

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-2-143-155>

УДК 628.38, 662.8.05

Исследование термоаналитическими методами энергетических свойств брикетированного многокомпонентного топлива

А. Н. Пехота¹⁾, С. А. Филатов²⁾

¹⁾Белорусский государственный университет транспорта (Гомель, Республика Беларусь),

²⁾Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова НАН Беларуси (Минск, Республика Беларусь)

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

Реферат. В статье представлены исследования по экономии энергетических ресурсов за счет создания условий и внедрения в производственную деятельность современных энергоэффективных технологий и оборудования, позволяющих развивать производство и использование местных видов топлива, в том числе путем брикетирования горючих коммунальных и промышленных отходов. Цель и задачи работы состоят в изучении тенденций и анализе проблем, связанных с переработкой и применением различных видов горючих отходов, образующихся и накопленных на промышленных и сельскохозяйственных предприятиях, а также в сфере жилищно-коммунального хозяйства. Рассмотрены основные направления национальной стратегии устойчивого развития, касающиеся энерго- и ресурсосбережения и рационального использования природных и вторичных ресурсов. Исследованы способы брикетирования многокомпонентных составов горючих отходов, позволяющие получить твердое топливо. Описана разработанная авторами инновационная технология переработки отходов производства методом брикетирования с использованием различных связующих веществ. Представлены результаты и выполнен анализ проведенных экспериментальных исследований в соответствии с теорией планирования эксперимента для многокомпонентных систем с учетом фазовых равновесий. Выполнена качественная оценка состава брикетируемого топлива, при котором обеспечивается наибольшая плотность брикета и эффективная производительность, с учетом влажности многокомпонентной смеси. Определены качественные показатели производимого двух- и трехкомпонентного топлива с использованием дифференциально-термического анализа на дериватографе MOM-1500, которые позволяют выявить фазовые превращения и химические реакции, протекающие при нагревании. Сравнительный анализ качественных показателей позволил сделать выводы о возможности применения разработанных составов топлива в эксплуатируемых топливосжигающих установках.

Ключевые слова: твердое топливо, многокомпонентный состав, осадок сточных вод, связующее, углеводородные отходы, теплота сгорания, дифференциально-термический анализ, технология брикетирования, утилизация отходов, нетрадиционные энергоресурсы

Для цитирования: 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>

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

Investigation of Energy Properties of Briquetted Multicomponent Fuel by Thermo-Analytical Methods

A. N. Pekhota¹⁾, S. A. Filatov²⁾

¹⁾Belarusian State University of Transport (Gomel, Republic of Belarus),

²⁾A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Sciences of Belarus (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. The paper presents studies on saving energy resources by creating conditions and introducing modern energy-efficient technologies and equipment into production activities that allow to develop the production and use of local fuels, including the use of briquetting of combustible municipal and industrial waste. The purpose and objectives of the work are to study trends and analyze the problems associated with the processing and use of various types of combustible waste generated and accumulated in industrial and agricultural enterprises, as well as in the field of housing and communal services. The main directions of national sustainable development strategy concerning energy and resource saving and rational use of natural and secondary resources are considered in the paper. Methods for briquetting multicomponent compositions of combustible wastes with the possibility of obtaining solid fuels have been studied. An innovative production technology developed by the authors is described that makes it possible to process waste products by briquetting with the use of various binders. The results are presented and the analysis of the conducted experimental studies is carried out in accordance with the theory of experiment planning for multicomponent systems, taking into account phase equilibria. A qualitative assessment of the component composition of the briquetted fuel, which ensures the highest density of the briquette and effective performance, is carried out taking into account of the moisture content of the multicomponent mixture. Qualitative indicators of the produced two- and three-component fuels have been determined using differential thermal analysis on the MOM-1500 derivatograph, which make it possible to identify phase transformations and chemical reactions occurring during heating. Comparative analysis of qualitative indicators has permitted to draw conclusions about the possibility of using the developed fuel compositions in operated fuel combustion plants.

Keywords: solid fuel, multicomponent composition, sewage sludge, binder, hydrocarbon waste, calorific value, differential thermal analysis, briquetting technology, recycling, non-traditional energy resources

For citation: Pekhota A. N., Filatov S. A. (2022) Investigation of Energy Properties of Briquetted Multicomponent Fuel by Thermo-Analytical Methods. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 65 (2), 143–155. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-2-143-155> (in Russian)

Введение

Для национальной экономики любой страны, в том числе Республики Беларусь, одной из важнейших задач является рациональное и эффективное использование топливно-энергетических ресурсов. Основным объемом экономии получают за счет внедрения в производство современных энергоэффективных технологий, оборудования и материалов. Большое внимание уделяется мероприятиям по вовлечению в топливно-энергетический баланс страны таких возобновляемых источников энергии, как местные виды топлива и отходы собственного производства.

Национальной стратегией по обращению с твердыми коммунальными отходами и вторичными материальными ресурсами в Республике Беларусь на период до 2035 г. предусмотрено, что к 2030 г. уровень переработки отходов должен составлять 40 %. Эта задача реализуется за счет рационального использования природных ресурсов, предотвращения образования отходов, их максимального вовлечения в хозяйственный оборот в качестве дополнительных источников сырья, материалов и применения в виде гранулированного топлива, RDF-топлива и брикетов для производства тепловой и электрической энергии [1, 2].

В связи с этим необходимо разработать технологии производства топлива с использованием горючих отходов, обеспечивающие его экологически безопасное сжигание.

Основная часть

Различные виды горючих отходов отличаются происхождением, дисперсностью, структурой, наличием в химическом составе механических примесей и включений, повышенной влажностью, а также гранулометрическим составом. Кроме того, в них присутствуют нежелательные антропогенные вещества, затрудняющие экологически безопасное сжигание. Все это не позволяет перерабатывать такого рода отходы на существующем оборудовании, применяемом в традиционных технологиях производства брикетированного и гранулированного топлива.

Как показали исследования [3–7], решением указанной проблемы является специализированный подбор оптимального многокомпонентного состава с обязательным использованием в брикетируемой смеси экологически чистых отходов. Такой подход обеспечивает сбалансированное соотношение химических элементов в конечном составе топлива и нормированные параметры содержания и выбросов вредных веществ при сжигании в котлоагрегатах.

Разработанная технология 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 группу отходов, успешно применяемых в качестве связующего [4, 7]. Среди них широкий спектр углеводородсодержащих отходов, использование которых в составе топлива допускается ТКП 17.11-01–2009: гидролизный лигнин, отходы очистных сооружений предприятий деревообработки, целлюлозно-бумажных производств, городской коммунально-бытовой канализации (осадок сточных вод) и др.

На рис. 1 представлена принципиальная технологическая схема многокомпонентного брикетирования твердого топлива (MSF-топливо) с использованием связующих.

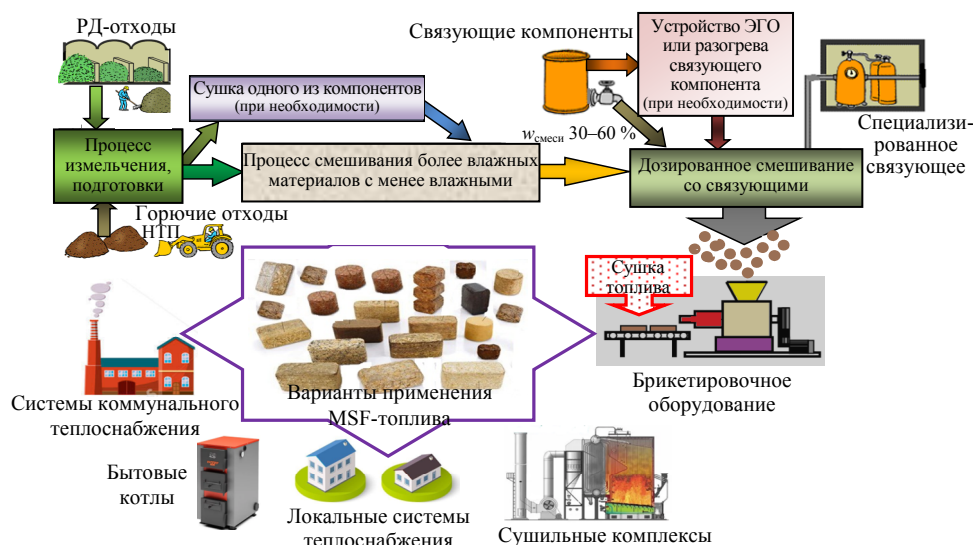


Рис. 1. Принципиальная технологическая схема брикетирования MSF-топлива с использованием связующих методом непрерывного брикетирования влажных многокомпонентных составов

Fig. 1. Basic technological scheme of MSF briquetting using binders by continuous briquetting method of wet multicomponent compositions

В многокомпонентном брикетировании используются в том числе различные измельченные горючие отходы растительно-древесного происхождения (РД-отходы) – отходы деревообработки, лесозаготовок, уборки и переработки сельскохозяйственных культур (солома, лузга, шелуха, костра и т. п.). В большинстве разработанных многокомпонентных составов это базовый компонент, к которому добавляют другие виды загрязненных горючих отходов в оптимальном соотношении. Так, например, связующими компонентами могут быть отработанные нефтесодержащие сорбенты, топливные и масляные элементы фильтров, донные отложения мазутных резервуаров, опилки и ветошь, насыщенные нефтепродуктами, осадки сточных вод очистных сооружений, отходы птицеводства и животноводства, гидролизного производства, горючие коммунально-бытовые отходы и т. п. Важным условием их применения является определенный технологический цикл подготовки [5–7].

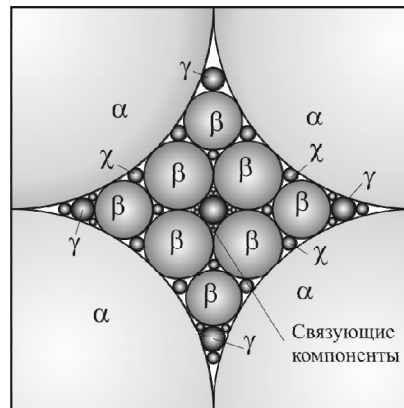
К основным факторам, определяющим формирование структурного каркаса многокомпонентного брикета, относятся гранулометрический состав, активность поверхности, влажность брикетируемой смеси, условия и пропорции смешивания компонентов, давление, создаваемое в матрице при брикетировании. Гранулометрический состав определяется суммарной поверхностью соприкосновения брикетируемых частиц, количеством и величиной пустот в структурном каркасе топлива, содержанием остроугольных частиц, рельефом их поверхности и обязательным наличием пылевидных частиц.

Принцип уплотнения смеси с частицами различной крупности при производстве MSF-топлива (рис. 2) заключается в создании структурной ком-

позиции, отвечающей наиболее плотной упаковке и обеспечивающей в дальнейшем качественные механические и энергетические показатели твердого топлива.

Рис. 2. Схема структуры с наиболее плотной упаковкой зерен диаметром α , β , γ , χ в многокомпонентной смеси при брикетировании твердого топлива

Fig. 2. Diagram of the structure with the most dense packing of grains with diameters α , β , γ , χ in a multicomponent mixture during solid fuel briquetting



Четыре крупных зерна α условно принимаются за сферы, которые, касаясь друг друга, образуют фигуру в виде криволинейного ромба. Свободное пространство заполняется зернами β . Далее пространство между зернами α и β занимают зерна γ и χ . Таким образом, при создании многокомпонентного твердого топлива, начиная с зерна α (его размеры не более 8–10 мм, объемная составляющая не более 20 %), происходит упаковка зерен различного размера в оптимальной пропорции, а включение пылевидных частиц и углеродсодержащих отходов приводит к повышению удельной поверхности и, следовательно, уплотнению брикетов в результате активного заполнения пустот.

Научная новизна предлагаемой технологии состоит в использовании математических моделей, позволяющих рассчитать оптимальное с энергетической и экологической точек зрения соотношение компонентов топлива исходя из их физико-химического состава, получить брикетированное топливо с учетом особенностей используемых для сжигания энергоустановок, а также достигнуть оптимальной производительности брикетирования и наибольшей плотности брикетов с помощью разработанной установки и инновационного технологического процесса, защищенного патентами [8–10] и заявками на изобретения.

Для решения указанной задачи использовались алгоритм, реализующий теорию планирования эксперимента и математическое моделирование процессов получения составов топлива и распространения выбросов при его сжигании в слоевых топках, система компьютерной математики Mathcad и математический программный комплекс STATISTICA 7 (промышленная статистика, планы для смесей с ограничениями). В процессе моделирования достигнуты условия, при которых получена достоверная информация о брикетировании двух- и трехкомпонентных составов топлива и протекающих процессах с количественной оценкой точности методами регрессионного анализа [11, 12]. Геометрическая интерпретация полного факторного эксперимента для трехкомпонентного топлива представлена на рис. 3.

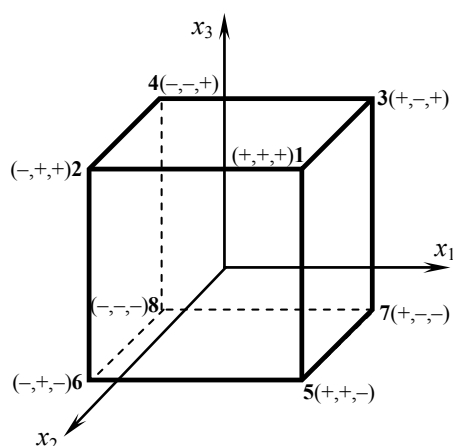


Рис. 3. Геометрическая интерпретация полного факторного эксперимента для трехкомпонентного топлива
 Fig. 3. Geometric interpretation of the full factorial experiment for a three-component fuel

Изучение физико-химических процессов, происходящих в сложных гетерогенных системах, осуществлено в соответствии с учением о фазовых равновесиях, представляющих собой общие закономерности для равновесных систем, содержащих любое число фаз и компонентов и подчиняющихся правилу фаз Гиббса. Проведенные экспериментальные исследования показали, что на многокомпонентную топливную смесь с учетом ее равновесия существенное влияние оказывают два основных внешних фактора – температура и давление.

Цель исследований – анализ и нахождение оптимального многокомпонентного состава твердого топлива с применением трансформированного цикла улучшения качества Шухарта – Деминга – цикла МАІС, включающего графическую визуализацию результатов в виде состав – свойство. Так, с помощью программы STATISTICA 7 получены адекватные уравнения регрессии, характеризующие степень влияния каждого компонента и их попарных сочетаний на показатели производительности брикетирования и плотность производимого топлива. На основе уравнений регрессии построены поверхности отклика с применением метода Гиббса – Розебома, представляющие собой равносторонние треугольники (рис. 4), вершины которых соответствуют заданному варьированию содержания компонентов – влажности смеси (А), осадка сточных вод (В), измельченных древесных отходов (С) и нефтешламов (D).

На основании теории планирования эксперимента, позволяющей получить математическое описание протекающего в установке технологического процесса, в виде уравнения множественной регрессии второго порядка с учетом анализа и обработки результатов выполненных опытов определено, что при влажности брикетируемой смеси 38–42 %, производительности установки по производству многокомпонентного твердого топлива 18 кг/мин, содержании в составе смеси 32,8–48,6 % осадков сточных вод, 3 % углеродсодержащих отходов плотность брикета составляет 0,86 кг/м³.

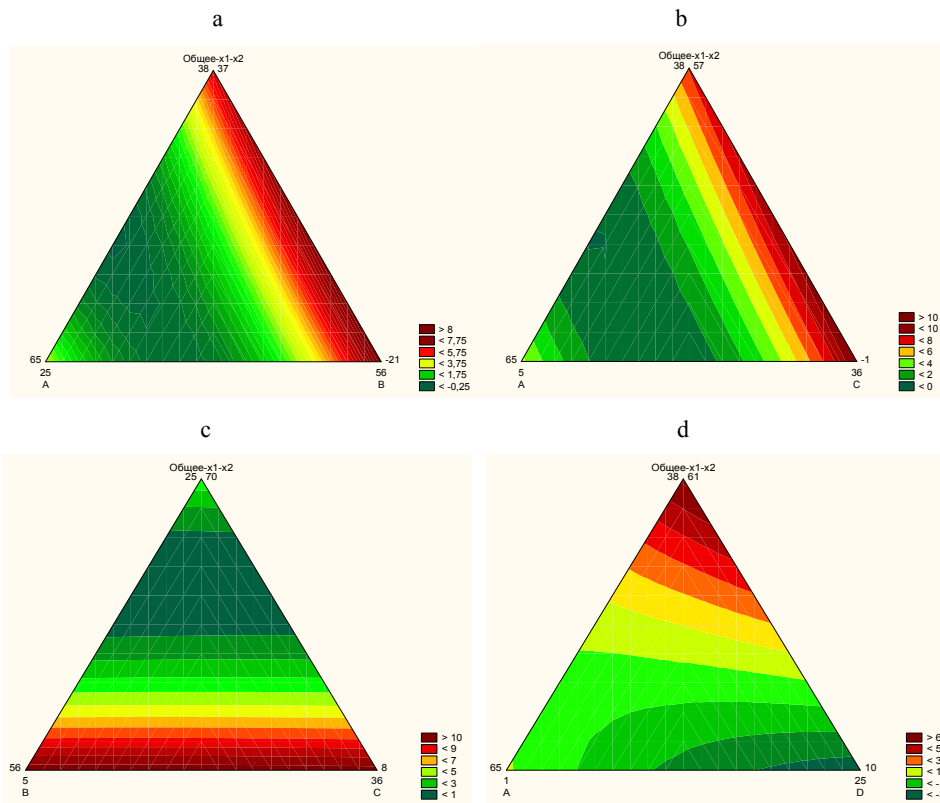


Рис. 4. Графическое изображение влияния компонентного состава на определяемые характеристики (a–d)

Fig. 4. Graphic representation of the effect of the component composition on the determined characteristics (a–d)

На рис. 5 представлены брикеты, изготавливаемые по инновационной технологии производства многокомпонентного топлива с использованием горючих отходов.



Рис. 5. Внешний вид многокомпонентного твердого топлива: а – сушка брикета в контейнере; б – брикет, получаемый на производстве

Fig. 5. Appearance of multicomponent solid fuel: a – briquette drying in container; b – briquette obtained in production

Использование отходов со связующими свойствами в технологии многокомпонентного брикетирования с измельченными горючими сыпучими отходами различного происхождения решает ряд комплексных задач, таких как комбинированная утилизация различных видов отходов, уменьшение объемов и площадей их складирования, экономически целесообразная транспортировка брикетированной продукции на значительные расстояния, а также возможность сжигать брикеты в котлоагрегатах со слоевыми топками [11, 13].

Исследования 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 с применением метода 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 [13].

Для изучения теплотехнических характеристик и фактических значений основных показателей твердого топлива (рис. 6) выполнены традиционные лабораторные исследования в соответствии с ГОСТ 33515, ГОСТ 33513, ГОСТ 2408.3, ГОСТ 33511, ГОСТ 33108, дополненные изотермическими и неизотермическими методами термического разложения веществ, дифференциально-термическими и термогравиметрическими методами анализа. Они позволяют рассчитать кинетические константы соответствующих процессов, тепловые эффекты реакции, определить температуру начала разложения и другие характеристики [14].



Рис. 6. Внешний вид топлива:

а – двухкомпонентного МРД2-1с; б – трехкомпонентного МСУ8-1с

Fig. 6. Fuel appearance:

а – two-component MPD2-1c; б – three-component MSU8-1c

Дифференциально-термический анализ (ДТА) позволил выявить фазовые превращения и химические реакции, протекающие в многокомпонентном топливе при нагревании, по термическим эффектам, сопро-

вождающим эти изменения. При помощи ДТА легко установить динамику энтальпии, связанную с химическими реакциями, происходящими в материале под влиянием теплоты, изменение состояния и превращение фаз в данной пробе. На основании кривой термографии можно производить стехиометрические расчеты или вычислять процентное содержание веществ [14, 15].

Указанные анализы выполнены на дериватографе MOM-1500 (Венгрия), позволяющем определить с высокой точностью энергетическое состояние топлива и его компонентов, характер протекающих физических или химических превращений, подобрать компоненты смесей требуемого качества, определить эффективность катализирующих и связующих добавок.

Результаты термического анализа многокомпонентного твердого топлива представлены на рис. 7–9.

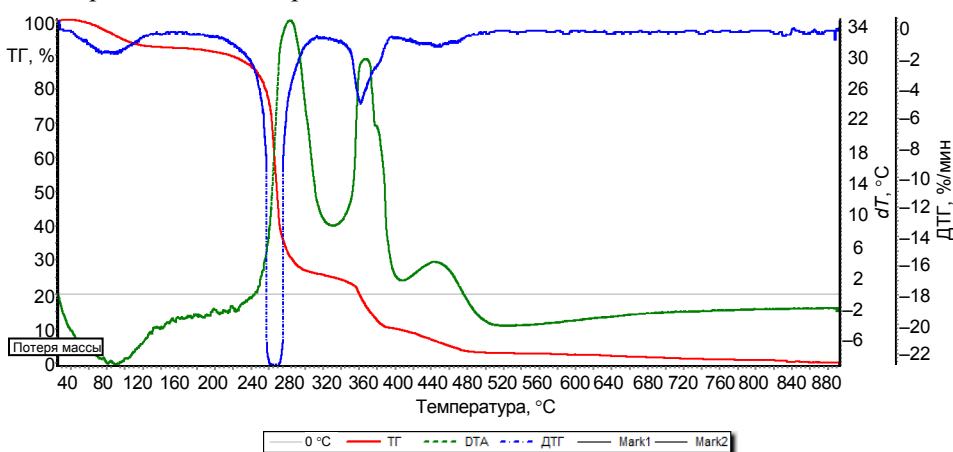


Рис. 7. Дериватограмма двухкомпонентного твердого топлива марки МРД2-1с

Fig. 7. Derivatogram of two-component solid fuel of the brand MRD2-1c

Согласно анализу дериватограммы двухкомпонентного топлива марки МРД2-1с (древесные опилки 98 %, связующее жидкое стекло 2 %) (рис. 7), терморазложение топлива начинается с испарения свободной влаги (ее содержание 8 %), что заметно по потере массы 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, когда происходит выделение основной массы летучих продуктов с потерей 65,3 % массы. При этом наблюдаются еще два эндотермических пика горения, указывающие на реакции вторичного пиролиза топлива в интервалах 340–400 и 420–480 °С с выделением летучих продуктов и потерей 13–15 и 7 % массы соответственно. Зольность топлива составила 5 % при допустимом ГОСТ 11022 значении 20 %.

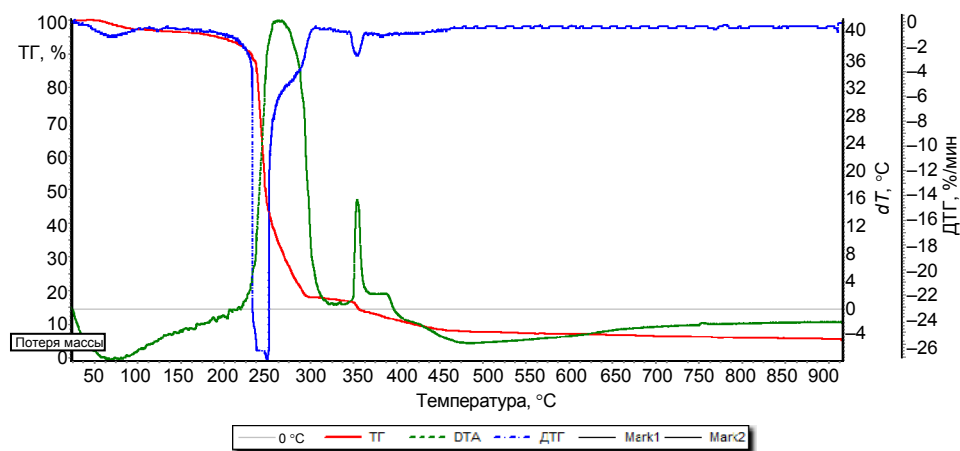


Рис. 8. Дериватограмма трехкомпонентного твердого топлива марки МСУ8-1с

Fig. 8. Derivatogram of three-component solid fuel of the brand MSU8-1c

Термический анализ трехкомпонентного топлива марки МСУ8-1с (древесные опилки 70 %, лигнин 15 %, нефтешламы 15 %) показывает (рис. 8), что его терморазложение также начинается с испарения свободной влаги (содержание 3 %), что заметно по потере массы при 65–85 °С. При температуре около 230 °С начинается интенсивная деструкция основных компонентов топлива и отмечается первый эндотермический пик горения 300 °С. Образуется ступенчатый пик в интервале 230–300 °С, сопровождаемый выделением летучих веществ с потерей 75,0 % массы. 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 8 %.

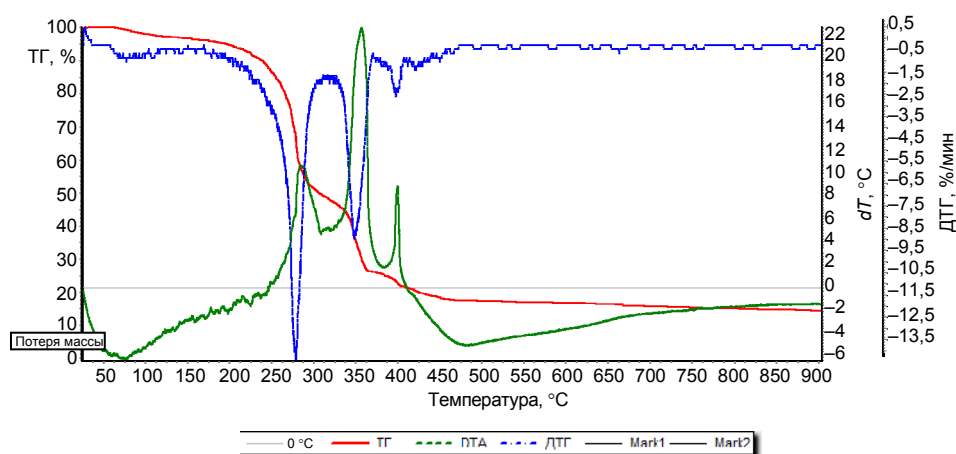


Рис. 9. Дериватограмма двухкомпонентного твердого топлива марки MKU1-1c

Fig. 9. Derivatogram of two-component solid fuel of the brand MKU1-1c

Терморазложение двухкомпонентного топлива марки МКУ1-1с (древесные опилки 50 %, осадки сточных вод очистных сооружений 50 %) (рис. 9) также начинается с испарения свободной влаги (содержание 2 %), что заметно по потере массы при достижении максимальной температуры в 78 °С. При температуре около 260 °С начинается интенсивная деструкция основных компонентов топлива и отмечается первый эндотермический пик горения 320 °С. В результате 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 18 %.

Таким образом, зольность трехкомпонентного топлива марки МСУ8-1с незначительно выше, чем двухкомпонентного МРД2-1с, что объясняется наличием минеральных компонентов в составе нефтешламов. При этом показатели зольности всех трех марок твердого топлива соответствуют требованиям ГОСТ 11022, ГОСТ 33511.

ВЫВОДЫ

1. Методом дифференциально-термического анализа установлены температуры превращений, фазовый состав, теплота реакций, зольность топлива и другие параметры, дающие представление о качественных характеристиках нового альтернативного источника энергии на основе многокомпонентных составов горючих отходов.

2. Получены математические модели, позволяющие рассчитать оптимальное с энергетической и экологической точек зрения соотношение компонентов топлива исходя из их физико-химического состава. Особенность реализации такой технологии заключается в подборе компонентов топлива с минимальной влажностью, при которой обеспечивается наибольшая плотность брикетов.

3. Получены результаты численного моделирования по определению оптимального состава брикетированного многокомпонентного топлива, которые подтверждаются данными термического анализа с использованием дериватографа МОМ-1500.

4. Практическая значимость разработанной технологии брикетирования многокомпонентного твердого топлива с оптимальным составом заключается в комплексном использовании различных отходов, что позволяет обеспечить местными видами топлива регионы, а также решать актуальные проблемы по утилизации отходов без применения дорогостоящих котлов-утилизаторов и других технологий утилизации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Национальная стратегия по обращению с твердыми коммунальными отходами и вторичными материальными ресурсами в Республике Беларусь на период до 2035 года:

- утв. пост. Совета Министров Респ. Беларусь 28.07.2017 № 567 // Нац. правовой Интернет-портал Респ. Беларусь, 05.08.2017, 5/44015.
2. Осипов, С. Н. Повышение эффективности получения тепловой энергии из бытовых стоков / С. Н. Осипов, А. В. Захаренко // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2019. Т. 62, № 5. С. 482–498. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-5-482-498>.
 3. Хрусталева, Б. Многокомпонентное твердое топливо на основе малоиспользуемых отходов / Б. Хрусталева, А. Н. Пехота // Энергетика и ТЭП. 2011. № 11. С. 16–19.
 4. Хрусталева, Б. М. Энергоэффективное многокомпонентное твердое топливо на основе малоиспользуемых отходов / Б. М. Хрусталева, А. Н. Пехота // Наука – образованию, производству, экономике: материалы 11-й Междунар. науч.-техн. конф.: в 4 т. Т. 1. Минск: БНТУ, 2013. С. 146.
 5. Хрусталева, Б. М. Композиционное твердое топливо на основе вторичных горючих отходов / Б. М. Хрусталева, А. Н. Пехота // Энергоэффективность. 2016. № 4. С. 18–22.
 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. Хрусталева, Б. М. Технология эффективного использования углеводородсодержащих отходов в производстве многокомпонентного твердого топлива / Б. М. Хрусталева, А. Н. Пехота // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2016. Т. 59, № 2. С. 122–140. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2016-59-2-122-140>.
 8. Способ получения топлива твердого многокомпонентного: пат. 18408 Респ. Беларусь, МПК С 10 L 5/48, С 10 L 5/06, С 10 L 5/36 / А. Н. Пехота, Б. М. Хрусталева; заявитель А. Н. Пехота, Б. М. Хрусталева, № а20120656; заявл. 25.04.2012; опубл. 30.08.2014 // Афіцыйны бюл. Нац. цэнтра інтэлект. уласнасці. 2014. № 3. С. 174.
 9. Состав для брикетирования топлива многокомпонентного: пат. 18463 Респ. Беларусь МПК С 10 L 5/04, С 10 L 5/48 / А. Н. Пехота, Б. М. Хрусталева; заявитель А. Н. Пехота, Б. М. Хрусталева, № а20120655; заявл. 25.04.2012; опубл. 30.08.2014 // Афіцыйны бюл. Нац. цэнтра інтэлект. уласнасці. 2014. № 3. С. 207.
 10. Состав для брикетирования топлива многокомпонентного: пат. 18130 Респ. Беларусь МПК С 10 L 5/44, С 10 L 5/48 / А. Н. Пехота, Б. М. Хрусталева; заявитель А. Н. Пехота, Б. М. Хрусталева, № а20120676; заявл. 30.04.2012; опубл. 30.04.2014 // Афіцыйны бюл. Нац. цэнтра інтэлект. уласнасці. 2014. № 2. С. 124.
 11. Пехота, А. Н. Многокомпонентное твердое топливо / А. Н. Пехота; М-во трансп. и коммуникаций Респ. Беларусь, Белорус. гос. ун-т трансп. Гомель: БелГУТ, 2021. 243 с.
 12. Сидняев, П. И. Введение в теорию планирования эксперимента / П. И. Сидняев, Н. Т. Вилисова. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2011. 463 с.
 13. Хрусталева, Б. М. 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>.
 14. Берг, Л. Г. Введение в термографию / Л. Г. Берг. М.: Наука, 1969. 224.
 15. Термический анализ. Ч. 1. Методы термического анализа / В. И. Ивлев [и др.]. Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2017. 44 с.

Поступила 21.12.2021 Подписана в печать 15.02.2022 Опубликована онлайн 31.03.2022

REFERENCE

1. National Strategy for the Management of Municipal Solid Waste and Secondary Material Resources in the Republic of Belarus for the Period up to 2035 / Resolution of the Council of Ministers of the Republic of Belarus dated 28.07.2017 No 567.
2. Osipov S. N., Zakharenko A. V. (2019) Improving the Efficiency of Heat Power Generation from Household Drains. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions*

- and Power Engineering Associations, 62 (5), 482–498. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-62-5-482-498> (in Russian).
3. Khroustalev B., Pekhota A. (2011) Multicomponent Solid Fuel Based on Low-Utilized Waste. *Energetika i TEK [Energy and Fuel and Energy Complex]*, (11), 16–19.
 4. Khroustalev B. M., Pekhota A. N. (2013) Energy-Efficient Multicomponent Solid Fuel Based on Low-Used Waste. *Science to Education, Industry, Economics: Proceedings of the 11th International Scientific and Technical Conference: in 4 Vol. Vol. 1*. Minsk, BNTU Publ. 146.
 5. Khroustalev B. M., Pekhota A. N. (2016) Composite Solid Fuel Based on Secondary Combustible Waste. *Energoeffektivnost [Energy Efficiency]*, (4), 18–22.
 6. Pekhota A. N., Khroustalev B. M., Vu M. P., Romanyuk V. N., Pekhota E. A., Vostrova R. N., Nguyen T. N. (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. Khroustalev B. M., Pekhota A. N. (2016) Technology for Efficient Usage of Hydrocarbon-Containing Waste in Production of Multi-Component Solid Fuel. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 59 (2), 122–140. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2016-59-2-122-140> (in Russian).
 8. Method for Producing Multicomponent Solid Fuel: Patent 18408 Republic of Belarus, MIIK [International Patent Classification] C 10 L 5/48, C 10 L 5/06, C 10 L 5/36 / A. N. Pekhota, B. M. Khroustalev; Applicant: Pekhota A. N., Khroustalev B. M.; No a20120656; Applied on 25.04.2012; Published on 30.08.2014. Official Bulletin. National Center of Intellectual Property. 2014. No 3. P. 174.
 9. Composition for Briquetting Multicomponent Fuel: Patent 18463 Republic of Belarus MIIK C 10 L 5/04, C 10 L 5/48 / A. N. Pekhota, B. M. Khroustalev; Applicant: Pekhota A. N., Khroustalev B. M.; No a20120655; Applied on 25.04.2012; Published on 30.08.2014. Official Bulletin. National Center of Intellectual Property. 2014. No 3. P. 207.
 10. Composition for Briquetting Multicomponent Fuel: Patent 18130 Republic of Belarus MIIK [International Patent Classification] C 10 L 5/44, C 10 L 5/48 / A. N. Pekhota, B. M. Khroustalev; Applicant: Pekhota A. N., Khroustalev B. M.; No a20120676; Applied on 30.04.2012; Published on 30.04.2014. Official Bulletin. National Center of Intellectual Property. 2014. No 2. P. 124.
 11. Pekhota A. N. (2021) *Multicomponent Solid Fuel*. Gomel, BelGUT. 243.
 12. Sidnyaev P. I., Vilisova N. T. (2011) *Introduction to the Theory of Experimental Design*. Moscow, Publishing House of Bauman Moscow State Technical University. 463 (in Russian).
 13. Khroustalev B. M., Pekhota A. N., Nguyen N. T., Vu P. M. (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>.
 14. Berg L. G. (1969) *Introduction to Thermography*. Moscow, Nauka Publ. 224.
 15. Ivlev V. I., Fomin N. E., Yudin V. A. [et al.] (2017) *Thermal Analysis. Part. 1. Methods of Thermal Analysis*. Saransk, Publishing House of N. P. Ogarev's Mordovia State University. 44 (in Russian).