

УДК 620-91

Ирина Ивановна Голованова

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

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, e-mail: p.marjandyshhev@narfu.ru

Исследование параметров производства гранулированного топлива из торфа

Авторское резюме

Состояние вопроса. Гранулирование становится все более привлекательной технологией для энергетического использования биомассы. Проблема поиска подходящего метода уплотнения различных видов биомассы существует на протяжении десятилетий. Целью исследования является подбор оптимального режима производства гранул из торфяного топлива.

Материалы и методы. В качестве материала исследования выбраны образцы торфа, собранные в Мезенском районе Архангельской области. Элементный анализ исследуемых образцов торфа и торфяных пеллет проведен методом рентгенофлуоресцентной спектроскопии на спектрометре EDX-8000. Эксперименты по гранулированию торфа проведены в пресс-грануляторе немецкой компании Amandus Kahl.

Результаты. Описан подбор режима работы пресс-гранулятора для производства пеллет из торфяного топлива. Подбран оптимальный режим, при котором производятся гранулы, соответствующие национальному стандарту. Проведен элементный анализ исследуемых образцов торфа и торфяных пеллет методом рентгенофлуоресцентной спектроскопии, который показал, что зольность торфяного топлива из Архангельской области составляет не более 2 %.

Выводы. Производство экологически чистых высококалорийных гранул из торфа, характеристики которых соответствуют требованиям российских стандартов, позволяет увеличить энергетический потенциал Архангельской области. При преобразовании торфа в пеллеты увеличивается содержание углерода, азота и водорода (C+N+H), а содержание серы и кислорода (O+S) снижается, что приводит к повышению теплоты сгорания топлива. Преимуществами для энергетического использования торфа является малое содержание в нем серы, низкая зольность и высокая температура размягчения золы.

Ключевые слова: торфяное топливо, торфяные пеллеты, гранулирование, плоская матрица, рентгенофлуоресцентный анализ

Irina Ivanovna Golovanova

Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Postgraduate student of Thermal Power Engineering and Heat Engineering Department, Russia, Arkhangelsk, e-mail: imukhrewa@gmail.com

Alexey Pavlovich Terekhin

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

Pavel Andreevich Maryandyshhev

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, e-mail: p.marjandyshhev@narfu.ru

Study of parameters of production of granular fuel from peat

Abstract

Background. Granulation technology is becoming an increasingly attractive one for the energy use of biomass. The problem to find a suitable method of compaction of various types of biomasses has existed for decades. The purpose of this study is to select the optimal mode to produce pellets from peat fuel.

Materials and methods. Peat samples collected in the Mezen district of the Arkhangelsk region have been selected as the data for study. Elemental analysis of the studied samples of peat and peat pellets has been carried out using X-ray fluorescence spectroscopy on an EDX-8000 spectrometer. Experiments on peat granulation have been carried out in a press granulator of the German company Amandus Kahl.

Results. The authors describe the procedure of selection of the operating mode of a press granulator to produce pellets from peat fuel. Optimal regime of pellets production has been selected corresponding to the national standard. An elemental analysis of the studied samples of peat and peat pellets has been carried out using X-ray fluorescence spectroscopy. The results have shown that the ash content of peat fuel from the Arkhangelsk region is no more than 2 %.

Conclusion. Production of environmentally friendly high-calorific pellets from peat corresponding to the National Russian standards allows increasing the energy potential of the Arkhangelsk region. When converting peat into the pellets, the content of carbon, nitrogen, and hydrogen (C+N+H) increases, and the content of sulfur and oxygen (O+S) decreases, which leads to the increase of the heat of fuel combustion. Advantages of the use of peat to produce energy are low sulfur content, low ash content and high softening ash temperature.

Key words: peat fuel; peat pellets; granulation; flat matrix; X-ray fluorescence analysis

DOI: 10.17588/2072-2672.2024.1.035-043

Введение. Декарбонизация энергетического сектора и меры по повышению энергоэффективности и вовлечению в энергобаланс различных видов биомассы способствуют устойчивому развитию и охране окружающей среды. Кроме того, колебания цен на традиционные виды топлива и опасность глобального потепления подтолкнули мировое сообщество к использованию устойчивых и возобновляемых источников энергии, преимущественно биомассы. Ресурсы биомассы широко варьируются от сельскохозяйственных и лесных отходов до твердых бытовых отходов. Это разнообразие обеспечивает широкую доступность и вариативность состава биомассы в зависимости от типа отходов [1].

Архангельская область обладает огромными запасами торфяного топлива. На территории Архангельской области достаточно обширные территории являются заболоченными (около 17 % суши), много крупных разведанных месторождений торфа. Открытие большого количества месторождений, находящихся в труднодоступных местах, будет связано с массовым использованием торфа в качестве энергетического ресурса.

Торф – это богатая углеродом органическая почва, состоящая в основном из частично разложившихся растений, накопившихся в заболоченных и анаэробных условиях в течение столетий или даже тысячелетий [2].

Торфяное топливо обладает огромным энергетическим потенциалом, особенно для Архангельской области. Одним из наиболее перспективных направлений обработки торфяной массы является ее гранулирование, которое позволяет в 2,5–3,5 раза увеличить удельную теплоту сгорания торфяного топлива, в 3–4 раза – механическую прочность [3].

Гранулирование биомассы является важным шагом в ее энергетическом применении. За счет гранулирования достигается повышение плотности энергии, а также более легкое обращение и более компактное хранение биомассы, что является важными факторами для экономической логистики и транспортировки. Качество гранулированного продукта в первую очередь измеряется

механической прочностью гранул, выраженной в виде доли образца гранулы, которая выдерживает испытание на переворачивание в неповрежденном виде. Производство гранул из биомассы затруднено несколькими факторами, включая отсутствие понимания механизма связывания частиц для образования пеллет в стандартных условиях прессования гранул. Это связано с тем, что при гранулировании биомассы способствующие факторы охватывают несколько молекулярных, микроскопических и даже наноскопических ступеней [4].

Целью проводимого исследования является подбор оптимального режима производства из торфяного топлива гранул, соответствующих стандарту ГОСТ Р 55114-2012.

Снижение запасов традиционных ископаемых топлив и необходимость снижения вредного влияния на окружающую среду энергетических объектов заставляют задуматься об использовании углеродно-нейтральных видов биомассы, к которым относят отходы сельскохозяйственной деятельности, животноводства, лесной промышленности, торф и др. Биомасса является возобновляемым источником энергии, при сжигании которого не происходит усиления глобального парникового эффекта. В связи с этим в мире происходит постепенное увеличение доли биомассы для выработки тепловой и электрической энергии [5].

Для Российской Федерации особый интерес представляет вовлечение торфяных ресурсов в топливно-энергетический баланс. Это обусловлено тем, что Россия располагает обширными запасами торфа – более 185 млрд т [6], что делает нашу страну лидером по количеству запасов этого сырья. Основная часть торфяных месторождений сосредоточена в Северо-Западном и Западно-Сибирском регионах [7]. Архангельская область занимает второе, после Вологодской, место по количеству торфяных месторождений и объему торфяных ресурсов [8].

Торф относится к возобновляемым типам топлив, поэтому его использование в качестве источника энергии помогает снизить негативное воздействие на окружающую среду. Однако использование его в энергетическом секторе постепенно

снижается, по причине того, что это сопряжено с рядом трудностей, связанных со значительными эксплуатационными расходами, приводящими к высокой стоимости производства энергии [9, 10]. По сравнению с другими видами топлива, для сушки торфа требуется больше энергии и времени, торфы низинного и переходного типов, помимо этого, обладают высокой зольностью [8]. Характеристики минеральной части биомассы сильно влияют на процессы горения внутри котлоагрегата. В [11–15] показано, что использование биомассы в качестве топлива неизбежно приводит к зашлаковыванию поверхностей нагрева, в результате чего снижается эффективность и сокращается срок службы котельного оборудования. Высокое содержание кремниевых соединений в минеральной части торфа оказывает абразивное воздействие на поверхности нагрева, приводя к их ускоренному износу и сокращению срока службы [16–18]. Конвективные поверхности нагрева, такие как испарительные ширмы, воздухоподогреватели и экономайзеры, могут быть подвержены эрозии от золы-уноса. Основными составляющими летучей золы являются оксиды кремния, алюминия и железа. Проектные организации устанавливают ограничения скорости дымовых газов (12–13 м/с для золы с высоким содержанием кремния и 18–20 м/с для менее эрозионной

золы), чтобы снизить скорость износа, снижая тем самым КПД котлоагрегата [19].

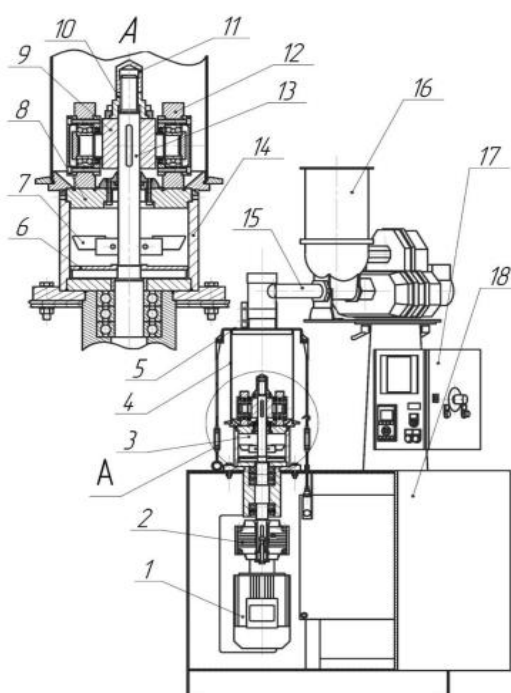
Механизм связывания в гранулах из уплотненной биомассы является сложным явлением, которое еще предстоит полностью изучить. В предыдущих исследованиях предпринимались попытки объяснить этот механизм с разных точек зрения, используя различные теории, такие как силы притяжения между твердыми частицами, силы адгезии и когезии, межфазные силы и капиллярное давление, твердые мостики и механические сцепляющие связи. Большинство теорий объясняют этот механизм с физико-механической точки зрения, а не химической, которая учитывает структурные свойства биомассы и взаимодействие веществ при гранулировании в стандартных условиях прессования гранул [20].

Методы исследования. Торфяное топливо было собрано в Мезенском районе Архангельской области и является экологически чистым видом топлива, так как выбросы в окружающую среду при термической утилизации торфа небольшие.

Эксперименты по гранулированию торфа проводились в пресс-грануляторе немецкой компании Amandus Kahl 14-175 с дозирующим устройством, набором сменных плоских матриц, отличающихся диаметрами и длиной каналов (рис. 1, а).



а)



б)

Рис. 1. Пресс-гранулятор Amandus Kahl 14-175: а – внешний вид; б – схема установки: 1 – асинхронный двигатель мощностью 3 кВт; 2 – горизонтальный редуктор с понижающей передачей; 3 – прессовальная камера; 4 – кожух; 5 – противопылевой колпак с рассекателем поступающего сырья; 6 – вращающееся дно; 7 – ножи; 8 – каналы матрицы; 9 – бегунковая головка; 10 – регулировочная гайка; 11 – контргайка; 12 – два бегунка диаметром 130 мм и шириной 29 мм; 13 – главный вал диаметром 30 мм; 14 – корпус прессовальной камеры; 15 – дозирующее устройство; 16 – приемный бункер с перемешивающим устройством и одинарным спиральным шнеком SSF диаметром 40 мм; 17 – распределительный шкаф для управления прессом; 18 – корпус гранулятора

Установка состоит из шнекового дозирующего устройства, бегунка с плоской матрицей, привода для подачи прессуемого продукта и лотка для отвода готовых пеллет (рис. 1,б).

Основными частями пресса являются бегунок и матрица, остальные части устройства служат в качестве привода для подачи прессуемого продукта, а также для отвода готовых пеллет. При проведении экспериментов торф подавался в прессовальную камеру и равномерно распределялся на матрице, вращающиеся бегунки предварительно сжимали его и проталкивали через прессовальные каналы. Таким образом, уплотнение торфяной массы происходило в открытых прессовальных каналах, расположенных в матрице. Торфяная масса нагревается вследствие трения при движении по каналам, спрессовывается в пеллеты и затем срезается вращающимися ножами с нижней плоскости матрицы.

Во время проведения экспериментов можно было изменять скорость движения (вращения) роликов по поверхности матрицы, расстояние от вальцов до матрицы, скорость подачи торфяной массы на матрицу, а также измерять температуру матрицы на ее боковой поверхности с помощью контактного термодатчика. Таким образом, задавая и варьируя скорость подачи биомассы и скорость прессования, можно выйти на оптимальный режим работы пресс-гранулятора для получения пеллет достаточного качества.

Подготовка торфяного топлива происходила в два этапа: высушивание торфяного топлива до воздушно-сухого состояния (на этом этапе торф имеет неоднородный гранулометрический состав, включающий крупные пластообразные куски, части растений); размол торфяного топлива на режущей мельнице до гранулометрического состава от 0 до 1000 мкм. Эксперименты проводились при различных режимах работы пресс-гранулятора.

Пресс-гранулятор настроен на работу по производству гранул из традиционных видов топлива на предприятиях большой мощности.

Оптимальный режим работы пресс-гранулятора определялся по соответствию гранул стандарту ГОСТ Р 55114-2012, их механической прочности, а также по времени работы установки.

Элементный анализ исследуемых образцов торфа и торфяных пеллет 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.

Результаты исследования. Для получения оптимальных гранул подбор режима работы пресс-гранулятора происходил экспериментальным путем. Изначально заданные параметры приведены в табл. 1.

При данных параметрах гранулы не принимали правильную форму, обладали низкой механической прочностью, что является не достаточным результатом, так как гранулы полученного качества не могут быть транспортированы для энергетической утилизации. Далее эксперименты проводились с постоянной частотой вращения вальцов, скорости подачи торфяной массы, при этом изменяли температуру матрицы и прилегание вальцов путем затягивания регулировочной гайки 10. Температура матрицы сильно влияет на работу пресс-гранулятора. При усилении прилегания вальцов к матрице происходит рост ее температуры с 53 до 60 °С, при этом получаемые торфяные гранулы начинают приобретать твердую оболочку. При ослаблении прилегания вальцов к матрице получить гранулы не удалось, так как торфяная масса свободно проходила сквозь каналы матрицы.

Также оценивалось влияние скорости вращения вальцов на получаемые гранулы при постоянном значении прилегания вальцов и частоты подачи торфа. Результаты показали, что увеличение или снижение скорости вальцов приводит к незначительному изменению температуры матрицы. При этом торфяные гранулы, полученные при работе с более низкой скоростью, имели лучшее качество.

При изменении скорости подачи торфяной массы в пресс-гранулятор качество полученных пеллет не изменялось. При увеличении скорости подачи, как и при ее уменьшении, масса слабо уплотнялась в каналах матрицы, при этом гранулы получались рыхлыми и без твердой оболочки. Однако удалось отметить, что при сниженной скорости температура матрицы увеличилась на 4 °С.

Оптимальный режим работы пресс-гранулятора подбирали путем увеличения прилегания вальцов и уменьшения скорости подачи. Результатом стало увеличение температуры поверхности матрицы и степени уплотнения массы в каналах. Для получения твердой оболочки гранул снижали скорость вальцов, что привело к увеличению длительности контакта торфа с горячей матрицей.

Таким образом удалось подобрать оптимальный режим, при котором получают гранулы, соответствующие национальному стандарту ГОСТ Р 55114-2012, – цилиндрической формы, длиной 25 мм, с обломленными концами (рис. 2). Параметры оптимального режима приведены в табл. 2.

Таблица 1. Параметры работы пресс-гранулятора

Изменяемый параметр	Частота вращения, Гц	Скорость подачи, гр/мин	Прилегание вальцов	Температура матрицы, °С	Плотность пеллет	Время работы, мин
Начальные параметры установки	31,1	170	При прокручивании вальцов масса на матрице слегка уплотняется	53	Рыхлые, рассыпаются при нажатии	4 Остановка работы, прекращение движения гранулируемой массы по каналам
Уменьшение прилегания вальцов к матрице	31,1	170	Торфяная масса свободно проходит через каналы	49	Пеллеты не получены	Работа не нарушается
Увеличение прилегания вальцов к матрице	31,1	170	При прокручивании вальцов торфяная масса на матрице начинает уплотняться в каналы	60	Твердые, при разламывании рассыпаются. Часть торфа свободно проходит через каналы пресс-гранулятора	3 Остановка работы, прекращение движения гранулируемой массы по каналам
Увеличение частоты вращения вальцов	34,3	170	При прокручивании вальцов масса на матрице слегка уплотняется	55	Рыхлые, рассыпаются при нажатии	10 Остановка работы, прекращение движения гранулируемой массы по каналам
Уменьшение частоты вращения вальцов	28,7	170	При прокручивании вальцов торфяная масса на матрице начинает уплотняться в каналы	49	Твердые, рассыпаются при нажатии	Работа не нарушается
Увеличение скорости подачи массы	31,1	180	При прокручивании вальцов масса на матрице слегка уплотняется	52	Рыхлые, рассыпаются при нажатии	4 Остановка работы, прекращение движения гранулируемой массы по каналам
Уменьшение скорости подачи массы	31,1	160	При прокручивании вальцов масса на матрице слегка уплотняется	57	Рыхлые, рассыпаются при нажатии	4 Остановка работы, прекращение движения гранулируемой массы по каналам

Таблица 2. Оптимальные параметры работы пресс-гранулятора

Изменяемый параметр	Частота вращения, Гц	Скорость подачи, гр/мин	Прилегание вальцов	Температура матрицы, °С	Плотность пеллет	Время работы, мин
Увеличение прилегания вальцов к матрице, уменьшение скорости подачи массы, уменьшение частоты вращения вальцов	22,6	140	При прокручивании вальцов торфяная масса на матрице начинает уплотняться в каналы	84	Твердые, имеют оболочку	Работа не нарушается



Рис. 2. Вид полученных гранул из торфа

В отличие от исходного режима и других экспериментальных вариантов, рабочий режим работы пресс-гранулятора с оптимальными параметрами показывает, что при более медленной подаче торфяной массы на матрицу, а также при более плотном прилегании вальцов гранулы

получаются более твердыми и каналы матрицы успевают разогреться до достаточной температуры. При такой температуре матрицы торф, продвигаясь по каналам, успевает спрессовываться и не забивает каналы матрицы сухой массой, останавливая работу установки.

Результаты рентгенофлуоресцентной спектроскопии исходной торфяной массы показывают, что зольность торфяного топлива из Архангельской области составляет 1,76 %. Это говорит о том, что исследованные образцы относятся к верховому малозольному торфу, который отличается большим содержанием органической части, малым содержанием минеральной (до 2 %) части и относительно низким, в отличие от других видов торфа (низинного и переходного), содержанием кальция.

Основными золообразующими и шлакообразующими элементами как в торфе, так и в торфяных гранулах являются кремний, кальций, алюминий, магний и сера. Доля щелочноземельных металлов (Ca, Mg, Sr) в исходном торфе (0,45 %) незначительно отличается от доли в пеллетах из торфа (0,43 %). Оба образца отличаются низким содержанием щелочных металлов (K, Rb) – около 0,04 %. При этом натрий, являющийся характерным элементом в большинстве видов быстрообразующихся биомасс, в торфе обнаружен не был (табл. 3).

Таблица 3. Элементный состав исходного торфа и торфяных пеллет

Элементы	Единицы измерения	Торф	Торфяные гранулы	Метод исследования
Кремний (SiO ₂)	%	0,62	0,78	Рентгенофлуоресцентная спектроскопия (EDX-8000)
Кальций (CaO)	%	0,260	0,244	
Алюминий (Al ₂ O ₃)	%	0,258	0,262	
Магний (MgO)	%	0,191	0,165	
Железо (Fe ₂ O ₃)	%	0,141	0,135	
Сера (SO ₃)	%	0,131	0,128	
Фосфор (P ₂ O ₅)	%	0,072	0,071	
Калий (K ₂ O)	%	0,041	0,041	
Титан (TiO ₂)	%	0,013	0,013	
Марганец (MnO)	%	0,003	0,002	
Медь (CuO)	%	0,003	0,003	
Бром (Br)	%	0,002	0,002	
Стронций (SrO)	%	0,001	0,002	
Хром (Cr ₂ O ₃)	%	0,001	0,001	
Цинк (ZnO)	%	0,001	0,001	
Рубидий (Rb ₂ O)	%	-	0,001	Элементный анализ (EA3000)
Кислород (O)	%	37,0	29,7	
Углерод (C)	%	51,7	55,8	
Азот (N)	%	1,35	1,62	
Водород (H)	%	8,19	11,1	

Кальций и магний в торфе обычно представлены в виде карбонатов, а кремний в виде оксида, остальные минеральные элементы обычно представлены в виде сложных силикатов. По результатам элементного анализа органической и минеральной части исследуемый торф можно отнести к травяным группам образования [21–23].

Результаты проведенного элементного анализа торфа и полученных торфяных гранул также позволили выделить особенности изменения горючей массы, обусловленные влиянием температуры матрицы пеллетной установки на элементный состав пеллет из торфа. Так, после гранулирования торфа, вследствие выхода влаги, возрастает содержание углерода, азота и водорода (C+N+H), а содержание серы и кислорода (O+S) снижается. Также после гранулиро-

вания у пеллет из торфа сохраняется закономерность содержания горючих элементов, аналогично исходной торфяной массе – высокое содержание углерода и водорода.

В табл. 4 представлены основные золообразующие элементы, присутствующие в полученных торфяных гранулах, и температура их деформации. Анализ данных показывает, что зола торфяных гранул имеет тугоплавкий характер, не слипается при высоких температурах и ее удаление не составит труда. Отсутствие же соединений натрия и малое содержание калия в минеральной части говорит о том, что при низких температурах сжигания, например, в кипящем слое (750–900 °С) или слоевом сжигании при более высоких температурах не будут образовываться легкоплавкие эвтектики щелочи с золой.

Таблица 4. Температура деформации и содержание соединений в золе

Показатель	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO
Температура деформации, °С	1400	2044	1566	2570	2825
Содержание соединений в торфяных гранулах, %	0,78	0,262	0,135	0,244	0,165

Выводы. Анализ результатов проведенных исследований показал, что при гранулировании торфа оптимальным является режим с невысокой частотой вращения и плотным прилеганием вальцов, а также с невысокой скоростью подачи торфяной массы в прессовальную камеру. Производство экологически чистых высококалорийных гранул из торфа, характеристики которых соответствуют требованиям российских стандартов, позволят увеличить энергетический потенциал Архангельской области. При преобразовании торфа в пеллеты в полученном биотопливе увеличивается содержание углерода, азота и водорода (C+N+H), а содержание серы и кислорода (O+S) снижается, что приводит к повышению теплоты сгорания топлива. Высокое содержание карбонатов дает возможность для использования торфа в качестве добавки к высокосернистым углям для снижения выбросов оксида серы. Преимуществами для использования торфа в качестве топлива является малое содержание серы, низкая зольность и высокая температура размягчения золы. Наличие большого количества карбонатов также может способствовать полному связыванию соединений серы при сжигании торфа. Установлено, что предпочтительным способом использования торфа с месторождений Архангельской области является его сжигание в кипящем слое.

Список литературы

1. **Energetic**, economic, and greenhouse gas emissions assessment of biomass and solar photovoltaic systems for an industrial facility / J. Sajid, M.B. Sajid,

M.M. Ahmad, et al. // *Energy Reports*. – 2022. – Vol. 8. – P. 12503–12521.

2. **Transient** gas and particle emissions from smouldering combustion of peat / Y. Hu, E. Christensen, F. Restuccia, G. Rein // *Proceedings of the Combustion Institute*. – 2019. – Vol. 37. – P. 4035–4042.

3. **Любов В.К., Любова С.В.** Повышение эффективности энергетического использования биотоплива. – Архангельск: САФУ, 2017. – 533 с.

4. **Pelleting** torrefied biomass at pilot-scale – Quality and implications for co-firing / D.A. Agar, M. Rudolfsson, S. Lavergne, et al. // *Renewable Energy*. – 2021. – Vol. 178. – P. 766–774.

5. **A review** of the mechanism of bonding in densified biomass pellets / A. Anukam, J. Berghel, G. Henriksson, et al. // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2021. – Vol. 148. – P. 111249.

6. **Impact** of torrefaction on thermal behavior of wheat straw and groundnut stalk biomass: Kinetic and thermodynamic study / B. Gajera, U. Tyagi, A.K. Sarma, M.K. Jha // *Fuel Communications*. – 2022. – Vol. 12. – P. 100073.

7. **The study** of highly mineralized peat sedimentation products in terms of their use as an energy source / R. Tabakaev, K. Ibraeva, N. Yazykov, et al. // *Fuel*. – 2020. – Vol. 271. – P. 117593.

8. **Biomass** integration for energy recovery and efficient use of resources: Tomsk Region / Y. van Fan, S. Romanenko, L. Gai, et al. // *Energy*. – 2021. – Vol. 235. – P. 121378.

9. **Исследование** характеристик и минерального состава торфа Томской области применительно к энергетическому использованию / К.Т. Ибраева, Ю.О. Манаев, Р.Б. Табакаев и др. // *Известия ТПУ*. – 2019. – Т. 330, № 1. – С. 191–200.

10. **Chukhareva N., Korotchenko T., Rozhkova D.** Impact of Heat Treatment on the Structure and Properties of Tomsk Region Peat // *Procedia Chemistry*. – 2014. – Vol. 10. – P. 535–540.

11. **Krumins J., Klavins M., Kalnina L.** Fen peat in environmentally friendly technologies // *Energy Procedia*. – 2018. – Vol. 147. – P. 114–120.

12. **Computational** study of the multidimensional spread of smouldering combustion at different peat conditions / H. Yuan, D.M.J. Purnomo, P. Sun, et al. // *Fuel*. – 2023. – Vol. 345. – P. 128064. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.128064>

13. **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.

14. **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.

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

16. **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.

17. **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.

18. **Experimental** study of ash wear of heat exchange surfaces of the boiler / R.K. Orumbayev, B.T. Bakhtiyar, D.R. Umyshev, et al. // *Energy*. – 2021. – Vol. 215. – P. 119119. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.119119>

19. **Pronobis M., Wojnar W.** The impact of biomass co-combustion on the erosion of boiler convection surfaces // *Energy Conversion and Management*. – 2013. – Vol. 74. – P. 462–470. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enconman.2013.06.059>

20. **Kaliyan N., Morey R.V.** Natural binders and solid bridge type binding mechanisms in briquettes and pellets made from corn stover and switchgrass // *Bioresource Technology*. – 2010. – Vol. 101(3). – P. 1082–1090. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.08.064>

21. **Effect** of oxidation on erosive wear behaviour of boiler steels / M. Antonov, R. Veinthal, E. Huttunen-Saarivirta, et al. // *Tribology International*. – 2013. – Vol. 68. – P. 35–44. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.triboint.2012.09.011>

22. **Oxidation-abrasion** of TiC-based cermets in SiC medium / M. Antonov, I. Hussainova, J. Kübarssepp, R. Traksmaa // *Wear*. – 2011. – Vol. 273(1). – P. 23–31. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.wear.2011.05.005>

23. **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.

References

1. Sajid, J., Sajid, M.B., Ahmad, M.M., Kamran, M., Ayub, R., Ahmed, N., Mahmood, M., Abbas, A. Energetic, economic, and greenhouse gas emissions assessment of biomass and solar photovoltaic systems for an industrial facility. *Energy Reports*, 2022, vol. 8, pp. 12503–12521.

2. Hu, Y., Christensen, E., Restuccia, F., Rein, G. (2019). Transient gas and particle emissions from smouldering combustion of peat. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2019, vol. 37, pp. 4035–4042.

3. Lyubov, V.K., Lyubova, S.V. *Povyshenie effektivnosti energeticheskogo ispol'zovaniya biotopliv* [Improving the efficiency of energy use of biofuels]. Arkhangel'sk: SAFU, 2017. 533 p.

4. Agar, D.A., Rudolfsson, M., Laverigne, S., Melkior, T., da Silva Perez, D., Dupont, C., Campargue, M., Kalén, G., Larsson, S.H. Pelletizing torrefied biomass at pilot-scale – Quality and implications for co-firing. *Renewable Energy*, 2021, vol. 178, pp. 766–774.

5. Anukam, A., Berghel, J., Henrikson, G., Frodeson, S., Ståhl, M. A review of the mechanism of bonding in densified biomass pellets. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2021, vol. 148, p. 111249.

6. Gajera, B., Tyagi, U., Sarma, A.K., Jha, M.K. Impact of torrefaction on thermal behavior of wheat straw and groundnut stalk biomass: Kinetic and thermodynamic study. *Fuel Communications*, 2022, vol. 12, p. 100073.

7. Tabakaev, R., Ibraeva, K., Yazykov, N., Shanenkov, I., Dubinin, Y., Zavorin, A. The study of highly mineralized peat sedimentation products in terms of their use as an energy source. *Fuel*, 2020, vol. 271, p. 117593.

8. Fan, Y. van, Romanenko, S., Gai, L., Kupresova, E., Varbanov, P.S., Klemeš, J.J. Biomass integration for energy recovery and efficient use of resources: Tomsk Region. *Energy*, 2021, vol. 235, p. 121378.

9. Ibraeva, K.T., Manaev, Yu.O., Tabakaev, R.B., Yazykov, N.A., Zavorin, A.S. Issledovanie kharakteristik i mineral'nogo sostava torfa Tomskoy oblasti primenitel'no k energeticheskomu ispol'zovaniyu [Investigation of the characteristics and mineral composition of peat of the Tomsk region in relation to energy use]. *Izvestiya TPU*, 2019, vol. 330, no. 1, pp. 191–200.

10. Chukhareva, N., Korotchenko, T., Rozhkova, D. Impact of Heat Treatment on the Structure and Properties of Tomsk Region Peat. *Procedia Chemistry*, 2014, vol. 10, pp. 535–540.

11. Krumins, J., Klavins, M., Kalnina, L. Fen peat in environmentally friendly technologies. *Energy Procedia*, 2018, vol. 147, pp. 114–120.

12. Yuan, H., Purnomo, D.M.J., Sun, P., Huang, X., Rein, G. Computational study of the multidimensional spread of smouldering combustion at different peat conditions. *Fuel*, 2023, vol. 345, p. 128064. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.128064>

13. 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.

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

15. Nisamaneenatte, 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.

16. 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.

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

18. Orumbayev, R.K., Bakhtiyar, B.T., Umyshev, D.R., Kumargazina, M.B., Otyunchiyeva, M.T., Akimbek, G.A. Experimental study of ash wear of heat exchange surfaces of the boiler. *Energy*, 2021, vol. 215, p. 119119. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.119119>

19. Pronobis, M., Wojnar, W. The impact of biomass co-combustion on the erosion of boiler convection surfaces. *Energy Conversion and Management*, 2013, vol. 74, pp. 462–470. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enconman.2013.06.059>

20. Kaliyan, N., Morey, R.V. Natural binders and solid bridge type binding mechanisms in briquettes and

pellets made from corn stover and switchgrass. *Biore-source Technology*, 2010, vol. 101(3), pp. 1082–1090. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.08.064>

21. Antonov, M., Veinthal, R., Huttunen-Saarivirta, E., Hussainova, I., Vallikivi, A., Lelis, M., Priss, J. Effect of oxidation on erosive wear behaviour of boiler steels. *Tribology International*, 2013, vol. 68, pp. 35–44. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.triboint.2012.09.011>

22. Antonov, M., Hussainova, I., Kübarsepp, J., Traksmäa, R. Oxidation-abrasion of TiC-based cermets in SiC medium. *Wear*, 2011, vol. 273(1), pp. 23–31. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.wear.2011.05.005>

23. 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.