



**ОБОРУДОВАНИЕ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКИ
И ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ –
КОРРОЗИЯ И ЗАЩИТА**

Тип статьи: научная, оригинальная

**THERMAL POWER AND HEAT
SUPPLY EQUIPMENT –
CORROSION AND PROTECTION**

Articale type: original

<https://doi.org/10.31615/j.corros.prot.2024.113.3-3>

**О технологии повышения эффективности и надежности котлов, сжигающих
биоотходы в кипящем слое инертного материала**

О.Ю. Милованов, Д.В. Климов, С.Н. Кузьмин✉, С.В. Григорьев, К.И. Милованов

Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
РФ, 111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, д. 14, стр. 1

e-mail: tregulyaj@mail.ru

Аннотация. Использование биомассы (биоотходов) в качестве возобновляемого источника энергии, представляет большой интерес с точки зрения экологии и защиты окружающей среды. Однако при сжигании биомассы в топках с кипящим слоем наблюдается ряд проблем: коррозия конвективных поверхностей нагрева котлов, агломерация частиц инертного материала и золы биомассы, дефлюидизация и др.

Рассмотрены характерные проблемы сжигания различных отходов растениеводства и, в частности, лузги подсолнечника, так как этот вид биоотходов очень распространен в России.

Определены пути решения проблемы, позволяющие уменьшить риск коррозионных разрушений поверхностей нагрева котлов, улучшить топливные и эксплуатационные характеристики биомассы. К ним относятся предварительная промывка биомассы горячей водой, торрефикация, рациональный выбор материалов кипящего слоя и ряд других.

Ключевые слова: биоотходы, котлы, сжигание, инертный кипящий слой, особенности, коррозия поверхностей нагрева, предотвращение

Для цитирования: Милованов О.Ю., Климов Д.В., Кузьмин С.Н., Григорьев С.В., Милованов К.И. О технологии повышения эффективности и надежности котлов, сжигающих биоотходы в кипящем слое инертного материала // Практика противокоррозионной защиты. – 2024. – Т. 29, № 3. – С. 32-40. <https://doi.org/10.31615/j.corros.prot.2024.113.3-3>

Статья получена 01.02.2024. Принята к публикации 06.08.2024. Опубликовано 01.09.2024.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (Соглашение № 075-15-2024-628 от 12 июля 2024 г. Наименование проекта: «Разработка технологии повышения эффективности и надежности котлов, сжигающих биоотходы в кипящем слое инертного материала». Главной исполнитель – федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ»).

**On the Technology of Increasing the Efficiency and Reliability of Boilers
Burning Biowaste in a Fluidized Bed of Inert Material**

**Oleg Yu. Milovanov, Dmitry V. Klimov, Sergey N. Kuzmin✉,
Sergey V. Grigoriev, Kirill I. Milovanov**

National Research University «Moscow Power Engineering Institute»,
bld. 1, 14, Krasnokazarmennaya st., Moscow, 111250, Russian Federation

e-mail:tregulyaj@mail.ru

Abstract. The use of biomass (biowaste) as a renewable energy source is of great interest from the point of view of ecology and environmental protection. However, when burning biomass in fluidized bed furnaces, a number of problems are observed: corrosion of convective heating surfaces of boilers, agglomeration of particles of inert material and biomass ash, defluidization, etc.

The article considers the characteristic problems of burning various plant wastes and, in particular, sunflower husks, since this type of biowaste is very common in Russia.

The ways of solving problems that reduce the risk of corrosion damage to boiler heating surfaces, improve the fuel and operational characteristics of biomass are determined. These include preliminary washing of biomass with hot water, torrefaction, rational selection of fluidized bed materials, and a number of others.



Keywords: biowaste, boilers, combustion, inert fluidized bed, features, corrosion of heating surfaces, prevention
For citation: Milovanov, O. Yu., Klimov, D. V., Kuzmin, S. N., Grigoriev, S. V., & Milovanov, K. I. (2024). On the Technology of Increasing the Efficiency and Reliability of Boilers Burning Biowaste in a Fluidized Bed of Inert Material. *Theory and Practice of Corrosion Protection*, 29(3), 32-40. <https://doi.org/10.31615/j.corros.prot.2024.113.3-3>

Received February 01, 2024. Accepted for publication August 06, 2024. Published September 01, 2024.

Acknowledgments. The work was carried out with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Agreement No. 075-15-2024-628 dated July 12, 2024. Project name: «Development of a technology for increasing the efficiency and reliability of boilers burning biowaste in a fluidized bed of inert material.» The main contractor is the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «National Research University «Moscow Power Engineering Institute»).

Введение

В 21 веке к ресурсам биомассы, как к возобновляемому источнику энергии, проявляется большой интерес, т.к. ее использование не приводит к повышению концентрации двуокси углерода в атмосфере.

При этом технология сжигания биомассы в топках с кипящим слоем является наиболее подходящей для сжигания биомассы, т.к. в кипящем слое можно сжигать топливо с изменяющимся фракционным составом, влажностью и теплотой сгорания при низком уровне выбросов загрязняющих веществ в атмосферу.

Однако при сжигании биомассы в топах с кипящим слоем часто наблюдается агломерация частиц инертного материала и золы биомассы, приводящая к дефлюидизации и остановке котлов [1-6]. Дефлюидизация наблюдалась даже при температуре кипящего слоя ниже 650 °С [7]. Особенно большие проблемы возникали при сжигании отходов растениеводства, т.к. эта биомасса обычно содержит повышенное содержание щелочи в золе [4]. К таким отходам относятся лузга подсолнечника, костра льна, солома озимой пшеницы, коры древесные отходы, использование которых в качестве топлива представляет большой интерес для распределенной энергетики России и республики Беларусь.

Подсолнечник (*Helianthus annuus*) – травянистая культура, которая культивируется во всем мире из-за относительно короткого цикла роста, высокой устойчивости к засухе и адаптации к различным почвенным условиям [8]. Ведущими странами-производителями подсолнечника и продуктов его переработки являются Российская Федерация, Украина и Аргентина, которые производят

примерно половину мирового производства семян подсолнечника. Лузга подсолнечника составляет 45...60% [8] массы семян в зависимости от сорта подсолнечника и отделяется от ядра в процессе измельчения, чтобы обеспечить лучшее прессование семян и более высокий выход масла. Таким образом, лузга семян подсолнечника является побочным продуктом производства подсолнечного масла. Влажность лузги подсолнечника, как правило, оказывается ниже 10%, зольность лузги лежит в пределах 1,98...2,22% и оказывается существенно ниже, чем содержание золы в пеллетах из скорлупы миндаля (3,35 %), пеллетах из отходов оливок (4,79 %), пеллетах из древесины дуба (3,32 %) [8]. По теплоте сгорания (17,844 МДж/кг) лузга подсолнечника уступает сосновым пеллетам и скорлупе миндаля, но очень близка к теплоте сгорания косточек оливок [8]. Технология производства подсолнечного масла и объемы перерабатываемого подсолнечника делают подсолнечную лузгу одним из самых дешевых источников тепловой энергии: стоимость 1 кВт-час энергии, произведенной за счет сжигания лузги оказывается в 3,7 ниже, чем стоимость 1 кВт-час энергии, произведенного за счет сжигания жидкого топлива, в 3 раза ниже, чем стоимость 1 кВт-час энергии, произведенного за счет сжигания природного газа, в 2,3 раза ниже, чем стоимость 1 кВт-часа энергии, произведенного за счет сжигания древесных пеллет и в 1,5 раза ниже, чем стоимость 1 кВт-часа энергии, произведенного за счет сжигания древесной щепы [8].

Использование в качестве топлива лузги подсолнечника очень актуально для России, т.к. этот вид биоотходов может использоваться не только в котельных предприя-

тий по переработке подсолнечника, но и на крупных электростанциях при совместном сжигании лузги подсолнечника и угля.

К другим видам биомассы, которые часто предлагается использовать в качестве топлива, следует отнести коровьи древесные отходы, костру льна, торф и т.п.

К сожалению, многие из этих биоотходов проблематично использовать в качестве топлива. Так, лузга подсолнечника имеет золу, которая содержит щелочные (*K, Na*) и щелочноземельные (*Ca, Mg*) металлы, а также *Si, S, Al, P* and *Cl* [9]. Такой состав золы лузги порождает такие проблемы, как быстрый рост отложений золы и коррозия конвективных поверхностей нагрева котлов, а также агломерацию частиц инертного материала при сжигании лузги в кипящем слое [9].

Агломерация частиц кипящего слоя влияет на производительность топki котла. Дефлюидизация наблюдается, когда частицы слоя больше не ведут себя как жидкость в результате увеличения среднего размера частиц слоя, вызванного агломерацией [10].

В последние десятилетия агломерация при сжигании биомассы активно исследуется с целью выявить механизмы агломерации, факторы, влияющие на агломерацию, а также контрмеры для ее снижения [4, 11, 12, 13].

«Агломерация, вызванная расплавлением», означает, что частицы слоя напрямую связываются расплавленной золой [14]. Связующее, например, соли щелочных металлов, уже является липким (то есть расплавленным) еще до того, как оно отложится на частицах слоя. Это связующее имеет достаточное поверхностное натяжение для смачивания частиц слоя и достаточно низкую вязкость, чтобы сформировать жидкий мостик между частицами [15]. Агломерация из-за расплавления золы, в основном, вызвана появлением (локальных) пиковых температур, например, «горячих точек», которые выше заданной рабочей температуры кипящего слоя. «Горячая точка», возникающая в результате неравномерной подачи топлива или временной дефлюидизации одного из участков слоя, вызывает локальное повышение температуры, приводящее к плавлению золы [16].

Агломерация, связанная с образованием покрытия на частицах слоя, вызывается

осаждением на этих частицах газообразных неорганических соединений или твердой фазы золы [14]. Агломерация начинается со склеивания частиц с покрытием при достижении толщины покрытия определенной величины или при достижении температуры покрытия определённого значения [14]. Утверждается, что такая агломерация часто наблюдается в условиях длительного времени работы топki с кипящим слоем, а агломераты, образованные по такому механизму, обычно легко дробятся или распадаются, т.е. механическая связь между агломератами очень незначительна [17].

На процесс образования агломератов в кипящем слое влияют вид сжигаемой биомассы, наличие в биомассе различных загрязняющих ее включений, температура кипящего слоя, число псевдоожижения, химический состав инертного материала слоя. Агломерация часто наблюдается при сжигании в псевдоожиженном слое биомассы с использованием кварцевого песка в качестве материала слоя [17] из-за образования легкоплавких соединений в результате взаимодействия золы биомассы и материала слоя на основе SiO_2 [18, 19].

Взаимодействие золы биомассы и материала слоя, содержащего значительное количество SiO_2 , является одной из основных причин возникновения легкоплавких эвтектик. Замена материала слоя на основе SiO_2 альтернативными материалами, т.е. соединениями, содержащими алюминий, кальций, магний и железо, может замедлить тенденцию к агломерации в псевдоожиженном слое.

К таким альтернативным материалам относится оливин ($(MgFe)_2SiO_4$) [20, 21, 22]. Этот материал в качестве наполнителя слоя использовался при сжигании различных видов топлив (отходы оливок, кора, пшеничная солома [20], древесные отходы, биошлам, торф, куриный помет, твердые бытовые отходы [21], смесь осины и ивы [22]). Отмечается, что при сжигании некоторых видов биотоплива в кипящем слое оливина удалось повысить температуру начала дефлюидизации повышается по сравнению со сжиганием в слое кварцевого песка, а в некоторых случаях, например, при сжигании пшеничной соломы, этого эффекта достичь не удалось. Это означает, что необходимы

дополнительные исследования процессов сжигания разных видов биомассы, в том числе лузги подсолнечника, в кипящем слое оливинового песка.

Возможное решение проблемы дефлюидизации при замене кварцевого песка на оливиновый не означает, что будут решены проблемы с образованием отложением золы и коррозией конвективных поверхностей нагрева котлов при сжигании биомассы, зола которой содержит щелочные и щелочноземельные металлы, а также серу и хлор.

Предварительная промывка биомассы горячей водой считается перспективным методом улучшения топливных характеристик биомассы, не требующим использования химических добавок [23, 24]. Процесс промывки водой осуществляется при температуре до 240 °С; продолжительность процесса достигает одного часа [24]. При такой обработке образцов тополя, мискантуса, стеблей кукурузы, проса удалось увеличить теплоту сгорания биотоплива на 1...12% [24]. Отмечается [25], что в результате водной промывки в течение 1 часа при 80 °С значительно снижается содержание в золе химических элементов, вызывающих проблемы при сжигании биотоплива: калия на 93%, натрия на 96%, фосфора на 85% и хлора на 97%.

Недостатком процесса промывки является необходимость использования реакторов, работающих под высоким давлением, а также необходимость сушки биомассы после обработки.

Торрефикация биомассы представляет перспективной технологией с точки зрения повышения теплоты сгорания биомассы, снижения затрат на ее измельчение и удаления таких проблемных элементов, как хлориды щелочных металлов или сернистые соединения [26, 27].

Имеются предварительные результаты исследований, которые показывают, что можно совместить процесс водной промывки биомассы с процессом охлаждения биомассы после торрефикации [28]. Это позволит отказаться от сушки биомассы после водной промывки. Однако такой комбинированный процесс предварительной термохимической обработки биомассы (торрефикация + водная промывка) в достаточной

степени не исследован, также как не исследованы процессы сжигания таким образом обработанной биомассы в кипящем слое.

Высокое содержание щелочи и хлоридов в золе биомассы имеет важное значение при эксплуатации биотопливных котлов и котлов, предназначенных для совместного сжигания. Аэрозоли хлорида или сульфата калия могут образовываться во время горения и конденсироваться на поверхностях нагрева. Эти аэрозоли могут также обволакивать частицы летучей золы и вместе с ними осаждаться на поверхностях, что приводит к образованию смешанных, а порой и слоистых структур шлака. Кроме того, из-за присутствия щелочей температура плавления алюмосиликатной золы углей может снизиться в результате образования эвтектик с низкой температурой плавления [29].

При совместном сжигании биомассы образующиеся хлориды щелочных металлов более коррозионно-опасны, чем их сульфаты, так как имеют значительно более низкие температуры плавления. Следовательно, преобладающими являются механизмы коррозии под отложениями. Из-за коррозии труб пароперегревателя снижается температура пара, а значит, и КПД энергоблока [30, 31]. Считается, что хлориды щелочных металлов, особенно хлорид калия, являются веществами, ответственными за высокие скорости загрязнения и коррозии при сжигании одной биомассы или совместно с углем [32].

Коррозионная стойкость обеспечивается защитным оксидным слоем на поверхности труб. На углеродистых сталях слой оксида железа образуется при высоких температурах и замедляет дальнейшее окисление. На легированных хромом сталях, таких как нержавеющие стали, образовавшийся слой оксида хрома намного более устойчив к коррозии, чем слой оксида железа, и потому коррозионная стойкость более высокая [33]. Однако изготовление котла из нержавеющей стали резко повысит стоимость такого оборудования.

Нанесение высокотемпературных покрытий – альтернативный метод повышения коррозионной стойкости труб без использования высоколегированных материалов. В настоящее время изучаются диффузионные покрытия, выполненные термическим напылением

и наплавкой, для труб, работающих в режиме совместного сжигания. При поддержке различных промышленных партнеров Исследовательский институт DECHEMA (Германия) и международный Институт технологий сжигания и электростанций (IFK) совместно разрабатывают модели определения срока службы для сталей, используемых в качестве материала труб пароперегревателей. Изучаются характеристики биомассы и ее золы, образующейся в результате совместного сжигания, оцениваются диффузионные покрытия, наносимые с помощью суспензии (*Al*, *Cr*, *Si*) на металлические поверхности для защиты их от высокотемпературной коррозии. Авторы [34] определяли эффективность пяти покрытий, выполненных термическим напылением при совместном сжигании нескольких видов топлива в котле с ЦКС на электростанции Alholmens Kraft (Финляндия). Сжигаемая смесь состояла в среднем из 30% торфа, 10% угля, 50% биомассы (лесные остатки, деловая древесина и кора) и 10% строительных древесных отходов. При температуре 550 °С антикоррозионные покрытия котла имели лучшие характеристики по сравнению с ферритной сталью T92. При 750 °С у материала трубки A263 с покрытиями из *NiCr* и *NiCrTi* отмечена самая высокая коррозионная стойкость. Эксперименты показали, что покрытия, выполненные термическим напылением, могут обеспечить хорошую защиту котлов от коррозии на электростанциях, работающих на биомассе и подготовленном из биомассы и отходов топливе.

Также необходимо отметить, что, ввиду большого количества летучих веществ, содержащихся в биомассе, необходимо завершить процесс горения в топке (это особенно важно при сжигании биомассы в котлах, изначально предусмотренных для сжигания углей) и исключить процесс горения биотоплива в трубах конвективной части котла, чтобы предотвратить расплавление золы и образование плотных отложений золы. Это возможно за счет сжигания биомассы в циклонно-слоевой топке [35-38].

Из приведенного анализа следует:

– сжигание биоотходов, в т.ч. отходов сельского хозяйства, лесной, деревообрабатывающей промышленности, позволяет решить экологические проблемы, связанные с утилизацией отходов, и экономиче-

ские проблемы, за счет снижения стоимости вырабатываемой при сжигании тепловой и электрической энергии;

– эффективное сжигание биоотходов возможно в топках с кипящим слоем, адаптированных к сжиганию топлива с переменной влажностью, зольностью и широким фракционным составом, характерном для биоотходов;

– из-за высокого содержания в золе биоотходов щелочных и щелочноземельных элементов надежное и эффективное сжигание биоотходов в кипящем слое фактически невозможно из-за шлакования слоя и дефлюидизации;

– из-за наличия в золе биоотходов соединений хлора сжигание биоотходов может сопровождаться коррозией конвективных поверхностей нагрева котла;

– известны методы решения отдельных проблем, возникающих при сжигании биоотходов (замена кварцевого песка, используемого как инертный материал, на материал, не содержащий соединений кремния, водная промывка биоотходов перед сжиганием, торрефикация биоотходов перед сжиганием, защита конвективных поверхностей нагрева котла с помощью специальных покрытий, сжигание биоотходов в циклонно-слоевой топке для снижения температуры топочных газов на выходе из топки и тем самым предотвращения расплавления отложений золы на конвективных поверхностях нагрева котла) не решают полностью проблему повышения эффективности и надежности биотопливных котлов или обладают низкой энергоэффективностью.

Из приведенного анализа следует, что обеспечение эффективности и надежности биотопливных котлов возможно за счет комплексного решения проблем:

– предотвращения агломерации при сжигании биотоплива в кипящем слое;

– снижения скорости роста отложений золы на конвективных поверхностях нагрева котлов и снижения содержания хлоридов в дымовых газах за счет предварительной торрефикации биомассы [35];

– защита конвективных поверхностей нагрева котлов, в т.ч. пароперегревателей, от коррозии и эрозии с помощью специальных покрытий.

Однако комплексного решения проблемы обеспечения эффективности и надежности биотопливных в известных исследованиях и технических решениях не предложено.

Литература

1. Anicic B., Lin W., Kim Dam-Johansen K.-D., Wu H. Agglomeration mechanism in biomass fluidized bed combustion – Reaction between potassium carbonate and silica sand // Fuel Processing Technology. – 2018, – V. 173. – P. 182-190.
2. Almark M., Hiltunen M. Alternative bed materials for high alkali fuels // Proceedings of FBC2005 18th International Conference on Fluidized Bed Combustion (May 22-25, 2005). – Canada. – Ontario, Toronto.
3. Cammarota A., Chirone R., Scala F. Bed agglomeration during the fluidized bed combustion of olive husk // Proceedings of FBC2005 18th International Conference on Fluidized Bed Combustion (May 22-25, 2005). – Canada. – Ontario, Toronto.
4. Scala F. Particle agglomeration during fluidized bed combustion: Mechanisms, early detection and possible countermeasures // Fuel Processing Technology. – 2018. – V. 171. – P. 31-38.
5. De Geyter S., Ohman M., Bostrom D., Eriksson M., Nordin A. Effects of Non-Quartz Minerals in Natural Bed Sand on Agglomeration Characteristics during Fluidized Bed Combustion of Biomass Fuels // Energy & Fuels. – 2007. – V. 21. – P. 2663-2668.
6. Nuutinen L.H., Tiainen M.S., Virtanen M.E., Enestam S.H., Laitinen R.S. Coating Layers on Bed Particles during Biomass Fuel Combustion in Fluidized-Bed Boilers // Energy & Fuels. – 2004. – V. 18. – P. 127-139.
7. Grubor B.D., Oka S.N., Ilic M.S., Dakic D.V., Arsic B.T., Biomass FBC combustion – bed agglomeration problems // Proc. 13th Int. Conf. on Fluidized Bed Combustion. – ASME. – 1995. – P. 515-522.
8. Perea-Moreno M.-A., Manzano-Agugliaro F., Perea-Moreno A.-J. Sustainable Energy Based on Sunflower Seed Husk Boiler for Residential Buildings // Sustainability. – 2018. – V. 10. – P. 3407.
9. Raclavska H., Juchelkova D., Roubicek V., Matysek D. Energy utilisation of biowaste – Sunflower-seed hulls for co-firing with coal // Fuel Processing Technology. – 2011. – V. 92. – P. 13-20.
10. Lin W., Dam-Johansen K., Frandsen F. Agglomeration in Bio-Fuel Fired Fluidized Bed Combustors // Chem. Eng. J. – 2003. – V. 96, № 1-3. – P. 171-185.
11. Bartels M., Lin W., Nijenhuis J., Kapteijn F., van Ommen, J.R. Agglomeration in Fluidized Beds at High Temperatures: Mechanisms, Detection and Prevention // Prog. Energy Combust. Sci. – 2008. – V. 34, № 5. – P. 633-666.
12. Morris J. D., Sheraz S., Chilton S., Nimmo W. Mechanisms and Mitigation of Agglomeration during Fluidize Bed Combustion of Biomass: A Review. // Fuel. – 2018. – V. 230. – P. 452-473.
13. Mettanant V., Basu P., Butler J. Agglomeration of Biomass Fired Fluidized №Bed Gasifier and Combustor // Can. J. Chem. Eng. – 2009. – V. 87, № 5. – P. 656-684.
14. Visser H. J. M. M., van Lith S. C., Kiel J. H. A. Biomass Ash-Bed Material Interactions Leading to Agglomeration in FBC // J. Energy Resour. Technol. – 2008. – V. 130, № 1. – P. 1-6.
15. Gatternig B., Karl J. Investigations on the Mechanisms of Ash-Induced Agglomeration in Fluidized-Bed Combustion of Biomass // Energy & Fuels. – 2015. – V. 29. – P. 931-941.
16. Olofsson, G. G.; Ye, Z.; Bjerle, I.; Andersson, A. Bed Agglomeration Problems in Fluidized-Bed Biomass Combustion // Ind. Eng. Chem. Res. – 2002. – V. 41, № 12. – P. 2888-2894.
17. Visser H. J. M., Hofmans H., Huijnen H., Kastelein R. Kiel J. H. A. Biomass Ash - Bed Material Interactions Leading to Agglomeration in Fluidised Bed Combustion and Gasification // Prog. Thermochem. Biomass Convers. – 2008. – P. 272-286.
18. Hupa M. Ash-Related Issues in Fluidized-Bed Combustion of Biomasses: Recent Research Highlights // Energy & Fuels. – 2012. – V. 26. – P. 4-14.
19. Ghaly A. E., Ergüdenler A., Laufer E. Study of Agglomeration Characteristics of Silica Sand-Straw Ash Mixtures Using Scanning Electronic Microscopy and Energy Dispersion X-Ray Techniques // Bioresour. Technol. – 1994. – V. 48, № 2. – P. 127-134.
20. De Geyter S., Öhman M., Boström D., Eriksson M., Nordin A. Effects of Non-Quartz Minerals in Natural Bed Sand on



Agglomeration Characteristics during Fluidized Bed Combustion of Biomass Fuels // *Energy & Fuels*. – 2007. – V. 21, № 5. – P. 2663-2668.

21. Nuutinen L. H., Tiainen M. S., Virtanen M. E., Enestam S. H., Laitinen R. S. Coating Layers on Bed Particles during Biomass Fuel Combustion in Fluidized-Bed Boilers // *Energy & Fuels*. – 2004. – V. 18, № 1. – P. 127-139.

22. Almark M., Hiltunen M. Alternative bed materials for high alkali fuels // *Proceedings of FBC2005 18th International Conference on Fluidized Bed Combustion (May 22-25, 2005)*. – Canada. – Ontario, Toronto.

23. Jimenez-Gutierrez J. M., Verlinden R. A. J., van der Meer P. C., van der Wielen L. A. M., Straathof A. J. J. Liquid Hot Water Pretreatment of Lignocellulosic Biomass at Lab and Pilot Scale // *Processes*. – 2021. – V. 9. – P. 1518.

24. Runge T., Pamela Wipperfurth P., Zhang C. Improving biomass combustion quality using a liquid hot water treatment // *Biofuels*. – 2013. – V. 4, № 1. – P. 73-83.

25. Vamvuka D., Zografos D. Predicting the behaviour of ash from agricultural wastes during combustion // *Fuel*. – 2004. – V. 83. – P. 2051-2057.

26. Lebendig F., Funcia I., Pérez-Vega R., Müller M. Investigations on the Effect of Pre-Treatment of Wheat Straw on Ash-Related Issues in Chemical Looping Gasification (CLG) in Comparison with Woody Biomass // *Energies*. – 2022. – V. 15. – P. 3422.

27. Abelha P., Vilela C. M., Nanou P., Carbo M., Janssen A., Leiser S. Combustion improvements of upgraded biomass by washing and torrefaction // *Fuel*. – 2019. – V. 253. – P. 1018-1033.

28. Nebyvaev A., Klimov D., Ryzhenkov A., Brulé M. Preliminary Results of Innovative Two-Stage Torrefaction Technology Applied for Thermochemical Treatment of Sunflower Husk // *Processes*. – 2023. – V. 11. – P. 2486.

29. Рябов Г.А. Совместное сжигание угля и ископаемых топлив – путь к декарбонизации производства тепла и электроэнергии (обзор) // *Теплоэнергетика*. – 2022. – № 6. – С. 1-15.

30. Niu Y., Tan H., Hui S. Ash-related issues during biomass combustion: Alkali-induced slagging, silicate melt-induced slagging (ash fusion), agglomeration, corrosion, ash utilization, and related countermeasures // *Prog. En ergy Combust. Sci.* – 2016. – V. 52. – P. 1-61.

31. Reduction of HCl emissions from combustion of biomass by alkali carbonate sorbents or by thermal pretreatment / X. Ren, E. Rokni, Y. Liu, Y.A. Levendis // *J. Energy Eng.* – 2018. – V. 144, № 4. – P. 04018045.

32. Zimmerling S. VGB. Essen, Germany, personal communication. – July 2020.

33. Зеликов Е.Н., Рябов Г.А., Дик Э.П., Тугов А.Н. Загрязнение и коррозия пароперегревателей котлов на ТЭС, сжигающих твердые бытовые отходы и биомассу // *Теплоэнергетика*. – 2008. – № 11. – С. 73-77.

34. Oksa M., Metsäjoki J., Kärki J. Corrosion testing of thermal spray coatings in a biomass cofiring power plant // *Coatings*. – 2016. – V. 6, № 4. – P. 13.

35. Pitsukha E.A., Buchilko É.K., Teplitskii Y.S. et al. Specific Features of the Combustion Process and Thermal Calculation of Two-Chamber Cyclone-Bed Furnaces // *J. Eng Phys Thermophy.* – 2023. – V. 96. – P. 1875-1883.

36. Pitsukha E.A., Teplitskii Y.S. & Buchilko É.K. Hydrodynamics of a Cyclone Chamber with a Varying Direction of Tangential Blowing // *J. Eng Phys Thermophy.* – 2023. – V. 96. – P. 1290-1303.

37. Teplitskii Y.S., Pitsukha E.A., Roslik A.R. Characteristic Features of the Hydrodynamics and Combustion of Fine Fuel Particles in the Vortex Zone of a Cyclone-Grate-Fired Chamber // *J. Eng Phys Thermophy.* – 2023. – V. 96. – P. 1162-1171.

38. Pitsukha E.A., Buchilko E.K., Teplitskii, Y.S. Cyclone-Bed Furnaces: Experimental Studies and Thermal Design // *Therm. Eng.* – 2020. – V. 67. – P. 374-386.

39. Ren X., Sun R., Chi H.-H, Meng X., Li Y., Levendis Y. Hydrogen chloride emissions from combustion of raw and torrefied biomass // *Fuel*. – 2017. – V. 200. – P. 37-46.

References

1. Anicic, B., Lin, W., Kim, Dam-Johansen K.-D., & Wu, H. (2018). Agglomeration mechanism in biomass fluidized bed combustion – Reaction between potassium carbonate and silica sand, *Fuel Processing Technology*, 173, 182-190.

2. Almark, M., Hiltunen, M. (2005, May 22-25) Alternative bed materials for high alkali fuels. *Proceedings 18th International Conference on Fluidized Bed Combustion, Toronto*,



Ontario, Canada.

3. Cammarota, A., Chirone, R., & Scala, F. (2005, May 22-25). Bed agglomeration during the fluidized bed combustion of olive husk. *Proceedings of FBC2005 18th International Conference on Fluidized Bed Combustion*, Canada, Ontario, Toronto.

4. Scala, F. (2018). Particle agglomeration during fluidized bed combustion: Mechanisms, early detection and possible countermeasures. *Fuel Processing Technology*, 171, 31-38.

5. De Geyter, S., Ohman, M., Bostrom, D., Eriksson, M., & Nordin, A. (2007). Effects of Non-Quartz Minerals in Natural Bed Sand on Agglomeration Characteristics during Fluidized Bed Combustion of Biomass Fuels. *Energy & Fuels*, 21, 2663-2668.

6. Nuutinen, L. H., Tiainen, M. S., Virtanen, M. E., Enestam, S. H., & Laitinen, R. S. (2004). Coating Layers on Bed Particles during Biomass Fuel Combustion in Fluidized-Bed Boilers. *Energy & Fuels*, 18, 127-139.

7. Grubor, B. D., Oka, S. N., Ilic, M. S., Dakic, D. V., & Arsic, B. T. (1995). Biomass FBC combustion – bed agglomeration problems. *Proc. 13th Int. Conf. on Fluidized Bed Combustion*, ASME, 515-522.

8. Perea-Moreno, M.-A., Manzano-Agugliaro, F., & Perea-Moreno A.-J. (2018). Sustainable Energy Based on Sunflower Seed Husk Boiler for Residential Buildings. *Sustainability*, 10, 3407.

9. Raclavska, H., Juchelkova, D., Roubicek, V., & Matysek, D. (2011). Energy utilisation of biowaste – Sunflower-seed hulls for co-firing with coal. *Fuel Processing Technology*, 92, 13-20.

10. Lin, W., Dam-Johansen, K., & Frandsen, F. (2003). Agglomeration in Bio-Fuel Fired Fluidized Bed Combustors. *Chem. Eng. J.* 2003, 96 (1-3), 171-185.

11. Bartels, M., Lin, W., Nijenhuis, J., Kapteijn, F., van Ommen, J. R. (2008). Agglomeration in Fluidized Beds at High Temperatures: Mechanisms, Detection and Prevention. *Prog. Energy Combust. Sci.* 34(5), 633-666.

12. Morris, J. D., Sheraz, S., Chilton, S., & Nimmo, W. (2018). Mechanisms and Mitigation of Agglomeration during Fluidized Bed Combustion of Biomass: A Review. *Fuel*, 230, 452-473.

13. Mettanant, V., Basu, P., & Butler, J. (2009). Agglomeration of Biomass Fired Fluidized Bed Gasifier and Combustor. *Can. J. Chem. Eng.*, 87 (5), 656-684.

14. Visser, H. J. M. M., van Lith, S. C., & Kiel, J. H. A. (2008). Biomass Ash-Bed Material Interactions Leading to Agglomeration in FBC. *J. Energy Resour. Technol.*, 130(1), 1-6.

15. Gatternig, B., Karl, J. (2015). Investigations on the Mechanisms of Ash-Induced Agglomeration in Fluidized-Bed Combustion of Biomass. *Energy & Fuels*, 29, 931-941.

16. Olofsson, G. G., Ye, Z., Bjerle, I., & Andersson, A. (2002). Bed Agglomeration Problems in Fluidized-Bed Biomass Combustion. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 41(12), 2888-2894.

17. Visser, H. J. M., Hofmans, H., Huijnen, H., Kastelein, R., & Kiel, J. H. A. (2008). Biomass Ash - Bed Material Interactions Leading to Agglomeration in Fluidised Bed Combustion and Gasification. *Prog. Thermochem. Biomass Convers.*, 272-286.

18. Hupa, M. (2012). Ash-Related Issues in Fluidized-Bed Combustion of Biomasses: Recent Research Highlights. *Energy & Fuels*, 26, 4-14.

19. Ghaly, A. E., Ergüdenler, A., & Laufer, E. (1994). Study of Agglomeration Characteristics of Silica Sand-Straw Ash Mixtures Using Scanning Electronic Microscopy and Energy Dispersion X-Ray Techniques. *Bioresour. Technol.*, 48(2), 127-134.

20. De Geyter, S., Öhman, M., Boström, D., Eriksson, M., & Nordin, A. (2007). Effects of Non-Quartz Minerals in Natural Bed Sand on Agglomeration Characteristics during Fluidized Bed Combustion of Biomass Fuels. *Energy & Fuels*, 21(5), 2663-2668.

21. Nuutinen, L. H., Tiainen, M. S., Virtanen, M. E., Enestam, S. H., & Laitinen, R. S. (2004). Coating Layers on Bed Particles during Biomass Fuel Combustion in Fluidized-Bed Boilers. *Energy & Fuels*, 18(1), 127-139.

22. Almark, M., Hiltunen, M. (2005, May 22-25). Alternative bed materials for high alkali fuels. *Proceedings of FBC2005 18th International Conference on Fluidized Bed Combustion*, Toronto, Ontario, Canada.

23. Jimenez-Gutierrez, J. M., Verlinden, R. A. J., van der Meer, P. C., van der Wielen, L. A. M., & Straathof, A. J. J. (2021). Liquid Hot Water Pretreatment of Lignocellulosic Biomass at Lab and Pilot Scale. *Processes*, 9, 1518.

24. Runge, T., Pamela Wipperfurth, P., & Zhang, C. (2013). Improving biomass combustion quality using a liquid hot water treatment. *Biofuels*, 4(1), 73-83.



25. Vamvuka, D., Zografos, D. (2004). Predicting the behaviour of ash from agricultural wastes during combustion. *Fuel*, 83, 2051-2057.
26. Lebendig, F., Funcia, I., Pérez-Vega, R., & Müller, M. (2022). Investigations on the Effect of Pre-Treatment of Wheat Straw on Ash-Related Issues in Chemical Looping Gasification (CLG) in Comparison with Woody Biomass. *Energies*, 15, 3422.
27. Abelha, P., Vilela, C. M., Nanou, P., Carbo, M., Janssen, A., & Leiser, S. (2019). Combustion improvements of upgraded biomass by washing and torrefaction. *Fuel*, 253, 1018-1033.
28. Nebyvaev, A., Klimov, D., Ryzhenkov, A., & Brulé, M. (2023). Preliminary Results of Innovative Two-Stage Torrefaction Technology Applied for Thermochemical Treatment of Sunflower Husk. *Processes*, 11, 2486.
29. Ryabov, G. A. (2022). Co-combustion of coal and fossil fuels – a path to decarbonization of heat and electricity production (review). *Thermal Power Engineering*, (6), 1-15.
30. Niu, Y., Tan, H., & Hui, S. (2016). Ash-related issues during biomass combustion: Alkali-induced slagging, silicate melt-induced slagging (ash fusion), agglomeration, corrosion, ash utilization, and related countermeasures. *Prog. Energy Combust. Sci.*, 52, 1-61.
31. Ren, X. E., Rokni, Y., Liu, Y.A. (2018). Levendis Reduction of HCl emissions from combustion of biomass by alkali carbonate sorbents or by thermal pretreatment. *J. Energy Eng.*, 144(4), 04018045.
32. Zimmerling, S. (July, 2020). VGB. Essen, Germany, personal communication.
33. Zelikov, E. N., Ryabov, G. A., Dik, E. P., & Tugov, A. N. (2008). Fouling and corrosion of superheaters of boilers at thermal power plants burning municipal solid waste and biomass. *Thermal Power Engineering*, (11), 73-77. (in Russ.)
34. Oksa, M., Metsäjoki, J., & Kärki, J. (2016). Corrosion testing of thermal spray coatings in a biomass cofiring power plant. *Coatings*, 6(4), 13.
35. Pitsukha, E. A., Buchilko, É. K., Teplitskii, Y. S. et al. (2023). Specific Features of the Combustion Process and Thermal Calculation of Two-Chamber Cyclone-Bed Furnaces. *J. Eng Phys Thermophy*, 96, 1875-1883.
36. Pitsukha, E. A., Teplitskii, Y. S. & Buchilko, É. K. (2023). Hydrodynamics of a Cyclone Chamber with a Varying Direction of Tangential Blowing. *J. Eng Phys Thermophy*, 96, 1290-1303.
37. Teplitskii, Y. S., Pitsukha, E. A. & Roslik, A. R. (2023). Characteristic Features of the Hydrodynamics and Combustion of Fine Fuel Particles in the Vortex Zone of a Cyclone-Grate-Fired Chamber. *J Eng Phys Thermophy*, 96, 1162-1171.
38. Pitsukha, E. A., Buchilko, E. K. & Teplitskii, Y. S. (2020). Cyclone-Bed Furnaces: Experimental Studies and Thermal Design. *Therm. Eng.*, 67, 374-386.
39. Ren, X., Sun, R., Chi, H.-H, Meng, X., Li, Y., & Levendis, Y. (2017). Hydrogen chloride emissions from combustion of raw and torrefied biomass. *Fuel*, 200, 37-46.

Информация об авторах

Милованов Олег Юрьевич, к.т.н., с.н.с., Национальный исследовательский университет «МЭИ» (НИУ «МЭИ»), г. Москва, Российская Федерация

Климов Дмитрий Владимирович, к.т.н., с.н.с., НИУ «МЭИ», г. Москва, Российская Федерация

Кузьмин Сергей Николаевич, к.т.н., с.н.с., НИУ «МЭИ», г. Москва, Российская Федерация

Григорьев Сергей Владимирович, к.т.н., в.н.с., НИУ «МЭИ», г. Москва, Российская Федерация

Милованов Кирилл Игоревич, инженер, НИУ «МЭИ», г. Москва, Российская Федерация

Information about authors

Oleg Yu. Milovanov, Ph.D. in Technical Sciences, senior researcher, National Research University «Moscow Power Engineering Institute», Moscow, Russian Federation

Dmitry V. Klimov, Ph.D. in Technical Sciences, senior researcher, National Research University «Moscow Power Engineering Institute», Moscow, Russian Federation

Sergey N. Kuzmin, Ph.D. in Technical Sciences, senior researcher, National Research University «Moscow Power Engineering Institute», Moscow, Russian Federation

Sergey V. Grigor'ev, Ph.D. in Technical Sciences, leading researcher, National Research University «Moscow Power Engineering Institute», Moscow, Russian Federation

Kirill I. Milovanov, engineer, National Research University «Moscow Power Engineering Institute», Moscow, Russian Federation