

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-2-164-174>

УДК 662.8.05

Исследование энергетических характеристик многокомпонентного твердого топлива с использованием некондиционных горючих коммунальных и производственных отходов

Канд. техн. наук А. Н. Пехота¹⁾

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

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

Реферат. Рассмотрены основные направления концепции национальных стратегий устойчивого развития с учетом проблем энерго- и ресурсосбережения, а также необходимости рационального использования природных и вторичных ресурсов во многих странах мирового сообщества с целью перехода к «зеленой» экономике. Дана оценка энергетического потенциала горючих отходов, не нашедших технологического применения, как одного из приоритетных направлений в области нетрадиционной энергетики. Представлены аспекты исследований получения и производства многокомпонентного твердого топлива. Описана технология брикетирования влажных смесей с добавлением различных связующих, в том числе разнообразных горючих отходов, с целью получения твердого топлива. Отмечены особенности формирования каркаса топлива с учетом факторов, влияющих на производительность брикетирующей установки, а также достижения оптимальной плотности брикета. Выполнена качественная оценка различных соотношений компонентов брикетируемого топлива, при которых достигаются наилучшие производственные и потребительские показатели. Рассмотрены особенности подготовки материалов и применяемого технологического оборудования, работающего в составе линии подготовки и брикетирования. Изложены практические аспекты производства, сушки, использования брикетированного твердого топлива. Исследованы энергетические и физико-химические характеристики многокомпонентных составов топлива с применением разных методик и лабораторного оборудования. Предложенный алгоритм решения поставленной задачи позволяет рационально использовать некондиционные горючие производственные отходы для получения многокомпонентного твердого топлива, при этом на стадии производства учитываются энергетические и экологические аспекты.

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

Для цитирования: 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>

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

Study of Energy Characteristics of Multicomponent Solid Fuel Using Substandard Municipal and Industrial Waste Fuels

A. N. Pekhota¹⁾

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

Abstract. The main directions of the concept of national strategies for sustainable development are considered, taking into account the problems of energy and resource saving, as well as the need for the rational use of natural and secondary resources in many countries of the world community in order to transition to a “green” economy. An assessment of the energy potential of combustible waste that has not found technological application is given as one of the priority areas in the field of non-traditional energy. The paper presents aspects of research into obtaining and production of multicomponent solid fuels. A technology is described for briquetting wet mixtures with the addition of various binders, including various combustible wastes, in order to obtain solid fuel. The features of the fuel frame formation are given, taking into account the factors affecting the performance of the briquetting plant, as well as achieving the optimal density of the briquette. A qualitative assessment was made with respect to various ratios of the components of briquetted fuel, at which the best production and consumer indicators are achieved. The features of the preparation of materials and the technological equipment used as part of the preparation and briquetting line are considered. The practical aspects of the production, drying, use of briquetted solid fuels are outlined in the paper. The paper presents studies of the energy and physico-chemical characteristics of multicomponent fuel compositions using various research laboratory equipment and methods. The proposed algorithm for solving the problem makes it possible to rationally use substandard combustible production waste to obtain multicomponent solid fuel, while energy and environmental aspects are taken into consideration at the production stage.

Keywords: waste, solid fuel, multicomponent composition, binder, sewage sludge, oily waste, calorific value, briquetting technology, emissions, energy resources, wood waste

For citation: Pekhota A. N. (2022) Study of Energy Characteristics of Multicomponent Solid Fuel Using Substandard Municipal and Industrial Waste Fuels. *Science and Technique*. 21 (2), 164–174. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-2-164-174> (in Russian)

Введение

Многие страны в рамках развития концепции национальных стратегий устойчивого развития осуществляют стремительный переход к «зеленой» экономике, которая направлена на сохранение благополучия общества за счет эффективного использования природных и материальных ресурсов. При этом основные усилия прилагаются в области разработки и внедрения технологий, обеспечивающих возвращение продуктов конечного пользования в производственный цикл. Все больше внедряемые технологии «зеленой» экономики направлены на экономное потребление тех ресурсов, которые в настоящее время подвержены истощению (невозобновляемые полезные ископаемые – нефть, газ, уголь и др.), и рациональное использование возобновляемых ресурсов.

Вполне очевидно, что стратегия перехода к «зеленой» экономике не может содержать универсальных для всех стран приемов. Она во многом зависит от сложившихся политических, технологических и социальных условий, уров-

ня развития, обеспеченности природными ресурсами и других факторов. Учитывая глобальные изменения топливно-энергетического рынка, особенно в последние годы, многие страны уделяют значительное внимание технологиям, обеспечивающим эффективное использование производственных, коммунальных отходов и биомассы с применением технологий сжигания и получения топлива. Такие достижения в использовании нетрадиционных и возобновляемых источников энергии в энергетике возможны только за счет накопленного исследовательского, технологического и практического опыта вовлечения горючих производственных и коммунальных отходов, а также биомассы как источников химической энергии. Так, согласно данным экспертной оценки ООН, ежегодно из недр Земли извлекается около 100 млрд т полезных ископаемых. В то же время на планете скопились сотни миллиардов тонн промышленных отходов. Не лучше ситуация и с использованием твердых коммунально-бытовых отходов. Ожидается, что к 2030 г. человечеству потребуется на 50 % больше продовольствия и соответствен-

но различных минерально-сырьевых ресурсов, чем сегодня. В связи с ростом населения и развитием мировой экономики к 2035 г. глобальное потребление энергии увеличится примерно на 50 % [1].

Таким образом, уже в обозримом будущем многие государства, в первую очередь с развитой системой экономики и производства, начнут испытывать дефицит в энергетических ресурсах. Все это свидетельствует об остроте проблем энергосбережения, а также о необходимости рационального использования природных и вторичных ресурсов во всех странах мирового сообщества. В то же время последними исследованиями установлено, что экономически оправданное применение горючих бытовых и производственных отходов как энергетического топлива позволяет экономить не менее 26 % мировой энергетической потребности, причем для развивающихся стран этот процент экономии будет коррелироваться только в большую сторону.

Аспекты применения искусственных видов твердого топлива

Производства альтернативных видов топлива ориентируются на выработку недорогих энергоресурсов с использованием энергоэффективных, ресурсосберегающих технологий и различных отходов, что в большинстве случаев обеспечивает сокращение объемов образования отходов. Направление деятельности и виды отходов могут различаться и иметь свои особенности. Однако, учитывая, что одним из доступных источников для многих стран являются отходы коммунального хозяйства и биомасса различного происхождения, основное внимание при разработке технологии уделяется их использованию с последующим термическим применением. Это, безусловно, разумно в условиях формирующихся тенденций перехода в перспективе к «циркулярной» экономике.

Стоит отметить, что развитые страны активно разрабатывают различные составы, производят и сжигают твердое восстановленное топливо (англ. refuse-derived fuel – RDF), которое преимущественно получается с использованием твердых бытовых отходов (ТБО). Оно состоит в основном из горючих компонентов ТБО, таких как пластик и биоразлагаемые отходы. Технологии производства альтернативного RDF-топлива в разных странах и регионах

имеют различия. Использование его, как правило, предусмотрено на промышленных предприятиях. Теплотворная способность RDF-топлива в различных странах с применением разных технологий составляет 13–23 МДж/кг [2].

Вместе с тем, несмотря на принимаемые меры, объем образования горючих промышленных отходов ежегодно увеличивается, а использование некоторых в значительной степени затруднено ввиду отсутствия экономически выгодных и экологически безопасных технологий, обеспечивающих их переработку и рациональное применение. С начала 2000-х гг. в республике ведутся работы по созданию аналога RDF-топлива, которое авторами [2–5] названо многокомпонентным твердым топливом (МТТ), (англ. multicomponent solid fuel – MSF) [6], в составе которого используются горючие отходы, не нашедшие применения в других технологиях.

В основу метода брикетирования положены научные способы подбора многокомпонентных составов, учитывающие структурно-реологические свойства отходов, брикетизируемость многокомпонентной смеси в заданном интервале значений под воздействием давления и с учетом влажности, а также других факторов. При этом учитывается экологически приемлемое соотношение компонентов в составе брикета для минимизации экологических последствий от его применения в качестве топлива с учетом действующих требований.

Научные основы получения MSF-топлива

Поскольку в МТТ входят вещества с различным набором свойств, которые могут быть получены разнообразными способами путем смешивания тех или иных исходных материалов в разных пропорциях, возникает ряд задач по оптимизации многокомпонентных смесей. Суть этих задач заключается в расчете таких дозировок смешиваемых веществ, которые, минимизируя расход связующих веществ (отходов), позволяют готовить смеси требуемого состава при соблюдении технологических и ресурсных ограничений. В связи с общей тенденцией возрастания неоднородности вовлекаемых в производство топлива отходов на первый план выступает сложная задача получения стабильных характеристик смесей в условиях значительных вариаций состава

смешиваемых материалов, что эффективно достигается в процессе экспериментов.

Важным элементом любого исследования является проведение эксперимента – основного и наиболее совершенного метода изучения объекта или процесса. Так, автор всесторонне изучил двухкомпонентные составы [2–5, 7], что позволило на практике определить оптимальные параметры времени брикетирования брикета P с учетом различных факторов, влияющих на производительность.

В основу научного эксперимента положено определение факторов зависимости оптимальной производительности и плотности при различных процентных содержаниях формуемой смеси, состоящей из осадков сточных вод a , древесных отходов z и отходов нефтепродуктов c при массовой влажности смеси в пределах 38–42 %. Давление прессования и температура сырья во время эксперимента не изменялись.

Установка для получения твердого топлива на основе осадка сточных вод, древесных отходов и отходов нефтепродуктов рассматривалась как «черный ящик», имеющий управляемые независимые входные (факторы) и выходные (отклики системы) параметры. При используемом подходе моделировалось внешнее функционирование установки по принципу «черного ящика» (рис. 1), где a, z, c – входные переменные (факторы); P, U – выходные переменные (отклики системы); ξ – ошибка, помеха, вызываемая наличием случайных факторов; φ – оператор, моделирующий действие реальной системы, определяющий зависимость отклика от факторов; ξ_P, ξ_U – ошибка измерения P, U , вызванная наличием случайных факторов; φ_P, φ_U – оператор, определяющий зависимость откликов P и U системы от факторов.

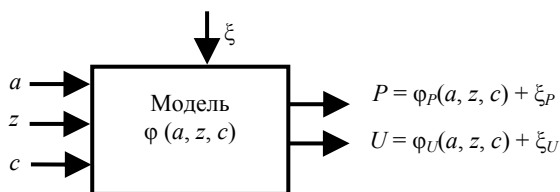


Рис. 1. Кибернетическое представление эксперимента

Fig. 1. Cybernetic representation of the experiment

Математическая модель протекающего в установке технологического процесса по производству твердого топлива формировалась по

результатам экспериментов в виде уравнения множественной регрессии. Принимали количество факторов $k = 3$ (осадки сточных вод a , древесные отходы z и отходы нефтепродуктов c), т. е. рассматривали трехмерное факторное пространство, вследствие чего для каждого фактора выбирали два уровня – верхний и нижний, на которых факторы варьировались. В этом случае для каждого из n факторов общее число опытов составляло $N = 2^n$, а полный факторный эксперимент – это эксперимент типа 2^n . Геометрической интерпретацией факторного эксперимента 2^3 является куб (рис. 2).

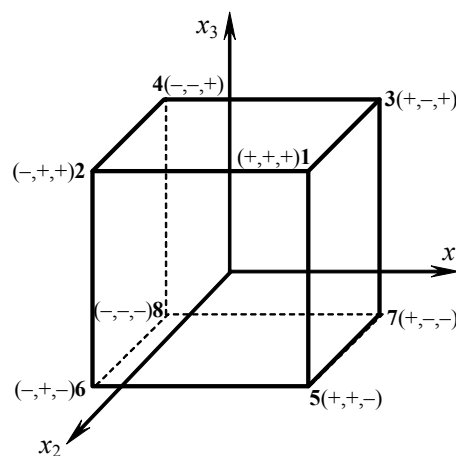


Рис. 2. Геометрическая интерпретация полного факторного эксперимента для $k = 3$

Fig. 2. Geometric interpretation of the full factorial experiment for $k = 3$

Использование ротатабельного планирования второго порядка позволяет получить математическое описание протекающего в установке технологического процесса в виде уравнения множественной регрессии второго порядка. Для числа факторов $n = 3$ математическая модель будет иметь вид

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_1x_2 + b_5x_1x_3 + b_6x_2x_3 + b_7x_1^2 + b_8x_2^2 + b_9x_3^2, \quad (1)$$

где b_i – коэффициент уравнения множественной регрессии, $i = (\overline{0, n})$.

С помощью ротатабельного планирования второго порядка получено математическое описание протекающего в установке технологического процесса в виде уравнения множественной регрессии, определяющего зависимость времени получения брикета от содержания в формуемой смеси осадков сточных вод, древесных отходов и отходов нефтепродуктов:

$$y_1(x_1, x_2, x_3) = -17,803 - 0,356x_1 + 1,658x_2 - 0,53x_3. \quad (2)$$

Модель является адекватной при выбранном уровне значимости $\alpha = 0,05$, так как $2,974 \leq F_{кр} = 5,05$. Перейдем в формуле (2) от безразмерных факторов x_1, x_2 и x_3 к размерным a, z и c , запишем математическую модель времени получения брикета

$$P(a, z, c) = 9,072 - 0,051a + 0,276z - 0,53c. \quad (3)$$

По результатам проведенного анализа качественных показателей и полученных данных эксперимента построены графические зависимости для определения оптимального соотношения компонентов с учетом оптимальной производительности. На рис. 3–5 представлены зависимости времени получения брикета P от процентного содержания в формуемой смеси осадков сточных вод a , древесных отходов z и отходов нефтепродуктов c в виде поверхностей в трехмерной системе координат.

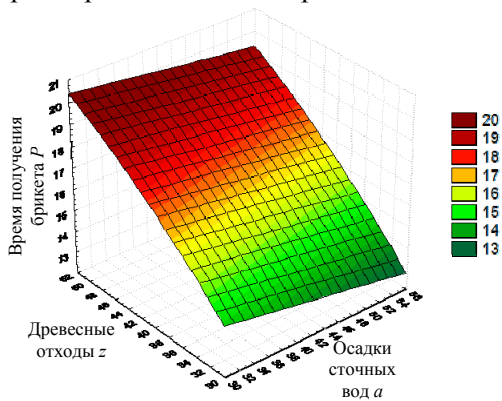


Рис. 3. Зависимость времени получения трехкомпонентного брикета P от процентного содержания осадков сточных вод a и древесных отходов z

Fig. 3. Dependence of time for obtaining three-component briquette P on percentage of sewage sludge a and wood waste z

Уравнение регрессии, определяющее зависимость плотности брикета от содержания в формуемой смеси осадков сточных вод, древесных отходов и отходов нефтепродуктов:

$$y_2(x_1, x_2, x_3) = 0,9075 + 0,0278x_1 + 0,0311x_2 + 0,0005x_3 - 0,0293x_1^2 - 0,0125x_2^2 - 0,0226x_3^2 + 0,0333x_1x_2 + 0,0071x_1x_3 - 0,0167x_2x_3. \quad (4)$$

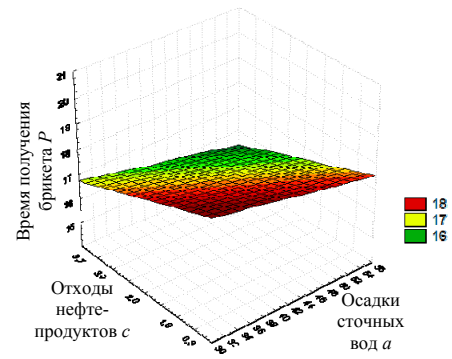


Рис. 4. Зависимость времени получения трехкомпонентного брикета P от процентного содержания осадков сточных вод a и отходов нефтепродуктов c

Fig. 4. Dependence of time for obtaining of three-component briquette P on percentage of sewage sludge a and waste of petroleum products c

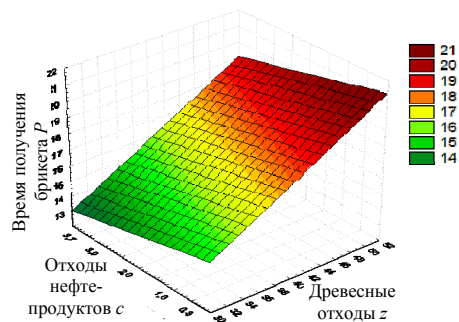


Рис. 5. Зависимость времени получения трехкомпонентного брикета P от процентного содержания древесных отходов z и отходов нефтепродуктов c

Fig. 5. Dependence of time for obtaining three-component briquette P on percentage of wood waste z and waste of petroleum products c

Модель является адекватной при выбранном уровне значимости $\alpha = 0,05$, так как $3,064 \leq F_{кр} = 5,05$. Перейдем в формуле (4) от безразмерных факторов x_1, x_2 и x_3 к размерным a, z и c , получим математическую модель показателя плотности брикета

$$U(a, z, c) = -0,733998 + 0,020828a + 0,005013z + 0,160819c - 0,000598a^2 - 0,000346z^2 - 0,022572c^2 + 0,000794az + 0,001020ac - 0,002778zc. \quad (5)$$

По результатам проведенного анализа качественных показателей и полученных данных эксперимента построены графические зависимости для определения оптимального соотношения компонентов с учетом минимальной влажности при оптимальных производительности и плотности. На рис. 6–8 приведены зави-

симости плотности брикета U от процентного содержания в формуемой смеси осадков сточных вод a , древесных отходов z и отходов нефтепродуктов c в виде поверхностей в трехмерной системе координат.

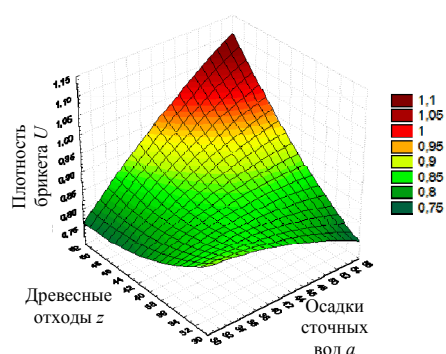


Рис. 6. Зависимость плотности трехкомпонентного брикета U от процентного содержания осадков сточных вод a и древесных отходов z

Fig. 6. Dependence of density of three-component briquette U on percentage of sewage sludge a and wood waste z

Технология получения MSF-топлива основана на влажном брикетировании многокомпонентных смесей с использованием связующих компонентов или материалов, обеспечивающих в составе брикетируемой смеси процессы объединения мелких разобщенных частиц в крупные структурные соединения с требуемыми геометрическими, механическими параметрами и необходимыми энергетическими свойствами [8]. Принципиальная схема подбора отходов при формировании многокомпонентных смесей представлена на рис. 9.



Рис. 9. Принципиальная схема подбора многокомпонентной смеси с использованием различных отходов

Fig. 9. Schematic diagram of selection of multicomponent mixture using various wastes

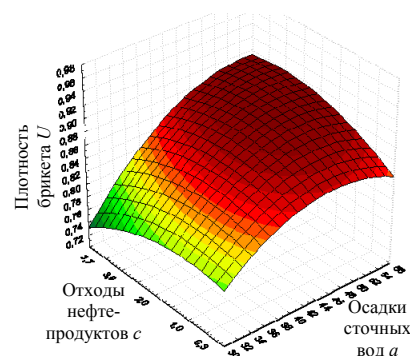


Рис. 7. Зависимость плотности трехкомпонентного брикета U от процентного содержания осадков сточных вод a и отходов нефтепродуктов c

Fig. 7. Dependence of density of three-component briquette U on percentage of sewage sludge a and waste of petroleum products c

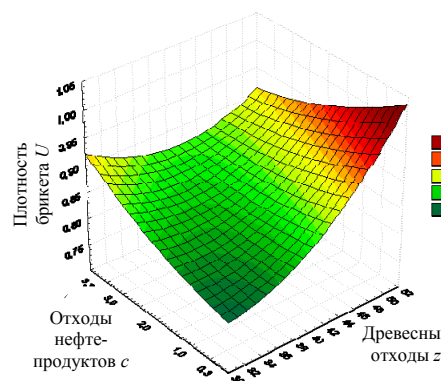


Рис. 8. Зависимость плотности трехкомпонентного брикета U от процентного содержания древесных отходов z и отходов нефтепродуктов c

Fig. 8. Dependence of density of three-component briquette U on percentage of wood waste z and waste of petroleum products c

Технологическая схема многокомпонентного брикетирования представляет собой использование различных измельченных горючих отходов растительно-древесного происхождения. К ним, как правило, относят отходы деревообработки, лесозаготовок, солому, лузгу, костру и т. п. Они в большинстве разработанных составов являются базовыми компонентами, к которым можно добавлять другие виды горючих отходов в определенном (исследованном) соотношении. Например, возможно добавление таких горючих компонентов, не нашедших технологического применения, как отработанные нефтесодержащие сорбенты, топливные и масляные элементы фильтров, опилки и ветошь, насыщенные нефтепродуктами, осадки сточных вод очистных сооружений, отходы животноводства и птицеводства, коммунально-бытовые отходы и т. п. Важным условием брикетирования является определенный технологический цикл подготовки этих смесей, который рассматривался отдельно [2–8].

Особенность технологии получения MSF-топлива – влажное брикетирование многокомпонентных смесей с использованием связующих компонентов или специализированных веществ. В данной технологии добавление связующего компонента или специализированного вещества является обязательным (за исключением некоторых отходов) в силу того, что при этом решаются технологические задачи, обеспечивающие:

- интенсивность адсорбции связующего вещества с брикетируемыми частицами;
- качественное формирование поверхности, формы, плотности и необходимых типоразмеров брикетов;
- возможность регулирования теплоты сгорания (с использованием нефтесодержащих компонентов, органических и комбинированных связующих веществ);
- создание необходимой интенсивности затвердевания и прочности брикета при сушке.

Все разработанные в последнее десятилетие многокомпонентные составы твердого MSF-топлива оформлены в виде технических условий ТУ ВУ 490319372.002–2021 «Топлива твердые многокомпонентные котельно-печные» и прошли государственную регистрацию в БелГИСС (20.12.2021, № 063905). Применение технических условий обеспечивает выпуск продукции с использованием различных отходов, разделенных в ТУ на семь типов в зависимости

от общих особенностей формирования составов отходов и проведенных научных и практических исследований. Такой подход, в конечном итоге, обеспечивает оптимальное соотношение компонентов топлива, которое гарантирует наиболее полное сжигание используемых в нем горючих материалов с выделением заданных теплотехнических характеристик, соответствующих экологическим требованиям к выбросам загрязняющих веществ.

Исследование энергетических характеристик

Первый и второй законы термодинамики, из которых следуют фундаментальные уравнения, были получены для закрытых систем. При изменении состояния закрытых систем массы компонентов и, следовательно, состав системы не изменяются. Поэтому термодинамические потенциалы простых закрытых систем являются функциями только двух переменных:

$$\begin{aligned} dU &= TdS - PdV; & dH &= TdS + VdP; \\ dA &= -SdT - PdV; & dG &= -SdT + VdP. \end{aligned} \quad (6)$$

На практике при создании многокомпонентных составов встречаются системы (или части сложной закрытой системы), в которых при протекании различных процессов массы компонентов изменяются. Такое может происходить, например, при фазовых превращениях или вследствие химической реакции. При этом может изменяться состав как отдельных частей системы, так и системы в целом.

Поэтому внутренняя энергия (и другие термодинамические потенциалы) открытых систем будут изменяться за счет не только сообщения системе теплоты и произведенной системой работы, но и варьирования состава (массы) системы. Для открытых простых систем (без совершения системой полезной работы) характеристические функции будут функциями не только их двух естественных переменных, но и функциями числа молей всех веществ, составляющих систему:

$$\begin{aligned} U &= U(S, V, n_1, n_2, \dots, n_k); & P &= P(S, H, n_1, n_2, \dots, n_k); \\ A(T, V, n_1, n_2, \dots, n_k); & G &= G(T, P, n_1, n_2, \dots, n_k), \end{aligned} \quad (7)$$

где n_1, n_2, \dots, n_k – число молей каждого вещества, входящего в систему.

Тогда полный дифференциал внутренней энергии открытой системы можно записать следующим образом:

$$dU = \left(\frac{\delta U}{\delta S} \right)_{V, n_i} dS + \left(\frac{\delta U}{\delta V} \right)_{S, n_i} dV + \left(\frac{\delta U}{\delta n_1} \right)_{S, V, n_{j \neq i}} dn_1 + \dots + \left(\frac{\delta U}{\delta n_k} \right)_{S, V, n_{j \neq i}} dn_k, \quad (8)$$

где $n_{j \neq i}$ – индекс, означающий, что число молей других веществ, кроме данного, не изменяется.

Таким образом, химический потенциал компонента равен приращению характеристической функции системы при добавлении одного моля данного компонента при условии, что естественные переменные и состав системы остаются постоянными. Отсюда для простых открытых систем фундаментальное уравнение термодинамики с учетом изменения энергии описанных правилом фаз Гиббса запишется в виде

$$dU = TdS - PdV + \sum_{i=1}^k \mu_i dn_i. \quad (9)$$

В формуле (9) каждое слагаемое можно рассматривать как произведение интенсивного свойства (обобщенной силы) на изменение экстенсивного свойства. Поэтому химический потенциал можно считать обобщенной силой, определяющей распределение масс компонентов в системе, что приводит к установлению в многокомпонентной гетерогенной системе фазового и химического равновесия.

Термодинамическая система МТТ, состоящая из различных по физическим или химическим свойствам частей компонентного состава в период формирования смеси, отделенных друг от друга поверхностями раздела, будет относиться к гетерогенной системе с использованием связующих компонентов на основе преимущественно вязких веществ. Наиболее простым и достаточно изученным источником связующего компонента являются углеводородсодержащие отходы [2–5]. Альтернативой применению этим отходам во многих составах твердого топлива может стать повсеместно распространенный осадок сточных вод (ОСВ) городских очистных сооружений, использование которого в смеси с древесно-растительными отходами позволяет уйти от углеродного следа в топливе. Производство топлива такого состава будет полностью относиться к топливу, полученному на основе биомассы, что расширяет возможности применения топлива и технологий в различных странах.

Проблема использования ОСВ с применением типовых технологий заключается в его повышенной зольности и высокой влажности исходной смеси. При этом ОСВ представляют собой дисперсную систему. Степень их дисперсности колеблется от 10 до 107 см⁻¹, что позволяет рассматривать осадки как коллоиды с повышенной вязкостью. Вязкость неоднородных масс, в частности осадков сточных вод, до сих пор не изучена ввиду исключительного разнообразия явлений и сложности вопроса. Однако на основании данных, полученных от комплекса исследований, в ходе которых выявлено, что осадки сточных вод, обладая повышенной вязкостью и высокой теплотой сгорания [9, 10], могут быть эффективно применимы в многокомпонентном брикетировании.

Полученные составы топлива с использованием ОСВ прошли полный комплекс теоретических и экспериментальных исследований химического состава, теплотехнических и физико-механических характеристик с применением традиционных лабораторных исследований, с различными соотношениями состава, параметрами плотности и влажности брикетов. Исследования проводились с участием аккредитованных лабораторий НИИ физико-химических проблем БГУ, Института тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова НАН Беларуси, Института механики металлополимерных систем имени В. А. Белого НАН Беларуси. Следует отметить, что изучались не только сбрикетированные многокомпонентные составы, но и зола, образующаяся от их сжигания. На рис. 10 представлены исследования ИК-спектрометрии образцов топлива с применением соотношения смеси 50 % ОСВ на 50 % древесных опилок.

На рис. 11 показаны результаты исследования с применением ИК-спектрометрии золы и топлива методом сравнения (наложения) кривых.

Сравнительный анализ веществ, основанный на избирательном поглощении излучения инфракрасной части спектра веществом при прохождении через него, показал, что в результате сгорания топлива произошло химическое преобразование одних соединений в другие, отображаемые спектром поглощения и пропускания (разные пики), характеризующие групповые частотные колебания связей и функциональных групп в исследуемых соединениях. Это говорит о полном дожиге карбонизированных компонентов состава многокомпонентного топлива, а также о разрушении (отсутствии) неароматических и ароматических веществ.

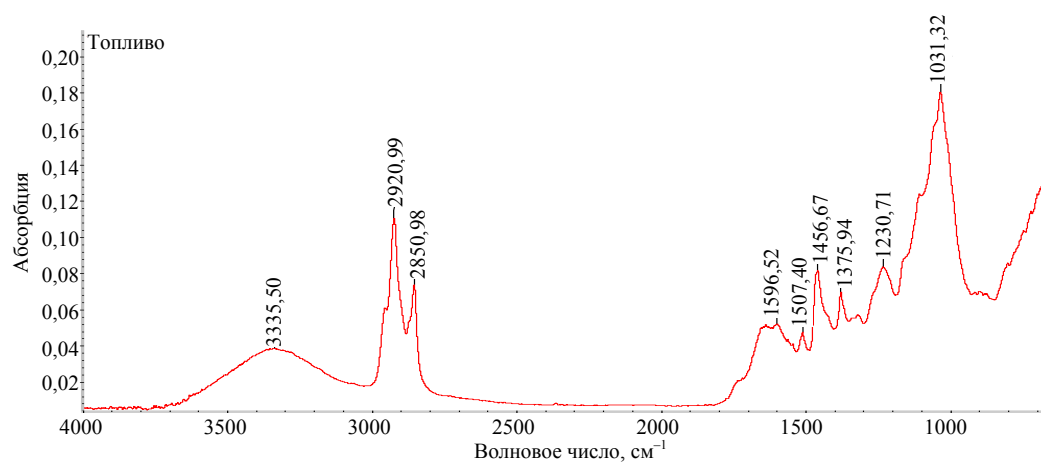


Рис. 10. ИК-спектрограмма брикетированного многокомпонентного топлива марки MKU7-1c

Fig. 10. IR-spectrogram of briquetted multicomponent fuel of brand MKU7-1c

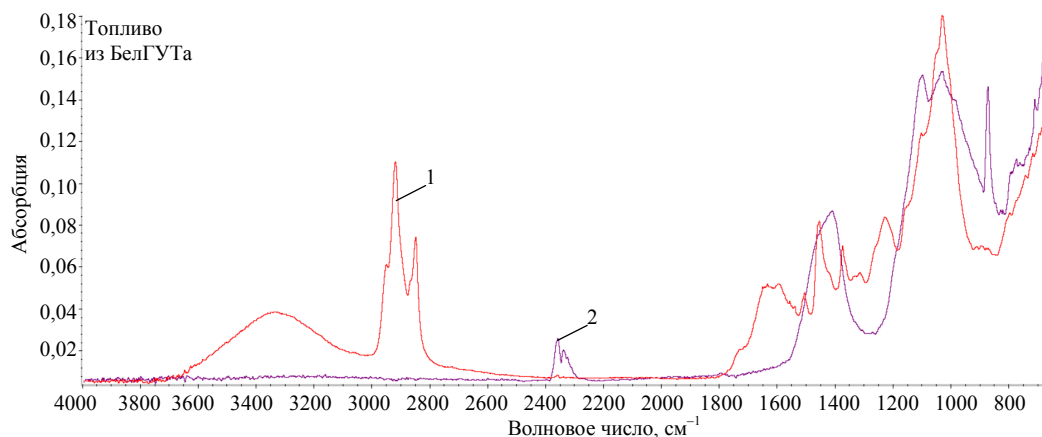


Рис. 11. Сравнение методом наложения ИК-спектрограмм брикетированного многокомпонентного топлива марки MKU7-1c (1) и золы (2), образовавшейся от сжигания

Fig. 11. Comparison by superimposition of IR-spectrograms of briquetted multicomponent fuel of the MKU7-1c brand (1) and ash (2) formed from combustion

При этом твердое топливо влажностью 30 % с использованием в составе ОСВ имеет низшую теплоту сгорания 11,9–12,5 МДж/кг, что соответствует требованиям СТБ 1919–2008 по теплоте сгорания торфобрикета марок БТ-2–БТ-6 (при влажности 20 % $Q_n^p = 12,6$ МДж/кг) и калорийному эквиваленту. Поскольку теплота сгорания МТТ влажностью 30 % сопоставима с торфобрикетом, в отдельных случаях или при необходимости (даже не досушивая брикеты до влажности 20 %) при сжигании может выделяться теплота сгорания, соответствующая торфяному топливу. Это обеспечит стабильную сырьевую базу и сэкономит энергоресурсы.

Разработаны оптимальные базовые составы МТТ, пригодные для использования в качестве энергоресурсов на предприятии КПУП «Гомель-

водоканал» с возможностью сжигания в котлах мощностью 0,5 и 1,0 МВт промышленной котельной. В табл. 1 представлен сравнительный анализ элементного химического состава горючей массы и теплоты сгорания различных видов твердого топлива.

Научная новизна данной технологии и накопленный практический опыт брикетирования, а также проведенные исследования характеристик составов топлива и инструментальные замеры выбросов вредных веществ при сжигании топлив с использованием наиболее распространенных видов отходов, образующихся на предприятиях промышленности, объективно показывают экологичность, энергоэффективность и перспективность внедрения технологий получения MSF-топлива с использованием горючих отходов.

Элементные составы горючей массы различных видов топлива
Elemental compositions of combustible mass of various types of fuel

Вид топлива	Состав топлива, %							Q, МДж/кг
	C	H ₂	N ₂	O ₂	S	A	W	
МТТ с углеводородсодержащими отходами	59–62	4,6–6,5	0,2–0,3	31–36	0,3–0,7	4,5–10,0	10,0–19,9	18,0–21,0
МТТ на основе ОСВ, марка 7	50–52	2,3–5,1	1,5–2,5	16–20	0,6	21,4–22,7	10,4–62,7	5,4–16,3
МТТ на основе ОСВ, марка 10	50–52	2,5–5,1	1,5–2,4	20–22	0,57–0,6	21,0–21,4	10,4–57,2	5,5–15,6
Торф	25–60	2,6–6,0	1,1–3,0	15–40	–	6,0–50,0	0–95,0	8,0–16,0
Древесина	48–52	6,0–7,0	0,1–0,6	43–45	–	–	60,0–95,0	12,5

Актуальность решения проблем переработки горючих отходов с применением доступных технологий подтверждается возросшим интересом к ее использованию не только в Республике Беларусь, но и в ряде стран Западной Европы (Сербии, Румынии) и Азии (Вьетнаме), где проведен ряд совместных экспериментальных и теоретических исследований [11–15].

ВЫВОДЫ

1. Определены оптимальные параметры брикетирования влажных многокомпонентных смесей, позволяющие получать топливо с приемлемыми плотностью и производительностью установки, использующей минимальную влажность смеси. Это дает возможность в промышленных объемах производить многокомпонентное твердое топливо, что способствует улучшению экологической обстановки и создает стабильную энергетическую базу для использования местных видов топлива.

2. Технология изготовления многокомпонентного твердого топлива методом брикетирования позволяет использовать широкий спектр горючих отходов в качестве связующего с возможностью его сжигания в различных теплогенерирующих устройствах с получением высоких энергетических параметров горения.

ЛИТЕРАТУРА

- Обращение с отходами: современное состояние и перспективы: сб. ст. Всерос. науч.-практ. конф., 13 дек. 2018 г. / под ред. И. О. Туктаровой. Уфа: Изд-во УГНТУ, 2018. 260 с.
- Хрусталева, Б. Многокомпонентное твердое топливо на основе малоиспользуемых отходов / Б. Хрусталева, А. Пехота // Энергетика и ТЭК. 2011. № 11. С. 16–19.
- 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. Минск: БНТУ, 2013. Т. 1. С. 146.
- Хрусталева, Б. М. Композиционное твердое топливо на основе вторичных горючих отходов / Б. М. Хрусталева, А. Н. Пехота // Энергоэффективность. 2016. № 4. С. 18–22.
- 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.
- Многокомпонентное твердое топливо [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://ru.wikipedia.org/wiki/Многокомпонентное_твердое_топливо. Дата доступа: 27.02.2022.
- Пехота, А. Н. Эффективное использование углеводородсодержащих промышленных отходов при создании топлива / А. Н. Пехота // IV Międzynarodowa Konferencja Naukowa “Społeczeństwo i Gospodarka Wobecyzwań XXI wieku. Nauka Narzecz Poleczeństwa i Biznesu”. Белосток: Белостокский государственный политехнический университет, 2014. С. 71.
- 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.
- 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>.
- Пехота, А. Н. Исследование теплотехнических свойств брикетов на основе осадков сточных вод городских очистных сооружений / А. Н. Пехота, Р. Н. Вострова, В. Н. Грибанов // Научно-технический прогресс в жилищно-коммунальном хозяйстве: материалы II Меж-

дунар. науч.-техн. конф.: в 2 т. Минск: Ин-т ЖКХ НАН Беларуси, 2020. Т. 2. С. 99–108.

11. Твердое топливо на основе отходов малоиспользуемых горючих энергоресурсов / Б. М. Хрусталеv [и др.] // Наука и техника. 2021. Т. 20, № 1. С. 58–65. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-1-58-65>.
12. 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. Хрусталеv. Оpubл. 30.08.2014.
13. 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. Хрусталеv; заявитель А. Н. Пехота, Б. М. Хрусталеv. Оpubл. 30.08.2014.
14. 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. Хрусталеv. Оpubл. 30.04.2014.
15. Состав для брикетирования топлива многокомпонентного на основе осадков городских сточных вод: заявка ВУ № а20210298 / А. Н. Пехота, Р. Н. Вострова [и др.]. Оpubл. 20.10.2021.

REFERENCES

1. Tuktarova I. O. (ed.) (2018) *Waste Management: Current State and Prospects: Collection of Papers of the All-Russian Scientific and Practical Conference, December 13, 2018*. Ufa, Publishing House of Ufa State Petroleum Technological University (USPTU), 260 (in Russian).
2. Khroustalev B., Pekhota A. N. (2011) Multicomponent Solid Fuel Based on Low-Utilized Waste. *Energetika i TEK [Energy and Fuel and Energy Complex]*, (11), 16–19 (in Russian).
3. Khroustalev B. M., Pekhota A. N. (2013) Energy-Efficient Multicomponent Solid Fuel Based on Low-Used Waste. *Nauka – Obrazovaniyu, Proizvodstvu, Ekonomike: Mater. II-i Mezhdunar. Nauch.-Tekhn. Konf. T. 1* [Science to Education, Industry, Economics: Proceedings of the 11th International Scientific and Technical Conference. Vol. 1]. Minsk, BNTU, 146 (in Russian).
4. Khroustalev B. M., Pekhota A. N. (2016) Composite Solid Fuel Based on Secondary Combustible Waste. *Energo-effektivnost [Energy Efficiency]*, (4), 18–22 (in Russian).
5. 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).
6. *Multicomponent Solid Fuel*. Available at: https://ru.wikipedia.org/wiki/Многокомпонентное_твердое_топливо. (Accessed 27 February 2022) (in Russian).
7. Pekhota A. N. (2014) Effective Use of Hydrocarbon-Containing Industrial Waste in the Creation of Fuel. *IV Międzynarodowa Konferencja Naukowa “Społeczeństwo i Gospodarka Wobec Wyzwań XXI wieku. Nauka Narzecz Poleczeństwa i Biznesu”* [IV International Scientific Conference “Society and Economy in the Face of Challenges of the XXI Century”]. Białystok, Białystok State Polytechnic University Publ., 71 (in Russian).
8. Pekhota A. N. (2021) *Multicomponent Solid Fuel*. Gomel, BelGUT, 243 (in Russian).
9. Pekhota A. N., Khroustalev B. M., Vu M. P., Romanuk 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>.
10. Pekhota A. N., Vostrova R. N., Gribanov V. N. (2020) Study of the Heat-Exchange Properties of Briquettes on the Basis of the Main Resistant in the Work of the City Clean Clock. *Nauchno-Tekhnicheskii Progress v Zhilishchno-Kommunal'nom Khozyaistve: Materialy II Mezhdunar. Nauch.-Tekhn. Konf. T. 2* [Well-Technogenic Progress in Residential and Communal Equipment: Materials of the II International Scientific and Technical Conference. Vol. 2]. Minsk, Institute of Housing and Communal Services of the National Academy of Sciences of Belarus, 99–108 (in Russian).
11. 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 & Technique*, 20 (1), 58–65. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-1-58-65> (in Russian).
12. Pekhota A. N., Khroustalev B. M. (2014) *Method for Producing Multicomponent Solid Fuel*: Patent Republic of Belarus No 18408 (in Russian).
13. Pekhota A. N., Khroustalev B. M. (2014) *Composition for Briquetting Multicomponent Fuel*: Patent Republic of Belarus No 18463 (in Russian).
14. Pekhota A. N., Khroustalev B. M. (2014) *Composition for Briquetting Multicomponent Fuel*: Patent Republic of Belarus No 18130 (in Russian).
15. Pekhota A. N., Vostrova R. N. [et al.] (2021) *Composition for Briquetting Multicomponent Fuel Based on Urban Waste Water*: Patent Application No a 20210298 (in Russian).

Received: 21.12.2021

Accepted: 24.01.2022

Published online: 31.03.2022