

**Использование отходов ЖКХ для получения альтернативного топлива.
Основные производства и технико-экономическая оценка**

*Пехота А. Н.¹, канд. техн. наук;
Хрусталева Б. М.², академик НАН Беларуси, д-р техн. наук, профессор;
Вострова Р. Н.³, канд. техн. наук*

*^{1,2}Белорусский национальный технический университет,
220013, Беларусь, г. Минск, пр-т Независимости, 65*

Email: ¹pehota.an@bntu.by, ²tg_v_fes@bntu.by

*³Учреждение образования «Белорусский государственный
университет транспорта»,*

246653, Беларусь, г. Гомель, ул. Кирова, 34

Email: vostrova@tut.by

Аннотация. Представлены результаты исследований свойств альтернативного твердого топлива на основе осадков сточных вод. Описано применение комплексного решения эффективного использования образующихся осадков сточных вод городских очистных сооружений в качестве вторичных возобновляемых энергоресурсов.

Ключевые слова: альтернативное топливо, твердое топливо, многокомпонентные составы, осадок сточных вод, экология, горючие ВЭР, брикетирование.

**The use of housing and communal services waste to obtain alternative fuel.
Main production facilities and technical and economic assessment**

Pekhota A. N.¹, Khrustalev B. M.¹, Vostrova R. N.²

¹Belarusian National Technical University

²Belarusian State University of Transport

Annotation. The results of studies of solid fuel properties based on sewage sludge are presented. The application of a comprehensive solution for the effective use of the generated sewage sludge from urban wastewater treatment plants as secondary renewable energy resources is described.

Keywords: alternative fuel, solid fuels, multicomponent compositions, sewage sludge, ecology, combustible VER, briquetting.

Введение. Проводимые в настоящее время за рубежом научные исследования направлены на разработку и совершенствование различных способов обработки и использования осадков сточных вод коммунальных очистных сооружений. В связи с этим решение вопроса экономически целесообразного и экологически безопасного размещения осадков сточных вод (ОСВ) в окружающей среде является актуальной задачей для предприятий водо-канализационного хозяйства (ВКХ) и мирового сообщества.

Применение технологии многокомпонентного брикетирования позволяет использовать осадок сточных вод в качестве компонента, обеспечивающего связующие свойства в смеси с древесно-растительными отходами [1; 2].

Основная часть. Коллективом белорусских ученых проведены научные и практические исследования, позволившие запустить производство многокомпонентного твердого топлива (англ. multicomponent solid fuel MSF). По результатам проведенных лабораторных исследований, выполненных в аккредитованных лабораториях определены теплотехнические и физические свойства брикетов, а также выявлен интервал изменений химического состава в пределах варьирования соотношением ОСВ и древесных отходов [2].

По результатам проведенных экспериментов, математического моделирования с использованием информационных технологий и применения нейросетей, определено оптимальное соотношение компонентов в *MSF*-топливе, которое обеспечивает наиболее полное сжигание используемых в нем горючих компонентов с выделением заданных теплотехнических характеристик и нормированного содержания вредных веществ в выбросах [4; 6; 7]

Результаты и обсуждения. Учитывая полученные научные результаты исследований, проведенный анализ и математическую обработку с определением зависимостей с учетом данных физико-химического состава различных видов твердого топлива и выбросов вредных веществ показал, что пределы варьирования зависят от содержания в составе топлива ОСВ. Причем для обеспечения эффективного сжигания *MSF*-топлива, их долевое соотношение должно составлять 32,8–48,6 %. При этом обеспечиваются нормированные параметры выбросов вредных веществ при сжигании *MSF*-топлива в основном за счет повышенного применения в составе «чистых» отходов, таких как, отходы деревообработки, сельскохозяйственного производства и отходов переработки ее продукции, не находящие технологического применения.

Реализуемая схема разработанного процесса брикетирования в упрощенном виде состоит из следующих операций, представленных на рис. 1.



Рис. 1. Технологическая схема подготовки и брикетирования MSF топлива
 Fig. 1. Technological scheme of preparation and briquetting of MSF fuel

Полученные данные исследований с применением разработанной установки, обеспечивающей электрогидравлическую обработку отходов в соответствии с общеизвестным «эффектом Юткина» [3], 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 можно снижать содержание нежелательных химических веществ в виде тяжелых металлов, что обеспечивает экологичность получаемого топлива на стадии сжигания и образования золы. Это достигается, за счет формирования определенной частоты и силы разряда, что вместе с тем дополнительно формирует во влажной смеси коллоидно-дисперсные связующие растворы, пригодные для влажного брикетирования [1; 5–7].

Вместе с тем к некоторым специалистам может возникнуть вопрос о рациональности применения влажного брикетирования отходов. Проведенный расчет теплоэнергетической системы сушки MSF-топлива, позволяют выполнить сравнение удельных энергозатрат при традиционном сухом и многокомпонентном влажном способах брикетирования [2; 5–13]. Традиционная технологическая схема брикетирования, например древесных отходов с применением технологии *Pini Kay* в условиях «горяче-сухого» брикетирования в шнековом экструдере, представлена на рис. 2.

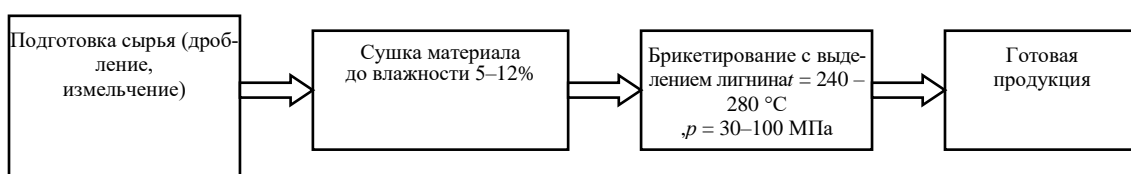


Рис. 2. Традиционная технологическая схема брикетирования (*Pini Kay*)
Fig. 2. Traditional technological scheme of briquetting (*Pini Kay*)

Исходя из представленной схемы технологического процесса, теории и практики «горячего» брикетирования, скорость формирования ограничена скоростью процесса пластификации лигнина, а также требуемым временем нахождения топлива в процессе пластификации в обогреваемом канале под соответствующим давлением.

На рис. 3 представлена разработанная технологическая схема брикетирования МТТ. Одной из особенностей разработанной технологии «холодно-влажного» брикетирования многокомпонентных смесей является отсутствие затрат тепловой энергии в процессе брикетирования, так как связующим компонентом выступает не лигнин, содержащийся в структуре древесины и выделяемый при нагреве и повышенном давлении (t и P) на брикетируемый материал, а вязкие компоненты углеводородсодержащих отходов и мелкодисперсная органическая составляющая ОСВ [2; 11–13].

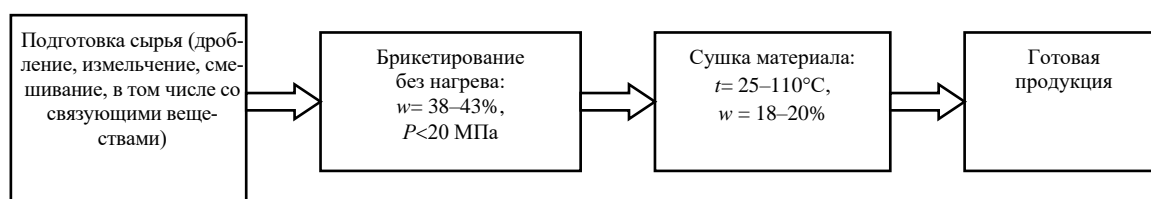


Рис. 3. Разработанная технологическая схема брикетирования МТТ
Fig. 3. The developed technological scheme of MTT briquetting

Принимая во внимание принципиальные особенности представленных технологических схем на рис. 2 и 3, выполнен сравнительный расчет удельных энергозатрат на получение брикетированного твердого топлива с учетом традиционной технологии брикетирования *Pini Kay* и технологии многокомпонентного брикетирования [1; 2]. Использование технологии «холодно-влажного» брикетирования позволяет осуществлять сушку брикета в теплое время года в естественных атмосферных условиях, под навесом, без дополнительных затрат энергии. В холодное время года – в конвективно-радиационной сушилке, периодического действия.

Тепловой расчет сушки измельченного сырья древесных материалов выполнен с учетом применения прямоточной барабанной сушильной установки марки АВМ-0,65, которая часто используется в составе большинства технологических линий подготовки сырья к брикетированию и гранулированию твердого топлива. С учетом параметров влажности материала, поступающего в сушильную установку ($W_1 = 45\%$ и конечная $W_2 = 12\%$), определены требуемые удельные энергозатраты на сушку измельченного сырья хвойных пород древесины, которые составляют $q = 0,82$ МДж/кг.

С учетом параметров транспортной влажности сформованного многокомпонентного состава ($W_1 = 38\%$ и конечная $W_2 = 20\%$), определены удельные энергозатраты (нетто) на сушку, приведенные к 1 кг высушенного материала, которые составили $q = 0,71$ МДж/кг.

Сравнительный анализ показал, что использование технологии получения многокомпонентного брикетирования влажных смесей позволяет сократить теплоэнергетические затраты на 15 % по сравнению с применением технологии брикетирования *Pini Kay*.

Экономическая оценка себестоимости производства МТТ с учетом разработанных ТУ ВУ 490319372.002–2021 «Топлива твердые многокомпонентные котельно-печные», с использованием древесных отходов, осадка сточных вод и нефтесодержащих отходов, составляет 28,9 \$ США.

При отпускной цене на МТТ (ОДО «ТеплоБел»), определенной на 10 % ниже стоимости 1 т дров в поленнице (кругляк), окупаемость производственной установки брикетирования составляет 21 месяц (при 2-сменном режиме работы; установка монтируется в существующем здании) [2; 4–9]. Оценка теплотехнических параметров различных видов твердого топлива с учетом их стоимости в Республике Беларусь, по состоянию на IV квартал 2022 года, представлена в табл. 1.

Из табл. 1 видно, что твердое топливо МКУ 3-1с и торфобрикет находятся в диапазоне усредненно-равнозначной цены, что позволяет замещать торф, а его использовать в более выгодных, с экономической точки зрения, сегментах, например, извлечения из него полезных веществ для медицины, косметологии и биотехнологий, производства премиальных видов субстратов почво-грунта для цветов и декоративных растений, а также для выращивания грибов на покровных грунтах и другой востребованной органической продукции в сельскохозяйственном земледелии.

Таблица 1. Расчет удельной стоимости твердых видов топлива с учетом плотности и теплоты сгорания

Table 1. Calculation of the specific cost of solid fuels, taking into account the density and heat of combustion

Вид твердого топлива	Теплота сгорания топлива, ккал/кг	Цена твердого топлива, \$/т	Плотность твердого топлива, кг/м ³	Удельная теплота сгорания, ккал/м ³	Удельная стоимость топлива, \$/ккал (кг/м ³)
Твердое топливо МКУ 3-1с, $W = 15\%$	4330	54,2	0,82	3550	0,013/0,015
Дрова поленик (кругляк), $W = 15\%$	2900	59,6	0,38	1102	0,021/0,054
Дрова колотые, $W = 15\%$	2900	87,0	0,38	1102	0,030/0,079
Торфобрикет (навалом), $W < 16\%$	3600	51,7	1,1	3960	0,014/0,013
Топливный брикет RUF, $W = 12\%$	4100	152,2	1,0	4100	0,037/0,037
Топливный брикет PiniKay, $W = 9\%$	4490	147,8	1,2	5388	0,033/0,027
Топливные гранулы, $W = 7,7\%$	4570	165,2	1,2	5484	0,036/0,030
Уголь бурый марки Б-2	4177	113,0	1,2	5012	0,027/0,022
Уголь антрацит марки АМ	6200	261,9	1,5	9300	0,042/0,028

Цена образована по средней оптовой стоимости.

Заключение. Использование многокомпонентного брикетирования горючих отходов позволяет заместить традиционные виды топлива, что соответствует основным направлениям рационального использования природных ресурсов, а также расширению использования возобновляемых источников энергии, в виде горючих производственных и коммунальных отходов, образующихся от хозяйственной деятельности человека.

Литература

1. Исследование многокомпонентного брикетированного топлива на основе осадков сточных вод городских очистных сооружений г. Гомеля и исследование теплотехнических свойств брикетов: отчет по НИР / Белорус. гос. ун-т трансп.; научный рук. А. Н. Пехота. – Гомель, 2020. – 99 с.
2. Пехота, А. Н. Многокомпонентное твердое топливо / А. Н. Пехота. – Гомель : БелГУТ, 2021. – 243 с.
3. Юткин, Л. А. Электрогидравлический эффект и его применение в промышленности / Л. А. Юткин. – Л. : Машиностроение, 1986. – 253 с.
4. Технология производства многокомпонентного твердого топлива с использованием отходов сточных вод / А. Н. Пехота [и др.] // Энергетика. – 2021. – Т. 64, № 6. – С. 525–537.

5. Пехота, А. Н. Определение эффективности параметров брикетирования и сушки многокомпонентных составов твердого топлива / А. Н. Пехота, Б. М. Хрусталев // Энергетическая Стратегия. – 2022. – № 2. – С. 34–38.

6. Пехота, А. Н. Исследование термоаналитическими методами энергетических свойств брикетированного многокомпонентного топлива / А. Н. Пехота, С. А. Филатов // Энергетика. – 2022. – Т. 65, № 2. – С. 143–155.

7. Пехота, А. Н. Исследование энергетических характеристик многокомпонентного твердого топлива с использованием горючих малоиспользуемых коммунальных и производственных отходов / А. Н. Пехота // Наука и техника. – 2022. – № 2. – С. 164–174.

8. Пехота, А. Н. Эффективное использование твердых коммунальных отходов в энергетических целях: особенности MSF-технологии // Энергоэффективность. – 2022. – № 5. – С. 27–32.

9. Пехота, А. Н. Оценка эффективности технологии многокомпонентного брикетирования топлива с использованием осадков сточных вод / А. Н. Пехота, Б. М. Хрусталев // Промышленная энергетика. – 2022. – № 6. – С. 40–50.

10. Технология производства MSF-топлива – направление, обеспечивающее переход к циркулярной экономике / Б. М. Хрусталев [и др.] // Наука и техника. – 2022. – Т. 21, № 4. – С. 340–348.

11. Пехота, А. Н. Использование углеводородсодержащих отходов в технологии многокомпонентного брикетирования твердого топлива / А. Н. Пехота, Б. М. Хрусталев // Промышленная энергетика. – 2022. – № 9. – С. 53–61.

12. Термо-аналитический анализ брикетированного многокомпонентного топлива / Б. М. Хрусталев, А. Н. Пехота, С. А. Филатов // Инновационные технологии в водном, коммунальном хозяйстве и водном транспорте : материалы II Республ. науч.-техн. конф., Минск, 28–29 апреля 2022 г. / М-во образования Респ. Беларусь [и др.]. – Минск : БНТУ, 2022. – С. 4–7.

13. Пехота, А. Н. Брикетирование осадка сточных вод на очистных сооружениях канализации / А. Н. Пехота, Р. Н. Вострова, Е. А. Пехота // ICER-2022 Актуальные научно-технические и экологические проблемы сохранения среды обитания : сб. тр. V Междунар. науч.-практ. конф. посвященной 50-летию кафедры природопользования, Брест, 26–28 окт. 2022 г. : в 2 ч. / М-во образования Респ. Беларусь, Брестский гос. техн. ун-т. – Брест : БрГТУ, 2022. – Ч. 2. – С. 173–178.