

DOI: 10.21122/1029-7448-2016-59-2-122-140

УДК 662.8.053.33

## Технология эффективного использования углеводородсодержащих отходов в производстве многокомпонентного твердого топлива

Б. М. Хрусталеv<sup>1)</sup>, А. Н. Пехота<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2016  
Belarusian National Technical University, 2016

**Реферат.** Рассмотрены современные подходы к использованию углеводородсодержащих отходов в качестве энергоресурсов. Представлены исследования, статистические материалы, выполнен анализ образования углеводородсодержащих отходов в Республике Беларусь. Отмечены основные проблемы применения отходов в качестве топлива, приведены технологии их использования. Изложены основные результаты исследований и способ эффективного применения вязких углеводородсодержащих отходов в качестве энергонасыщенного компонента и связующего вещества при производстве твердого топлива. Представлены технологическая схема, опытно-промышленная установка и оборудование, необходимые для реализации способа получения твердого многокомпонентного топлива. Приведены модель технологического процесса с эффективной последовательностью технологических операций и параметры оптимального компонентного состава. Отражены основные факторы, оказывающие существенное структурообразующее влияние на создание структурной композиции твердого многокомпонентного топлива. Дано графическое представление принципа подбора частиц смеси различной крупности при формировании твердого топлива методом брикетирования с учетом в составе вязких углеводородсодержащих отходов. Представлена зависимость безразмерной концентрации выбросов в атмосферу при сжигании двухкомпонентного твердого топлива. Проанализировано влияние разработанной методики расчета концентрации выбросов твердых многокомпонентных топлив, показана возможность оптимизации компонентного состава по экологической функции цели и индивидуальным особенностям топливосжигающего оборудования. Рассмотрены особенности хранения и транспортировки, отражены преимущества и недостатки, даны сравнительные характеристики, отмечена практическая применимость разработанного твердого многокомпонентного топлива. Приведены практические результаты использования углеводородсодержащих отходов на оборудовании по производству твердого многокомпонентного топлива. Проанализированы данные экономической целесообразности использования твердого многокомпонентного топлива с высокими теплотехническими характеристиками на котельных, работающих на местных видах твердого топлива. Дана перспективная оценка, отмечены актуальность и практическая значимость решения проблемы по эффективному использованию углеводородсодержащих отходов в производстве твердого многокомпонентного топлива.

**Ключевые слова:** углеводородсодержащие отходы, многокомпонентное твердое топливо, особенности хранения, практическая применимость

**Для цитирования:** Хрусталеv, Б. М. Технология эффективного использования углеводородсодержащих отходов в производстве многокомпонентного твердого топлива / Б. М. Хрусталеv, А. Н. Пехота // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2016. Т. 59, № 2. С. 122–140

---

### Адрес для переписки

Хрусталеv Борис Михайлович  
Белорусский национальный технический университет  
просп. Независимости, 65,  
220013, г. Минск, Республика Беларусь  
Тел.: +375 17 292-77-52  
rector@bntu.by

### Address for correspondence

Khroustalev Boris M.  
Belarusian National Technical University  
65 Nezavisimosty Ave.,  
220013, Minsk, Republic of Belarus  
Tel.: +375 17 292-77-52  
rector@bntu.by

---

## Technology for Efficient Usage of Hydrocarbon-Containing Waste in Production of Multi-Component Solid Fuel

B. M. Khroustalev<sup>1)</sup>, A. N. Pekhota<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

**Abstract.** The paper considers modern approaches to usage of hydrocarbon-containing waste as energy resources and presents description of investigations, statistic materials, analysis results on formation of hydrocarbon-containing waste in the Republic of Belarus. Main problems pertaining to usage of waste as a fuel and technologies for their application have been given in the paper. The paper describes main results of the investigations and a method for efficient application of viscous hydrocarbon-containing waste as an energy-packed component and a binding material while producing a solid fuel. A technological scheme, a prototype industrial unit which are necessary to realize a method for obtaining multi-component solid fuel are represented in the paper. A paper also provides a model of technological process with efficient sequence of technological operations and parameters of optimum component composition. Main factors exerting significant structure-formation influence in creation of structural composition of multi-component solid fuel have been presented in the paper. The paper gives a graphical representation of the principle for selection of mixture particles of various coarseness to form a solid fuel while using a briquetting method and comprising viscous hydrocarbon-containing waste. A dependence of dimensionless concentration  $g$  of emissions into atmosphere during burning of two-component solid fuel has been described in the paper. The paper analyzes an influence of the developed methodology for emission calculation of multi-component solid fuels and reveals a possibility to optimize the component composition in accordance with ecological function and individual peculiar features of fuel-burning equipment. Special features concerning storage and transportation, advantages and disadvantages, comparative characteristics, practical applicability of the developed multi-component solid fuel have been considered and presented in the paper. The paper cites practical results pertaining to usage of hydrocarbon-containing waste for the equipment applied for production of multi-component solid fuel. Data on economic expediency for usage of the multi-component solid fuel with high thermo-technical characteristics in the boiler-houses operating on local solid fuel have been analyzed in the paper. The paper shows a perspective evaluation, applicability and practical significance of the solution of the problem on efficient usage of hydrocarbon-containing waste while producing the multi-component solid fuel.

**Keywords:** hydrocarbon-containing waste, multi-component solid fuel, special features of storage, practical applicability

**For citation:** Khroustalev B. M., Pekhota A. N. (2016) Technology for Efficient Usage of Hydrocarbon-Containing Waste in Production of Multi-Component Solid Fuel. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 59 (2), 122–140 (in Russian)

### Введение

Изучение мировых тенденций потребления топливно-энергетических ресурсов (ТЭР) позволяет утверждать, что в будущем следует ожидать возрастания доли использования местных видов твердого топлива, газа, а также альтернативных, вторичных и нетрадиционных энергетических ресурсов [1]. Адекватно отвечать требованиям времени может только качественно новый топливно-энергетический комплекс – финансово устойчивый, экономически эффективный и динамично развивающийся, оснащенный передовыми технологиями, позволяющими реализовывать проекты, направленные на снижение энергоемкости продукции за счет широкого использования вторичных ресурсов, создания стабильной топливно-сырье-

вой базы на местных ТЭР, с приемлемым уровнем их получения и применения для окружающей среды.

В последние годы экономика Республики Беларусь претерпевает глубокие структурные изменения, которые связаны с повышением эффективности использования местных видов топлива из вторичных и имеющихся сырьевых ресурсов. Особый интерес представляет применение вторичных сырьевых ресурсов в качестве альтернативного топлива, что требует новых научных подходов, углубленных исследований в этой области и современных технических решений, направленных на создание экологически безопасных технологий и энергоресурсов, обеспечивающих внутренние потребности страны в местных видах топлива (МВТ).

### **Динамика образования и использования производственных отходов**

Одной из важнейших проблем всех без исключения индустриально развитых стран является стремительный рост объемов промышленных отходов. Тема вовлечения различных отходов для повторного использования, в том числе в энергетических целях, не нова. Например, в странах Европейского союза и США она довольно распространена. Анализ экологической стратегии получения альтернативных твердых топлив в Европе и США позволяет выделить в качестве основных путей достижения результата использование различных биоресурсов и твердых бытовых отходов (ТБО). Основная цель производства альтернативного твердого топлива – выработка недорогих энергоресурсов с применением энергоэффективных, ресурсосберегающих технологий и различных отходов, а также сокращение объемов образования отходов. Направление деятельности и виды отходов могут различаться и иметь свои особенности, но, как правило, конечная цель – в получении твердого восстановленного топлива (англ. refused derived fuel – RDF). RDF представляет собой твердое топливо, получаемое путем измельчения и обезвоживания ТБО. Оно состоит в основном из горючих компонентов ТБО, таких как пластик и биоразлагаемые отходы.

Технология производства альтернативного топлива RDF в разных странах и регионах имеет различия. Использование такого топлива, как правило, предусмотрено на промышленных предприятиях. Теплотворная способность RDF в различных странах при разных технологиях составляет 13–23 МДж/кг. Существенное влияние на теплотворные характеристики оказывают такие факторы, как морфологический состав отходов, способ использования полученного топлива, экологические особенности, разный технологический подход к операциям преобразования ТБО и др. [2].

В Республике Беларусь, несмотря на применяемые меры, ежегодно увеличивается объем образования горючих промышленных отходов, использование которых в значительной мере затруднено ввиду отсутствия экономически выгодных и экологически безопасных технологий, обеспечивающих их переработку и рациональное использование. Проведенные исследования белорусских ученых объективно доказывают возможность получения значительного энергетического эффекта от применения нефтесодержащих,

древесных и иных горючих отходов, которые мало востребованы в уже применяемых в республике технологиях.

Анализ данных отчетов Национального статистического комитета Республики Беларусь за 2008–2013 гг. показывает уровень и динамику использования отходов производства в стране. Тенденция роста объемов образования отходов производства показана на рис. 1. Количество накапливающихся отходов постоянно растет, а ежегодный их прирост составляет в среднем 3 % [3].

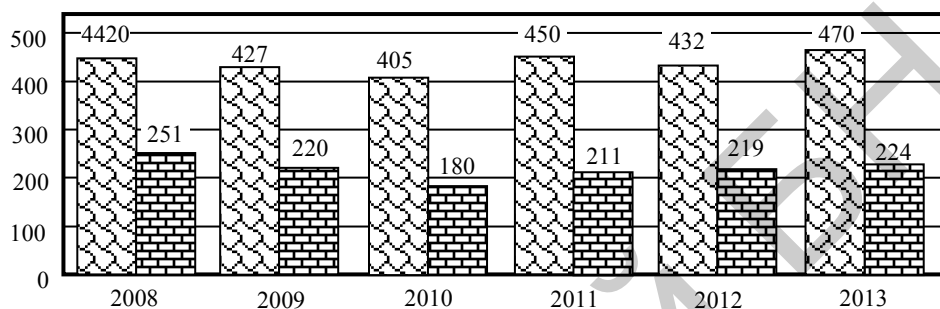


Рис. 1. Динамика объемов образования и использования отходов химического производства и производств, связанных с ними, на территории Беларуси с 2008 по 2013 г.:

▨ – объем образовавшихся отходов; ▤ – то же использованных отходов

Fig. 1. Dynamics in volumes of formation and usage of chemical industry and related productions on the territory of Belarus from 2008 till 2013:

▨ – volume of waste formation; ▤ – volume of used waste

Обработка данных в виде построения графиков линейной и кубической регрессий, определяемых как отношение объема использования отходов к объему их образования, с введением коэффициента использования отходов  $R$  показана на рис. 2.

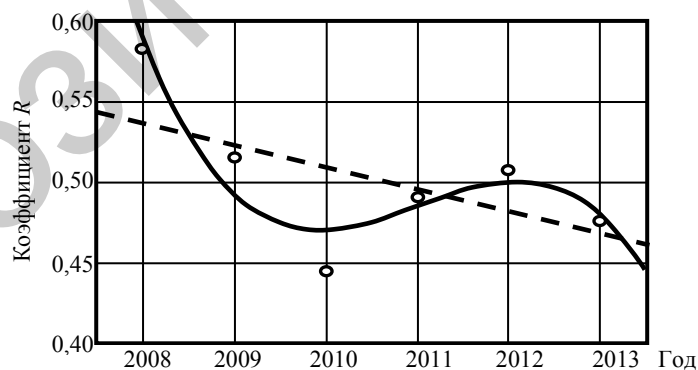


Рис. 2. Динамика отношения объема использования отходов химического производства и производств, связанных с ними, к объему их образования на территории Беларуси с 2008 по 2013 г.: ○ – статистические данные; — — — кубическая регрессия;

— — — — линейная регрессия

Fig. 2. Dynamics in ratio of volume pertaining to usage of waste of chemical industry and related productions to volume of their formation on the territory of Belarus from 2008 till 2013: ○ – statistic data; — — — — cubic regression; — — — — linear regression

Из данных рис. 2 следует, что первые три года наблюдалась тенденция снижения коэффициента  $R$ . Далее использование отходов возросло, а в последний год снизилось, что связано с ростом объемов производства продукции переработки нефтехимическим комплексом и низким уровнем применяемых технологий, не позволяющих обеспечить использование вязких отходов. Характерно, что достигнутый уровень переработки в основном базируется за счет широкого внедрения доступных технологий и специализированного топливосжигающего оборудования, предназначенного для жидких горючих отходов без предварительной подготовки (отработанное масло, эмульсии, смеси и т. п.).

Необходимо отметить, что только в агропромышленном комплексе страны ежегодно накапливается до 700 тыс. т нефтесодержащих сточных вод, до 30 тыс. т отработанных масел, накоплено около 1 млн т отходов (мелкой крошки) торфа, угля и более 500 тыс. т нефтешламов [4]. Их переработка затруднена из-за многочисленности и географической разбросанности источников отходов, а также из-за высоких транспортных расходов.

### **Эффективное применение углеводородсодержащих отходов**

Образование вязких нефтесодержащих (углеводородсодержащих – УВС) отходов происходит при добыче, переработке, производстве, хранении, транспортировке нефти и нефтепродуктов, а также в результате выполнения технологических операций при эксплуатации различных видов транспорта и промышленного оборудования. УВС-отходы – это отходы продуктов переработки нефти, а также отходы (шламы, остатки, смеси), содержащие или насыщенные нефтепродуктами. Данный вид отходов представляет собой вещества (или смеси веществ), образующиеся в результате производственной деятельности, и относится к отходам производства. Широкий диапазон значений показателей химического состава и физических свойств УВС-отходов, а также присутствие в них механических примесей, тяжелых металлов, серы, избыточного содержания воды требуют проведения детального анализа отходов и выполнения подготовительных мероприятий для использования их в качестве топлива [5]. К основным наиболее эффективным методам применения УВС-отходов относятся сжигание и регенерация. Однако переход энергетики на использование вторичных ресурсов в виде альтернативного топлива в энергоустановках многих пугает, так как это может оказаться экономически неприемлемым в силу значительных капитальных затрат на модернизацию оборудования.

Одним из решений вышеуказанных проблем по эффективному применению УВС-отходов является их использование при производстве твердого топлива. Сравнительный анализ существующих методов, технологий, оборудования, предназначенного для получения твердого топлива и переработки УВС-отходов, выявил ряд недостатков, к которым относятся: сложность и пожароопасность технологических решений, высокие энергетиче-

ские затраты при их реализации, жесткие требования к качественным показателям и составу используемых производственных отходов, дороговизна импортного технологического оборудования.

Также стоит отметить, что научно-исследовательские работы по переработке и применению нефтесодержащих отходов в большинстве своем проводятся с учетом потребности по снижению себестоимости продукции за счет экономии топливно-энергетических и сырьевых ресурсов крупных предприятий. Поэтому одним из недостатков научно-исследовательской деятельности является отсутствие доступных отечественных технологий и оборудования по переработке УВС-отходов, накопленных и образующихся повсеместно.

Цель исследования – разработать способ переработки вязких УВС-отходов путем их добавления к основному составу при брикетировании твердого топлива из древесных отходов, которое по своим теплотворным характеристикам может использоваться для сжигания в существующих огнетехнических установках без их переоборудования, при этом удовлетворяя критерии энергоэффективности и экологической безопасности.

#### **Результаты исследования и их анализ**

Исследования в обозначенных направлениях ведутся усилиями структурных подразделений Белорусского национального технического университета, в том числе кафедрами «Теплогоснабжение и вентиляция» и «Промышленная теплоэнергетика». Одним из результатов исследования является разработанная в БНТУ технология производства топлива твердого многокомпонентного (ТТМ) (англ. multicomponent solid fuel – MSF), внедрение которой позволит получать твердое топливо с использованием образующихся на предприятиях вязких углеводородсодержащих и древесных отходов [6]. Полученное MSF-топливо обеспечивает полное сжигание присутствующих в нем горючих материалов с выделением заданных теплотехнических характеристик. При этом оно удовлетворяет требованиям транспортировки и хранения, обеспечивая сохранение свойств и качественных характеристик горючей массы.

Разработанная технология получения ТТМ позволяет использовать в качестве связующего компонента нефтешламы, насыщенные нефтепродуктами опилки, ветошь, сорбирующие материалы, эмульсии нефтепродуктов, отработанные смазки, отходы очистки мазутных и нефтяных резервуаров, отходы нефтеловушек очистных сооружений. Их процентное содержание в топливе, как отдельных компонентов, так и в парном соотношении, не превышает 30 %. Основными компонентами этого вида топлива являются отходы деревообработки, лесопиления и переработки древесины, не находящиеся по разным причинам технологического применения (механические примеси, повышенная влажность, разный морфологический состав, биохимические процессы, повлекшие изменения, и т. п.).

В основе исследований лежат изменение подходов и совершенствование технологических схем процессов производства твердого топлива методом

брикетирования. Реализуемая схема существующих процессов брикетирования (RDF-топлива, брикетов RUF, Pini-kaу и т. п.), с технологической точки зрения, состоит из операций, представленных на рис. 3.

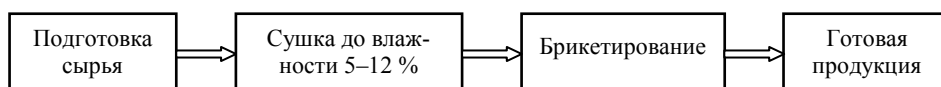


Рис. 3. Последовательность операций при традиционном способе брикетирования

Fig. 3. Sequence in operations while using conventional briquetting method

Недостатком данной схемы, ограничивающим ее применение при переработке нефтесодержащих отходов, является использование нагревательных элементов, поддерживающих температуру 220–260 °С, необходимую для спекания смолы и лигнина, выделяемых при брикетировании древесных опилок под создаваемым прессом давлением. С целью брикетирования нефтесодержащих и древесных отходов при производстве твердого MSF-топлива предложена схема последовательности операций, представленная на рис. 4.

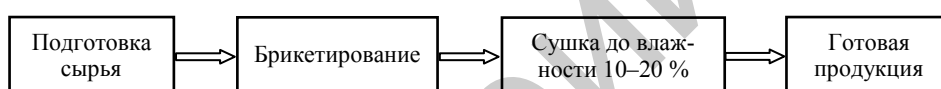


Рис. 4. Последовательность операций при предложенном способе брикетирования

Fig. 4. Sequence in operations while using the proposed briquetting method

Преимуществом такой схемы является исключение возможности самовоспламенения нефтесодержащих отходов при брикетировании топлива за счет отсутствия необходимости нагрева формуемой смеси. Сушку сформованного топлива производят в сушильных камерах, в теплое время года – при температуре наружного воздуха.

Для достижения цели исследования и научных результатов создана опытно-промышленная установка, на которой проведены эксперименты для решения задач описания общих закономерностей процесса, протекающего в установке при получении ТТМ, и оптимизации режима работы установки по производству этого топлива, позволяющего получать максимальное его количество заданного качества и формы в единицу времени. Для решения заданного алгоритма реализации этой научной задачи использовали теорию планирования эксперимента. При ее 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 ТТМ показали, что на производительность  $P$  установки наибольшее влияние оказывают влажность смеси  $w$  и доля  $x$  нефтесодержащих веществ в фор-

муемой смеси при одинаковом давлении  $p$  прессования и температуре  $T$  подаваемого сырья.

В качестве иллюстрации на рис. 5 схематично приведена информация, дающая представление об основном комплексе технологического оборудования опытно-промышленной установки, которое позволяет обеспечивать технологический процесс получения ТТМ, включающий следующие этапы: подготовку отходов, измельчение (0,1–8,0 мм), дозирование компонентов и перемешивание, прессование массы, сушку в естественных условиях или сушильной камере.

Установка работает в следующей последовательности: из расходного бункера-смесителя предварительно подготовленная смесь поступает в шнековый пресс, где уплотняется, затем перемещается через коническую формующую насадку шнекового пресса при давлении 20 МПа с образованием внутреннего сквозного продольного отверстия в формируемом брикете.

Основные требования к исходному сырью: древесное сырье (опилки) – не менее 70 % (допускается наличие мелких древесных частиц, коры размером до 10 мм, объемом 20 %); связующее – вязкие нефтеотходы (нефешламы, отработанные нефтепродукты, донные отложения нефтяных мазутных резервуаров и т. п.) – не более 30 %. В нефтеотходах допускается содержание (добавление) ветоши и сорбентов (на основе торфа, мха, лигнина и т. п.), насыщенных нефтепродуктами, до 5 % от общей массы сырья.

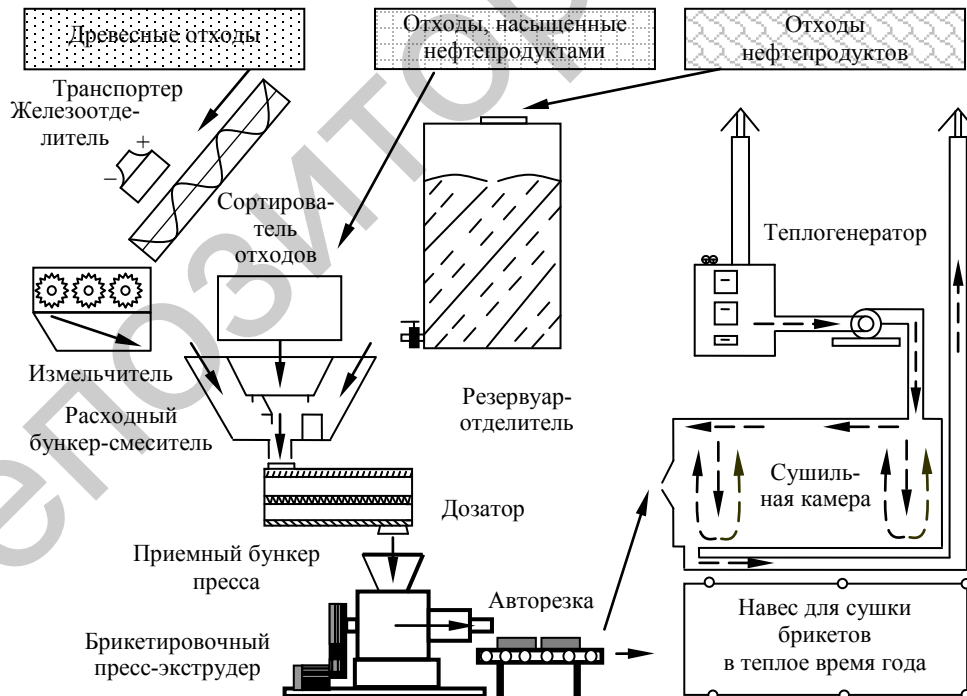


Рис. 5. Схема опытно-промышленной установки

Fig. 5. Scheme of prototype industrial unit



Дозирование компонентов, их перемешивание производится до образования однородной массы с помощью расходного бункера-смесителя, из которого подготовленная масса поступает через загрузочное окно пресса в формующую часть брикетировочного пресса-экструдера. В процессе непрерывного прессования (коническим шнеком) однородная масса уплотняется под воздействием внешней нагрузки, создаваемой модернизируемым шнековым прессом многокомпонентного топлива марки ПМТ-1 или ПМТ-0,3. Внешний вид изготовленных образцов ТТМ показан на рис. 6.



Рис. 6. Внешний вид, варианты сушки изготовленных образцов брикетов:  
а – малогабаритный пресс марки ПМТ-0,3;  
б – внешний вид высушенного топлива;  
с – вид контейнера в стационарной сушилке

Fig. 6. External view, variants in drying of the produced briquette specimens:  
a – small-size press of ПМТ-0.3 model;  
b – external view of dried fuel;  
c – view of container in stationary drier

Структура брикета образуется путем контактов частиц между собой и через прослойки связующих за счет создаваемых усилий прессования. Многообразие физико-химических и структурно-реологических процессов, которые протекают в период формования структурного каркаса брикета, обусловлено большим количеством необходимых для этого условий.

Среди основных факторов, оказывающих существенное структурообразующее действие, прежде всего следует учитывать гранулометрический состав, геометрический профиль поверхности, влажность и условия смешивания компонентов, давление и температуру прессования. Принцип подбора смеси частиц различной крупности заключается в создании структурной композиции, отвечающей наиболее плотной упаковке, представленной на рис. 7.

Четыре крупные частицы  $\alpha$  условно рассматриваются как сферы, которые, касаясь друг друга в точках  $b$ , образуют фигуру в виде криволинейного ромба. Свободное пространство между частицами  $\alpha$  заполняется зернами  $\beta$ . Далее пространство между частицами  $\alpha$  и  $\beta$  заполняют зерна  $\gamma$  и т. д.

Как видно, начиная с зерна  $\alpha$ , размеры которого должны быть заданы, существует оптимальная пропорция между размерами частиц  $\beta$  и  $\gamma$  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 ТТМ.

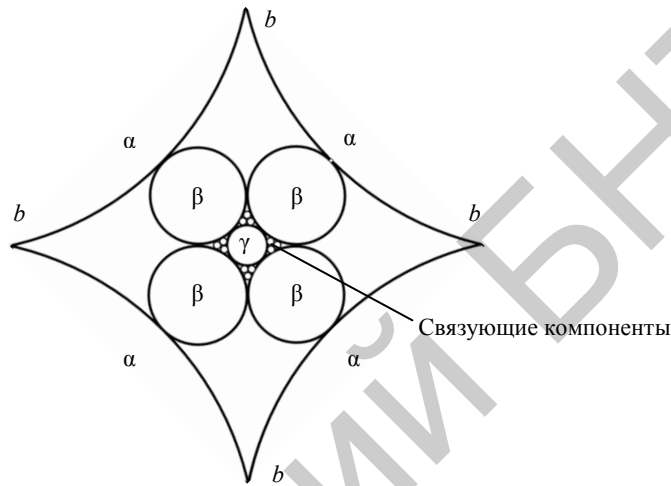


Рис. 7. Схема структуры с наиболее плотной (кубической) упаковкой частиц диаметрами  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  и т. д. в смеси ТТМ

Fig. 7. Scheme of structure with the most density (cubic) packing of particles with diameter  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  etc. in the mixture of multi-component solid fuel

В ходе проведения исследований определены: дисперсия выходных параметров, среднеквадратичные ошибки, доверительные интервалы, значение критерия Фишера  $F_p$ . Из результата сравнения  $F_p$  и табличного значения критерия Фишера  $F_t$  при 5%-м уровне значимости, числе степеней свободы  $f = 4$  следует, что представленная модель адекватна изучаемому процессу.

В уравнении регрессии

$$P = b_0 + b_1 z_w + b_2 z_x + b_{12} z_w z_x + b_{21} z_w^2 + b_{22} z_x^2, \quad (1)$$

где  $b_0$ ,  $b_1$ ,  $b_2$ ,  $b_{12}$ ,  $b_{11}$  и  $b_{22}$  – коэффициенты полинома при степенях  $z_w$  и  $z_x$ , произведена замена безразмерных факторов  $z_w$  и  $z_x$  исходными физическими величинами  $w$  и  $x$ . Преобразованное уравнение регрессии приобрело вид

$$I(w, x) = \beta_0 + \beta_1 w + \beta_2 x + \beta_{12} wx + \beta_{21} w^2 + \beta_{22} x^2, \quad (2)$$

где  $\beta_0$ ,  $\beta_1$ ,  $\beta_2$ ,  $\beta_{12}$ ,  $\beta_{21}$  и  $\beta_{22}$  – коэффициенты полинома при степенях  $w$  и  $x$ ,

$$\beta_0 = b_0 - \frac{b_1 w_0}{\Delta w} - \frac{b_2 x_0}{\Delta x} + \frac{b_{12} w_0 x_0}{\Delta w \Delta x} + \frac{b_{21} w_0^2}{\Delta w^2} + \frac{b_{22} x_0^2}{\Delta x^2}; \quad \beta_1 = \frac{b_1}{\Delta w} - \frac{b_{12} x_0}{\Delta w \Delta x} - \frac{2b_{21} w_0}{\Delta w^2};$$

$$\beta_2 = \frac{b_2}{\Delta x} - \frac{b_{12}w_0}{\Delta w \Delta x} - \frac{2b_{22}x_0}{\Delta x^2}; \quad \beta_{12} = \frac{b_{12}}{\Delta w \Delta x}; \quad \beta_{21} = \frac{b_{21}}{\Delta w^2}; \quad \beta_{22} = \frac{b_{22}}{\Delta x^2}.$$

По результатам проведенного анализа качественных показателей и полученных данных эксперимента представлены графические зависимости для определения оптимального соотношения компонентов с учетом минимальной влажности при оптимальной производительности и доле содержания нефтешламов.

Зависимости производительности  $P$  установки, рассчитанной после сушки брикета до влажности  $w = 0,1$ , от доли  $x$  нефтешламов в прессуемой смеси показаны на рис. 8, а от влажности  $w$  прессуемой смеси – на рис. 9.

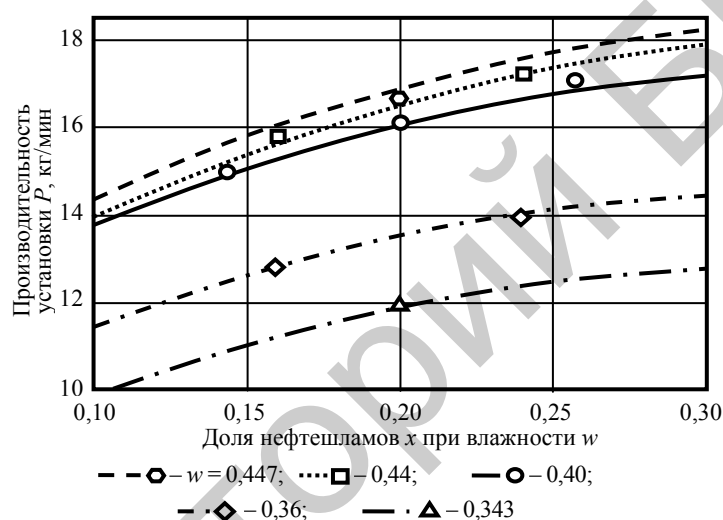


Рис. 8. Сравнение расчетных и экспериментальных данных для зависимости производительности от доли нефтепродуктов: точки – эксперимент; линии – расчет по уравнению регрессии

Fig. 8. Comparison of calculated and experimental data for dependence of productivity on oil product proportion: dots – experiment; lines – calculation in accordance with regression equation

Согласно построенным зависимостям, с ростом доли  $x$  нефтешламов в прессуемой смеси производительность  $P$  установки увеличивается; с повышением влажности прессуемой смеси в диапазоне от  $w = 0,30$  до  $w = 0,43$  также возрастает, а от  $w = 0,43$  до  $w = 0,60$  – уменьшается.

На основе исследования опытно-промышленных партий ТТМ с различными компонентными составами получены данные по химическому составу, теплоте сгорания, атмосферным выбросам от сжигания, которые позволили определить дополнительные выходные параметры эксперимента и зависимости. Поскольку переход на альтернативное топливо котельных 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 нефтешламы).

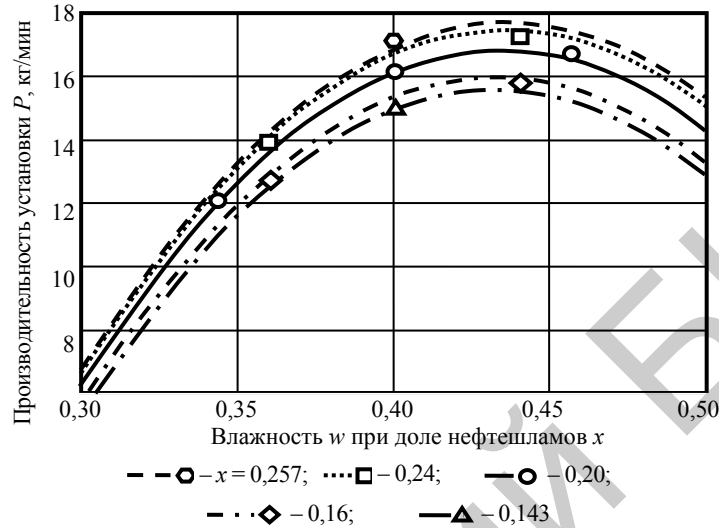


Рис. 9. Сравнение расчетных и экспериментальных данных для зависимости производительности от влажности: точки – эксперимент; линии – расчет по уравнению регрессии

Fig. 9. Comparison of calculated and experimental data for dependence of productivity on moisture: dots – experiment; lines – calculation in accordance with regression equation

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

$$q(x_1) = \frac{0,1AF_m n m \eta N}{H^2 \sqrt[3]{V \Delta T} [Q_1 x_1 + Q_2 (1 - x_1)] \eta_k} [q_{11}(x_1) + q_{12}(x_1) + q_2(x_1) + q_3(x_1) + q_4(x_1)], \quad (3)$$

где  $q_{11}(x_1)$  и  $q_{12}(x_1)$  – функции, учитывающие вклад в выбросы оксидов азота,

$$q_{11}(x_1) = \frac{\beta_p}{C_{uNO_2}} \left(1 - \frac{q_{41}}{100}\right) x_1 Q_1 \left[ H_{1,T} K_{1,T} \alpha_T \sqrt{\left(1 - \frac{q_{41}}{100}\right) \frac{100N}{[Q_1 x_1 + Q_2 (1 - x_1)] \eta_k} x_1 Q_1^3} \right];$$

$$q_{12}(x_1) = \frac{\beta_p}{C_{uNO_2}} (1 - x_1) Q_2 \left[ H_{2,T} K_{2,T} \alpha_T \sqrt{\frac{100N}{[Q_1 x_1 + Q_2 (1 - x_1)] \eta_k} (1 - x_1) Q_2^3} \right];$$

$q_2(x_1)$  – функция, учитывающая вклад в выбросы диоксидов серы (двуокиси серы),

$$q_2(x_1) = \frac{20000}{C_{uSO_2}} [x_1 S_{1,r} + (1 - x_1) S_{2,r}] (1 - \eta_{s_1}) (1 - \eta_{s_2}),$$

$q_3(x_1)$  – функция, учитывающая вклад в выбросы окиси углерода,

$$q_3(x_1) = \frac{x_1 C_{1,CO} + (1-x_1) C_{2,CO}}{C_{uCO}},$$

$q_4(x_1)$  – функция, учитывающая вклад в выбросы твердых частиц,

$$q_4(x_1) = \frac{10000}{C_{uPM}} \left[ x_1 (1 - \eta_{1,c}) \left( \alpha_{1,ab} A_r + q_{1,ab} \frac{Q_1}{\tau} \right) \right] + \\ + \frac{10000}{C_{uPM}} \left[ (1-x_1) (1 - \eta_{2,c}) \left( \alpha_{2,ab} A_r + q_{2,ab} \frac{Q_2}{\tau} \right) \right];$$

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

По результатам расчета  $q(x_1) = 0,909$ .

Разработанная методика позволяет рассчитывать доли компонентного состава ТТМ, удовлетворяющие индивидуальным особенностям оборудования котельных и экологическим требованиям, предъявляемым к его работе. Полученные зависимости безразмерной концентрации  $q$  от доли первого компонента брикета представлены на рис. 10.

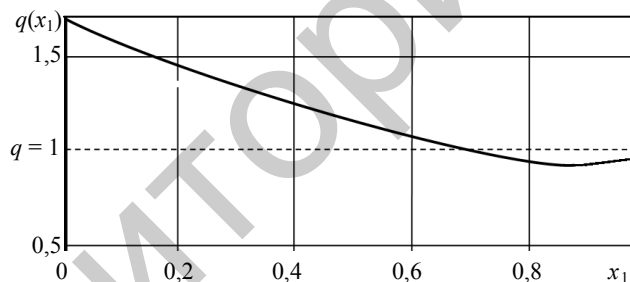


Рис. 10. Зависимость безразмерной концентрации  $g$  от доли компонента  $x_1$  (опилки)

Fig. 10. Dependence of dimensionless concentration  $g$  on component portion  $x_1$  (sawdust)

Определена доля компонента брикета (опилок), при которой безразмерная концентрация  $q$  минимальна. Например, доля отходов опилок  $x_1$  в рабочей массе топлива относительно содержания второго компонента нефтешламов, при котором  $q = 1$ , составляет  $x_1 = 0,676$ . По мере уменьшения доли опилок в топливе и увеличения доли нефтешламов концентрация выбросов вредных веществ от сжигания будет превышать предельно допустимые концентрации  $q(x_1)$ .

Полученные зависимости безразмерной концентрации  $q$  вредных выбросов от доли нефтесодержащих отходов (нефтешламов)  $x$  в брикетах для различных значений мощности  $N$  котельных установок представлены на рис. 11.

Математическая модель и методика расчета выбросов при сжигании разработанного двухкомпонентного твердого топлива, построенная с учетом регла-

ментирующих требований, изложенных в ОНД-86 и ТКП 17.08-01–2006 [7–9], позволяют определить оптимальное соотношение долей компонент в топливе с учетом параметров энергоустановки (мощность, КПД, диаметр устья и высота трубы и т. п.), в том числе и котельной.

Математическая модель за счет суммации вредного воздействия от каждого компонента позволяет найти приведенную концентрацию  $q$ , которая определяется как сумма безразмерных приземных концентраций каждого вредного вещества. Такой подход помогает рассчитывать на этапе производства оптимальный, с энергетической и экологической точек зрения, подбор компонентного состава топлива. Это позволяет использовать ТТМ на энергоустановках без дополнительных экономических затрат.

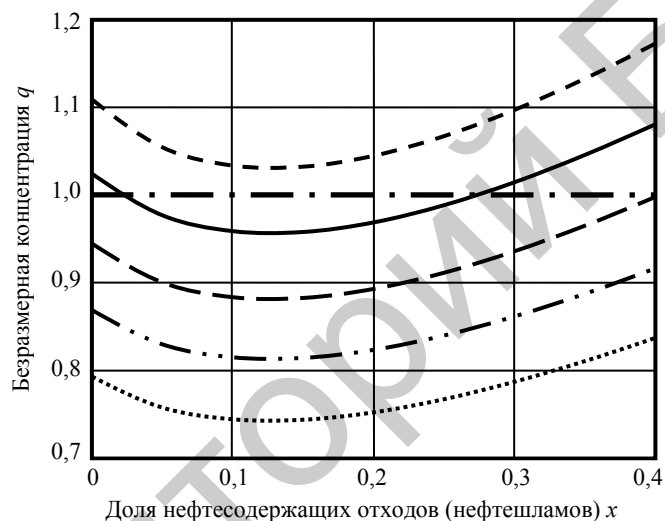


Рис. 11. Зависимость безразмерной концентрации  $q$  от доли компонента брикета  $x$ :

.....  $N = 14$  МВт; — · — · —  $N = 15$ ; — — —  $N = 16$ ; — — —  $N = 17$ ;  
 - - - -  $N = 18$  МВт; — · — · —  $q = 1,0$

Fig. 11. Dependence of dimensionless concentration  $q$  on component portion  $x$  (briquette):

.....  $N = 14$  MW; — · — · —  $N = 15$ ; — — —  $N = 16$ ; — — —  $N = 17$ ;  
 - - - -  $N = 18$  MW; — · — · —  $q = 1,0$

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

На основании полученных результатов теоретических и практических исследований и в соответствии с техническими нормативно-правовыми актами разработаны ТУ ВУ 490319372.001–2005, прошедшие согласование в установленном законодательством порядке. Изготовленные промышленные партии в соответствии с ТУ прошли испытания с участием представителей Гомельского областного управления по надзору за рациональным использованием топливно-энергетических ресурсов, предприятий

КУП «Речицаводоканал» и ОДО «ТеплоБел» (г. Гомель) с целью оценки качественных показателей хранения, транспортировки, сжигания ТТМ. Элементные составы горючей массы различных видов топлива приведены в табл. 1.

Таблица 1

## Элементные составы горючей массы различных видов топлива

## Element compositions of various fuel types

Вид топлива	Рабочий состав топлива (по массе), %				
	Углерод С	Кислород O <sub>2</sub>	Водород H <sub>2</sub>	Азот N <sub>2</sub>	Сера SO <sub>2</sub>
ТТМ с содержанием нефтешламов 25 %*	61,42	31,05	6,43	0,33	0,77
ТТМ с содержанием смеси отработанных нефтепродуктов 30 %*	58,88	36,09	4,56	0,20	0,27
Дрова	51,00	42,30	6,10	0,60	–
Торф	58,00	33,60	6,00	2,10	0,30
RDF-топливо** (нижнее и верхнее значения)	44–51	29–36	5–7	0,9–1,6	0,38–1,46

\* Данные получены в аналитической лаборатории РУП «Белгослес». Аттестат аккредитации 02.1.0.0417 № ВУ/112.  
\*\* Данные по [2].

Анализ зольности, влаги, теплоты сгорания, содержания серы в процессе проведения испытаний с целью определения и контроля статистически достоверных результатов проводили в специализированных лабораториях на образцах с применением идентичных методов. Теплота сгорания и цена различных видов топлива в Республике Беларусь по состоянию на конец 2015 г. представлены в табл. 2.

Таблица 2

## Теплота сгорания и стоимость различных видов топлива (декабрь 2015 г.)

## Heating value and cost of various fuel types (December, 2015)

Вид топлива	Теплота сгорания, ккал/кг	Цена, тыс. руб./т	Производитель (поставщик)
ТТМ «Марка-2», W = 15 %	4330	590	ОДО «ТеплоБел»
Дрова-поленья (кругляк), W = 15 %	2500	620	ЧПУП «Пинскстройлес»
Дрова колотые, W = 15 %	2500	950	ЧПУП «Пинскстройлес»
Торфобрикет, W не более 16 %	3600	895	ОАО ТБЗ «Усяж»
Топливный брикет RUF, W = 12 %	4100	1416	ОАО «Речицадрев»
Топливный брикет Pini-kaу, W = 9 %	4890	2000	ООО «Древ-контакт»
Топливные гранулы, W = 7,7 %	4570	1900	ИП Бочкарев С.А.
Уголь бурый марки Б-2	4177	1350	ООО «Белкарботранс»
Уголь антрацит марки АМ	6200	2200	ООО «Белкарботранс»

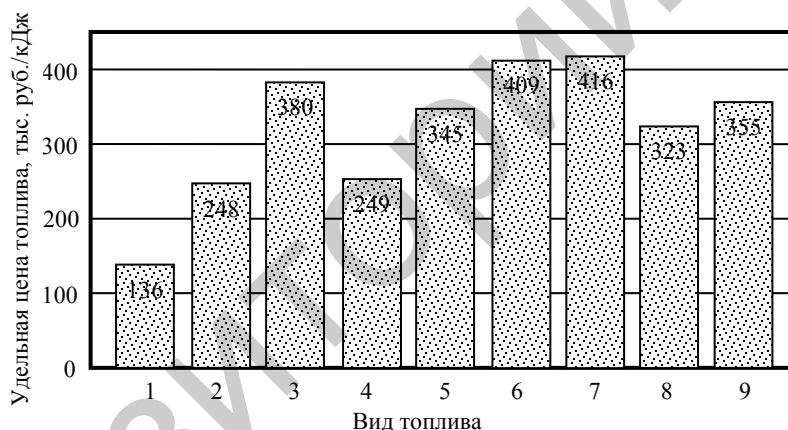
Результаты испытаний показали, что транспортировка россыпью создает максимальную гибкость логистических операций при минимальных за-

тратах с использованием самосвальных транспортных средств, обеспечивающих быструю разгрузку и оборачиваемость транспорта. Места погрузки-выгрузки должны быть оборудованы навесами, препятствующими затеканию дождевых осадков.

Как показала практика, упаковка в контейнеры биг-бэг удобна при транспортировке, обеспечивает защиту топлива от внешних воздействий и позволяет использовать простые технические средства при погрузочно-разгрузочных работах (кран, кран-балка, автопогрузчик, манипулятор). Складирование контейнеров в штабель не должно превышать три ряда.

Возможность использования ТТМ для сжигания в топках, котлах и промышленных котельных согласована с Министерством природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь. Сравнение удельных цен различных видов топлива приведено на рис. 12.

Разработаны составы ТТМ четырех марок, которые прошли государственную регистрацию в Государственном центре каталогизации продукции и допущены к реализации потребителям [10]. Разработанные марки топлива защищены патентами [11, 12].



*Рис. 12.* Сравнение удельных цен различных видов топлива:

- 1 – ТТМ «Марка-2»,  $W = 15\%$ ; 2 – дрова-поленья (кругляк),  $W = 15\%$ ;
- 3 – дрова колотые,  $W = 15\%$ ; 4 – торфобрикет,  $W$  не более  $16\%$ ;
- 5 – топливный брикет RUF,  $W = 12\%$ ; 6 – топливный брикет Pini-key,  $W = 9\%$ ;
- 7 – топливные гранулы,  $W = 7,7\%$ ; 8 – уголь бурый марки Б-2;
- 9 – уголь антрацит марки АМ

*Fig. 12.* Comparison of unit price of various fuel types

- 1 – TTM Grade-2,  $W = 15\%$ ; 2 – cordwood (round timber),  $W = 15\%$ ;
- 3 – chop wood,  $W = 15\%$ ; 4 – peat briquette,  $W$  not more than  $16\%$ ;
- 5 – fuel briquette RUF,  $W = 12\%$ ; 6 – fuel briquette Piny-key,  $W = 9\%$ ;
- 7 – fuel granules,  $W = 7,7\%$ ; 8 – lignite, Grade Б-2;
- 9 – anthracitic coal, Grade АМ

Технологическая схема получения ТТМ на основе нефтешламов, смеси отработанных нефтепродуктов, донных отложений мазутных резервуаров и древесных отходов внедрена на предприятии ОДО «ТеплоБел». Разрабо-



танный способ позволил утилизировать производственные отходы, образующиеся на предприятиях и не нашедшие технологического применения, что дало возможность осуществить рециклинг более 60 т нефтесодержащих отходов на предприятиях ОАО «Гомельдрев» при строительстве завода по производству плиты МДФ/ХДФ, в значительно меньших объемах – на РДУП «Гомельский завод “Эталон”», в ОАО «Птицефабрика “Рассвет”», ОАО «Гомельский ДСК» и др.

Технологическое объединение насыщенных по химическому составу УВС-отходов позволило получить не только топливо с высокой калорийностью, но и высокий экономический эффект, а в качестве полезного результата иметь не только прибыль, но и экономию ресурсов. Экономический эффект от производства ТТМ заключается в сокращении объемов отходов и расходов на их хранение, а также в обеспечении тепловой энергией собственных потребностей предприятия. При этом стоит учитывать возможность получения дополнительной прибыли от реализации топливных брикетов сторонним промышленным предприятиям и населению. 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 т в смену.

Расчетная экономическая эффективность подтверждается результатами работы внедренной производственной установки в ОДО «ТеплоБел». При этом расчет учитывает, что УВС-отходы, поступающие на переработку, принимаются бесплатно. Однако при изменении структуры издержек в расчете себестоимости ТТМ может быть нулевой, так как в настоящее время на рынке переработки и утилизации отходов нефтепродуктов принципиально изменяются взаимоотношения с собственниками отходов путем компенсации ими затрат на их переработку. В этом случае прибыль предприятия, производящего ТТМ по разработанной технологии, зависит от возможности реализовать свою продукцию по конкурентоспособной цене и от объемов продаж.

Таким образом, внедрение разработанной технологии производства и составов топлива позволяет сократить энергозатраты предприятий, потребляющих твердое топливо, увеличить долю МВТ в энергетическом балансе региона, а также улучшить экологическую обстановку за счет снижения объемов отходов производства и обеспечить экономию природных ресурсов. Серийное изготовление отечественных установок и их размещение в регионах Республики Беларусь создаст условия, при которых экономятся валютные средства, создаются дополнительные рабочие места, появляется дополнительная возможность экономии на энергоносителях. За счет этого уменьшается зависимость производства от их поставок, что приобретает особое значение в современных экономических условиях.

## ВЫВОД

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 дают возможность получать энергоэффективное топливо с необходимыми теплотехническими характеристиками. Это при системном подходе обеспечит экономию сырья, материалов и топливно-энергетических ресурсов, что является актуальной научно-технической задачей. Ее решение имеет важное практическое значение для увеличения доли местных топливно-энергетических ресурсов, создания стабильной сырьевой базы для энергетических установок, работающих на твердом топливе.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Мясникович, М. В. Энергетическая безопасность и устойчивое инновационное развитие – основа независимости Республики Беларусь / М. В. Мясникович // Экономика Беларуси. 2007. № 3. С. 22–26.
2. Бушихин, В. В. Альтернативные топлива из твердых отходов. Применение и легализация [Электронный ресурс] / В. В. Бушихин // Экологический вестник России. 2013. № 5. Режим доступа: <http://www.ecovestnik.ru/index.php/obrashchenie-s-otkhodami/1737-alternativnye-topliva-iz-tverdykh-otkhodov-primeneniye-i-legalizatsiya>. Дата доступа: 11.08.2015.
3. Экологический бюллетень 2008–2013 гг. [Электронный ресурс] // Министерство природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь. Режим доступа: <http://minpriroda.gov.by/ru/bulleten-ru>. Дата доступа: 11.08.2015.
4. Севернев, М. М. Нетрадиционные возобновляемые источники энергии и местные виды топлива. Ресурсы и перспективы использования в Республике Беларусь / М. М. Севернев, В. В. Кузьмич // Белорусское сельское хозяйство. 2008. № 9 (77). С. 11–15.
5. Охрана окружающей среды и природопользование. Отходы. Правила использования углеводородсодержащих отходов в качестве топлива: ТКП 17.11-01–2009. Введ. 01.04.2009. Минск: РУП «БелНИЦ «Экология», 2013. 28 с.
6. Способ получения топлива твердого многокомпонентного: пат. 18408 Респ. Беларусь, МПК С 10 L 5/48, С 10 L 5/06, С 10 L 5/36 / А. Н. Пехота, Б. М. Хрусталева; дата публ. 30.08.2014.
7. Инженерная экология и очистка выбросов промышленных предприятий: учеб. пособие для вузов / Б. М. Хрусталева [и др.]; под общ. ред. Б. М. Хрусталева. Минск: Вит-постер, 2014. 488 с.
8. Охрана окружающей среды и природопользование. Атмосфера. Выбросы загрязняющих веществ в атмосферный воздух. Порядок определения выбросов при сжигании топлива в котлах теплопроизводительностью до 25 МВт: ТКП 17.08-01–2006 (02120). Введ. 01.05.2006. Минск: Минприроды, 2006. 30 с.
9. Методика расчета концентраций в атмосферном воздухе вредных веществ, содержащихся в выбросах предприятий. ОНД-86. Введ. 01.01.1987. Л.: Гидрометеиздат, 1987. 106 с.
10. Топлива твердые многокомпонентные. Технические условия: ТУ ВУ 490319372.001–2005. Введ. 01.05.2005. Гомель: Теплобел, 2005. 8 с.

11. 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; дата публ. 30.08.2014.
12. 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; дата публ. 30.04.2014.

Поступила 03.03.2016 Подписана в печать 20.03.2016 Опубликовано онлайн 30.03.2016

## REFERENCES

1. Myasnikovich M. V. (2007) Independence of Belarus is Energy Security Coupled with Sustainable Innovation-Based Development. *Ekonomika Belarusi* [Economy of Belarus], (3), 22–26 (in Russian).
2. Bushikhin V. V. (2013) Alternative Refuse-Derived Fuels. Application and Legalization. *Ekologicheskii Vestnik Rossii* [Ecological Bulletin of Russia], (5). Available at: <http://www.eco-vestnik.ru/index.php/obrashchenie-s-otkhodami/1737-alternativnye-topliva-iz-tverdykh-otkhodov-primenenie-i-legalizatsiya> (Accessed 11 August 2015). (in Russian).
3. Ecological Bulletin of 2008–2013. *Ministry of Natural Resources and Environmental Protection of the Republic of Belarus*. Available at: <http://minpriroda.gov.by/ru/bulleten-ru>. (Accessed 11 August 2015). (in Russian).
4. Severnev M. M., Kuzmich V. V. (2008) Non-Conventional and Renewable Energy Sources and Local Fuel Types. Resources and Prospects on Usage in the Republic of Belarus. *Belorusskoye Selskoye Khozyaistvo* [Belarusian Agriculture], 77 (9), 11–15 (in Russian).
5. ТКР 17.11-01–2009. Environmental Protection and Nature Management. Waste. Rules and Regulations on Usage of Hydrocarbon-Containing Waste as Fuel. Minsk, RUE Belarusian Research Center “Ecology”, 2013. 28 (in Russian).
6. Pekhota A. N., Khroustalev B. M. (2014) Method for Obtaining Multi-Component Solid Fuel. Patent Republic of Belarus, no 18408 (in Russian).
7. Khroustalev B. M., Sizov V. D., Brakovich I. S., Zolotareva I. M. (2014) *Engineering Ecology and Purification of Emissions From Industrial Enterprises*. Minsk, Publishing House “Vitposter”. 488 (in Russian).
8. ТКР 17.08-01–2006 (02120). Environmental Protection And Nature Management. Atmosphere. Emissions of Contaminants Into Open air. Procedure For Determination of Emissions During Fuel Burning in The Boilers with Heat Capacity Up to 25 MW. Minsk, Publishing House “Minpriroda”, 2006. 30 (in Russian).
9. OND-86. Methodology for calculation of Contaminant Concentrations in the Atmospheric Air Which are Contained in the Emissions of Industrial Enterprises. Leningrad, Publishing House “Hydrometeoizdat”, 1987. 106 (in Russian).
10. TU BY 490319372.001–2005. Multi-Component Solid Fuel. Technical Specifications. Gomel, Teplobel. 8 (in Russian Unpublished).
11. Pekhota A. N., Khroustalev B. M. (2014) Composition of Multi-Component Fuel for Briquetting. Patent Republic of Belarus, No 18463 (in Russian).
12. Pekhota A. N., Khroustalev B. M. (2014) Composition of Multi-Component Fuel for Briquetting. Patent Republic of Belarus, No 18130 (in Russian).

Received: 3 March 2016

Accepted: 20 March 2016

Published online: 30 March 2016