

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-4-340-348>

УДК 662.7+662.8

Технология производства MSF-топлива – направление, обеспечивающее переход к циркулярной экономике

Акад. НАН Беларуси, докт. техн. наук Б. М. Хрусталеv¹, канд. техн. наук А. Н. Пехота²,
канд. техн. наук Р. Н. Вострова², Е. А. Пехота²

¹Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь),

²Белорусский государственный университет транспорта (Гомель, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2022
Belarusian National Technical University, 2022

Реферат. В статье представлена разработанная авторами технология многокомпонентного брикетирования твердого топлива (MSF-топлива), позволяющая сократить экономические потери от неиспользования горючих отходов производственной и коммунальной жизнедеятельности человека. Рассмотрены вопросы энерго- и ресурсосбережения, рационального использования природных и вторичных ресурсов в соответствии с Национальной стратегией устойчивого развития Республики Беларусь на период до 2035 года. Проанализированы понятие, структура и принципы циркулярной экономики. Дана характеристика основным направлениям использования и переработки отходов, не нашедших применения в традиционных технологиях и энергетике. Представлены некоторые аспекты проведенных исследований по производству многокомпонентного твердого топлива. Описана технология брикетирования влажных смесей с добавлением различных связующих веществ, в том числе горючих отходов, с учетом факторов, влияющих на производительность брикетирующей установки и плотность топлива. Проанализированы различные соотношения компонентов брикетируемого топлива и определены составы, при которых достигаются наилучшие производственные, потребительские и экологические показатели. Исследованы энергетические и физико-химические характеристики производимого многокомпонентного топлива. Разработаны алгоритмы подбора компонентов топлива. Полученные результаты могут применяться для решения задач по рациональному использованию горючих производственных отходов путем производства многокомпонентного твердого топлива, соответствующего установленным энергетическим и экологическим требованиям.

Ключевые слова: горючие отходы, твердое топливо, многокомпонентный состав, связующее, осадок сточных вод, нефтесодержащие отходы, теплота сгорания, технология брикетирования, выбросы, энергоресурсы, древесные отходы

Для цитирования: Технология производства MSF-топлива – направление, обеспечивающее переход к циркулярной экономике / Б. М. Хрусталеv [и др.] // *Наука и техника*. 2022. Т. 21, № 4. С. 340–348. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-4-340-348>

Technology for Production of MSF-fuel – Direction Providing Transition to Circular Economy

В. М. Khroustalev¹, А. N. Pekhota², R. N. Vostrova², Е. А. Pekhota²

¹Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus),

²Belarusian State University of Transport (Gomel, Republic of Belarus)

Abstract. The paper presents the technology of multi-component briquetting of solid fuel (MSF-fuel) developed by the authors, which makes it possible to reduce economic losses from the non-use of combustible waste from industrial and

Адрес для переписки

Пехота Александр Николаевич
Белорусский государственный университет транспорта
ул. Кирова, 34,
246653, г. Гомель, Республика Беларусь
Тел.: +375 23 231-93-45
1555522@mail.ru

Address for correspondence

Pekhota Alexander N.
Belarusian State University of Transport
34, Kirov str.,
246653, Gomel, Republic of Belarus
Tel.: +375 23 231-93-45
1555522@mail.ru

municipal human activities. The issues of energy and resource saving, rational use of natural and secondary resources in accordance with the National Strategy for Sustainable Development of the Republic for the period up to 2035 are considered in the paper. The concept, structure and principles of the circular economy are analyzed. The paper provides characteristics of the main areas of use and processing of waste that have not found application in traditional technologies and energy. Some aspects of the conducted research on the production of multicomponent solid fuels are presented in the paper. The technology of briquetting wet mixtures with the addition of various binders, including combustible waste, is described, taking into account the factors that affect the performance of the briquetting plant and the density of the fuel. Various ratios of the components of briquetting fuel have been analyzed and the compositions are determined, at which the best production, consumer and environmental indicators are analyzed. The paper studies the energy and physico-chemical characteristics of the produced multicomponent fuel. Algorithms for selecting fuel components have been developed. The results obtained can be used to solve problems of rational use of combustible industrial waste by producing a multicomponent solid fuel that meets the established energy and environmental requirements.

Keywords: combustible waste, solid fuel, multicomponent composition, binder, sewage sludge, oily waste, heat of combustion, briquetting technology, emissions, energy resources, wood waste

For citation: Khurstalev B. M., Pekhota A. N., Vostrova R. N., Pekhota E. A. (2022) Technology for Production of MSF-fuel – Direction Providing Transition to Circular Economy. *Science and Technique*. 21 (4), 340–348. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-4-340-348> (in Russian).

Введение

Сегодня Республика Беларусь, исходя из невысокого уровня обеспеченности собственными энергоресурсами, проявляет стремление к переходу на разумные принципы функционирования зеленой экономики, что нашло отражение в Национальной стратегии устойчивого развития на период до 2035 г. Это предполагает многообразие подходов государства и бизнеса к повышению энерго- и ресурсоэффективности с учетом необходимости снижения экологических последствий в производственной деятельности.

Перспективной современной тенденцией для многих стран, ограниченных в ресурсах, в том числе для Беларуси, является переход к циркулярной экономике, нацеленной на повторное использование, восстановление и переработку уже задействованных ресурсов, что способствует увеличению жизненного цикла продукции. Иными словами, циркулярная экономика – это направление развития и функционирования эффективных бизнес-моделей, при которых производственная структура пытается повторить закрытую природную цепочку, где все, что произведено и использовано обществом, должно быть полностью переработано внутри этих звеньев без возникновения экологических проблем.

Для реализации принципов циркулярной экономики необходимо создавать максимально закрытые циклы производства, в которых ресурсы не выбывают, а превращаются в новые товарные продукты, и при этом используются экономически оправданные возобновляемые источники энергии. Вместе с тем реализация

полного рециклинга предполагает не только явные экологические преимущества, связанные с минимизацией отходов и загрязнения окружающей среды, но и экономическую выгоду, проявляющуюся на уровне как производства, так и потребления. В отличие от сложившихся тенденций, циркулярная экономика нацеливает производителей на выпуск долговечных и экологически безопасных товаров, которые не содержат вредных для здоровья и экологии веществ. Упрощенная структура циркулярной экономики с учетом биологического и технологического циклов представлена на рис. 1.

Циркулярная экономика основана на принципах [1]:

- сохранения и увеличения естественного капитала путем управления ограниченными запасами и балансирования потоков возобновляемых ресурсов;
- оптимизации выбывания ресурсов за счет циркуляции продуктов, компонентов и материалов с наивысшей полезностью на протяжении всего времени на всех этапах как в техническом, так и в биологическом циклах;
- содействия повышению эффективности систем путем выявления негативных внешних факторов и последующего перепроектирования производственной деятельности.

В большинстве стран развитие безотходного производства и потребления находится на невысоком уровне. Однако постепенное внедрение безотходных технологий и эффективных бизнес-моделей переработки отходов, а также международная кооперация и сотрудничество могут ускорить переход от традиционной линейной экономики к перспективной и действенной экономике замкнутого цикла.

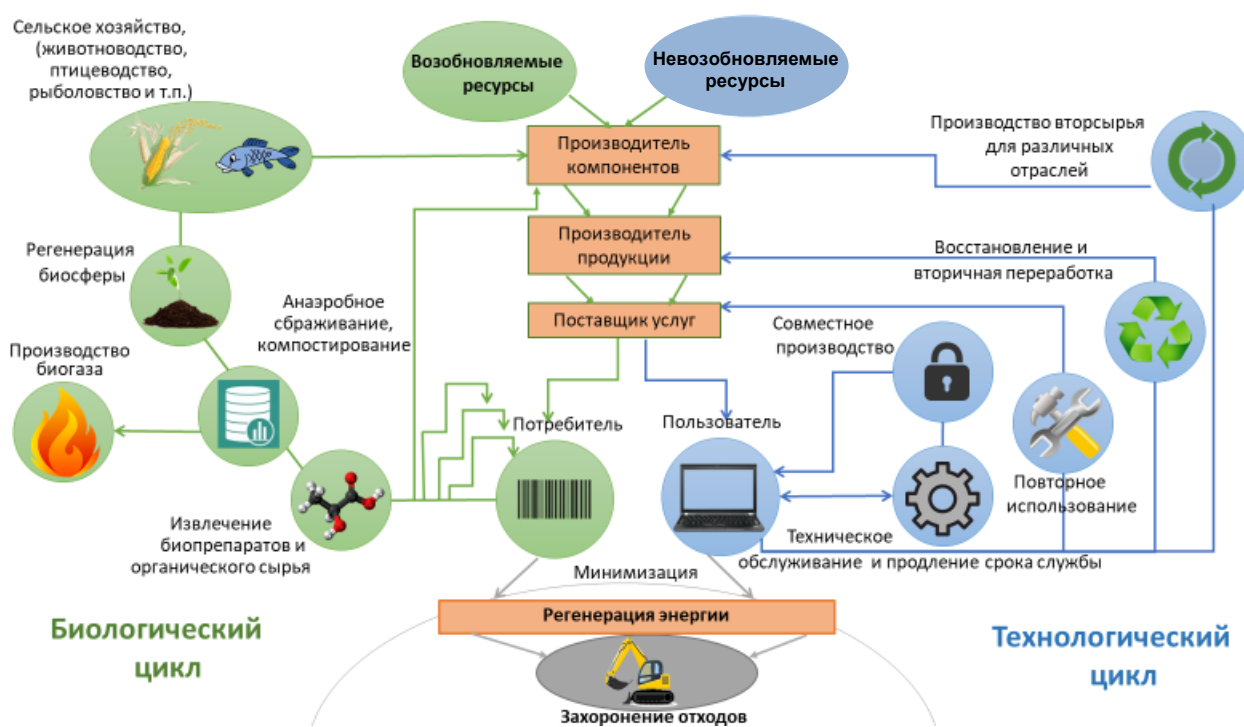


Рис. 1. Структура циркулярной экономики

Fig. 1. Structure of Circular Economy

Аспекты применения горючих отходов для получения твердого топлива

В связи с вышеизложенным возникает необходимость разработки технологий производства топлива на основе горючих отходов и их составов, соответствующего требованиям экологической безопасности при сжигании. Сложность задачи заключается в том, что различные виды горючих отходов отличаются происхождением, дисперсностью, структурой, наличием в составе механических примесей и включений, степенью влажности, гранулометрическим составом. К тому же в них имеются нежелательные вещества, в том числе антропогенного характера, затрудняющих экологически безопасное сжигание. Указанные особенности не позволяют перерабатывать такого рода отходы в оборудовании, применяемом в традиционных технологиях производства брикетированного и гранулированного топлива.

Проведенные ранее исследования показали, что в ситуации с отходами, не нашедшими применения в других технологиях, решением проблемы может стать специализированный подбор оптимального многокомпонентного состава с обязательным использованием в брикетируемой смеси экологически чистых отходов в определен-

ной пропорции с загрязненными [2–5]. Такой подход при формировании многокомпонентных смесей в пределах заданной влажности обеспечивает оптимальное и сбалансированное соотношение химических элементов в конечном составе топлива и нормированные параметры содержания вредных веществ в выбросах при сжигании в котлоагрегатах.

Разработанная и смоделированная открытая система многокомпонентного брикетирования базируется и на таком обязательном факторе, как использование связующего в составе топливной смеси. Продолжительный опыт экспериментальных исследований, изучение моделей процесса и практика брикетирования позволили определить широкую группу отходов производства и жизнедеятельности человека, успешно применяемых в качестве связующего. К ним можно отнести гидролизный лигнин, отходы очистных сооружений предприятий деревообработки, целлюлозно-бумажных производств, городской коммунально-бытовой канализации (осадок сточных вод) и др. Кроме того, связующими свойствами обладают различные углеродсодержащие (УВД) отходы, применение которых в составе топлива допускается ТКП 17.11-01–2009. Многокомпонентное брикетированное твердое топливо со связую-

щим все шире применяется под брендовым названием MSF-топливо (multicomponent solid fuel) [2, 3].

Проблемы использования горючих отходов и методы их решения

В настоящее время введены ряд государственных программ, связанных с организацией сбора, обезвреживания и использования обширного спектра отходов, образующихся и накопленных в производственном секторе и коммунальном хозяйстве. При этом для некоторых видов отходов практически нет экономически доступных технологий, позволяющих в полной мере превратить их в предмет бизнеса с возможностью получения прибыли.

Значительный энергетический потенциал имеют нефтесодержащие, древесные, сельскохозяйственные и иные вторичные горючие отходы, не нашедших применения в других технологиях. Поэтому комплексная переработка таких отходов путем получения многокомпонентного твердого топлива является эффективным решением актуальных задач, имеющих научную новизну и важное практическое значение для увеличения доли местных топливно-энергетических ресурсов, создания дополнительных рабочих мест, стабильной сырьевой базы для энергетических установок [2–4].

Углеродсодержащие отходы – это отходы продуктов переработки нефти, а также отходы (шламы, остатки, смеси), содержащие нефтепродукты или насыщенные ими (рис. 2). Наиболее эффективные методы их использова-

ния – сжигание и регенерация. Однако ввиду того, что такие вещества (смеси веществ) образуются в результате производственной деятельности, т. е. относятся к отходам производства, зачастую их регенерация проблематична или экономически нецелесообразна.

Стоит отметить, что УВД-отходы имеют различные химический состав и физические свойства. Кроме того, в них присутствуют механические примеси, тяжелые металлы, сера, избыточное содержание воды, что затрудняет их применение в традиционных технологиях переработки или требует подготовительных мероприятий для использования их в качестве топлива [5].

Осадок сточных вод (ОСВ) – это отходы, образующиеся в результате очистки хозяйственно-бытовых и производственных сточных вод. В настоящее время они в основном складываются на территории очистных сооружений, что создает неблагоприятную экологическую ситуацию вблизи мест их размещения. Основные направления использования и переработки ОСВ представлены на рис. 3.

ОСВ является видом энергетически насыщенных горючих отходов, состоит из органических (до 80 %) и минеральных (около 20 %) веществ, выделенных из воды в результате механической, биологической и физико-химической очистки. Ежегодное количество осадков, выделяющихся при очистке сточных вод на очистных сооружениях различной степени оснащенности, составляет 2–10 % от объема поступающих вод [2, 6–8].

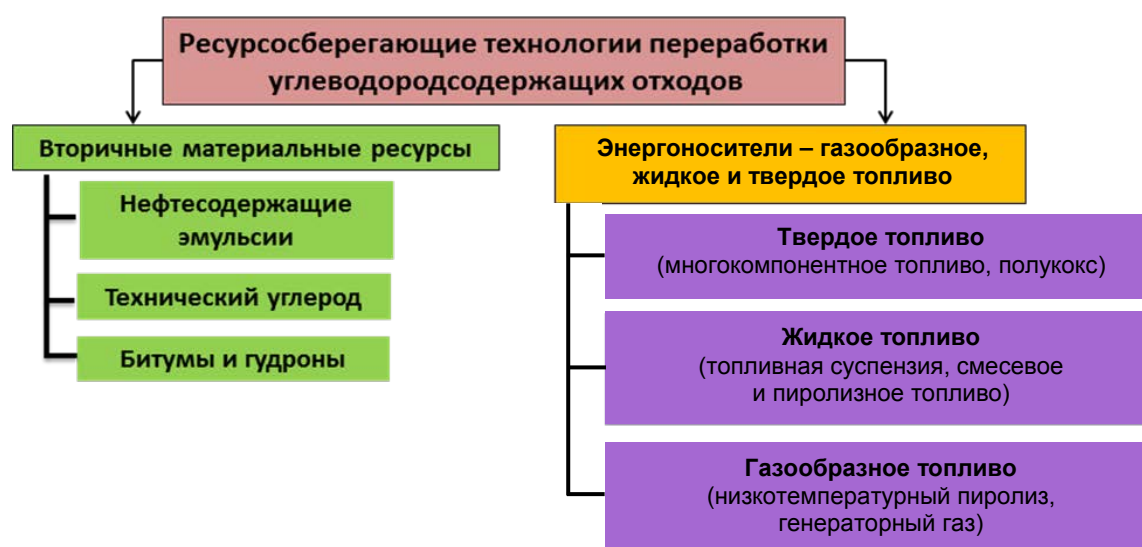


Рис. 2. Основные направления получения вторичных ресурсов после переработки углеводородсодержащих отходов

Fig. 2. Main directions for obtaining secondary resources after processing of hydrocarbon-containing waste

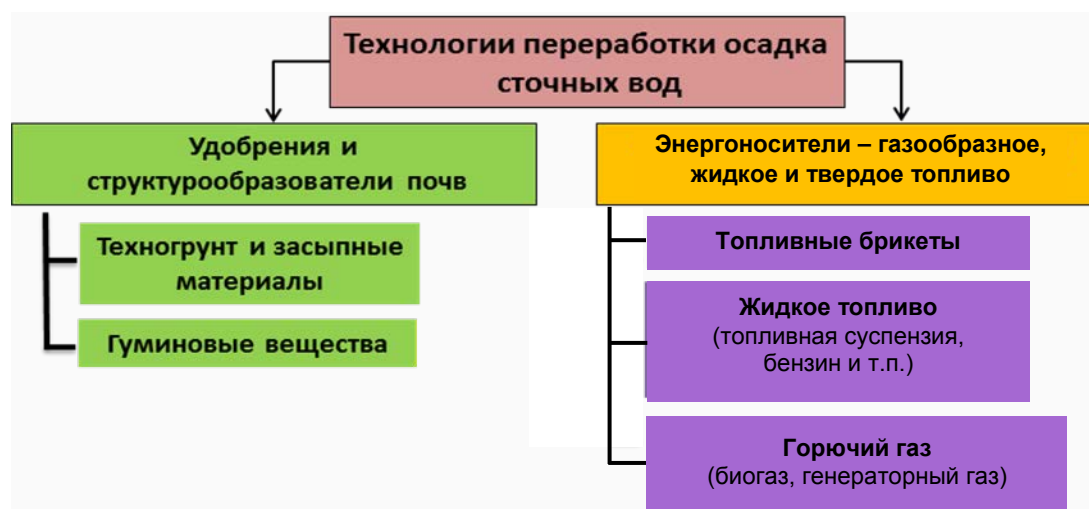


Рис. 3. Основные направления использования и переработки осадка сточных вод

Fig. 3. Main areas of use and processing of sewage sludge

В то же время для производственных и коммунальных предприятий все более актуальным становится вопрос выбора технологии, позволяющей сократить площади для размещения ОСВ или обеспечить его полную переработку в процессе поступления.

Древесные отходы – это мелкие остатки лесоматериалов, древесного сырья, образующихся в процессе производства основной продукции лесозаготовок, лесопиления, деревообработки, рубок ухода за лесом. Основной их особенностью является средняя теплота сгорания, обеспечивающая низкий уровень выбросов загрязняющих веществ при сжигании, а также малое процентное содержание зольного остатка.

Научные исследования потенциала MSF-топлива

Научные исследования по использованию горючих отходов ведутся кафедрами «Теплогазоснабжение и вентиляция» Белорусского национального технического университета и «Физика и энергоэффективные технологии» Белорусского государственного университета транспорта с 2005 г. Разработана технология производства многокомпонентного твердого топлива с использованием образующихся на предприятиях и в коммунальном хозяйстве осадков сточных вод, вязких углеводородсодержащих и древесных отходов. Преимуществами полученного MSF-топлива являются полное сжигание используемых в нем горючих компонентов с выделением заданных тепло-

технических характеристик и соответствие требованиям транспортировки и хранения.

Представленная технология получения твердого топлива позволяет использовать в качестве связующего компонента нефтешламы, насыщенные нефтепродуктами опилки, ветошь, сорбирующие материалы, эмульсии нефтепродуктов, отработанные смазки, отходы очистки мазутных и нефтяных резервуаров, нефтеловушек очистных сооружений. При этом доля УВД-отходов в топливе при совместном использовании ОСВ и древесных отходов составляет 3,0–7,9 %. Пределы варьирования зависят от содержания ОСВ, причем для эффективного и экологически безопасного сжигания MSF-топлива долевое соотношение указанного компонента должно быть 32,8–48,6 %. Соблюдение нормированных параметров при сжигании многокомпонентного топлива обеспечивается в основном за счет повышенного использования чистых отходов, например отходов деревообработки, лесопиления и переработки древесины, по разным причинам не находящих технологического применения (механические примеси, высокая влажность, разный морфологический состав, биохимические процессы), сельскохозяйственного производства и переработки продукции.

В основу научных исследований положено изменение подходов к брикетированию и совершенствование технологических схем и процессов производства твердого топлива. Схема процесса брикетирования в упрощенном виде состоит из операций, представленных на рис. 4.



Рис. 4. Последовательность операций получения брикетированного MSF-топлива

Fig. 4. Sequence of operations for obtaining briquetted MSF-fuel

Для реализации указанной технологической схемы создана опытно-промышленная установка, обеспечивающая все необходимые циклы технологического регламента производства топлива. Поставлен ряд научных экспериментов [2–10], позволивших выявить закономерности и впоследствии создать промышленную установку, которая работает в г. Речице. Принципиальная технологическая схема производства MSF-топлива с использованием ОСВ методом непрерывного брикетирования влажных многокомпонентных составов представлена в [9].

Проведено имитационное моделирование процесса брикетирования, учитывающее особенности работы установки и технологии получения твердого топлива на основе многокомпонентных смесей. Целесообразность имитационного моделирования обусловлена необходимостью исследовать основные параметры технологического процесса и определить его характеристик, рассмотреть варианты модели, отвечающие различным сторонам функционирования опытно-промышленной установки, и получить значения количественных характеристик разработанного технологического процесса. Моделирование позволяет проанализировать различные сценарии путем проведения экспериментов в режиме реального времени на имитационной модели установки, а не на реальном объекте. Это дает возможность сэкономить ресурсы, избежав слишком дорогих экспериментов, и вместе с тем проиграть любые ситуации, включая те, при которых установка может выйти из строя.

Для моделирования технологического процесса по производству твердого топлива на ос-

нове смеси древесных и вязких нефтесодержащих отходов предложена математическая модель массового обслуживания, реализованная в пакете автоматизации имитационного моделирования GPSSWorld. Испытание включало два этапа: верификацию и проверку адекватности. Последний этап проведен на реальных данных по статистике работы опытно-промышленной установки. Затем осуществлена оценка: погрешности имитации, обусловленной наличием в имитационной модели генераторов псевдослучайных чисел; длины переходного периода в модели, устойчивости результатов моделирования; чувствительности откликов к изменениям входных параметров.

Разработанная имитационная модель технологического процесса для производства твердого топлива на основе смеси ОСВ, древесных и вязких углеводородсодержащих отходов позволила определить:

- оптимальное соотношение компонентного состава брикетируемой массы (ОСВ 48 %, древесных отходов 49 %, отходов нефтепродуктов 3 %);

- оптимальную влажность брикетируемой массы (38–43 %), при которой производительность установки будет максимальной и составит не менее 18,2 кг/мин.

Полученные данные использованы для имитационного моделирования экспериментов с многокомпонентными составами твердого топлива с обработкой в программе Statistica 7. Кроме того, они позволили в процессе подготовки многокомпонентных смесей достигать гомогенизации с выделением природных связующих

компонентов без химического и термического воздействия. Так, при обработке отходов импульсным искровым разрядом методом электрогидравлической обработки можно снижать содержание нежелательных химических веществ, что обеспечивает экологичность получаемого топлива. За счет определенной частоты и силы разряда достигается необходимая консистенция влажной смеси с мелкодисперсными частицами и связующими веществами, образующими коллоидно-дисперсные растворы, пригодные к брикетированию [7].

Поскольку некоторые компоненты в составе твердого топлива на основе горючих отходов малоизучены, помимо традиционных параметров дополнительно исследованы фазовые со-

стояния теплотехнических характеристик и фактические значения основных показателей твердого топлива. Лабораторные исследования проведены изотермическими и неізотермическими методами термического разложения веществ многокомпонентного топлива с применением дифференциально-термического анализа (ДТА) и термогравиметрического анализа. Это позволило рассчитать кинетические константы соответствующих процессов, тепловые эффекты реакции, определить температуру начала разложения и другие характеристики [9]. На рис. 5, 6 представлены дериватограммы многокомпонентного твердого топлива разных марок, позволяющие оценить его качество.

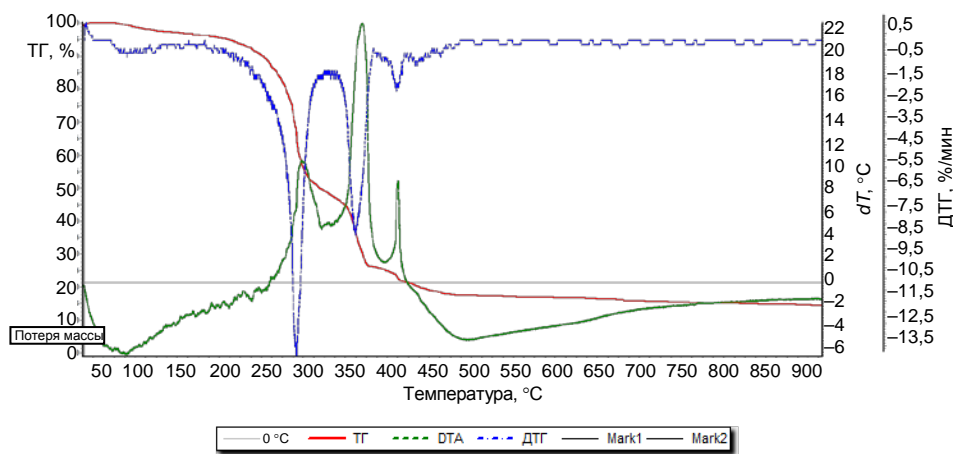


Рис. 5. Дериватограмма двухкомпонентного твердого топлива марки МКУ1-1с

Fig. 5. Derivatogram of two-component solid fuel of MKU[MKU]1-1c grade

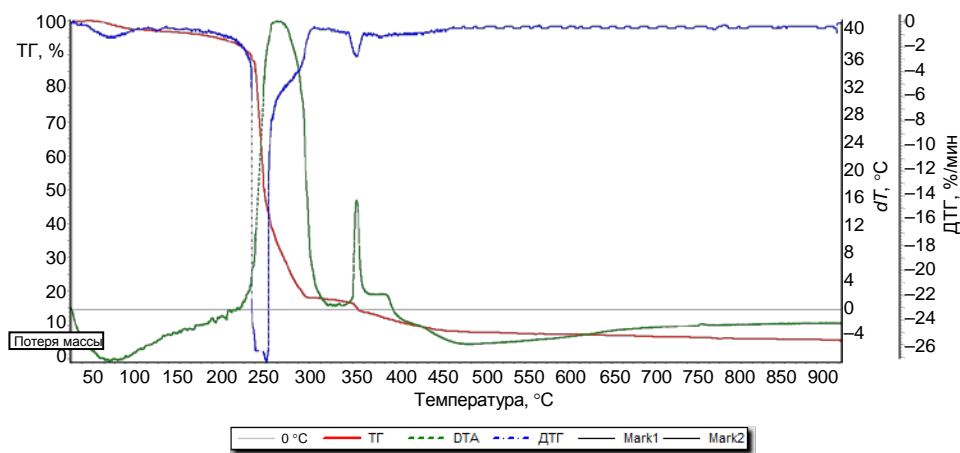


Рис. 6. Дериватограмма трехкомпонентного твердого топлива марки МСУ8-1с

Fig. 6. Derivatogram of three-component solid fuel of MSU[MSU]8-1c grade

Термический анализ двухкомпонентного топлива марки МКУ1-1с, полученного на основе смеси древесных опилок (50 %) и ОСВ очистных сооружений (50 %) (рис. 6), показывает, что терморазложение топлива начинается с испарения свободной влаги (содержание 2 %). Это заметно по пику ДТА при достижении максимальной температуры 100 °С. При температуре около 260 °С начинается интенсивная деструкция основных компонентов топлива и отмечается первый эндотермический пик горения 320 °С. В результате на графике образуется ступенчатый пик в интервале 260–320 °С, сопровождаемый выделением основной массы летучих веществ с потерей 40,0 % массы. При этом наблюдаются еще два эндотермических пика горения, указывающие на реакции вторичного пиролиза топлива: в интервалах 350–380 °С с дополнительной потерей 20 % массы и 400–420 °С с потерей 5 % массы летучих продуктов. Зольность топлива составила 18 %.

Термический анализ трехкомпонентного топлива марки МСУ8-1с, полученного на основе смеси древесных опилок (70 %), лигнина (15 %), нефтешламов (15 %) (рис. 7), также показывает, что терморазложение топлива начинается с испарения свободной влаги (содержание 3 %). Это заметно по пику ДТА при достижении максимальной температуры 120 °С. При температуре около 230 °С начинается интенсивная деструкция основных компонентов топлива и отмечается первый эндотермический пик горения 300 °С. В результате на графике образуется ступенчатый пик в интервале 230–300 °С, сопровождаемый выделением основной массы летучих веществ с потерей 75,0 % массы. При этом наблюдаются еще два эндотермических пика горения, указывающие на реакции вторичного пиролиза топлива в интервалах 350–370 °С с потерей 3 % массы и 380–390 °С с потерей 1 % массы летучих продуктов. Зольность топлива составила 8 %.

Зольности трехкомпонентного топлива марки МСУ8-1с, определенная согласно реакции горения, на 10 % выше, чем у двухкомпонентного топлива марки МКУ1-1с, что объясняется

наличием минеральных составляющих в используемых нефтешламах. При этом показатели зольности обеих исследованных марок твердого топлива, полученного на основе различного соотношения коммунальных, углеродсодержащих и древесных отходов, с хорошим запасом (от 2 до 12 %) соответствуют требованиям норм и допусков, изложенных в ГОСТ 11022–95 и ГОСТ 33511.

ВЫВОДЫ

1. В современном мире как никогда актуален вопрос утилизации промышленных и бытовых отходов и обеспечения экологической безопасности. Его решением может стать внедрение принципов циркулярной экономики, что в долгосрочной перспективе позволит снизить импортозависимость и укрепить экономическую безопасность государства.

2. Разработана технология многокомпонентного брикетирования твердого топлива (MSF-топлива), позволяющая сократить экономические потери от неиспользования горючих отходов производственной и коммунальной жизнедеятельности человека, не нашедших технологического применения. Исследованы оптимальные составы топлива, включающего полидисперсные твердые коммунальные отходы и связующие, в том числе на основе отходов нефтепродуктов.

3. Использование математических моделей и имитационного моделирования технологического процесса производства позволяет рассчитать оптимальное с энергетической и экологической точек зрения соотношение компонентного состава топлива. Особенностью реализации такой технологической разработки является подбор компонентов для брикетирования твердого топлива с учетом основных характеристик энергоустановок и возможность достижения высокой производительности брикетирования при наибольшей плотности топливных брикетов. Результаты численного моделирования по определению оптимального состава брикетированного многокомпонентного топлива подтверждаются данными проведенного термического анализа.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сочеева, В. Е. Циркулярная модель экономики как новый подход к проблеме устойчивого развития / В. Е. Сочеева // Экономика и бизнес: теория и практика. 2018. № 7. С. 122–125.
 2. Твердое топливо на основе отходов малоиспользуемых горючих энергоресурсов / Б. М. Хрусталева [и др.] // Наука и техника. 2021. Т. 20, № 1. С. 58–65. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-1-58-65>.
 3. Хрусталева, Б. М. Композиционное твердое топливо на основе вторичных горючих отходов / Б. М. Хрусталева, А. Н. Пехота // Энергоэффективность. 2016. № 4. С. 18–22.
 4. Хрусталева, Б. М. К вопросу применения эксергетического метода термодинамического анализа при оценке и разработке энергоиспользования в промышленных теплотехнологиях / Б. М. Хрусталева, В. Н. Романюк, А. Н. Пехота // Энергетическая стратегия. 2017. № 1. С. 50–56.
 5. Хрусталева, Б. М. Твердое топливо из углеводородсодержащих, древесных и сельскохозяйственных отходов для локальных систем теплоснабжения / Б. М. Хрусталева, А. Н. Пехота // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2017. Т. 60, № 2. С. 147–158. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2017-60-2-147-158>.
 6. Multicomponent Solid Fuel Production Technology Using Waste Water / A. N. Pekhota [et al.] // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2021. Т. 64, № 6. С. 525–537. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-6-525-537>.
 7. Пехота, А. Н. Многокомпонентное твердое топливо: моногр. / А. Н. Пехота. Гомель: БелГУТ, 2021. 243 с.
 8. Пехота, А. Н. Определение эффективности параметров брикетирования и сушки многокомпонентных составов твердого топлива / А. Н. Пехота, Б. М. Хрусталева // Энергетическая стратегия. 2022. № 2. С. 34–38.
 9. Пехота, А. Н. Исследование термоаналитическими методами энергетических свойств брикетированного многокомпонентного топлива / А. Н. Пехота, С. А. Филатов // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2022. Т. 65, № 2. С. 143–155. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-2-143-155>.
 10. Пехота, А. Н. Исследование энергетических характеристик многокомпонентного твердого топлива с использованием некондиционных горючих коммунальных и производственных отходов / А. Н. Пехота // Наука и техника. 2022. Т. 21, № 2. С. 164–174. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-2-164-174>.
- Поступила 06.04.2022
Подписана в печать 10.06.2022
Опубликована онлайн 29.07.2022
1. Socheeva V. E. (2018) Circular Economy Model as a New Approach to the Problem of Sustainable Development. *Ekonomika i Biznes: Teoriya i Praktika* [Economics and Business: Theory and Practice], (7), 122–125 (in Russian).
 2. Khroustalev B. M., Pekhota A. N., Nguyen Thuy Nga, Vu Minh Phap (2021) Solid Fuel Based on Waste of Low-Utilized Combustible Energy Resources. *Nauka i Tekhnika = Science and Technique*, 20 (1), 58–65. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-1-58-65> (in Russian).
 3. Khroustalev B. M., Pekhota A. N. (2016) Composite Solid Fuel Based on Secondary Combustible Waste. *Energoeffektivnost* [Energy Efficiency], (4), 18–22 (in Russian).
 4. Khroustalev B. M., Romaniuk V. N., Pekhota A. N. (2017) On the Issue of Applying the Exergy Method of Thermodynamic Analysis in the Assessment and Development of Energy use in Industrial Heat Technologies. *Energeticheskaya Strategiya* [Energy Strategy], (1), 50–56 (in Russian).
 5. Khroustalev B. M., Pekhota A. N. (2017) Solid Fuel of Hydrocarbon, Wood and Agricultural Waste for Local Heat Supply Systems. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 60 (2), 147–158. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2017-60-2-147-158> (in Russian).
 6. Pekhota A. N., Khroustalev B. M., Vu Minh Phap, Romaniuk V. N., Pekhota E. A., Vostrova R. N., Nguyen Thuy Nga (2021) Multicomponent Solid Fuel Production Technology Using Waste Water. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 64 (6), 525–537. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-6-525-537>.
 7. Pekhota A. N. (2021) *Multicomponent Solid Fuel*. Gomel, Publishing House of the Belarusian State University of Transport. 243 (in Russian).
 8. Pekhota A. N., Khroustalev B. M. (2022) Determination of the Efficiency of Briquetting and Drying Parameters of Multicomponent Solid Fuel Compositions. *Energeticheskaya Strategiya* [Energy Strategy], (2), 34–38 (in Russian).
 9. Pekhota A. N., Filatov S. A. (2022) Investigation of Energy Properties of Briquetted Multicomponent Fuel by Thermo-Analytical Methods. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 65, (2), 143–155. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-2-143-155> (in Russian).
 10. Pekhota A. N. (2022) Study of Energy Characteristics of Multicomponent Solid Fuel Using Substandard Municipal and Industrial Waste Fuels. *Nauka i Tekhnika = Science and Technique*, 21 (2), 164–174. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-2-164-174> (in Russian).

REFERENCES

1. Socheeva V. E. (2018) Circular Economy Model as a New Approach to the Problem of Sustainable Development.

Received: 06.04.2022

Accepted: 10.06.2022

Published online: 29.07.2022