

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-6-501-515>

УДК 662.7,628.4; 662.8

Разработка технологических вариантов использования различных отходов в качестве альтернативных источников энергии на основе многокомпонентных составов твердого топлива

**А. Н. Пехота¹⁾, Б. М. Хрусталеv¹⁾, В. П. Голубев²⁾,
Нгуен Тху Нга³⁾, Ву Минь Фан⁴⁾**

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

²⁾РНПУП «Институт энергетики Национальной академии наук Беларуси»
(Минск, Республика Беларусь),

³⁾Электроэнергетический университет (Ханой, Вьетнам),

⁴⁾Научно-технологический институт энергетики и окружающей среды
Вьетнамской академии наук и технологий (Ханой, Вьетнам)

Реферат. В статье рассмотрены перспективные направления решения проблем энерго- и ресурсосбережения, а также вопросы рационального использования природных и вторичных ресурсов, образующихся в производственной и коммунальной деятельности. Представлены аспекты исследований и разработки технологических вариантов использования различных отходов на основе многокомпонентных составов твердого топлива в качестве альтернативных источников энергии. Дан анализ организации обращения и переработки отходов производства и потребления, отражены объемы образования коммунально-бытовых отходов, дана оценка морфологическому составу образующихся в настоящее время отходов в областных центрах Республики Беларусь и г. Минске с учетом морфологического состава. Представлены основные этапы разработанных и применяемых технологий брикетирования и сжигания многокомпонентных смесей на основе различных горючих отходов. Описаны основные научные и технические решения, связанные с применением комплекса топливосжигающего оборудования, рассмотрены температурные параметры процесса термохимической деструкции топливных элементов с целью получения высококалорийного газообразного топлива и его использования в процессе сжигания в камере дожига локальной модульной установки, обеспечивающей экологичное сжигание твердых коммунальных и производственных горючих отходов. Рассмотрен разработанный алгоритм решения поставленной задачи, позволяющий рационально использовать некондиционные горючие производственные коммунально-бытовые отходы для получения многокомпонентного твердого топлива, соответствующего критериям качества по энергетическим

Адрес для переписки

Пехота Александр Николаевич
Белорусский национальный
технический университет
просп. Независимости, 65,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 379-76-22
pehota.an@bntu.by

Address for correspondence

Pekhota Alexander N.
Belarusian National
Technical University
65, Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 379-76-22
pehota.an@bntu.by

и экологическим показателям. Изложены результаты прикладных исследований, непосредственно связанные с качественной оценкой многокомпонентного брикетизируемого топлива, при которых достигаются наилучшие производственные и потребительские показатели энергетического качества и экологичности.

Ключевые слова: горючие отходы, твердое топливо, многокомпонентный состав, коммунальные отходы, мездра, скоп, теплота сгорания, технология брикетирования, выбросы, вредные вещества, альтернативное топливо, древесные отходы

Для цитирования: Разработка технологических вариантов использования различных отходов в качестве альтернативных источников энергии на основе многокомпонентных составов твердого топлива / А. Н. Пехота [и др.] // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2024. Т. 67, № 6. С. 501–515. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-6-501-515>

Development of Technological Options for the Use of Various Wastes as Alternative Energy Sources Based on Multicomponent Compositions of Solid Fuels

A. N. Pekhota¹), B. M. Khrustalev¹), V. P. Golubev²),
Nguyen Thuy Nga³), Vu Minh Phap⁴)

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

²Republican Scientific and Production Unitary Enterprise “Institute of Energetics of the National Academy of Sciences of Belarus” (Minsk, Republic of Belarus),

³University of Electricity (Hanoi, Vietnam),

⁴Institute of Science and Technology for Energy and Environment of Vietnam Academy of Science and Technology (Hanoi, Vietnam)

Abstract. The article considers promising areas for solving problems of energy and resource conservation, as well as issues of rational use of natural and secondary resources generated in industrial and communal activities. The aspects of research and development of technological options for the use of various wastes based on multicomponent compositions of solid fuels as alternative energy sources are presented. Also presented are the main stages of the developed and applied technologies for briquetting and incineration of multicomponent mixtures based on various combustible waste. The developed algorithm for solving the problem under consideration which makes it possible to rationally use substandard combustible industrial municipal waste to obtain multicomponent solid fuel that meets the quality criteria for energy and environmental indicators is reviewed. The results of the applied research directly related to the qualitative assessment of multicomponent briquetted fuels and facilitating achievement of the best production and consumer indicators values of energy quality and environmental friendliness are presented.

Keywords: combustible waste, solid fuel, multicomponent composition, municipal waste, scrapings, sludge, heat of combustion, briquetting technology, emissions, harmful substances, alternative fuels, wood waste

For citation: Pekhota A. N., Khrustalev B. M., Golubev V. P., Nguyen Thuy Nga, Vu Minh Phap (2024) Development of Technological Options for the Use of Various Wastes as Alternative Energy Sources Based on Multicomponent Compositions of Solid Fuels. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 67 (6), 501–515. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-6-501-515> (in Russian)

Введение

Жизнь и производственная деятельность человека всегда сопровождаются образованием большого количества различных отходов (как произ-

водственных, так и коммунально-бытовых). Человечество все больше потребляет и производит, а следовательно, возрастает расходование ресурсов и образование отходов. Из-за урбанизации и роста крупных городов и мегаполисов радикальным изменениям подвергается и потребление населения, что также содействует увеличению объемов отходов. Накапливаясь, они наносят вред природе и здоровью человека. В настоящее время в мире остро стоят вопросы оптимизации объемов накопления и утилизации производственных и твердых коммунально-бытовых отходов. Не менее остра и актуальна эта проблема и для Республики Беларусь. В отходах городов и поселков содержатся как ценные металлы (черные и цветные), так и другие отходы потребления, такие как бумага, картон, стекло, пластики, пластмассы, полиэтилен, кожа, резина, дерево, пищевые отходы.

Стратегия перехода к ресурсосберегающей экономике не может содержать универсальных для всех стран технологических подходов и методов. Ресурсосберегающая экономика во многом зависит от сложившихся политических, технологических и социальных условий, показателей развития общества и его уровня потребления и производства, 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, коммунально-бытовых отходов и биомассы с применением технологий получения и сжигания биогаза и твердого 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 коммунально-бытовых отходов, а также образующейся биомассы как источников химической энергии.

В Республике Беларусь, как и в других странах, произошел значительный рост объемов производственных и твердых коммунально-бытовых отходов. Это связано с радикальными переменами в характере потребления и изменениями в производстве товаров и оказании услуг. Например, общий объем образования твердых коммунальных отходов за 2022 г. составил более 63 млн т, а объем образования твердых коммунальных отходов (ТКО), по данным Министерства жилищно-коммунального хозяйства Республики Беларусь, достиг 4,2 млн т в год, из них 73 % – отходы населения и 27 % – отходы производства. В настоящее время каждый белорус выбрасывает более 400 кг бытовых отходов за год, что в три раза больше, чем 20 лет назад, а показатель удельного образования ТКО составляет около 0,92 кг/чел.-день [1–4].

Это свидетельствует об остроте проблем энерго- и ресурсосбережения, а также о необходимости рационального использования природных и вторичных материальных ресурсов (ВМР). В то же время последними исследованиями установлено, что экономически оправданное применение горючих твердых

коммунально-бытовых и производственных отходов как альтернативного энергетического топлива позволяет сэкономить не менее 26 % мировой энергетической потребности, причем для развивающихся стран этот процент экономии будет изменяться только в направлении увеличения.

Актуальность использования горючих отходов

Ежегодный рост объемов образования отходов опережает современные экономические и технологические возможности их применения, обезвреживания и утилизации. В современном мире устойчиво доминирует их извлечение с последующим складированием на специальных полигонах. Например, в Беларуси для этих нужд отведены значительные площади полигонов, суммарно составляющие более 3,5 тыс. га, более 40 % которых уже полностью задействованы, требуется их дальнейшее расширение [1–4]. Основной целью деятельности в сфере обращения с отходами производства и потребления является снижение или стабилизация их отрицательного воздействия на состояние окружающей среды, а также предотвращение негативного влияния на здоровье людей, животных и растительный мир.

Международные тенденции в области обращения с отходами стремятся к иерархической последовательности методов обращения, обеспечивающих экологическую безопасность, по принципу – от наиболее приоритетных методов утилизации к менее приоритетным: 1) предотвращение образования отходов; 2) уменьшение их образования или их минимизация; 3) повторное использование и переработка отходов; 4) их использование для получения энергии; 5) захоронение отходов.

Важным аспектом для организации обращения и переработки отходов производства и потребления является определение объемов образования с учетом морфологического состава.

Традиционно в морфологическом составе выделяют от 10 до 15 компонентов. Например, в составе ТКО преобладающими компонентами с различным фракционным составом в отношении к их общей массе являются: органические отходы – от 30 до 40 %; полимерные отходы и пластмассы – 7–10; стекло и стеклобой – до 6; бумага – до 6; металлы – около 2; тетрапаки – 2–3 % [1–4]. Морфологические составы ТКО в Минске, областных центрах, малых городах и сельских населенных пунктах республики существенно различаются. В то же время морфологический состав отходов подвержен изменению в течение года.

В табл. 1 представлен усредненный по годам морфологический состав образующихся ТКО в Беларуси [1–4]. Как видно из данных таблицы, ТКО по своему морфологическому составу обладают ресурсно-ценными компонентами и сырьевым потенциалом с устойчивым объемом образования.

Таблица 1

Усредненный морфологический состав отходов в Беларуси
The average morphological composition of waste in Belarus

Наименование компонента	Минск	Областные центры	Крупные города	Малые города
Древесина	1,16	1,18	1,1	0,13
Бумага, картон, гофрокартон	2,43	2,1	1,8	2,21
Металлы	0,63	0,56	0,53	0,4
Текстиль, ветошь	3,64	3,1	1,86	1,92
Кожа, резина, шины	0,25	0,65	0,34	0,1
Стекло	6,17	7,45	7,4	6,9
Полимеры, в том числе	11,8	15,4	11,7	7,1
ПЭТ тара	3,56	2,86	2,33	1,96
полиэтилен	2,9	2,89	1,48	1
полипропилен	0,5	0,45	0,26	0,1
полистирол	0,6	0,34	0,3	0,1
прочий пластик, в том числе неперерабатываемый	3,98	3,56	3,1	1,8
Пищевые и растительные отходы	22,6	38,5	28,8	24,6
Инертные отходы (камни, кирпичи и т. п.)	2,0	2,8	2,6	2,0
Потенциально опасные отходы (элементы питания, медицинские отходы)	0,46	0,34	0,02	0,01
Смешанные отходы	28,1	24,9	31,1	13,8
Отсев мелких фракций	12,1	12,2	21,6	13,4

Также одним из ресурсно-ценных является коммунальный отход в виде осадка сточных вод (ОСВ) городских очистных сооружений. Проблема использования ОСВ с применением типовых распространенных технологий заключается в его повышенной влажности в исходном состоянии. При этом осадки сточных вод представляют собой дисперсную систему, степень дисперсности которых колеблется от 10 до 10^7 см^{-1} , что позволяет рассматривать осадки как коллоиды с повышенной вязкостью. Вязкость неоднородных масс, в частности осадков сточных вод, до сих пор еще не изучена ввиду исключительного разнообразия явлений и сложности вопроса. Однако на основании данных, полученных при проведении комплекса исследований, установлено, что ОСВ, обладая повышенной вязкостью и высокой теплотой сгорания (16,7–18,4 МДж/кг [5, 9]), может быть эффективно применен в многокомпонентном брикетировании.

Из промышленных видов горючих отходов в проводимых исследованиях использовалась мездра кожи крупного рогатого скота. Мездра – это слой подкожной жировой клетчатки, мяса, сала, кусков сухожилий, которые удаляются со шкуры в процессе осуществления подготовительных опера-

ций. В мездре свежей шкуры содержится до 75–80 % воды, остальное – жировые и белковые вещества. Сам процесс удаления со шкуры прирезей сала, мяса и жировой клетчатки называется мездрением. Соотношение основных компонентов шкуры (белки, жиры, углеводы) может варьироваться и зависит от состояния животного перед забоем. Причем основные органические компоненты – белки и жиры – вполне пригодны для использования в качестве энергетического ресурса. Так, жиры при полном сгорании выделяют калорийность в пределах 42–48 МДж/кг [6] в зависимости от процентного соотношения жирных кислот.

Современные концепции обращения с ТКО, как правило, базируются на максимальном использовании ресурсно-ценного потенциала компонентов, входящих в состав ТКО. При этом состав отходов, поступающих на переработку, влияет на степень отбора вторичного сырья на мусоросортировочных заводах, определяет калорийность отходов при использовании термических методов утилизации и эффективности процессов разложения при использовании биотехнологий, что зачастую влияет на технико-экономические показатели той или иной технологии.

Исследование термических параметров сжигания альтернативных видов твердого топлива

Производство альтернативных видов топлива ориентировано на выработку недорогих энергетических ресурсов за счет использования энергоэффективных, ресурсосберегающих технологий и методов подготовки и переработки отходов различных предприятий. Это в большинстве случаев обеспечивает сокращение объемов образования отходов. В зависимости от направления деятельности предприятий и видов используемого сырья отходы могут различаться и иметь свои особенности. Доступными источниками энергоресурсов для многих стран являются отходы коммунально-бытового хозяйства и биомасса различного происхождения, образующаяся в результате хозяйственной деятельности. В связи с этим при разработке технологических вариантов использования различных отходов в качестве альтернативных источников энергии предпочтение отдается их вторичному использованию с последующей термической утилизацией, что, по оценке экспертов, является наиболее разумным в условиях формирующихся тенденций перехода в перспективе к энерго- и ресурсосберегающей экономике.

Стоит отметить, что развитые страны активно разрабатывают различные составы, производят и сжигают твердое восстановленное топливо (англ. refused 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 в разных странах и регионах имеют различия. Использование такого топлива, как правило, предусмотрено на промышленных предприятиях. Теплотворная способ-

ность RDF, полученного с использованием различных технологий, составляет 13–23 МДж/кг [5, 7, 9].

С ростом благосостояния объемы образования горючих промышленных и коммунальных отходов ежегодно увеличиваются, а использование некоторых в значительной мере затруднено ввиду отсутствия экономически выгодных и экологически безопасных технологий, обеспечивающих их переработку и рациональное использование.

БНТУ совместно с Институтом энергетики Национальной академии наук Беларуси, Электроэнергетическим университетом и Научно-технологическим институтом энергетики и окружающей среды Вьетнамской академии наук и технологий проводят научные исследования по созданию аналога RDF, которое авторами [5, 7–9] названо многокомпонентным твердым топливом (МТТ), а для англоязычных стран топливо имеет название – MSF (англ. – multicomponent solid fuel) [5]. Принципиальная схема последовательности технологических операций производства многокомпонентного твердого топлива представлена на рис. 1.

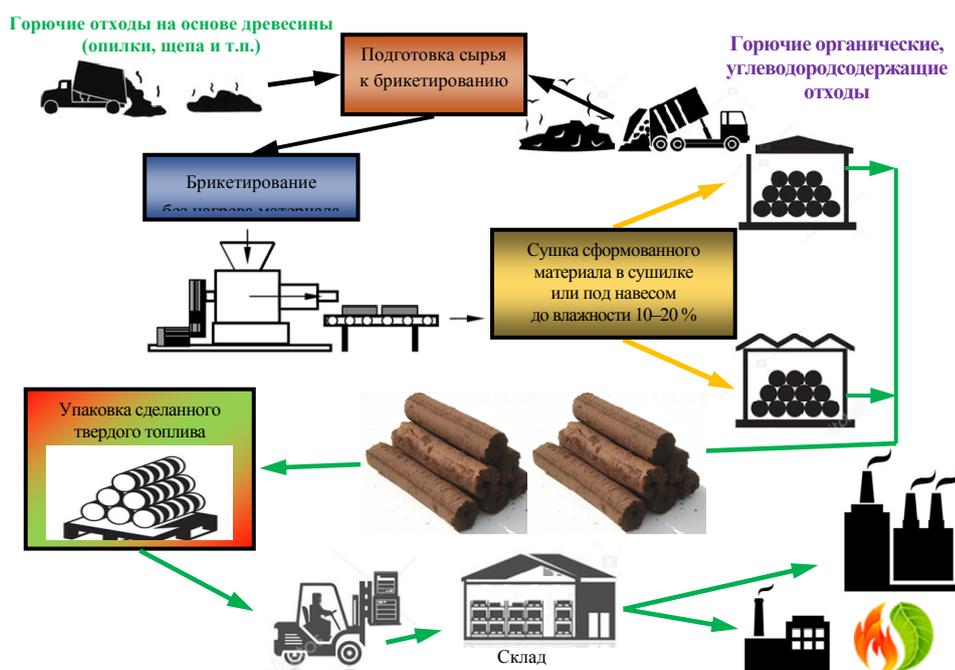


Рис. 1. Схема последовательности технологических операций действующего производства MSF

Fig. 1. Sequence diagram of technological operations of the current MSF fuel production

Технологическая схема последовательности операций многокомпонентного брикетирования (рис. 1) представляет собой использование различных измельченных горючих отходов растительно-древесного происхождения (РД отходов). К ним, как правило, относят отходы деревообработки, лесозаготовок, солому, лузгу, костру и т. п. Они в большинстве разрабо-

танных многокомпонентных составов являются базовым компонентом, к которому можно добавлять другие виды горючих отходов в определенном (исследованном) соотношении. Например, возможно добавление таких горючих компонентов, не нашедших технологического применения (НТП), как осадки сточных вод очистных сооружений, мездра, скоп, отходы животноводства и птицеводства, коммунально-бытовые отходы, отработанные нефтесодержащие сорбенты, опилки и ветошь, насыщенные нефтепродуктами, и т. п. Важным условием их применения является определенный технологический цикл подготовки этих материалов, который рассматривался в [7–9]. Причем очевидно, что оптимальным направлением при разработке максимально эффективного, с энергетической точки зрения, MSF является включение в его состав только компонентов, обладающих высокой удельной теплотворной способностью.

В то же время необходимо отметить, что жиры и белки могут являться сырьем для получения высококалорийного газообразного топлива, поэтому отказываться от такого источника тепловой энергии не рационально. Основная проблема при использовании мездры для получения тепловой энергии – очень большое количество воды. Также является непростой задачей технология сжигания или пиролиза мездры. При повышении температуры произойдет расплавление жиров, образование белково-жирового «бульона», который имеет малую поверхность и поэтому скорость его горения или пиролиза будет небольшой [10].

При этом применение брикетирования мездры, например с опилками или щепой, позволяет получать MSF, которое имеет приемлемую влажность (в пределах 20–30 %), плотную геометрическую форму (квадрат, круг, прямоугольник и т. п.), оптимальный компонентный состав, что позволяет полученное многокомпонентное топливо использовать как для сжигания, так и для пиролиза.

Для сжигания стандартизированных (традиционных) видов топлива технологические параметры в достаточной степени отработаны, однако в случае использования в качестве топлива многокомпонентных смесей из отходов могут возникать определенные экологические риски. В связи с этим предпочтительнее разработать комплекс топливосжигающего оборудования и оптимальный многокомпонентный состав топливной смеси, который может экологически безопасно и экономически выгодно использоваться в качестве топлива.

В настоящее время наибольшее распространение получают термические методы утилизации отходов. Причем наилучшим эффектом обладает оборудование, технологически обеспечивающее инсинерацию процесса утилизации отходов. Главное отличие инсинераторов от других котлов и топливосжигающих устройств заключается в наличии специальной камеры дожигания, которая обеспечивает полное обезвреживание помещенных в топку горючих отходов посредством нагнетания температуры вплоть до 1200 °С и выше [10, 11]. Эта технология в основном используется в Европе для сжигания опасных отходов во вращающихся печах, однако этот процесс может быть применен и усовершенствован в условиях Республики Беларусь для других типов топливосжигающих устройств с созданием новых

схем модульного сжигания горючих отходов различных производств, не нашедших технологического применения в иных технологиях [8].

Применяемый для исследования комплекс топливосжигающего оборудования создан с учетом возможности инсинерации процесса утилизации отходов, что позволяет использовать некоторые виды однокомпонентных отходов без подготовки, а также разработанные многокомпонентные составы твердого топлива. Данное оборудование создано по модульному принципу. Каждый модуль выполняет свою функцию, но обеспечивает согласованную и безопасную работу всего комплекса. Модульный принцип позволяет легко адаптировать комплекс оборудования как для горючих отходов, имеющих сложный многокомпонентный или даже неизвестный состав, так и для отходов хорошо известного и постоянного состава. Провести адаптацию (настройку) одного модуля проще, быстрее и дешевле, чем приспособлять (переделять) весь комплекс оборудования под новый вид отходов.

Основные научные и технические решения разработанного комплекса топливосжигающего оборудования представлены на рис. 2 в виде структурно-технологической схемы модульного типа.

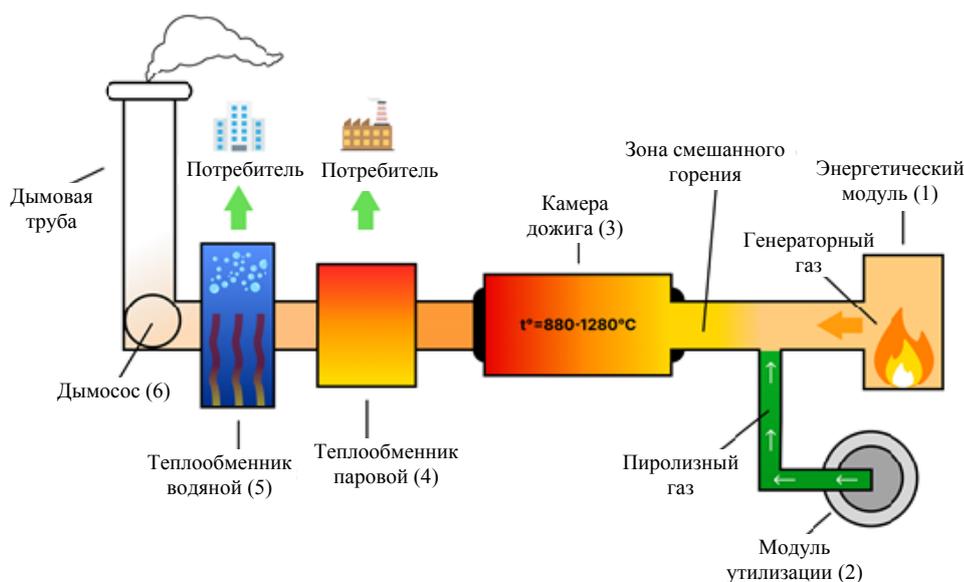


Рис. 2. Структурно-технологическая схема топливосжигающей установки модульного типа

Fig. 2. Structural and technological scheme of a modular type fuel combustion plant

В энергетическом модуле 1 при контролируемой подаче воздуха утилизируются энергоемкие органические отходы с образованием генераторного газа. В камеру дожига 3 поступает генераторный газ, который создает постоянный факел пламени. В модуле утилизации 2 идет процесс пиролиза органических отходов I–IV классов опасности в бескислородной среде. Пиролизный газ также поступает в камеру дожига, где происходит его смешивание с генераторным газом. При этом температура в камере дожига значительно превышает требуемую для обезвреживания особо опасных отходов, достигая 1200 °C и более, что обеспечивает очистку дымовых га-

зов даже от стойких органических загрязнителей (диоксины, фураны, пестициды). Вместе с тем стоит отметить, что в качестве минимально необходимой рабочей температуры горения генераторного газа определена температура для обезвреживания медицинских и фармацевтических отходов (850 °С), которая установлена постановлением Министерства здравоохранения Республики Беларусь от 22.11.2002 № 81 «Об утверждении Инструкции о правилах и методах обезвреживания отходов лекарственных средств, изделий медицинского назначения и медицинской техники».

Далее дымовые газы охлаждаются до требуемых температур, проходят через теплообменник, подогревая воду, используемую для отопления производственных помещений, горячего водоснабжения и технологических нужд производства, выходя после этого в атмосферу.

На рис. 3 представлены температурные параметры процесса термохимической деструкции многокомпонентных топливных элементов с использованием мездры и опилок с целью получения высококалорийного газообразного топлива.

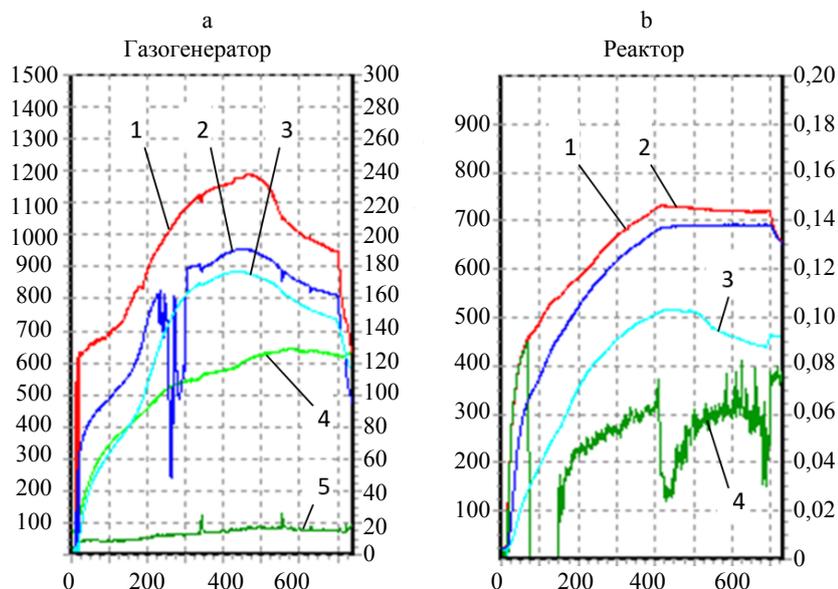


Рис. 3. Температурные параметры процесса термохимической деструкции топливных элементов с целью получения высококалорийного газообразного топлива: а – 1 – температура горения генераторного газа; 2 – то же смеси генераторного газа и пиролизного газа; 3–5 – температуры в разных участках газового тракта (при такой постановке эксперимента эти температуры не имеют практического значения); б – 1 – температура трубчатого электронагревателя; 2 – то же в камере пиролиза; 3 – то же пиролизного газа, выходящего из камеры пиролиза; 4 – резервная термопара (при такой постановке эксперимента эти температуры не имеют практического значения)

Fig. 3. Temperature parameters of the process of thermochemical destruction of fuel cells in order to obtain high-calorie gaseous fuel: а – 1 – the combustion temperature of the generator gas; 2 – the combustion temperature of the mixture of generator gas and pyrolysis gas; 3–5 – temperatures in different sections of the gas path (when the experiment is set up in such a way, these temperatures have no practical importance); б – 1 – temperature of the tubular electric heater; 2 – temperature in the pyrolysis chamber; 3 – temperature of the pyrolysis gas coming out of the pyrolysis chamber; 4 – backup thermocouple (when the experiment is set up in such a way, these temperatures have no practical importance)

Как видно из рис. 3а (генератор), температура горения генераторного газа 1 выходит на небольшое плато температур около 700 °С (временная единица 10). После временной единицы 100 начинается постепенный рост температуры горения до 1190 °С. Такое плавное повышение температуры связано с равномерным поступлением в камеру дожига порций горючих газообразных продуктов. Исходя из такого роста температуры и продолжительного времени подъема температур, можно предположить, что процесс образования горючего газа является равномерным на протяжении всего времени пиролиза. Это говорит о высоком качестве брикетированных многокомпонентных топливных элементов для получения высококалорийного газообразного топлива. После временной единицы 470 начинается плавное понижение температуры, связанное с постепенным завершением процесса пиролиза.

Более информативно процесс пиролиза прослеживается при рассмотрении графика температур горения смеси генераторного газа и пиролизного газа 2. После энергичного роста температуры до уровня 800 °С (временной интервал 220) происходит серия падений и подъемов температуры. Первое падение температуры связано с поступлением в камеру дожига паров влаги, образовавшихся в результате «досушивания» топливных элементов в камере. Обращает на себя внимание резкий подъем температуры с 250 до 800 °С (временная единица 260). Очевидно, влаги было незначительное количество, что способствовало быстрому формированию и выходу горючего газа.

Этим газом может быть аммиак, который образовался в результате пиролиза белковых молекул, а при концентрациях 15–28 % по объему в воздухе он способен гореть [11]. Такие концентрации аммиака могли образоваться в короткий временной интервал, что вызвало быстрый рост и падение температуры. Учитывая высокое содержание белка в мездре, такое развитие событий весьма вероятно. Дальнейшее падение температуры могли вызвать другие негорючие продукты пиролиза (например, углекислый газ, азот и его окислы) [10].

В ходе продолжающегося пиролиза происходит дальнейшее повышение температуры за счет термохимической деструкции жиров и остатков белковых молекул. Такой быстрый рост температуры свидетельствует о термохимической деструкции одинаковых или очень близких по химическому составу веществ в составе сжигаемого топлива. Логично предположить, что это были в основном молекулы липидов, которые составляют основную часть жирового компонента мездры. Небольшое плато с температурой около 900 °С свидетельствует о разложении большого количества одинаковых или очень близких по химической структуре молекул.

При дальнейшем нагреве происходят плавное повышение температуры до 950 °С и такое же плавное ее снижение в связи с уменьшением количества образующегося пиролизного газа.

Значительный интерес представляют процессы, проходящие в камере пиролиза при термохимической деструкции топливных элементов. Как следует

из данных, представленных на рис. 3b (реактор), наблюдался практически линейный подъем температуры трубчатых электронагревателей (ТЭН) до температуры около 450 °С. После достижения этой температуры скорость повышения температуры ТЭНов существенно замедлилась. Это говорит о том, что в камере пиролиза начали происходить процессы, связанные с энергичным поглощением тепловой энергии. Очевидно, что на начальной стадии процесса энергичное поглощение энергии связано с испарением влаги (досушивание топливных элементов). На это указывает замедление скорости повышения температуры внутри камеры пиролиза. После испарения влаги скорости подъема температур ТЭНов и температуры внутри камеры пиролиза выравниваются и становятся практически параллельными.

Вид исследуемого MSF (на основе мездры и опилок), примененного в эксперименте в модульной установке сжигания, представлен на рис. 4a. Полученный твердый остаток после пиролиза в виде обугленных образований (органического угля) представлен на рис. 4b.



Рис. 4. Вид исследуемого MSF в модульной установке до и после пиролиза:
а – брикетированное твердое топливо из смеси мездры и опилок; б – обугленные образования брикетов после пиролиза

Fig. 4. Type of MSF under study, in a modular installation before and after pyrolysis:
a – briquetted solid fuel from a mixture of scrapings and sawdust;
b – charred briquette formations after pyrolysis

Твердый обугленный остаток после пиролиза имеет калорийность 18–20 МДж/кг, что позволяет использовать его в любых твердотопливных котлах или в качестве сырьевого ресурса, востребованного в системах очистки промышленных стоков, газовых выбросов предприятий, в литейном производстве, химической промышленности, сельском хозяйстве, транспортной сфере.

Актуальность решения проблем переработки горючих отходов с использованием доступных технологий подтверждается возросшим интересом к ее применению не только в Республике Беларусь, но и в ряде стран Западной Европы (Сербия, Румыния) и Азии (Вьетнам), где проведен ряд совместных экспериментальных и теоретических исследований по использованию коммунальных и производственных отходов [7, 12–15].

ВЫВОДЫ

1. Технология изготовления многокомпонентного твердого топлива методом брикетирования дает возможность применять широкий спектр малоиспользуемых горючих отходов в качестве твердого топлива с возможностью их сжигания как в специализированных, так и в различных теплогенерирующих устройствах с получением высоких энергогенерирующих параметров горения и экологичности.

2. Научная новизна данных технологий брикетирования и сжигания, а также накопленный практический опыт и результаты проведенных исследований характеристик составов топлива и инструментальные замеры выбросов вредных веществ при сжигании MSF с использованием в составе наиболее распространенных видов отходов, образующихся на предприятиях промышленности и коммунального хозяйства, объективно показывают энергоэффективность, экологичность конечной утилизации, быструю экономическую окупаемость и перспективность внедрения технологий получения MSF.

ЛИТЕРАТУРА

1. Об утверждении Концепции создания мощностей по производству альтернативного топлива из твердых коммунальных отходов и его использования [Электронный ресурс]: постановление Совета Министров Респ. Беларусь, 22.08.2016, № 664. Режим доступа: <https://government.by/upload/docs/file69078b9e10018d70.PDF>. Дата доступа: 01.05.2024.
2. Об объемах сбора вторичных материальных ресурсов и отходов товаров и упаковки, размерах расходования денежных средств, полученных от производителей и поставщиков. Отчет за 2022 год [Электронный ресурс] / Государственное учреждение «Оператор вторичных материальных ресурсов». Режим доступа: https://vtoroperator.by/sites/default/files/otchet_2022.pdf. Дата доступа: 21.07.2024.
3. Об объемах сбора вторичных материальных ресурсов и отходов товаров и упаковки, размерах расходования денежных средств, полученных от производителей и поставщиков, в 2023 году. Отчет за 2023 год [Электронный ресурс] / Государственное учреждение «Оператор вторичных материальных ресурсов». Режим доступа: <https://vtoroperator.by/upload/iblock/fd7/ilt3sfwfhlg207vyz2cd975t3umj2q/%D0%9E%D1%82%D1%87%D0%B5%D1%82%D0%9E%D0%BF%D0%B5%D1%80%D0%B0%D1%82%D0%BE%D1%80%D0%B0%20%D0%92%D0%9C%D0%A0%20%D0%B7%D0%B0%202023%20%D0%B3%D0%BE%D0%B4.pdf>. Дата доступа: 21.07.2024.
4. Труш, Я. В. Анализ данных изучение морфологического состава коммунальных отходов в Республике Беларусь / Я. В. Труш, Е. А. Ботян // Экологическая безопасность 1991–2021: сб. материалов заочной науч.-практ. конф., посвященной юбилейной дате образования РУП «Бел НИЦ «Экология» / РУП «Бел НИЦ «Экология»; сост. В. М. Конькова. Минск: РУП «Бел НИЦ «Экология», 2021. С. 152–156.
5. Пехота, А. Н. Многокомпонентное твердое топливо / А. Н. Пехота. Гомель: БелГУТ, 2021. 243 с.
6. Косивцов, Ю. Ю. Технология пиролиза органических материалов / Ю. Ю. Косивцов, Э. М. Сульман. Тверь: ТГТУ, 2010. 124 с.
7. Технология производства многокомпонентного твердого топлива с использованием отходов сточных вод / А. Н. Пехота [и др.] // 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>.

8. Пехота, А. Н. Эффективный способ термической утилизации горючих отходов различных производств / А. Н. Пехота, В. П. Голубев, А. А. Бойко // Энергоэффективность. 2024. № 6. С. 20–26.
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. Пиролиз древесины: теоретический и практический аспекты / М. В. Малько [и др.]. Минск: Беларуская навука, 2023. 118 с.
11. Science and Technology of Ammonia Combustion / Н. Kobayashi [et al.] // Proceedings of the Combustion Institute. 2019. No 37 (1). P. 109–133. <https://doi.org/10.1016/j.proci.2018.09.029>.
12. 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 Междунар. науч.-техн. конф.: в 2 т. Минск: Ин-т ЖКХ НАН Беларуси, 2020. Т. 2. С. 99–108.
13. 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>.
14. Технология производства MSF-топлива – направление, обеспечивающее переход к циркулярной экономике / Б. М. Хрусталева [и др.] // Наука и техника. 2022. Т. 21, № 4. С. 340–348. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-4-340-348>.
15. Пехота, А. Н. Использование углеводородсодержащих отходов в технологии многокомпонентного брикетирования твердого топлива / А. Н. Пехота, Б. М. Хрусталева // Промышленная энергетика. 2022. № 9. С. 53–61.

Поступила 19.08.2024 Подписана в печать 22.10.2024 Опубликована онлайн 29.11.2024

REFERENCES

1. Resolution of the Council of Ministers of the Republic of Belarus of August 22, 2016 No 664 on Approval the Concept of Creating Capacities for the Production of Alternative Fuel from Municipal Solid Waste and on its Use. Available at: <https://government.by/upload/docs/file69078b9e10018d70.PDF> (accessed 05 January 2024) (in Russian).
2. State Institution “Operator of Secondary Material Resources”. *On the Amount of Collection of Secondary Material Resources and Waste of Goods and Packaging, and on the Amount of Expenditure of Money Received from Manufacturers and Suppliers. Report for 2022*. Available at: https://vtoroperator.by/sites/default/files/otchet_2022.pdf. (accessed 21 July 2024) (in Russian).
3. State Institution “Operator of Secondary Material Resources”. *On the Amount of Collection of Secondary Material Resources and Waste of Goods and Packaging, and on the Amount of Expenditure of Money Received from Manufacturers and Suppliers in 2023. Report for 2023*. Available at: <https://vtoroperator.by/upload/iblock/fd7/iltp3sfwfhlg207vyz2cd975t3umj2q/%D0%9E%D1%82%D1%87%D0%B5%D1%82%20%D0%9E%D0%BF%D0%B5%D1%80%D0%B0%D1%82%D0%BE%D1%80%D0%B0%20%D0%92%D0%9C%D0%A0%20%D0%B7%D0%B0%202023%20%D0%B3%D0%BE%D0%B4.pdf>. (accessed 21 July 2024) (in Russian).
4. Trush Ya. V., Botyan E. A. (2021) Analysis of Data from Studying the Morphological Composition of Municipal Waste in the Republic of Belarus. *Ekologicheskaya Bezopasnost' 1991–2021: sb. materialov zaochnoi nauch.-prakt. konf., posvyashchennoi yubileinoi date obrazovaniya RUP «Bel NITs «Ekologiya»* [Environmental Safety 1991-2021: a Collection of Mate-

- rials from a Correspondence Scientific and Practical Conference Dedicated to the Anniversary of the Formation of RUE “Bel SRC “Ecology”. Minsk, RUE “Bel SRC “Ecology”, 152–156 (in Russian).
5. Pekhota A. N. (2021) *Multicomponent Solid Fuel*. Gomel, Belarusian State University of Transport. 242 (in Russian).
 6. Kosivtsov Yu. Yu., Sul'man E. M. (2010) *Technology of Pyrolysis of Organic Materials*. Tver, TSTU. 124 (in Russian).
 7. Pekhota A. N., Khroustalev B. M., Vu M. P., Romaniuk 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> (in Russian).
 8. Pekhota A. N., Golubev V. P., Boyko A. A. (2024) Effective Method of Thermal Utilization of Combustible Waste from Various Industries. *Energoeffektivnost' [Energy Efficiency]*, (6), 20–26 (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. Mal'ko M. V., Vasilevich S. V., Dobrego K. V., Degterov D. V. (2023) *Pyrolysis of Wood: Theoretical and Practical Aspects*. Minsk, Belaruskaya Navuka Publ. 117 (in Russian).
 11. Kobayashi H., Hayakawa A., Somaratne K. D. K. A., Okafor E. C. (2019) Science and Technology of Ammonia Combustion. *Proceedings of the Combustion Institute*, 37 (1), 109–133. <https://doi.org/10.1016/j.proci.2018.09.029>.
 12. Pekhota A. N., Vostrova R. N., Griбанov V. N. (2020) Research of Thermal Engineering Properties of Briquettes Based on Sewage Sludge from Urban Wastewater Treatment Plants. *Nauchno-tekhnicheskii progress v zhilishchno-kommunal'nom khozyaistve: materialy II Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. T. 2 [Scientific and Technical Progress in Housing and Communal Services: 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).
 13. Pekhota A. N. (2022) Study of Energy Characteristics of Multicomponent Solid Fuel Using Substandard Municipal and Industrial Waste Fuels. *Nauka i Tehnika = Science & Technique*, 21 (2), 164–174. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-2-164-174> (in Russian).
 14. Khroustalev B. M., Pekhota A. N., Vostrova R. N., Pekhota E. A. (2022) Technology for Production of MSF-fuel – Direction Providing Transition to Circular Economy. *Nauka i Tehnika = Science & Technique*, 21 (4), 340–348. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-4-340-348> (in Russian).
 15. Pekhota A. N., Khroustalev B. M. (2022) The Use of Hydrocarbon-Containing Waste in the Technology of Multicomponent Solid Fuel Briquetting. *Promyshlennaya Teploenergetika = Industrial Power Engineering*, (9), 53–61 (in Russian).