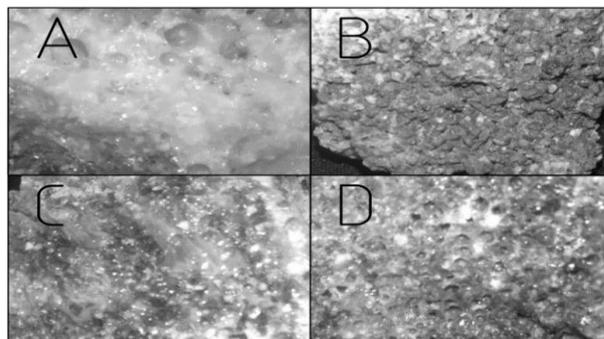


Рис. 2. Образцы агломерата котлоагрегата Е-75-3,9-440 ДФТ

В табл. 1 приведен элементный состав двух видов биотоплива, сжигаемых в котлоагрегате с кипящим слоем. Особое внимание было уделено золообразующим элементам, которые способствуют образованию критического количества золы в котлоагрегате, вызывая трудности при его эксплуатации.

Таблица 1. Характеристики топлива и стандартизированные методы анализа биомассы

Показатель топлива	Единицы измерения	КДО	ОСВ	Метод	НД на метод испытания
Влажность	%	53,7	71,12	Высушивание	ГОСТ Р 54186-2010
Зольность	%	3,9	30,00	Сжигание в муфельной печи	ГОСТ 32988-2014
Высшая теплота сгорания	кДж/кг	20393	14922	Сжигание в калориметрической бомбе	ГОСТ 33106-2014
Низшая теплота сгорания	кДж/кг	7825	2546		
Элементарный состав сухой массы топлива					
С	%	48,5	35,6	Элементный анализ	ГОСТ 32985-2014
Н	%	8,0	6,1		
N	%	2,1	2,4		
O	%	39,8	50,5		
S	%	0,046	0,830	Рентгенофлуоресцентная спектроскопия	ГОСТ 33256-2015 ГОСТ Р 55879 — 2013
Cl	%	0,130	0,200		
Cu	%	0,003	0,004		
Ti	%	0,004	0,017		
V	%	0,001	0,004		
Cr	%	0,001	0,002		
Mn	%	0,047	0,080		
Ni	%	0,001	0,002		
Zn	%	0,014	0,031		
Sr	%	0,001	0,011		
Al	%	0,038	0,508		
P	%	0,043	0,245		
Fe	%	0,035	0,256		
Mg	%	0,084	0,154		
Si	%	0,078	0,661		
K	%	0,177	0,101		
Ca	%	0,698	2,170		
Na	%	0,210	0,260		

Результаты исследования. Анализ элементного состава двух видов биотоплива (табл. 1) показывает, что Ca, K, Na, Si и Mg являются преобладающими элементами в золе кодревесных отходов и содержат более 77 % основных золообразующих элементов. В пробе осадка сточных вод обнаружено высокое содержание Ca, Si и Al. Образец осадка сточных вод

отличается повышенным содержанием щелочноземельных элементов Ca и Mg. Щелочные металлы K и Na, являющиеся главными катализаторами агломерации кипящего слоя, присутствуют в обоих образцах.

Результаты рентгенофлуоресцентного анализа образцов агломерата и золы представлены в табл. 2.

Таблица 2. Рентгенофлуоресцентный анализ образцов агломерата, летучей золы и донной золы

Компонент	Единицы измерения	Агломераты (рис. 2)				Летучая зола	Донная зола
		образец А	образец В	образец С	образец D		
Al ₂ O ₃	%	2,71	4,27	4,62	5,03	7,90	1,91
P ₂ O ₅	%	–	0,261	0,373	0,638	5,13	–
Fe ₂ O ₃	%	0,657	1,20	1,37	1,48	2,10	0,396
K ₂ O	%	6,61	6,17	6,44	6,88	3,65	5,26
CaO	%	15,5	17,2	18,0	19,3	37,1	13,7
CuO	%	0,016	0,021	0,024	0,025	0,023	0,014
ZnO	%	0,375	0,280	0,265	0,278	0,42	0,258
Na ₂ O	%	1,72	1,42	1,61	1,65	1,35	1,57
MgO	%	0,849	1,30	1,51	1,65	3,95	1,06
SiO ₂	%	65,9	62,4	55,2	58,2	4,74	74,4
TiO ₂	%	0,535	0,503	0,444	0,462	0,181	0,057
Cr ₂ O ₃	%	0,020	0,020	0,019	0,021	0,016	0,021
MnO	%	0,341	0,619	0,728	0,788	1,63	0,271
NiO	%	0,004	0,007	0,006	0,006	0,028	0,002
SrO	%	0,062	0,060	0,061	0,064	0,122	0,053
Rb ₂ O	%	0,011	0,013	0,015	0,016	0,009	0,008
ZrO ₂	%	0,003	0,006	0,007	0,009	–	–
V ₂ O ₃	%	–	–	–	–	–	0,036
BaO	%	0,211	0,171	0,156	0,158	0,36	0,176
Br	%	–	–	–	–	0,007	–
Cl	%	–	–	–	–	–	0,263
SO ₃	%	–	–	–	–	10,1	0,568
O	%	1,23	0,555	6,89	0,993	12,3	–
N	%	1,06	0,848	0,396	0,324	1,72	< 0,1
C	%	1,98	2,48	1,78	1,96	6,87	< 0,1
H	%	0,168	0,125	0,101	0,107	0,32	< 0,1

Агломераты образца А имеют наиболее пористую и хрупкую структуру относительно остальных образцов. Главным отличием образца А является светлый оттенок и отсутствие оксида фосфора, также образец отличается высоким содержанием кварцевого песка и низким, относительно остальных образцов, содержанием оксида кальция. Агломерат образца А интересен отсутствием фосфора и повышенной хрупкостью, что можно объяснить отсутствием фосфата в соединениях данного образца и, как следствие, меньшей предрасположенностью к спеканию. Это объясняется тем, что на ранних стадиях сжигания некоторые соединения фосфора являются высоколетучими и могут улетучиваться из слоя [17].

Агломераты образца В характеризуются частицами песка, покрытыми золой, которые плотно прилегают друг к другу. Эти агломераты имеют менее пористую структуру по сравнению с другими агломератами, которые имеют более высокую степень прилипания золы и плавления на поверхности частиц песка.

Агломераты образцов С и D имеют самую высокую твердость, отличаясь самым низким содержанием кварцевого песка и большим количеством оксидов фосфора, алюминия, кальция, железа и марганца. В образце агломерата D соединения щелочноземельных металлов являются наиболее распространенными. Анализ образцов показал, что наиболее твердые образцы С и D обладали самым высоким содержанием оксидов кальция и магния, при этом образец D

отличался самым высоким содержанием щелочных элементов.

Группа щелочных металлов К, Na занимает второе место после щелочноземельных элементов Са и Mg по концентрации во всех образцах агломерата и в донной золе. После первоначального образования силикатов К и Na, которые плавятся при относительно низких температурах, эти соединения вступают в реакцию с Са и Mg (растворение и осаждение), с которыми они имеют большое термодинамическое родство [18]. Происхождение Са-(Mg)-силикатов может варьироваться (в основном вторичного происхождения с различными путями образования). По этой причине присутствие данных соединений в таких концентрациях может быть характерным для спекания смешанных топлив, таких как осадок сточных вод и кородревесные отходы [19, 20].

Анализ донной золы показал, что около 75 % кипящего слоя составляет кварцевый песок и 25 % процентов слоя заменила зола, состоящая преимущественно из оксидов кальция, калия, алюминия и натрия. Доля щелочных элементов в донной золе составляет 6,838 %, что говорит о высоком риске агломерации кипящего слоя.

Результаты анализа летучей золы показывают, что щелочноземельная группа (Са, Mg, Ва, Sr) является наиболее распространенной, составляя более 40 % от общей массы золы. Также было обнаружено высокое содержание фосфора в золе. Содержание серы в золе указывает на механический недожог топлива. Анализ также показал, что состав золы сильно отличается от проектного показателя. Доля щелочных элементов в летучей золе по проекту – 12,8 %, в исследуемом образце золы доля щелочных элементов составила примерно 5 %, что говорит о том, что большая часть щелочи оседает в слое, ускоряя процесс агломерации и сокращая срок его работы.

Для прогнозирования процессов агломерации, засорения и зашлаковывания обычно используются несколько показателей, таких как отношение щелочей к кислотам (В/А), индекс засорения (Fi), индекс шлакообразования (Si), щелочной индекс (Al), индекс агломерации слоя (BAI), отношение S/Cl. Важно упомянуть, что эти показатели были первоначально разработаны для угля. Для биомассы их применимость, в отличие от угольного топлива, может быть ограничена из-за различного неорганического состава, способа появления неорганических соединений, химического состава при горении и исключения нескольких проблемных элементов из индексов [21].

Образование агломератов приводит к увеличению пустоты в локальном слое и последующему снижению сопротивления течению жидкости через слой. Это часто связано с возникновением «горячих точек» из-за сочетания временных колебаний подачи топлива и интенсивного сжигания его остатков и приводит к значительно

более высокой локальной температуре по сравнению с заданной рабочей 770–830 °С и последующему интенсивному плавлению золы и образованию крупных агломератов. Это может привести к временному образованию газовых каналов и локальным нарушениям процесса псевдоожижения. Ограниченный поток жидкости вызывает нарушение слоя с воздушными каналами и деожожение зон в слое. Эти зоны создают случайно сформированные «горячие точки», что ведет к неравномерному распределению температуры, которое распознается как большие колебания в профилях температуры и давления слоя. Наличие полного деожожения обнаруживается как внезапное повышение температуры слоя и снижение давления в слое [22].

Химический состав золы был проанализирован с помощью показателей прогнозирования осаждения, а именно: отношения основания к кислоте ($R_{b/a}$); общего содержания щелочи (T_A); показателей засорения (F_u) и вязкости при шлакообразовании (S_R), которые были определены по следующим уравнениям [23]:

$$R_{b/a} = \frac{\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{CaO} + \text{MgO} + \text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}}{\text{SiO}_2 + \text{TiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3};$$

$$T_A = \text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O};$$

$$F_u = R_{b/a}(\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O});$$

$$S_R = \frac{\text{SiO}_2}{\text{SiO}_2 + \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{CaO} + \text{MgO}} 100\%.$$

Индекс $R_{b/a} < 0,5$ означает низкое, а $R_{b/a} > 1$ – высокое отложение золы на поверхностях, подверженных воздействию продуктов сгорания; значения между 0,5 и 1 соответствуют среднему отложению золы. Значения T_A указывают на степень осаждения золы: $T_A < 0,3$ – низкая степень осаждения; $0,3 \leq T_A \leq 0,4$ – средняя; $T_A > 0,4$ – высокая. При засорении $F_u < 0,6$ отложение золы низкое; при $0,6 \leq F_u \leq 40$ – высокое; при $F_u > 40$ – чрезвычайно высокое. Индекс вязкости при шлакообразовании $S_R > 78$ соответствует низкой степени отложения золы; $66,1 \leq S_R \leq 78$ – средней, а $S_R < 66,1$ – высокой [23]. Результаты расчетов индексов шлакования представлены в табл. 3.

Таблица 3. Показатели прогнозирования осаждения

$R_{b/a}$	T_A	F_u	S_R
3,755	5,0	18,775	9,897

Анализ полученных результатов показывает, что явления шлакования и агломерации будут происходить в кипящем слое, где сжигаются исследуемые виды биомассы.

Чтобы предотвратить эти явления (агломерация и зашлакованность), было предложено [18] использовать добавки (например, оксид алюминия, оксид кальция, оксид магния, доломит и каолин), которые способствуют повыше-

нию температуры размягчения золы выше рабочих температур, используемых в кипящем слое. Также рекомендуется увеличить расход дренажа кипящего слоя, чтобы снизить критическое содержание щелочных элементов в материале слоя, при этом контролировать температуру по всему профилю слоя и производить слив материала с наиболее проблемных участков. Снижение доли осадка вод в сжигаемой смеси также окажет положительный эффект на работу кипящего слоя из-за снижения зольности сжигаемой смеси. Замена кварцевого песка на альтернативный материал слоя с низким содержанием кремния может снизить скорость агломерации и увеличить срок эксплуатации слоя, так как щелочные элементы калий и натрий в первую очередь вступают в реакцию с оксидом кремния, образуя легкоплавкие эвтектики [19, 20].

Выводы. Анализ процесса агломерации котлоагрегата с кипящим слоем Е-75-3.9-440 ДФТ, сжигающего топливо из биомассы двух видов, типичных для целлюлозно-бумажного производства, а также рентгенофлуоресцентный анализ образцов кородеревесных отходов показали, что основными золообразующими и шлакообразующими элементами являются кальций, калий, натрий, кремний и магний. Анализ осадка сточных вод показал высокую зольность образца, присутствие в нем большого количества тяжелых элементов: основными золообразующими и шлакообразующими элементами в осадке сточных вод являются кальций, кремний и алюминий. Результаты анализа образцов агломерата показали значительные различия фракций в соединениях, найденных в агломерированных частях слоя. Образец с большим содержанием кварцевого песка имел самую хрупкую структуру, при этом наиболее твердый образец агломерата отличался самым высоким содержанием щелочной и щелочноземельной группы элементов. Анализ донной золы показал, что 25 % материала слоя заменила зола, состоящая преимущественно из оксидов кальция, калия, алюминия и натрия. Доля щелочных элементов в донной золе составила 6,838 %, что говорит о высоком риске агломерации кипящего слоя. В летучей золе большую часть составили оксид кальция и триоксид серы.

Список литературы

1. **Study** of biomass gasification in an industrial-scale dual circulating fluidized bed (DCFB) using the Eulerian-Lagrangian method / J. Yu, S. Wang, K. Luo, et al. // *Particuology*. – 2023. – Vol. 83. – P. 156–168.
2. **Recent** development of biomass gasification for H₂ rich gas production / H. Song, G. Yang, P. Xue, et al. // *Applications in Energy and Combustion Science*. – 2022. – Vol. 10. – P. 100059.
3. **Contemporary** issues in thermal gasification of biomass and its application to electricity and fuel production / L. Wang, C.L. Weller, D.D. Jones, M.A. Hanna // *Biomass Bioenergy*. – 2008. – Vol. 32. – P. 57381.

4. **Big** problem, little answer: overcoming bed agglomeration and reactor slagging during the gasification of barley straw under continuous operation / H. Alabdralameer, T. Pikkarainer, M. Taylor, V. Skoulou // *Sustain Energy Fuels*. – 2020. – Vol. 4. – P. 376472.

5. **Basu P.** Biomass gasification, pyrolysis and torrefaction, second edition. – UK: Academic Press, 2013.

6. **Bed** particle agglomeration and defluidization in the rubber wood and coir-fired fluidized beds / P. Chaivatamaset, S. Tia, W. Methaviriyasilp, W. Pumiampran // *Waste Biomass Valorization*. – 2019. – Vol. 10. – P. 345770.

7. **Рябов Г.А., Литун Д.С.** Агломерация при сжигании и газификации топлив в кипящем слое // *Теплоэнергетика*. – 2019. – № 9. – С. 42–59.

8. **Experimental** study and SEM-EDS analysis of agglomerates from gasification of biomass in fluidized beds / N.C.I.S. Furuvik, L. Wang, R. Jaiswal, et al. // *Energy*. – 2022. – Vol. 252. – P. 124034.

9. **Royo J., Canalis P., & Quintana D.** Chemical study of bottom ash sintering in combustion of pelletized residual agricultural biomass // *Fuel*. – 2022. – Vol. 310. – P. 122145.

10. **Characterization** of ashes produced from different biomass fuels used in combustion systems in a pulp and paper industry towards its recycling / M.N. Capela, D.M. Tobaldi, M.P. Seabra, et al. // *Biomass and Bioenergy*. – 2022. – Vol. 166. – P. 106598.

11. **Agglomeration** in fluidized bed: Bibliometric analysis, a review, and future perspectives / R.F. Nascimento, M.F. Ávila, O.P. Taranto, L.E. Kurozawa // *Powder Technology*. – 2022. – Vol. 406. – P. 117597.

12. **Bench-scale** bubbling fluidized bed systems around the world – Bed agglomeration and collapse: A comprehensive review / F.R.M. Nascimento, A.M. González, E.E. Silva Lora, et al. // *International Journal of Hydrogen Energy*. – 2021. – Vol. 46(36). – P. 18740–18766.

13. **Kim J.-W., Jeong Y.-S., Kim J.-S.** Bubbling fluidized bed biomass gasification using a two-stage process at 600 °C: A way to avoid bed agglomeration // *Energy*. – 2022. – Vol. 250. – P. 123882.

14. **Mitigating** bed agglomeration in a fluidized bed gasifier operating on rice straw / J. Nisamaneenate, D. Atong, A. Seemen, V. Sricharoenchaikul // *Energy Reports*. – 2020. – Vol. 6. – P. 275–285.

15. **Thermodynamic** equilibrium prediction of bed agglomeration tendency in dual fluidized-bed gasification of forest residues / F. Moradian, P.A. Tchoffor, K.O. Davidsson, et al. // *Fuel Processing Technology*. – 2016. – Vol. 154. – P. 82–90.

16. **The increase** of silver grass ash melting temperature using additives / J. Jnadacka, T. Ochodek, M. Malcho, et al. // *Int J Renew Energy Resour*. – 2015. – Vol. 5(1).

17. **Alkali** metals association in biomass and their impact on ash melting behavior / A. Mlonka-Medrała, A. Magdziarz, M. Gajek, et al. // *Fuel*. – 2020. – Vol. 261. – P. 116421.

18. **Morris J.D., Daood S.S., Nimmo W.** The use of kaolin and dolomite bed additives as an agglomeration mitigation method for wheat straw and miscanthus biomass fuels in a pilot-scale fluidized bed combustor // *Renewable Energy*. – 2022. – Vol. 196. – P. 749–762.

19. **CFD-DEM** simulation of distribution and agglomeration characteristics of bendable chain-like biomass particles in a fluidized bed reactor / C. Gu, H. Zhao, B. Xu, et al. // *Fuel*. – 2023. – Vol. 340. – P. 127570.

20. Gao W., Zhang M., Wu H. Bed agglomeration during fast pyrolysis of bio-oil derived fuels in a fluidized-bed reactor // *Fuel*. – 2022. – Vol. 328. – P. 125359.

21. Singhal A., Konttinen J., Joronen T. Effect of different washing parameters on the fuel properties and elemental composition of wheat straw in water-washing pre-treatment. Part 1: Effect of washing duration and biomass size // *Fuel*. – 2021. – Vol. 292. – P. 120206.

22. **Characteristics** of distinct ash flows in a biomass thermal power plant with bubbling fluidised bed combustor / L.A.C. Tarelho, E.R. Teixeira, D.F.R. Silva, et al. // *Energy*. – 2015. – Vol. 90. – P. 387–402.

23. **Study** of biomass combustion wastes / R. García, C. Pizarro, A. Álvarez, et al. // *Fuel*. – 2015. – Vol. 148. – P. 152–159.

References

1. Yu, J., Wang, S., Luo, K., Li, D., Fan, J. Study of biomass gasification in an industrial-scale dual circulating fluidized bed (DCFB) using the Eulerian-Lagrangian method. *Particuology*, 2023, vol. 83, pp. 156–168.

2. Song, H., Yang, G., Xue, P., Li, Y., Zou, J., Wang, S., Yang, H., Chen, H. Recent development of biomass gasification for H₂ rich gas production. *Applications in Energy and Combustion Science*, 2022, vol. 10, p. 100059.

3. 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. *Bio-mass Bioenergy*, 2008, vol. 32, p. 57381.

4. Alabdralameer, H., Pikkariiner, T., Taylor, M., Skoulou, V. Big problem, little answer: overcoming bed agglomeration and reactor slagging during the gasification of barley straw under continuous operation. *Sustain Energy Fuels*, 2020, vol. 4, p. 376472.

5. Basu, P. Biomass gasification, pyrolysis and torrefaction, second edition. UK: Academic Press, 2013.

6. Chaivatamaset, P., Tia, S., Methaviriyasilp, W., Pumisampran, W. Bed particle agglomeration and deflu-idization in the rubber wood and coir-fired fluidized beds. *Waste Biomass Valorization*, 2019, vol. 10, p. 345770.

7. Ryabov, G.A., Litun, D.S. Agglomeration during combustion and gasification of fuels in a fluidized bed. *Thermal Engineering*, 2019, no. 9, pp. 42–59.

8. Furuviik, N.C.I.S., Wang, L., Jaiswal, R., Thapa, R., Eikeland, M.S., Moldestad, B.M.E. Experimental study and SEM-EDS analysis of agglomerates from gasification of biomass in fluidized beds. *Energy*, 2022, vol. 252, p. 124034.

9. Royo, J., Canalís, P., Quintana, D. Chemical study of bottom ash sintering in combustion of pelletized residual agricultural biomass. *Fuel*, 2022, vol. 310, p. 122145.

10. Capela, M.N., Tobaldi, D.M., Seabra, M.P., Tarelho, L.A.C., Labrincha, J.A. Characterization of ashes produced from different biomass fuels used in combustion systems in a pulp and paper industry towards its recycling. *Biomass and Bioenergy*, 2022, vol. 166, p. 106598.

11. Nascimento, R.F., Ávila, M.F., Taranto, O.P., Kurozawa, L.E. Agglomeration in fluidized bed: Bibliometric analysis, a review, and future perspectives. *Pow-der Technology*, 2022, vol. 406, p. 117597.

12. Nascimento, F.R.M., González, A.M., Silva Lora, E.E., Ratner, A., Escobar Palacio, J.C., Reinaldo, R. Bench-scale bubbling fluidized bed systems around the world – Bed agglomeration and collapse: A comprehensive review. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2021, vol. 46(36), pp. 18740–18766.

13. Kim, J.-W., Jeong, Y.-S., Kim, J.-S. Bubbling fluidized bed biomass gasification using a two-stage process at 600 °C: A way to avoid bed agglomeration. *Energy*, 2022, vol. 250, p. 123882.

14. Nisamaneenate, J., Atong, D., Seemen, A., Sricharoenchaikul, V. Mitigating bed agglomeration in a fluidized bed gasifier operating on rice straw. *Energy Reports*, 2020, vol. 6, pp. 275–285.

15. Moradian, F., Tchhoffor, P.A., Davidsson, K.O., Pettersson, A., Backman, R. Thermodynamic equilibrium prediction of bed agglomeration tendency in dual fluid-ized-bed gasification of forest residues. *Fuel Processing Technology*, 2016, vol. 154, pp. 82–90.

16. Jnadacka, J., Ochodek, T., Malcho, M., Kolon-icny, J., Holubcik, M. The increase of silver grass ash melting temperature using additives. *Int J Renew Energy Resour*, 2015, vol. 5(1).

17. Mlonka-Medrala, A., Magdziarz, A., Gajek, M., Nowinska, K., Nowak, W. Alkali metals association in biomass and their impact on ash melting behaviour. *Fuel*, 2020, vol. 261, p. 116421.

18. Morris, J.D., Daood, S.S., Nimmo, W. The use of kaolin and dolomite bed additives as an agglomeration mitigation method for wheat straw and miscanthus biomass fuels in a pilot-scale fluidized bed combustor. *Renewable Energy*, 2022, vol. 196, pp. 749–762.

19. Gu, C., Zhao, H., Xu, B., Yang, J., Zhang, J., Du, M., Liu, Y., Tikhankin, D., Yuan, Z. CFD-DEM simulation of distribution and agglomeration characteristics of bendable chain-like biomass particles in a fluidized bed reactor. *Fuel*, 2023, vol. 340, p. 127570.

20. Gao, W., Zhang, M., Wu, H. Bed agglomeration during fast pyrolysis of bio-oil derived fuels in a fluid-ized-bed reactor. *Fuel*, 2022, vol. 328, p. 125359.

21. Singhal, A., Konttinen, J., Joronen, T. Effect of different washing parameters on the fuel properties and elemental composition of wheat straw in water-washing pre-treatment. Part 1: Effect of washing duration and biomass size. *Fuel*, 2021, vol. 292, p. 120206.

22. Tarelho, L.A.C., Teixeira, E.R., Silva, D.F.R., Modolo, R.C.E., Labrincha, J.A., Rocha, F. Characteristics of distinct ash flows in a biomass thermal power plant with bubbling fluidised bed combustor. *Energy*, 2015, vol. 90, pp. 387–402.

23. García, R., Pizarro, C., Álvarez, A., Lavín, A.G., Bueno, J.L. Study of biomass combustion wastes. *Fuel*, 2015, vol. 148, pp. 152–159.