

НОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ТЕХНОЛОГИИ

УДК 662.8.05

Б. М. ХРУСТАЛЕВ, академик НАН Беларуси, доктор технических наук, профессор, Белорусский национальный технический университет, г. Минск; А. Н. ПЕХОТА, кандидат технических наук, Р. Н. ВОСТРОВА, кандидат технических наук, Ю. А. ПШЕНИЧНОВ, кандидат технических наук, Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

ПРИМЕНЕНИЕ МНОГОКОМПОНЕНТНОГО ТОПЛИВА В КОТЛАХ ПЕСКОСУШИЛЬНЫХ УСТАНОВОК ЛОКОМОТИВНЫХ ДЕПО

Рассмотрена технология многокомпонентного брикетирования горючих отходов, образующихся в локомотивных депо, с целью их применения в качестве твердого топлива в пескосушильных установках, обеспечивающих локомотивы наибольшей и устойчивой силы тяги по сцеплению. Приведены результаты исследований, на основе которых определены эффективные подходы к совершенствованию технологических схем, обеспечивающих производство твердого топлива.

Одним из технических требований обеспечения безопасности движения поездов в зимний период является необходимость применения песка в песочницах локомотивов. Песок на поверхности контакта движущихся колес и рельсов способствует реализации локомотивом наибольшей и устойчивой силы тяги по сцеплению. Самые лучшие условия сцепления локомотива с рельсами создает песок, однородный по размерам частиц 0,5–0,2 мм. В соответствии с нормами технологического проектирования сырой песок складировается на площадках с последующей сушкой в установках. Специализированные установки обеспечения сушки в ряде локомотивных депо Республики Беларусь и других стран работают на твердом топливе, которое приходится приобретать, при этом депо имеет множество горючих отходов, применение которых может обеспечить их использование для собственных нужд.

Образование горючих отходов в локомотивных депо обусловлено выполнением технологических операций при осуществлении обслуживания и различных видов ремонта подвижного состава, а также эксплуатацией различных видов промышленного оборудования и материалов.

Одним из распространенных горючих отходов являются углеводородсодержащие (УВС) отходы, которые образуются в виде нефтесодержащих шламов и остатков, а также их смесей, содержащих или насыщенных нефтепродуктами. Широкий диапазон значений показателей химического состава и физических свойств УВС отходов, присутствие в отходах механических примесей, серы, избыточное содержание воды зачастую требуют проведения детального анализа отходов и выполнения подготовительных мероприятий для использования их в качестве топлива [1].

К основным наиболее эффективным методам использования углеводородсодержащих отходов относятся сжигание и регенерация, а при добавлении их в составе многокомпонентного твердого топлива (МТТ) позволяет их эффективно сжигать, обеспечивая брикетируемую смесь связующим веществом и углеродом. Разработанная технология получения твердого многокомпонентного топлива позволяет использовать в качестве связующего компонента насыщенные нефтепродуктами опилки, ветошь, сорби-

рующие материалы, эмульсии нефтепродуктов, отработанные смазки, отходы очистки мазутных и нефтяных резервуаров, отходы нефтеловушек очистных сооружений.

В основе проведенных исследований лежит определение эффективности изменения подходов и совершенствование технологических схем производства твердого топлива методом брикетирования.

Для решения заданного алгоритма реализации данной научной задачи использовалась теория планирования эксперимента. При её реализации достигнуты такие условия, при которых получена достоверная информация об объекте и протекающих процессах с количественной оценкой точности метода и регрессионного анализа. Физически реализованные схемы подбора компонентного состава с различной долей нефтесодержащих отходов при различной влажности прессуемой массы в установке для получения МТТ показали, что на производительность P установки наибольшее влияние оказывает влажность смеси w и доля x нефтесодержащих веществ в формуемой смеси при одинаковом давлении p прессования и температуре T подаваемого сырья.

Среди основных факторов, оказывающих существенное структурообразующее действие, прежде всего, следует учитывать гранулометрический состав, геометрический профиль поверхности, влажность и условия смешивания компонентов, давление и температура прессования. Принцип подбора смеси частиц различной крупности заключается в создании структурной композиции, отвечающей наиболее плотной упаковке (рисунок 1).

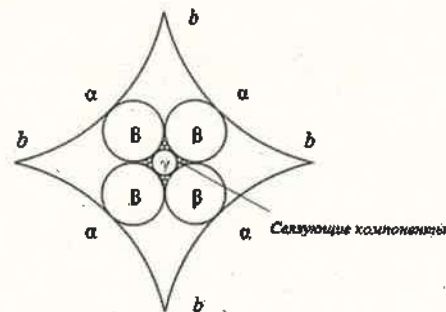


Рисунок 1 – Схема структуры с наиболее плотной (кубической) упаковкой частиц диаметрами α , β , γ и т. д. в смеси ТМТ

Четыре крупные частицы α условно рассматриваются как сферы, которые, касаясь друг друга в точках b , образуют фигуру в виде криволинейного ромба. Свободное пространство между частицами α заполняется зернами β . Далее пространство между частицами α и β заполняют зерна γ и т. д. Начиная с зерна α , размеры которого должны быть заданы, существует оптимальная пропорция между размерами частиц β и γ и т. д., при которой достигается наиболее плотная их упаковка. Оптимальное соотношение связующего компонента с частицами гранулометрического состава формируемого топлива позволяет обеспечивать наиболее плотную упаковку частиц в прессуемой смеси твердого многокомпонентного топлива.

Особенностью разработанной технологии получения МТТ является влажное брикетирование многокомпонентных смесей с использованием связующих компонентов в виде углеводородсодержащих отходов или специализированных веществ. При этом добавление связующего компонента или специализированного вещества при влажном брикетировании является обязательным (за исключением некоторых отходов) в силу того, что с их участием решается много технологических задач, которые обеспечивают:

- 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.

По результатам проведенных исследований разработаны многокомпонентные составы твердого топлива, которые прошли государственную регистрацию как технические условия ТУ ВУ 490319372.002-2021 «Топлива твердые многокомпонентные котельно-печные» в научно-производственном РУП «БелГИСС» от 20.12.2021 г. № 063905.

Применение оборудования и технологии брикетирования с учетом разработанных технических условий обеспечивает оптимальное соотношение компонентов, которое гарантирует наиболее полное сжигание используемых в нем горючих материалов с выделением заданных теплотехнических характеристик, учитывающих экологические требования 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 изменяется. Поэтому термодинамические потенциалы простых закрытых систем являются функциями только двух переменных:

$$\begin{aligned} dU &= Tds - PdV; \quad dH = Tds + VdP; \\ dA &= -SdT - PdV; \quad dG = -SdT + VdP. \end{aligned} \quad (1)$$

На практике при создании многокомпонентных составов встречаются системы (или части сложной закрытой системы), в которых при протекании различных

процессов массы компонентов изменяются. Это может происходить, например, при фазовых превращениях или вследствие протекания химической реакции. При этом может изменяться состав как отдельных частей, так и системы в целом.

Поэтому внутренняя энергия (и другие термодинамические потенциалы) открытых систем будут изменяться не только за счет сообщения системе теплоты и произведенной системой работы, но и за счет изменения 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:

$$\begin{aligned} U &= U(S, V, n_1, n_2, \dots, n_k); \\ P &= P(S, H, n_1, n_2, \dots, n_k); \\ A &= A(T, V, n_1, n_2, \dots, n_k); \\ G &= G(T, P, n_1, n_2, \dots, n_k), \end{aligned} \quad (2)$$

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:

$$\begin{aligned} dU &= \left(\frac{\delta U}{\delta S} \right)_{v, n_i} dS + \left(\frac{\delta U}{\delta V} \right)_{s, n_i} dV + \left(\frac{\delta U}{\delta n_i} \right)_{s, v, n_{j \neq i}} \\ & \quad dn_i + \dots + \left(\frac{\delta U}{\delta n_k} \right)_{s, v, n_{j \neq k}} dn_k, \end{aligned} \quad (3)$$

где индекс $n_j \neq i$ означает, 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. Таким образом, для простых открытых систем фундаментальное уравнение термодинамики с учетом изменения энергии описанных правил фаз Гиббса можно записать в виде

$$dU = Tds - PdV + \sum_{i=1}^k \mu_i dn_i. \quad (4)$$

В формуле (4) 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 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 [2–4, 6].

Применение МТТ в условиях сушки. В сушильных агрегатах на предприятиях с парком локомотивов до пяти единиц сухой песок хранится на складах башенного типа вместимостью 25 м³, состоящих из металлической башни и кирпичного подбашенного помещения. Для промышленных предприятий с большим локомо-

тивным парком применяют башенные склады вместимостью 50, 120 и 400 м³ сборной железобетонной конструкции, устанавливаемые на позиции экипировки. Склады предусматриваются двух типов: с наземным и подземным размещением оборудования, которое работает на привозном сухом песке, получаемом из пескосушилки экипировочного пункта. Сухой песок к раздаточным устройствам транспортируется пневматическим способом. Применяют установки выжимного типа и вентиляторные, действующие по принципу эжекции. Наибольшее распространение получили пескоподающие устройства выжимного типа. К числу их достоинств относится возможность транспортирования песка на значительные расстояния (до 200 м) по трубам сравнительно малого диаметра (51–76 мм), отделенным друг от друга поверхностями раздела. Вентиляторная система обеспечивает подачу песка на расстояние всего лишь 50–70 м по пескопроводу диаметром 125–150 мм.

Для удаления влаги из песка используют пескосушильные установки, как правило, в виде одинарных вращающихся барабанных устройств, в которые подается непрерывным потоком песок, а лопасти барабана осуществляют подъем и перевод песка во взвешенное состояние. Интенсивность взвеси в таких барабанах составляет 5–20 кг на 1 м³ объема барабана при скорости потока воздуха 0,4–0,9 м/с генерируемого твердотопливным котлом. Продвижение песка осуществляется наклоном вращающейся части барабана (рисунок 2).

В последние годы на данные барабаны стали устанавливать автоматику и утепление, а в современных версиях барабанов топочная часть заменяется дожигателями, что дает экономию энергоносителя 5–10 %. На данный момент при сушке песка расход твердого топлива составляет из расчета 0,0114 т у. т. на тонну песка, при этом расход условного топлива может изменяться в зависимости от влажности песка и условий хранения. Описанная конструкция с твердотопливным котлом имеет низкую себестоимость в производстве сушки при самых высоких эксплуатационных расходах по отношению к другим конструкциям.

В последние годы на данные барабаны стали устанавливать автоматику и утепление, а в современных версиях барабанов топочная часть заменяется дожигателями, что дает экономию энергоносителя 5–10 %. На данный момент при сушке песка расход твердого топлива составляет из расчета 0,0114 т у. т. на тонну песка, при этом расход условного топлива может изменяться в зависимости от влажности песка и условий хранения. Описанная конструкция с твердотопливным котлом имеет низкую себестоимость в производстве сушки при самых высоких эксплуатационных расходах по отношению к другим конструкциям.

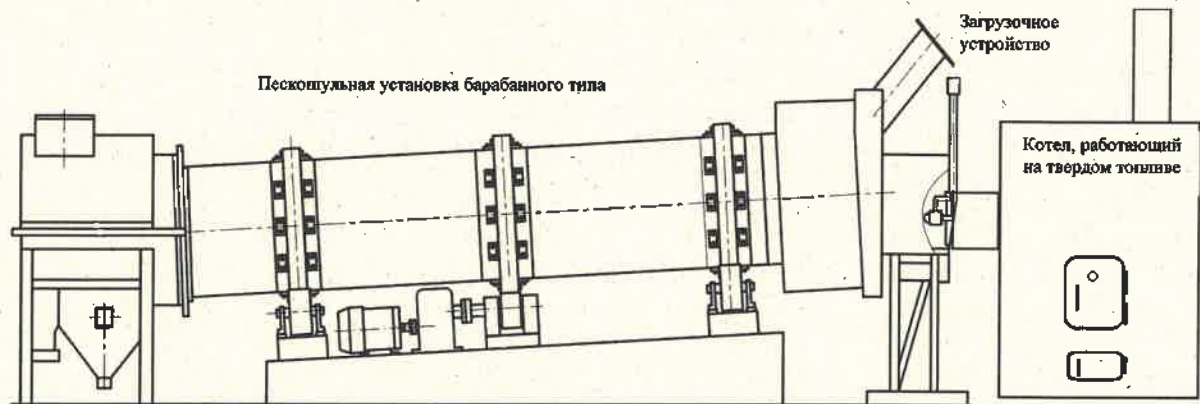


Рисунок 2 – Вид пескоосушительной установки типа СОБУ, работающей на твердом топливе

Поскольку переход на альтернативное топливо твердотопливных котлов может оказаться нерациональным вследствие значительных капитальных вложений на модернизацию оборудования, в рамках научной работы, с учетом полученных данных по химическому составу различных марок топлива, их теплоте сгорания и выбросам загрязняющих веществ при сжигании, разработана математическая модель, позволяющая осуществлять подбор оптимального с экономической и экологической точек зрения состава двухкомпонентного топлива (опилки и углеводородсодержащие отходы).

Зависимость для безразмерной концентрации g выбросов в атмосферу при сжигании двухкомпонентного твердого топлива получена в виде

$$g(x_1) = \frac{0,1AF_{M_{\text{нмн}}}N}{H^2\sqrt{V\Delta T}[\mathcal{Q}_1x_1 + \mathcal{Q}_2(1-x_1)]\eta_k} \times \quad (5)$$

$$\times [g_{11}(x_1) + g_{12}(x_1) + g_2(x_1) + g_3(x_1) + g_4(x_1)],$$

$$\text{где } g_{11}(x_1) = \frac{\beta_p}{C_{\text{мNO}_2}} \left(1 - \frac{q_{41}}{100}\right) x_1 \mathcal{Q}_1 \times$$

$$\times \left[H_{1,r} K_{1,r} \alpha_r \sqrt{\left(1 - \frac{q_{41}}{100}\right) \frac{100N}{[\mathcal{Q}_1x_1 + \mathcal{Q}_2(1-x_1)]\eta_k} x_1 \mathcal{Q}_1^3} \right];$$

$$g_{12}(x_1) = \frac{\beta_p}{C_{\text{мNO}_2}} (1-x_1) \mathcal{Q}_2 \left[H_{2,r} K_{2,r} \alpha_r \sqrt{\frac{100N}{[\mathcal{Q}_1x_1 + \mathcal{Q}_2(1-x_1)]\eta_k}} (1-x_1) \mathcal{Q}_2^3 \right];$$

$$g_2(x_1) = \frac{20000}{C_{\text{мSO}_2}} [x_1 S_{1,r} + (1-x_1) S_{2,r}] (1-\eta_{1s}) (1-\eta_{2s});$$

$$g_3(x_1) = \frac{x_1 C_{1,\text{CO}} + (1-x_1) C_{2,\text{CO}}}{C_{\text{мCO}}};$$

$$g_4(x_1) = \frac{10000}{C_{\text{мPM}}} \left[x_1 (1-\eta_{1,c}) \left(\alpha_{1,ab} A_r + q_{1,ab} \frac{\mathcal{Q}_1}{\tau} \right) + \right. \\ \left. + \frac{10000}{C_{\text{мPM}}} \left[(1-x_1) (1-\eta_{2,c}) \left(\alpha_{2,ab} A_r + q_{2,ab} \frac{\mathcal{Q}_2}{\tau} \right) \right] \right],$$

где τ – безразмерная константа, $\tau = 32,68$.

Результаты расчета: $g(x_1) = 0,909$.

Полученные зависимости безразмерной концентрации g вредных выбросов от доли нефтесодержащих отходов (нефтешламов) x в брикетах для различных значений мощности N котельных установок представлены на рисунке 3.

Методика расчета и математическая модель для данной технологии построена с учетом регламентирующих требований, изложенных в ОНД-86, ТКП 17.08-01-2006 и ЭкоНиП 17.01.06-001-2017 [7–9], что позволяет определить безразмерную концентрацию выбросов однородных вредных веществ в атмосферу при сжигании твердого топлива, но с учетом химического состава двухкомпонентного топлива, а также

особенностей и условий эксплуатации энергоустановки (мощность, КПД, диаметр устья и высота трубы и т. п.) [2, 5, 7].

При этом математическая модель за счет суммирования вредного воздействия от каждого компонента позволяет определить приведенную концентрацию g , которая определяется как сумма безразмерных приземных концентраций каждого вредного вещества. Такой подход позволяет рассчитывать на этапе производства

оптимальный с энергетической и экологической точек зрения подбор компонентного состава топлива, что дает возможность использовать МТТ на энергоустановках без дополнительных экономических затрат.

Таким образом, получены уравнения, описывающие концентрации выбросов в зависимости от состава предложенного МТТ, и на их основе оптимизирован состав по экологической функции цели, в том числе при сжигании топлива в котельных.

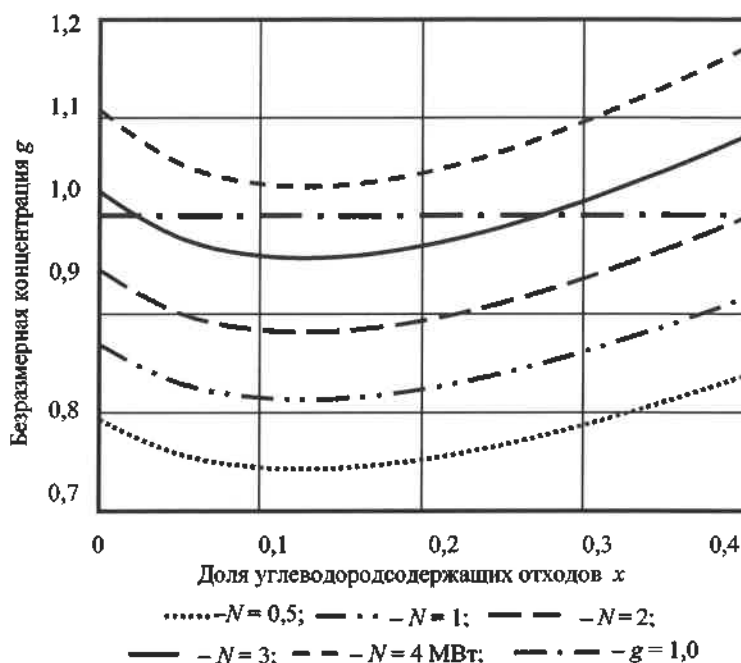


Рисунок 3 – Зависимость безразмерной концентрации g от доли компонента брикета x

Анализ результатов исследования. На основании полученных результатов теоретических и практических исследований и в соответствии с техническими нормативно-правовыми актами разработаны ТУ ВУ 490319372.002–2021, прошедшие согласование в установленном законодательством порядке. Анализ зольности, влаги, теплоты сгорания, содержания серы в процессе проведения испытаний с целью определения и контроля статистически достоверных результатов проводился в специализированных лабораториях на образцах с применением идентичных методов. Изготовленная промышленная партия, в целях оценки качественных показателей хранения, транспортировки, сжигания многокомпонентного твердого топлива с различными

соотношениями состава и параметрами плотности и влажности брикетов прошли испытания с участием аккредитованных лабораторий: «НИИ физико-химических проблем» БГУ (г. Минск), с использованием методов дифференциально-термического анализа в «Институте тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова НАН Беларуси» (г. Минск), с применением ИК-спектроскопии в «Институте ММПС им. В. А. Белого» НАН Беларуси (г. Гомель). При этом исследованию подверглись не только сбрикетированные многокомпонентные составы, но и зола, образующаяся от их сжигания. В таблице 1 представлены сравнительные характеристики элементных составов горючей массы различных видов топлива [7, 8].

Таблица 1 – Элементные составы горючей массы различных видов топлива

Вид топлива	Рабочий состав топлива (по массе), %					Теплота сгорания ккал/кг
	Углерод С	Кислород O ₂	Водород H ₂	Азот N ₂	Серя SO ₂	
МТТ с содержанием нефтешламов 25 %, W=15 %	61,42	31,05	6,43	0,33	0,77	4240
МТТ с содержанием смеси нефтепродуктов отработанных 30 %, W=16 %	58,88	36,09	4,56	0,20	0,27	4330
Дрова, W=15 %	51,00	42,30	6,10	0,60	0,05	2500
Торф, W=16 %	58,00	33,60	6,00	2,10	0,30	3600
RDF топливо** (нижнее и верхнее значение)	44–51	29–36	5–7	0,9–1,6	0,38–1,46	4100–4770
Топливный брикет RUF, W=12 %	51,30	43,10	6,20	0,55	0,1	4100
Топливные гранулы, W=7,7 %	50,67	43,90	6,10	0,68	0,05	4570
Топливный брикет Pinu-key, W=9 %	51,70	41,90	6,30	0,60	0,05	4890

* Приведенные данные получены в аналитической лаборатории РУП «Белгослес». Аттестат аккредитации № ВУ/112 02.1.0.0417.
 ** Приведены данные из источника [2].

Технологическое объединение насыщенных по химическому составу углеводородсодержащих отходов позволило получить не только топливо с высокой калорийностью, но и высокий экономический эффект, который позволяет не только получать в качестве полезного результата прибыль, но и экономить ресурсы.

Экономический эффект от производства МТТ состоит в сокращении объемов отходов и расходов на их хранение, а также обеспечении тепловой энергией собственных потребностей предприятия, при этом стоит учитывать возможность получения дополнительной прибыли и от реализации топливных брикетов сторонним потребителям. Выполненный экономический расчет ожидаемого экономического эффекта, с учетом использования технических характеристик и стоимости оборудования, фактически необходимого соотношения различных используемых компонентов и других затрат, связанных с организацией производства топлива (без учета возведения здания), показал окупаемость создания таких производств в течение 28 месяцев при двухсменном режиме работы и производительности 6 тонн в смену.

Заключение. Новым аспектом в формировании представлений о перспективных направлениях эффективного использования вторичных сырьевых ресурсов является создание альтернативного твердого многокомпонентного топлива, позволяющего эффективно использовать вязкие углеводородсодержащие промышленные отходы. Разработанная технология и составы топлива позволяют получать энергоэффективное топливо с необходимыми тепло-техническими характеристиками, которое при системном подходе обеспечит экономию сырья, материалов и топливно-энергетических ресурсов, что является актуальной научно-технической задачей, решение которой имеет важное практическое значение для увеличения доли местных топливно-энергетических ресурсов, создания

стабильной сырьевой базы для энергетических установок, работающих на твердом топливе.

Список литературы

- 1 Охрана окружающей среды и природопользование. Отходы. Правила использования углеводородсодержащих отходов в качестве топлива : ТКП 17.11-01-2009. – Введ. 01.04.2009 (изм. 27.08.2010; 19.10.2012). – Минск : Минприроды, 2013. – 14 с.
- 2 Инженерная экология и очистка выбросов промышленных предприятий : учеб. пособие для вузов / Б. М. Хрусталева [и др.] ; под общ. ред. Б. М. Хрусталева. – Минск : Витно-стер, 2014. – 488 с.
- 3 Хрусталева, Б. М. Композиционное твердое топливо на основе вторичных горючих отходов / Б. М. Хрусталева, А. Н. Пехота // Энергоэффективность. – 2016. – № 4. – С. 18–22.
- 4 Хрусталева, Б. М. Технология эффективного использования углеводородсодержащих отходов в производстве многокомпонентного твердого топлива / Б. М. Хрусталева, А. Н. Пехота // Энергетика. Известия высш. учеб. заведений и энергетич. объединений СНГ. – 2016. – Т. 59, № 2. – С. 122–140.
- 5 Твердое топливо на основе отходов малоиспользуемых горючих энергоресурсов / Б. М. Хрусталева [и др.] // Наука и техника : Междунар. науч.-практ. журнал. – 2021. – № 1. – С. 58–65.
- 6 Пехота, А. Н. Определение эффективности параметров брикетирования и сушки многокомпонентных составов твердого топлива / А. Н. Пехота, Б. М. Хрусталева // Энергетическая Стратегия : науч.-практ. журнал. – 2022. – № 2. – С. 34–38.
- 7 Пехота, А. Н. Исследование термоаналитическими методами энергетических свойств брикетированного многокомпонентного топлива / А. Н. Пехота, С. А. Филагов // Энергетика. Известия высш. учеб. заведений и энергетич. объединений СНГ. – 2022. – Т. 65, № 2. – С. 143–155.
- 8 Пехота, А. Н. Многокомпонентное твердое топливо : [монография] / А. Н. Пехота. – Гомель : БелГУТ, 2021. – 243 с.

Получено 17.06.2022

B. M. Khrustalev, A. N. Pekhota, R. N. Vostrova, Yu. A. Pshenichnov. The use of multi-component fuel in boilers of sand-drying plants to ensure the safety of locomotive traffic.

The technology of multi-component briquetting of combustible waste generated in locomotive depots is considered with the aim of using them as solid fuel in sand-drying plants, providing locomotives with the greatest and most stable traction force for adhesion. The article discusses the results of research, on the basis of which effective approaches to the improvement of technological schemes that ensure the production of solid fuels are determined.