Вестник ВГУИТ/ Proceedings of VSUET ISSN 2226-910X E-ISSN 2310-1202
DOI: http://doi.org/10.20914/2310-1202-2025-1-243-249 Обзорная статья/Review article
УДК 658.567.1 Open Access Available online at vestnik-vsuet.ru

Исследование технического решения экологических и энергетических проблем при пиролизной переработке крупнотоннажных твердых органических отходов

Мария Ю. Балабанова [1] mariya_balabanova@mail.ru 0000-0002-7126-2863
Сергей Ю. Панов [2] su-panov@mail.ru 0000-0003-2257-8180
Александр Ю. Марнов [2] su-panov@mail.ru 0009-0005-9613-2271

1 Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия
2 Воронежский государственный технический университет, ул. 20-летия Октября, 84, г. Воронеж, 394006, Россия

Аннотация. Крупнотоннажные твердые органические отходы (КТОО), такие как жом свекловичный, дробина пивная, отработанный активный ил (ОАИ) и ионообменные смолы (ОИС) в большом количестве образуются на пищевых и химических предприятиях России. В настоящее время для указанных КТООизвестно большое количество способов переработки и утилизации (использование в качестве сырого корма или для получения кормовых добавок для животных, консервирование в силосных или жомовых ямах, использование в качестве сырья для получения биогаза, сушка, использование в качестве сырья для получения полезных компонентов), однако, указанные способы позволяют переработать или утилизировать лишь небольшой объем КТОО, основная же часть КТОО складируется на полигонах или иловых картах. Необходимо разработать техническое решение экологических и энергетических проблем при пиролизной переработки КТОО, для чего были проведены экспериментальные исследования пиролизной переработки КТОО на лабораторной установке, которая включат в себя горизонтальный пиролизный реактор, устройства загрузки и выгрузки, два конденсатора. В результате чего получены зависимости выходов вторичных продуктов от температуры проведения процесса пиролиза. Установлено, что в процессе термической переработки КТОО образуются вторичные продукты: жидкая фракция, твердый остаток и пиролизный газ. Полученные вторичные продукты имеют различный выход по массе в зависимости от температуры пиролиза, но аналогичный характер графических зависимостей для всех исследованных КТОО. Разработана структурная схема универсальной пиролизной установки для переработки отходов различных отраслей промышленности, которая включает в себя три участка: участок пиролизной утилизации, участок газификации твердого остатка, участок разделения жидкой фракцию.

Ключевые слова: переработка отходов, пиролиз, вторичные продукты, вторичные продукты, реактор.

Research of Technical Solutions to Environmental and Energy Problems During Pyrolysis Processing of Large-Tonnage Solid Organic Waste

Mariya Yu. Balabanova [1] mariya_balabanova@mail.ru 0000-0002-7126-2863
Sergej Yu. Panov [2] su-panov@mail.ru 0000-0003-2257-8180
Aleksandr Yu. Marnov [2] su-panov@mail.ru 0009-0005-9613-2271

1 Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19, Voronezh, 394036, Russia
2 Voronezh State Technical University, 20th Anniversary of October Street, 84, Voronezh, 394006, Russia

Abstract. . Large-tonnage solid organic waste [LSOW], such as beet pulp, beer pellets, spent activated sludge [SAS], and ion exchange resins [IER], are formed in large quantities at food and chemical enterprises in Russia. Currently, a large number of methods of processing and disposal are known for these LSOW (use as raw feed or for obtaining feed additives for animals, canning in silage or pulp pits, use as raw materials for biogas production, drying, use as raw materials for obtaining useful components). However, these methods allow only a small amount of LSOW to be processed or disposed of. The main part of LSOW is stored in landfills or silt maps. It is necessary to develop a technical solution to environmental and energy problems in the pyrolysis processing of LSOW. For it, the authors carried out the experimental studies of the pyrolysis processing of LSOW on a laboratory installation. It will include a horizontal pyrolysis reactor, loading and unloading devices, two condensers. As a result, the dependences of the yields of secondary products on the temperature of the pyrolysis process are obtained. The authors established that secondary products are formed in the process of thermal processing of LSOW: liquid fraction; solid residue; pyrolysis gas. The obtained secondary products have a different yield by weight depending on the pyrolysis temperature, but the graphical dependencies are similar for all the studied LSOW. The authors developed a block diagram of a universal pyrolysis plant for processing waste from various industries. It includes three sections:pyrolysis disposal section; solid residue gasification section; liquid fraction separation section.

Keywords: waste recycling, pyrolysis, secondary products, secondary products, reactor.

Для цитирования
Балабанова М.Ю., Панов С.Ю., Марнов А.Ю. Исследование технического решения экологических и энергетических проблем при пиролизной переработке крупнотоннажных твердых органических отходов // Вестник ВГУИТ. 2025. Т. 87. № 1. С. 243–249. doi:10.20914/2310-1202-2025-1-243-249

For citation
Balabanova M.Yu., Panov S.Yu., Marnov A.Yu. Research of Technical Solutions to Environmental and Energy Problems During Pyrolysis Processing of Large-Tonnage Solid Organic Waste. Vestnik VGUIT [Proceedings of VSUET]. 2025. vol. 87. no. 1. pp. 243–249. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2025-1-243-249

©2025, Балабанова М.Ю. и др. / Balabanova M.Yu. et al.
This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License

Введение

На пищевых и химических предприятиях России образуются КТОО, для переработки и утилизации которых используется большое количество различных способов. Выбор способа переработки и утилизации зависит от характеристик и свойств конкретного отхода и экономических возможностей предприятия, на котором они образуются.

Нами рассматривается возможность применения универсального, доступного и недорогого способа переработки КТОО, которые обладают минимальным набором сходных характеристик. Применение универсального способа позволит сократить расходы предприятий на переработку отходов, так как одно предприятие в регионе может заниматься переработкой отходов различных отраслей промышленности.

При выборе отходов (объектов исследования) руководствовались следующими условиями:

– отходы являются органическими и крупнотоннажными;

– отходы образуются в одном регионе;

– практическое решение проблемы переработки и утилизации отходов (с имеющимися на предприятиях ресурсами) является затруднительным с технической и экономической стороны.

Исходя из вышесказанного, нами рассматриваются следующие виды КТОО: жом свекловичный, дробина пивная, ОАИ и ОИС. Указанные отходы являются органическими (жом свекловичный, дробина пивная и ОАИ – целлюлозосодержащими) и крупнотоннажными (например, на сахарных и пивоваренных заводах России образуется около 4,7 млн т./год жома свекловичного и 1,3 млн т/год дробины пивной соответственно), все отходы изначально обладают высокой влажностью, доходящей у ОАИ до 80%. Предприятия, на которых они образуются, а именно пищевые (преимущественно сахарные и пивоваренные заводы), химические предприятия, имеющие в своем составе очистные сооружения, а также предприятия, на которых предусмотрен процесс водоподготовки, являются основными для многих регионов страны.

Существует большое количество различных способов переработки и утилизации КТОО.

В частности, использование в качестве корма для животных и сырья для получения ценных компонентов, компостирование, сушка и силосование применяются для жома свекловичного и дробины пивной; депонирование на иловых картах, биологическая переработка анаэробными микроорганизмами в метантенках, технологическое сжигание – для ОАИ; цементирование, компактирование, сжигание, регенерация – для ОИС. Однако указанные способы не могут полностью справиться с образующимися объемами отходов в связи с возникающими трудностями. В частности, дробина пивная и жом свекловичный быстро закисают (срок хранения составляет не более 24 часов), что приводит к невозможности использования отходов в качестве корма для животных и сырья для получения ценных компонентов. Компостирование и силосование требуют достаточно много времени, сушка – значительных энергетических затрат [3, 8, 9].

ОАИ с биологических очистных сооружений практически в полном объеме складируется на иловых картах, которые зачастую переполнены, особенно в крупных городах. Биологическая переработка анаэробными микроорганизмами в метантенках и технологическое сжигание в настоящее время практически не применяются.

При переработке и утилизации ОИС также возникает ряд трудностей:

- при цементировании объем конечного продукта увеличивается 5–8 раз;
- сжигание опасно ввиду высвобождения оксидов серы и азота;
- при компактировании коэффициент уменьшения объема составляет около двух единиц;
- регенерация является трудоемким и затратным процессом, при практической реализации которого образуется большое количество вторичных жидких отходов.

В связи с вышеперечисленными трудностями на многих предприятиях регенерация и обезвреживание ОИС затруднена, и после истощения обменной емкости её направляют на хранение с последующим захоронением.

Авторами проведен аналитический обзор альтернативных методов переработки и утилизации КТОО, в результате которого в качестве универсального и доступного для практической реализации выбран один из Авторами проведен аналитический обзор альтернативных методов переработки и утилизации КТОО, в результате которого в качестве универсального и доступного для практической реализации выбран пиролиз, который позволит разложить органические отходы под воздействием высокой температуры (350–1050 °С) без доступа кислорода на простые химические соединения и получить вторичные продукты, такие как твердый остаток, жидкие фракции и пиролизный газ (пирогаз) [1, 5–7].

Выход того или иного продукта, а также его энергетические и химические свойства зависят от свойств сырья, температуры процесса, скорости теплообмена между веществами и теплоносителем.

Цель работы – исследование процесса пиролизной переработки крупнотоннажных твердых органических отходов с учетом экологических и энергетических проблем.

Материалы и методы

Схема универсальной экспериментальной установки для пиролизной переработки КТОО представлена на рисунке 1.

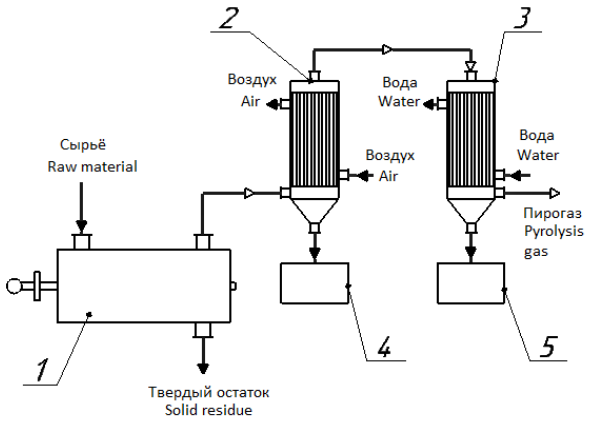

Рисунок 1. Схема экспериментальной установки: 1 – реактор; 2, 3 – конденсаторы; 4, 5 – сборники

Figure 1. The scheme of the experimental installation: 1 – reactor; 2, 3 – capacitors; 4, 5 – collectors

Экспериментальная установка выполнена в виде комплекса связанных между собой аппаратов различного функционального назначения: пиролизного реактора 1, конденсаторов 2 и 3, сборников жидких фракций 4 и 5.

Пиролизный реактор выполнен в горизонтальном исполнении. Обогрев реакционной камеры реактора реализуется с помощью электронагревателей, которые размещены с внешней стороны корпуса и закрыты теплоизоляцией с защитным кожухом.

Экспериментальная установка работает следующим образом.

Исходное сырье через шаровой кран подаётся в загрузочный патрубок реактора *1*. Сырьё, постоянно перемешиваясь внутри реактора с помощью ворошителя, перемещается к выгрузному патрубку. Ворошитель приводится в движение с помощью электропривода, снабженного электронным преобразователем частоты для регулирования скорости его вращения.

Электронагреватели обеспечивают нагрев сырья до температуры, при которой происходит пиролиз с образованием парогазовой смеси и твердого остатка.

Парогазовая смесь из горизонтального пиролизного реактора по газоходу поступает в трубное пространство конденсатора *2*, в трубках которого протекает процесс перехода высококипящих компонентов в жидкое состояние, а образующаяся при этом жидкая фракция, состоящая из преимущественно из тяжёлых углеводородов, стекает в днище конденсатора, откуда поступает в сборник *4*.

Легкокипящие компоненты парогазовой смеси (пары воды, органические и неорганические составляющие пирогаза) выходят из конденсатора *2* с температурой 110–120 °С и поступают в трубное пространство конденсатора *3*, в трубном пространстве которого происходит конденсация легкокипящих компонентов пирогаза и паров воды. Жидкая фракция с температурой 50–60 °С стекает в сборник *5*, а образующийся после разделения смеси пиролизный газ подается на горелку.

Результаты

На разработанной экспериментальной установке проведены исследования зависимости выходов вторичных продуктов (жидкой фракции, твердого остатка и пирогаза) от температуры пиролизной утилизации КТОО. Экспериментальные исследования проводились при атмосферном давлении в диапазоне температур 350–550 °С (с интервалом 50 °С). Выбор температурного диапазона обусловлен наиболее интенсивным протеканием процесса разложения органических веществ при минимальных энергетических затратах. Графические зависимости выходов вторичных продуктов от температуры пиролизной утилизации КТОО представлены на рисунках 2–4.

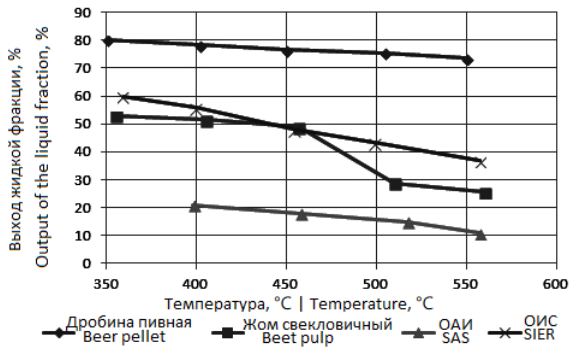

Рисунок 2. Зависимость выхода жидкой фракции от температуры пиролиза для различных видов КТОО

Figure2. Dependence of the yield of the liquid fraction on the pyrolysis temperature for various types of LSOW

Выход жидкой фракции в процентном отношении к сухому веществу, как следует из представленных на рисунке 2 зависимостей, при увеличении температуры протекания процесса пиролиза КТОО уменьшается. Образующаяся жидкая фракция представляет собой жидкость от темно-коричневого до черного цвета с резким запахом нефтяных фракций. При нормальных

условиях жидкая фракция, полученная после пиролизной переработки жома свекловичного, дробины пивной и отработанного активного ила не воспламеняется, при этом фракция, полученная после пиролиза отработанной ионообменной смолы, хорошо горит.

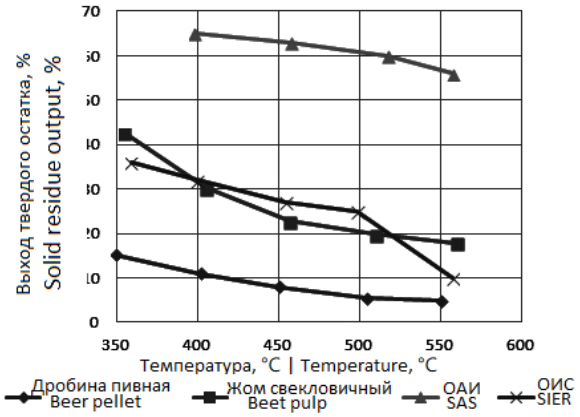

Рисунок 3. Зависимость выхода твердого остатка от температуры пиролиза для различных видов КТОО

Figure3. Dependence of the solid residue yield on the pyrolysis temperature for various types of LSOW

Из зависимостей, представленных на рисунке 3 можно сделать вывод, что с повышением температуры пиролизной утилизации количество твёрдого остатка для всех видов КТОО заметно уменьшается в следующих диапазонах: для дробины пивной – с 43% до 18%; для жома свекловичного – с 22% до 5%; для ОИС – с 37% до 10%. При этом следует отметить, что в случае ОАИ уменьшение количества твердого остатка незначительно – с 64% до 55%.

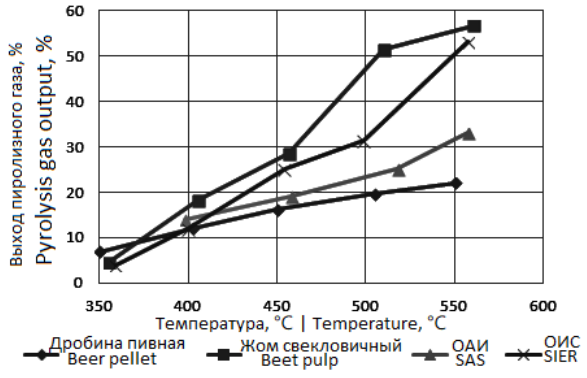

Рисунок 4. Зависимость выхода пирогаза от температуры пиролиза для различных видов КТОО

Figure4. Dependence of the pyrogas yield on the pyrolysis temperature for various types of LSOW

Как следует из графических зависимостей (рисунок 4), выход пирогаза в процентном отношении к сухому веществу с повышением температуры пиролиза плавно растёт. При повышении температуры пиролиза происходит более глубокое разложение жидких и твёрдых фракций продуктов пиролиза и их переход в газовую фракцию, что подтверждается характером графических зависимостей. Максимальный выход пирогаза составляет около 55% масс. для отходов в виде жома свекловичного, минимальный – для отходов в виде дробины пивной – около 20% масс. Полученный пирогаз является горючим и легко воспламеняется, что визуально наблюдалось в процессе проведения экспериментальных исследований

В результате проведенных экспериментальных исследований для всех КРОО получены аналогичные зависимости выходов вторичных продуктов и установлено, что оптимальное время проведения пиролизной переработки составляет 15 мин при температуре пиролиза 500 °С.

На основании результатов экспериментальных исследований и проведенного аналитического обзора разработана структурная схема универсальной установки для пиролизной утилизации КТОО (рисунок 5). Установка состоит из трех участков: пиролиза КТОО, газификации твердых фракций, полученных в результате пиролиза КТОО, разделения жидких фракций, полученных в результате пиролиза КТОО [4, 10].

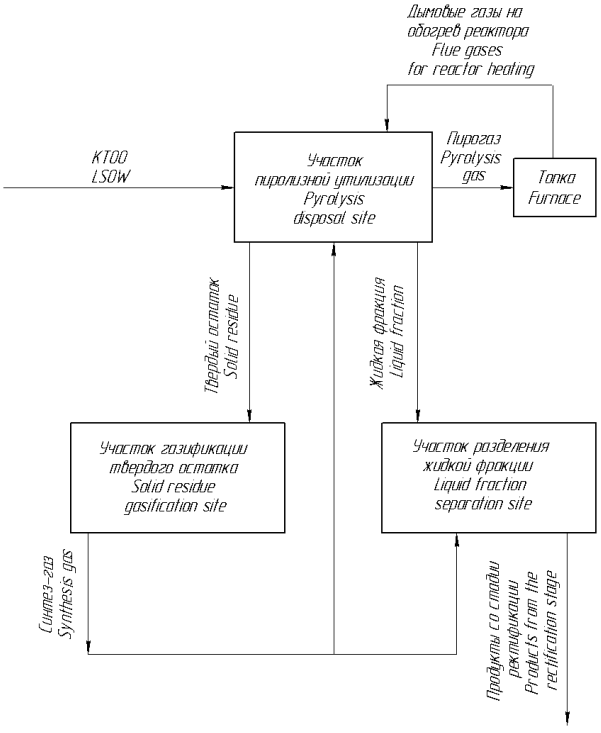

Рисунок 5. Структурная схема универсальной установки для пиролизной утилизации КТОО

Figure5. Block diagram of a universal installation for pyrolysis utilization of LSOW

Обсуждение

В работе [2] проводились исследования химико-термической переработки целлюлозосодержащих отходов (в частности, помета птичьего), в ходе которого установлено, что в процессе переработки образуются вторичные продукты виде пиролизного газа, жидкой и твердой фракций. Образование таких же вторичных продуктов происходит и в нашем исследовании пиролизной переработки КТОО. Кроме того, схож и характер графических зависимостей выходов вторичных продуктов от температуры. При увеличении температуры процесса выход пиролизного газа увеличивается, а жидкой и твердых фракций уменьшается.

Заключение

Согласно проведенным расчетам, установка, разработанная на основании представленной схемы пиролизной утилизации КТОО, при установившемся режиме работы является полностью энергетически независимой от сторонних источников энергии.

На основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы.

1. Установлена оптимальная температура пиролиза КТОО – 500 °С при данной температуре время пиролиза составляет минимальное значение 15 мин. Дальнейшее повышение температуры пиролиза не имеет практического смысла, т. к. длительность протеканияпроцесса пиролиза сокращается незначительно, в то время как затраты энергии на пиролиз увеличиваются существенно (до 90%).

2. Установлены выходы вторичных продуктов в зависимости от температуры пиролиза КТОО:

– для пирогаза: максимальный выход (55% масс.) – для отходов в виде жома свекловичного, минимальный (20% масс.) – для отходов в виде дробины пивной;

– для жидкой фракции: максимальный выход (75% масс.) – для отходов в виде дробины пивной, минимальный (10,0% масс.) – для отходов в виде отработанного активного ила;

– для твердого остатка: максимальный выход (50% масс.) – для отходов в виде отработанного активного ила, минимальный (5% масс.) – для отходов в виде дробины пивной.

3. Предложена структурная схема пиролизной утилизации с учетом возможности практической реализации универсального процесса переработки КТОО различных отраслей промышленности с учетом энергосбережения.

Литература

1 Хасхачих В.В., Ларина О.М., Сычев Г.А., Герасимов Г.Я., Зайченко В.М. Пиролитические методы термической переработки твердых коммунальных отходов // Теплофизика высоких температур. 2021. № 3. С. 467–480.

2 Балабанова М.Ю., Скляднев Е.В. Исследование комплексной химико-термической переработки целлюлозосодержащих отходов // Проблемы и инновационные решения в химической технологии. Воронеж: Воронежский государственный университет инженерных технологий, 2019. С. 304–305.

3 Ермолаев В.А. Вторичное сырье сахарного производства и направления его переработки // Инновации и продовольственная безопасность. 2024. № 1. С. 87–94. doi: 10.31677/2311–0651–2024–43–1–87–94.

4 Габитов Р.Н., Колибаба О.Б., Сокольский А.И., Грошева А.В. Разработка конструкции печи для утилизации твердых отходов и оценка эффективности ее работы // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. 2019. № 5. С. 23–30. doi: 10.17588/2072–2672.2019.5.023–030.

5 Сафин Р.Г., Сотников В.Г., Зиатдинова Д.Ф. Термическая переработка твердых растительных отходов методом медленного кондуктивного пиролиза // Экология и промышленность России. 2023. Т. 27. № 11. С. 9–14.

6 Lee X.J. Fast Microwave-Assisted Pyrolysis of Wastes for Biofuels Production // Khan A., Asiri A., Bhawani S. (eds.) Waste to Biofuel Technology. Singapore: Springer, 2024. doi: 10.1007/978–981–97–4561–6_5.

7 Kaushal J., Khatri M., Arya S.K. Thermochemical Conversion of Algae Biomass: Pyrolysis and Gasification // Arya S.K., Khatri M., Singh G. (eds.) Value Added Products From Bioalgae Based Biorefineries: Opportunities and Challenges. Singapore: Springer, 2024. doi: 10.1007/978–981–97–1662–3_7.

8 Доронина А.С., Лиходумова М.А., Прохасько Л.С. Актуальные решения утилизации отходов пивоваренной промышленности // Молодой ученый. 2014. № 9. С. 133–135. URL: https://moluch.ru/archive/68/11511/ (дата обращения: 28.10.2019).

9 Зиненко Д.В., Стрекалов С.В., Лебединский Е.С. Проблемы утилизации отработанного активного ила // Актуальные вопросы техники, науки, технологии. Брянск: Брянский государственный инженерно-технологический университет, 2023. С. 163–166.

10 Пат. № 2726979 Российская Федерация, F01K 13/00, F23G 5/08. Энергетический комплекс для переработки твердых бытовых отходов / Паршуков В.И., Ефимов Н.Н., Кихтев И.М., Пряткина В.С., Копица В.В., Васильев Б.Н. № 2019119628; заявл. 24.06.2019; опубл. 20.07.2020. 9 с.

11 Икромов А.А., Эшмухамедов М.А. Эффективные методы переработки органических отходов методом пиролиза с получением топливного газа // Oriental renaissance: Innovative, educational, natural and social sciences. 2023. Т. 3. № 10. С. 302-310.

12 Aboelela D., Saleh H., Attia A.M., Elhenawy Y., Majozi T., Bassyouni M. Recent Advances in Biomass Pyrolysis Processes for Bioenergy Production: Optimization of Operating Conditions // Sustainability. 2023. Vol. 15. No. 14. P. 11238. doi: 10.3390/su151411238

13 Zhao N., Low S.S., Law C.L., Wu T., Pang C.H. Co-pyrolysis of polymers: Recent advances, challenges and perspectives // Fuel Processing Technology. 2025. Vol. 274. P. 108239. doi:10.1016/j.fuproc.2025.108239

14 Yu S., Zhang H., Liu Z., Yi T., Mao X., Liang X., Nie Y. Design and optimization of electromagnetic induction heating pyrolysis reactor based on load impedance model and heat transfer model // Chemical Engineering Journal. 2025. Vol. 509. P. 160851. doi:10.1016/j.cej.2025.160851

15 Ghodke P.K., Sharma A.K., Pandey J.K., Chen W.-H., Patel A., Ashokkumar V. Pyrolysis of sewage sludge for sustainable biofuels and value-added biochar production // Journal of Environmental Management. 2021. Vol. 298. P. 113450. doi: 10.1016/j.jenvman.2021.113450

16 Sahoo K., Behera U.S., Poddar S. Recycling processes and exploitation of waste to obtain energy and challenges: a mini review // International Journal of Environmental Science and Technology. 2025. doi:10.1007/s13762-025-06502-5

17 Puligundla P., Mok C. Valorization of sugar beet pulp through biotechnological approaches: recent developments // Biotechnology Letters. 2021. Vol. 43. P. 1253-1263. doi:10.1007/s10529-021-03146-6

18 Jackowski M., Niedźwiecki Ł., Jagiełło K., Uchańska O., Trusek A. Brewer's Spent Grains - Valuable Beer Industry By-Product // Biomolecules. 2020. Vol. 10. No. 12. P. 1669. doi:10.3390/biom10121669

19 Robazza A., Welter C., Kubisch C., Baleeiro F.C.F., Ochsenreither K., Neumann A. Co-Fermenting Pyrolysis Aqueous Condensate and Pyrolysis Syngas with Anaerobic Microbial Communities Enables L-Malate Production in a Secondary Fermentative Stage // Fermentation. 2022. Vol. 8. No. 10. P. 512. doi:10.3390/fermentation8100512

20 Morya S., Sandhu D., Neumann A., Simon C.J. Chapter 3: Sustainable Environmental Remediation by Valorization of Agro-food Industrial Waste and By-products // Green Chemistry Series. 2023. P. 70-94. doi:10.1039/BK9781837670093-00070

References

1 Khaskhachikh V.V., Larina O.M., Sychev G.A., Gerasimov G.Ya., Zaichenko V.M. et al. Pyrolytic methods of thermal processing of municipal solid waste. High Temperature. 2021. no. 3. pp. 467-480. (in Russian).

2 Balabanova M.Yu., Sklyadnev E.V. Study of complex chemical-thermal processing of cellulose-containing waste. Problems and innovative solutions in chemical technology. Voronezh: Voronezh State University of Engineering Technologies, 2019. pp. 304-305. (in Russian).

3 Ermolaev V.A. Secondary raw materials of sugar production and directions of its processing. Innovations and food security. 2024. no. 1. pp. 87-94. doi: 10.31677/2311-0651-2024-43-1-87-94 (in Russian).

4 Gabitov R.N., Kolibaba O.B., Sokolisky A.I., Grosheva A.V. Development of a furnace design for solid waste disposal and evaluation of its performance. Bulletin of Ivanovo State Power University. 2019. no. 5. pp. 23-30. doi: 10.17588/2072-2672.2019.5.023-030 (in Russian).

5 Safin R.G., Sotnikov V.G., Ziatdinova D.F. Thermal processing of solid plant waste by slow conductive pyrolysis. Ecology and Industry of Russia. 2023. vol. 27. no. 11. pp. 9-14. (in Russian).

6 Lee X.J. Fast Microwave-Assisted Pyrolysis of Wastes for Biofuels Production. In: Khan A., Asiri A., Bhawani S. (eds.) Waste to Biofuel Technology. Singapore: Springer, 2024. doi: 10.1007/978-981-97-4561-6_5.

7 Kaushal J., Khatri M., Arya S.K. Thermochemical Conversion of Algae Biomass: Pyrolysis and Gasification. In: Arya S.K., Khatri M., Singh G. (eds.) Value Added Products From Bioalgae Based Biorefineries: Opportunities and Challenges. Singapore: Springer, 2024. doi: 10.1007/978-981-97-1662-3_7.

8 Doronina A.S., Likhodumova M.A., Prokhas'ko L.S. Current solutions for the disposal of brewing industry waste. Young Scientist. 2014. no. 9. pp. 133-135. Available at: https://moluch.ru/archive/68/11511/ (in Russian).

9 Zinenko D.V., Strekalov S.V., Lebedinsky E.S. Problems of disposal of spent activated sludge. Current issues of engineering, science, technology. Bryansk: Bryansk State University of Engineering and Technology, 2023. pp. 163-166. (in Russian).

10 Pat. No. 2726979 Russian Federation, F01K 13/00, F23G 5/08. Power complex for municipal solid waste processing / Parshukov V.I., Efimov N.N., Kikhtev I.M., Pryatkina V.S., Kopitsa V.V., Vasiliev B.N. No. 2019119628; filed 24.06.2019; publ. 20.07.2020. 9 p. (in Russian).

11 Ikromov A.A., Eshmukhamedov M.A. Effective methods of organic waste processing by pyrolysis with fuel gas production. Oriental renaissance: Innovative, educational, natural and social sciences. 2023. vol. 3. no. 10. pp. 302-310. (in Russian).

12 Aboelela D., Saleh H., Attia A.M., Elhenawy Y., Majozi T., Bassyouni M. Recent Advances in Biomass Pyrolysis Processes for Bioenergy Production: Optimization of Operating Conditions. Sustainability. 2023. vol. 15. no. 14. p. 11238. doi:10.3390/su151411238.

13 Zhao N., Low S.S., Law C.L., Wu T., Pang C.H. Co-pyrolysis of polymers: Recent advances, challenges and perspectives. Fuel Processing Technology. 2025. vol. 274. p. 108239. doi:10.1016/j.fuproc.2025.108239.

14 Yu S., Zhang H., Liu Z., Yi T., Mao X., Liang X., Nie Y. Design and optimization of electromagnetic induction heating pyrolysis reactor based on load impedance model and heat transfer model. Chemical Engineering Journal. 2025. vol. 509. p. 160851. doi:10.1016/j.cej.2025.160851.

15 Ghodke P.K., Sharma A.K., Pandey J.K., Chen W.-H., Patel A., Ashokkumar V. Pyrolysis of sewage sludge for sustainable biofuels and value-added biochar production. Journal of Environmental Management. 2021. vol. 298. p. 113450. doi: 10.1016/j.jenvman.2021.113450.

16 Sahoo K., Behera U.S., Poddar S. Recycling processes and exploitation of waste to obtain energy and challenges: a mini review. International Journal of Environmental Science and Technology. 2025. doi:10.1007/s13762-025-06502-5

17 Puligundla P., Mok C. Valorization of sugar beet pulp through biotechnological approaches: recent developments. Biotechnology Letters. 2021. vol. 43. pp. 1253-1263. doi:10.1007/s10529-021-03146-6.

18 Jackowski M., Niedźwiecki Ł., Jagiełło K., Uchańska O., Trusek A. Brewer's Spent Grains - Valuable Beer Industry By-Product. Biomolecules. 2020. vol. 10. no. 12. p. 1669. doi:10.3390/biom10121669.

19 Robazza A., Welter C., Kubisch C., Baleeiro F.C.F., Ochsenreither K., Neumann A. Co-Fermenting Pyrolysis Aqueous Condensate and Pyrolysis Syngas with Anaerobic Microbial Communities Enables L-Malate Production in a Secondary Fermentative Stage. Fermentation. 2022. vol. 8. no. 10. p. 512. doi:10.3390/fermentation8100512.

20 Morya S., Sandhu D., Neumann A., Simon C.J. Chapter 3: Sustainable Environmental Remediation by Valorization of Agro-food Industrial Waste and By-products. Green Chemistry Series. 2023. pp. 70-94. doi: 10.1039/BK9781837670093-00070.

Сведения об авторах

Мария Ю. Балабанова старший преподаватель, кафедра промышленной экологии и техносферной безопасности, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, mariya_balabanova@mail.ru

https://orcid.org/0000-0002-7126-2863

Сергей Ю. Панов д.т.н., профессор, кафедра прикладной математики и механики, Воронежский государственный технический университет, ул. 20-летия Октября, 84, г. Воронеж, 394006, Россия, su-panov@mail.ru

https://orcid.org/0000-0003-2257-8180

Александр Ю. Марнов слушатель, кафедра прикладной математики и механики, Воронежский государственный технический университет, ул. 20-летия Октября, 84, г. Воронеж, 394006, Россия, su-panov@mail.ru

https://orcid.org/0009-0005-9613-2271

Information about authors

Mariya Yu. Balabanova Cand. Sci. (Engin.), assistant professor, Department of Industrial Ecology and Technosphere Safety, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, mariya_balabanova@mail.ru

https://orcid.org/0000-0002-7126-2863

Sergej Yu. Panov doctor of technical sciences, professor, department of applied mathematics and mechanics, Voronezh State Technical University, 20th Anniversary of October Street, 84, Voronezh, 394006, Russia, su-panov@mail.ru

https://orcid.org/0000-0003-2257-8180

Aleksandr Yu. Marnov listener, department of applied mathematics and mechanics, Voronezh State Technical University, 20th Anniversary of October Street, 84, Voronezh, 394006, Russia, su-panov@mail.ru

https://orcid.org/0009-0005-9613-2271

Вклад авторов

Все авторы в равной степени принимали участие в написании рукописи и несут ответственность за плагиат

Contribution

All authors are equally involved in the writing of the manuscript and are responsible for plagiarism

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Поступила 11/12/2024	**После редакции** 18/01/2025	**Принята в печать** 10/02/2025

Received 11/12/2024	**Accepted in revised** 18/01/2025	**Accepted** 10/02/2025