

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-1-91-100>

УДК 662.711.4

Экспериментальное и расчетное исследование формирования композитного гранулированного топлива

Л. Н. Овчинников¹⁾, Н. Л. Овчинников¹⁾, А. В. Митрофанов²⁾,
С. В. Василевич³⁾, Н. С. Шпейнова²⁾

¹⁾Ивановский государственный химико-технологический университет
(Иваново, Российская Федерация),

²⁾Ивановский государственный энергетический университет
(Иваново, Российская Федерация),

³⁾Белорусская государственная академия авиации (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2023
Belarusian National Technical University, 2023

Реферат. В настоящее время актуальной тенденцией развития энергетических комплексов ряда стран является расширение твердотопливной ниши, которое во многом обеспечивается за счет использования различных видов местного возобновляемого топлива. Оно зачастую обладает высокими теплотехническими свойствами (теплотой сгорания, зольностью и т. п.), но имеет низкие или плохо прогнозируемые физико-механические характеристики (прочность, гранулометрический состав и др.). Последнее практически исключает стабильную и эффективную работу систем автоматизации и механизации транспортировки гранул, а также технологические процессы котлоагрегатов. Создание композитных топлив с заданными физико-механическими свойствами позволяет решить эту проблему. Состав композитного топлива на основе торфа, опилок, целлюлозы и модификатора установлен на предыдущих этапах. Однако при заданном составе композиции физико-механические характеристики зависят от режимно-технологических условий получения гранул. В настоящей работе выполнено расчетно-экспериментальное исследование, направленное на поиск рациональных технологических условий гранулирования и сушки частиц композитного топлива с заданным массовым соотношением компонентов. Для приготовления топливных гранул определенного размера из исходных мелкофракционных компонентов использовалась лабораторная установка, основные элементы которой – Z-образный смеситель, шнековый гранулятор и сушилка со взвешенным слоем. Влияние независимых переменных на прочность и конечную влажность готовых гранул композитного топлива определено в рамках полного факторного эксперимента. В статье представлены графические изображения поверхностей отклика, характеризующие указанное влияние варьируемых факторов. Полученные регрессионные зависимости, описывающие влияние факторов на целевые свойства гранул, имеют линейный характер. Последнее ограничивает возможность использования градиентных методов оптимизации, поэтому необходимо искать рациональные условия с учетом ограничений, обусловленных технико-экономическими параметрами изготовления топливных гранул.

Ключевые слова: композитное гранулированное топливо, торф, отходы деревообработки, сушка, полный факторный эксперимент

Для цитирования: Экспериментальное и расчетное исследование формирования композитного гранулированного топлива / Л. Н. Овчинников [и др.] // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2023. Т. 66, № 1. С. 91–100. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-1-91-100>

Адрес для переписки

Василевич Сергей Владимирович
Белорусская государственная академия авиации
ул. Уборевича, 77,
220096, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 249-97-65
svasilevich@yandex.ru

Address for correspondence

Vasilevich Siarhei V.
Belarusian State Academy of Aviation
77, Uborevich str.,
220096, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 249-97-65
svasilevich@yandex.ru

Experimental and Computational Study of the Formation of Composite Granular Fuel

L. N. Ovchinnikov¹⁾, N. L. Ovchinnikov¹⁾, A. V. Mitrofanov²⁾,
S. V. Vasilevich³⁾, N. S. Shpeynova²⁾

¹⁾Ivanovo State University of Chemistry and Technology (Ivanovo, Russian Federation),

²⁾Ivanovo State Power Engineering University (Ivanovo, Russian Federation),

³⁾Belarusian State Academy of Aviation (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. Currently, the topical trend in the development of energy complexes in a number of countries is the expansion of the solid fuel use, which is largely provided by the use of various types of local renewable fuels. The latter often have high thermal properties (heat of combustion, ash content, etc.), but have low or poorly predicted physical and mechanical characteristics (strength, granulometric composition, etc.). These circumstances practically make stable and efficient operation of automation systems, mechanization of transportation of pellets, and technological processes of boilers impossible. The formation of a composite fuel with specified physical and mechanical properties provides a solution to this problem. The structure of the composite fuel based on peat, sawdust, cellulose and modifier was established at the previous stages of our work. However, in case of a given composition, the physical and mechanical characteristics depend on the operating and technological conditions for obtaining granules. In this paper, a statistical and experimental study was carried out aimed at finding rational technological conditions for granulating and drying composite fuel particles with a given mass ratio of components. To prepare fuel pellets of a given size from the initial fine-fraction components, a laboratory installation was used, the main elements of which were a Z-shaped mixer, a screw granulator, and a fixed bed dryer. The influence of independent variables on the strength and final moisture content of finished pellets of composite fuel was determined within the framework of a full factor experiment. The paper presents graphical images of response surfaces characterizing the specified influence of variable factors. The obtained regression dependences describing the influence of factors on the target properties of granules are linear in nature. The latter limits the possibility of using gradient optimization methods and creates the need to search for rational conditions, taking into account the limitations caused by the technical and economic parameters of obtaining finished fuel pellets.

Keywords: composite granular fuel, peat, woodworking waste, drying, full factor experiment

For citation: Ovchinnikov L. N., Ovchinnikov N. L., Mitrofanov A. V., Vasilevich S. V., Shpeynova N. S. (2023) Experimental and Computational Study of the Formation of Composite Granular Fuel. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 66 (1), 91–100. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-1-91-100> (in Russian)

Введение

В настоящее время тенденции развития энергетических комплексов ряда стран, в том числе России и Беларуси, четко указывают на расширение твердотопливной ниши в энергетическом секторе, которое во многом обеспечивается за счет использования различных видов местного возобновляемого топлива [1–3]. При этом важны вопросы пригодности этого топлива для технологического использования. Определяя целесообразность и эффективность вовлечения в оборот того или иного вида топлива, очевидно, приходится принимать во внимание большое количество факторов (экономических, экологических, географических, технологических и др.), значимость каждого из которых не всегда может быть однозначно оценена и требует специального обоснования [2–4].

Торф находится на промежуточной стадии процесса перехода от органической массы к угольному топливу (процесса минерализации) и поэтому может быть отнесен как к возобновляемым источниками энергии, так и к невозобновляемым. В России известные запасы торфа оцениваются специалистами примерно в 128 млрд т, что при существующем уровне во-

влечения его в хозяйственный оборот позволяет рассматривать торф как медленно возобновляемый источник энергии (slowly renewable biomass), уровень прироста объемов которого превышает уровень потребления [4–6].

Торф как топливо имеет широкий спектр экономических и экологических преимуществ: в частности, обладая близким к бурому углю значением низшей теплоты сгорания на горючую массу, он отличается более низким содержанием серы, невысокой зольностью, более приемлемым содержанием ртути [6]. Однако хорошо известны и лимитирующие использование торфа в качестве топлива факторы: высокая влажность, хрупкость частиц и их агрегатов, неоднородность характеристик в зависимости от сезона и др. [4–5]. В связи с этим значительную нишу в области исследований, направленных на вовлечение торфа в хозяйственный оборот в качестве топливного компонента, занимают труды, связанные с разработкой композитных топлив [7–10].

Важной задачей является не только подбор состава композиции, но и разработка и совершенствование технологии производства топливных гранул. В общем случае технологические схемы их производства включают следующие этапы: подготовка компонентов (сушка, измельчение, классификация), их смешивание, гранулирование, сушка [11–13]. Технологические аспекты отдельных стадий производства топливных гранул стали предметом достаточно широкого круга исследований (например, сушка гранул [5, 13], получение смесей [14, 15], различные способы их гранулирования [15, 16]). Несмотря на сравнительную многочисленность подобных работ, вопросы выработки рекомендаций по выбору конкретного способа осуществления того или иного технологического передела, а также методов расчета параметров указанных переделов являются открытыми и актуальными. Во многом это объясняется разнообразием видов топлива и, соответственно, значительным количеством возможных композиций. Таким образом, просто не может существовать исчерпывающего банка характеристик и соответствующих технологических рекомендаций. С другой стороны, технологический аспект проблем часто рассматривается вне связи с возможными изменениями состава композиций, т. е. изучается некоторый модельный материал, характеристики которого даны заранее или варьируются на нескольких уровнях. При такой постановке задачи практически не принимаются во внимание другие этапы жизненного цикла топлива. Например, на стадиях сушки, хранения, транспортировки искусственных видов топлива на основе торфа их топливно-энергетические параметры не важны, зато критически значимы их характеристики как сыпучих материалов (прочность, сыпучесть, истираемость и др.). Низкие значения этих показателей влекут за собой трудно прогнозируемые изменения гранулометрического состава топлив, что может нарушать режим работы систем автоматизации и механизации транспортировки гранул, а также технологические процессы котлоагрегатов [7, 16, 17]. В итоге к полученным новым результатам исследования всегда возникают вопросы, касающиеся их применимости при других режимах производства гранул, а также влияния на топливно-энергетические параметры топлива.

Предлагаемое в настоящей статье исследование направлено на поиск режима получения гранулированного композитного топлива, рационального с точки зрения теплотворной способности и требований к нему как к сыпучему продукту, и поэтому удачно позиционируется среди описанных выше крупных исследовательских направлений.

Методы и результаты исследования

Важной стадией получения гранулированного биотоплива является его сушка, которая часто организуется в конвективном потоке сушильного агента через фильтрующий слой материала [16]. В связи с этим в рамках настоящей работы проведены расчетно-экспериментальные исследования, направленные на поиск рациональных технологических условий гранулирования и сушки частиц готового продукта с заданным массовым соотношением компонентов.

Экспериментальное исследование проводили на лабораторной установке, схема которой приведена на рис. 1. Перед экспериментом установку вывели на стационарный тепловой режим. Воздух, нагнетаемый газодувкой, с заданным расходом (измеряется ротаметром) поступал в электрокалорифер, а оттуда в сушилку. Исходные мелкофракционные компоненты (целлюлоза, торф, опилки, модификатор и вода) подавались в смеситель, после их смешивания приготовленная паста направлялась в шнековый гранулятор для получения гранул заданного размера. На следующем этапе навеску гранул загружали в кювету и помещали на газораспределительную решетку сушилки. Через определенные интервалы времени проводили измерения значений температуры воздуха под решеткой, в слое и над слоем. Убыль влаги в гранулах слоя измеряли периодически с помощью электронных весов марки MW-120.

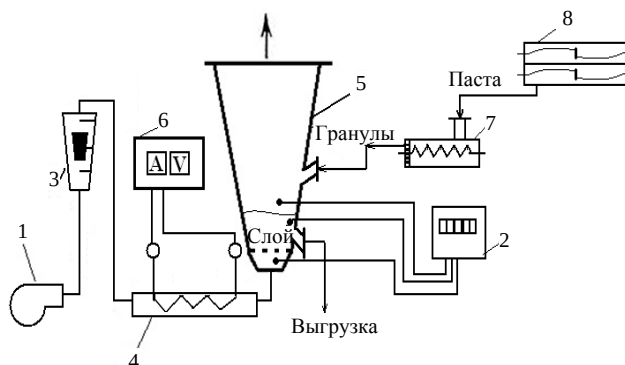


Рис. 1. Технологическая схема лабораторной установки для получения гранулированного композитного топлива: 1 – газодувка; 2 – прибор для измерения температуры; 3 – ротаметр для измерения расхода воздуха; 4 – электрокалорифер; 5 – сушилка с плотным слоем частиц; 6 – электрощит; 7 – шнековый гранулятор; 8 – Z-образный смеситель

Fig. 1. Technological scheme of a laboratory installation for producing granular composite fuel: 1 – gas blower; 2 – temperature measuring device; 3 – rotameter for measuring air flow; 4 – electric heater; 5 – fixed bed dryer; 6 – electrical panel; 7 – screw granulator; 8 – Z-shaped mixer

Для нахождения рациональных технологических условий получения качественных гранул композитного топлива выполнен полный факторный эксперимент с размерностью $N = 2^k$, где N – число опытов.

В качестве исследуемых параметров выбраны: Y_1 – конечная относительная влажность гранул, %; Y_2 – прочность гранул, МПа. Независимые переменные: X_1 – температура воздуха под решеткой, °С; X_2 – содержа-

ние модификатора в смеси, г; X_3 – время сушки, мин; X_4 – масса слоя, г; X_5 – расход воздуха, м³/ч. Интервалы и уровни варьирования независимых переменных: $\Delta X_1 = 70\text{--}90$ °С; $\Delta X_2 = 1\text{--}3$ % по массе; $\Delta X_3 = 25\text{--}35$ мин; $\Delta X_4 = 17\text{--}27$ г; $\Delta X_5 = 40\text{--}50$ м³/ч.

Выбран общий вид уравнений регрессии в виде полиномов, расположенных по восходящим степеням изучаемого фактора и одновременно линейных ко всем коэффициентам (полиномиальная регрессия) [18–19]:

$$Y = b_0 + b_1 X + b_2 X^2 + \dots + b_m X^m, \quad (1)$$

где b – параметры модели, подлежащие определению (коэффициенты регрессии).

В случае использования плана первого порядка для многофакторного эксперимента при условии взаимодействия (зависимости друг от друга) факторов выражение (1) трансформируется в соотношение вида [18–19]

$$Y = b_0 + \sum_{i=1}^m b_i X_i + \sum_{\substack{i,j=1 \\ i \neq j}}^m b_{ij} X_i X_j + \sum_{\substack{u,i,j=1 \\ i \neq j \neq u}}^m b_{iju} X_i X_j X_u + \dots, \quad (2)$$

где i, j и u – индексы факторов (1, 2, 3, ..., m); m – число исследуемых факторов.

Для определения коэффициентов регрессии использовали известные формулы [18–19]. Так, значение свободного слагаемого (b_0) находили как среднее арифметическое всех полученных в эксперименте значений параметра Y

$$b_0 = \frac{\sum_{j=1}^N Y_j}{N}, \quad (3)$$

где Y_j – экспериментальное значение параметра в j -м опыте.

Линейные выборочные коэффициенты регрессии

$$b_i = \frac{\sum_{j=1}^N X_{ij} Y_j}{N}, \quad (4)$$

где X_{ij} – кодированное значение фактора в j -м опыте.

После математической обработки результатов эксперимента, определения значений коэффициентов регрессионных уравнений и проверки их адекватности по критерию Фишера получены новые регрессионные зависимости [18–19].

Уравнение для определения конечной влажности

$$W = 0,022 - 0,00096 X_1 - 0,0012 X_3 - 0,0000875 X_4 + 0,00041 X_5. \quad (5)$$

Уравнение для определения прочности

$$\sigma = 0,2925 + 0,01 X_1 - 0,01 X_2 + 0,0175 X_3 + 0,05 X_5. \quad (6)$$

На рис. 2а представлена фотография гранул готового продукта, на рис. 2б приведены некоторые результаты сравнения экспериментальных

данных (точки) и расчетных значений (линии), полученных на основе предложенного регрессионного уравнения (2). Как видно, экспериментальные данные находятся в хорошем соответствии с расчетными (локальные расхождения между расчетами и результатами экспериментов составляют: для прочности – в пределах 5 %, для влажности – в пределах 7 %). Последнее позволяет перейти к рассмотрению вопросов использования результатов статистического моделирования для поиска рациональных технологических режимов получения гранул.

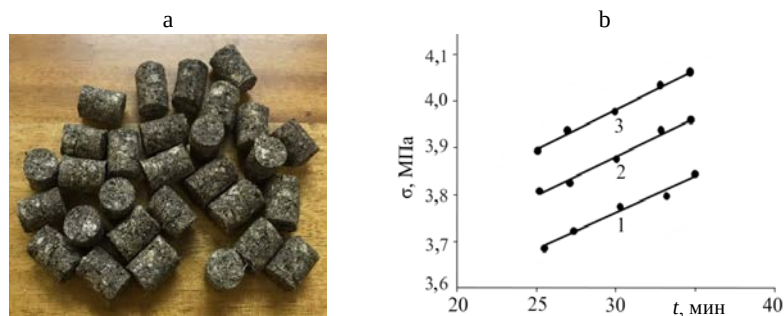


Рис. 2. Гранулы композитного топлива: а – фотография; б – графики прочности в зависимости от продолжительности сушки (точки – экспериментальные данные; линии – расчетные значения) при различных температурных режимах: 1 – 70 °C; 2 – 80; 3 – 90 °C

Fig. 2. Composite fuel pellets: а – photo; б – graphs of the strength of composite fuel pellets depending on the drying time (points – experimental data; lines – calculated forecasts) under different temperature conditions: 1 – 70 °C; 2 – 80; 3 – 90 °C

Результаты и обсуждение

Некоторые результаты статистического моделирования с использованием метода полного факторного эксперимента представлены в виде графического изображения поверхностей отклика (рис. 3–5). Эти рисунки позволяют дать характеристику влияния выбранных факторов на основные исследуемые параметры (прочность гранул σ и их конечную влажность W).

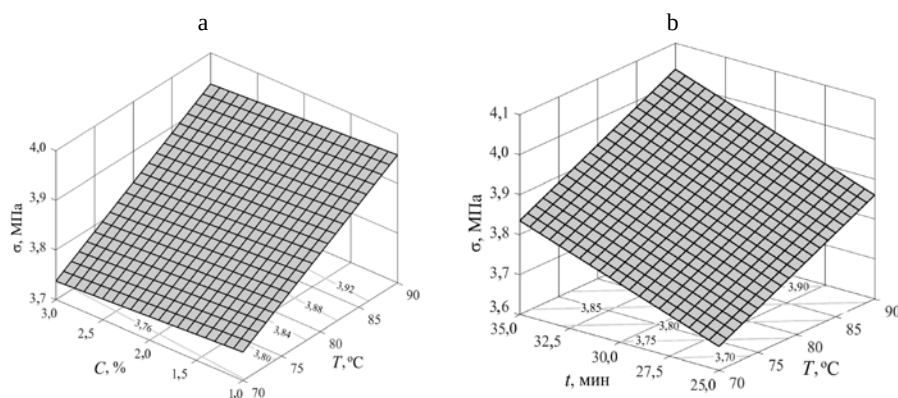


Рис. 3. Зависимость прочности гранул композитного топлива от: а – концентрации модификатора; б – времени сушки

Fig. 3. The dependence of the composite fuel granules strength on: а – the concentration of the modifier; б – the drying time

Из анализа рис. 3 видно, что прочность гранул возрастает с повышением концентрации модификатора и температуры воздуха под решеткой. Дальнейшее увеличение концентрации модификатора в готовом продукте экономически нецелесообразно, так как величина прочности гранул доведена до товарного значения ($\sigma > 4,0$ МПа); повышение температуры газового теплоносителя под решеткой выше $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ недопустимо, так как это может привести к возгоранию композитного топлива в аппарате.

Прочность гранул, согласно рис. 4, возрастает с увеличением расхода газового теплоносителя до $50\text{ м}^3/\text{ч}$ и продолжительности сушки до 35 мин. Расход газа в аппарате свыше $50\text{ м}^3/\text{ч}$ нецелесообразен, так как в этом случае происходит разрушение плотного слоя и переход его в состояние псевдооживления, когда влажные частицы формируемых гранул разрушаются и это ведет к снижению качества готового продукта.

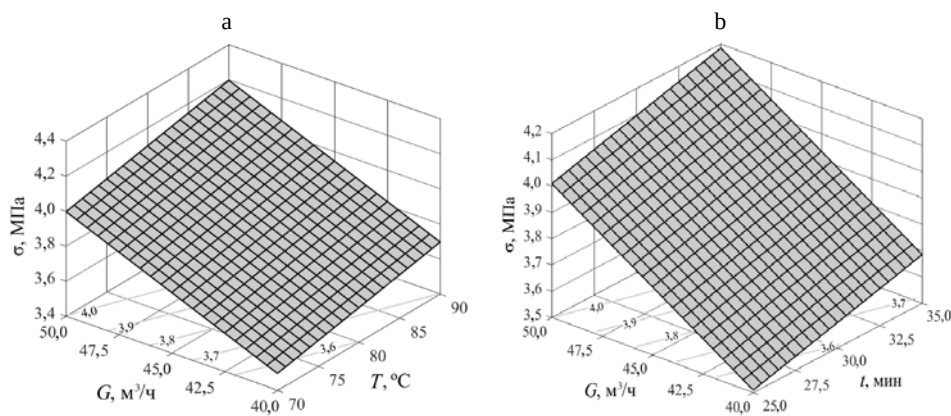


Рис. 4. Зависимость прочности гранул композитного топлива от расхода нагретого воздуха, подаваемого в сушильную камеру:
а – при различной температуре воздуха под решеткой; б – при изменении времени сушки
Fig. 4. The dependence of the composite fuel granules strength on the flow rate of heated air supplied to the drying chamber: а – at different air temperatures under the grate; б – when the drying time changes

Из результатов исследования, показанных на рис. 5, следует, что для выбранных интервалов варьирования независимых переменных уменьшение конечной влажности готового продукта наблюдается при увеличении времени сушки и снижении массы навески материала.

При статистической обработке расчетно-экспериментальных данных поиск экстремума обычно осуществляется с использованием градиентных методов [18–19], однако такой подход не приводит к разумной асимптотике в контексте настоящего исследования, так как полученные регрессионные зависимости (5), (6) имеют линейный характер. Иными словами, несмотря на достаточные прогностические возможности предложенных соотношений, их использование лимитируется переходом объекта в новое качественное состояние (например, наблюдается возгорание частиц и т. п.). Поэтому при анализе результатов экспериментальных исследований и статистического моделирования необходимо учитывать ограничения, обусловленные технико-экономическими параметрами получения готовых топливных гранул, отвечающих требованиям стандартов. В частности, как было отмечено ранее, принималось во внимание снижение качества гото-

вого продукта при переходе слоя в псевдоожиженное состояние (достижении скорости начала псевдоожижения), а также склонность топлива к подгоранию при форсировании теплового режима обработки.

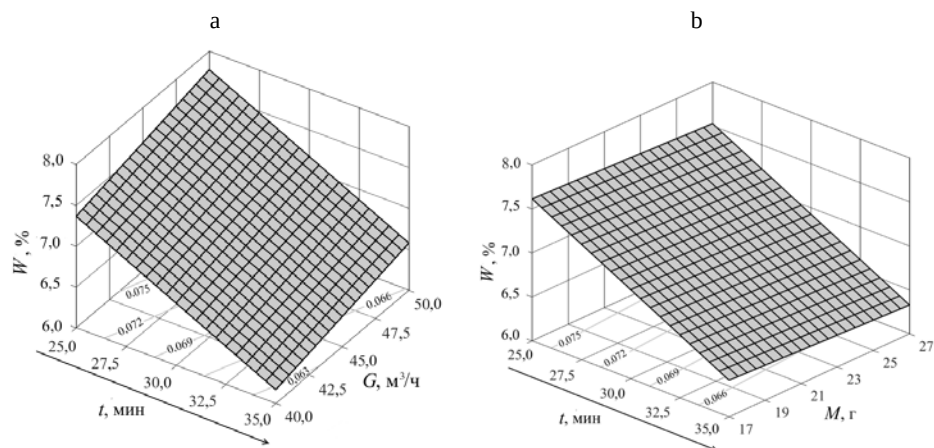


Рис. 5. Зависимость конечной влажности гранул композитного топлива от времени сушки: а – при различном расходе воздуха, подаваемого в сушилку; б – при различной массе слоя

Fig. 5. The dependence of the composite fuel pellets final moisture content on drying time: а – at different air flow rates supplied to the dryer; б – at different bed weights

В результате при осуществлении расчетно-экспериментальных исследований формирования гранулированного композитного топлива в настоящей работе определены следующие рациональные режимные параметры их получения: температура воздуха под решеткой $T = 84\text{ }^{\circ}\text{C}$; время сушки $t = 33\text{ мин}$; расход воздуха $G = 48\text{ м}^3/\text{ч}$.

ВЫВОДЫ

1. Выполнено поисковое исследование с целью обоснования технологических параметров формирования композитных топливных гранул, физико-механические свойства которых создают условия для обеспечения стабильной и эффективной работы систем автоматизации и механизации транспортировки гранул, а также технологических процессов котлоагрегатов. Задачи исследования решены при помощи статистического моделирования с применением метода полного факторного эксперимента для определения рациональных технологических параметров сушки гранулированного композитного топлива.

2. Предложены регрессионные зависимости для определения физико-механических свойств композитного топлива, обладающие высокой прогностической эффективностью для заданного компонентного состава топливных гранул. Представлены графические изображения поверхностей отклика, характеризующих влияние независимых переменных на прочность и конечную влажность готовых гранул. Получены рациональные технологические параметры формирования гранулированного композитного топлива заданного компонентного состава.

3. Полученные результаты могут рассматриваться в качестве конкретных указаний по организации процесса формирования гранул предложенного состава, а также как алгоритм действий при вовлечении в оборот новых видов топлив и создании режимных карт получения топливных гранул на их основе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Корсак, Е. П. Формирование системы угроз энергетической безопасности Республики Беларусь / Е. П. Корсак // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2019. Т. 62, № 4. С. 388–398. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-4-388-398>.
2. Фортов, В. Е. Состояние развития возобновляемых источников энергии в мире и в России / В. Е. Фортов, О. С. Попель // Теплоэнергетика. 2014. № 6. С. 4–13.
3. 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>.
4. Laitinen, S. Exposure to Biological and Chemical Agents at Biomass Power Plants / S. Laitinen [et al.] // Biomass Bioenergy. 2016. Vol. 93. P. 78–86. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2016.06.025>.
5. Thermal Processing of Biomass into High-Calorific Solid Composite Fuel / R. Tabakaev [et al.] // Journal of Analytical and Applied Pyrolysis. 2017. Vol. 124. P. 94–102. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2017.02.016>.
6. Исследование процесса термического разложения и горения торфяного топлива / П. А. Марьяндышев [и др.] // Химия твердого топлива. 2019. № 5. С. 33–38.
7. Solid Biofuels for Energy. A Lower Greenhouse Gas Alternative / ed. P. Grammelis // Springer-Verlag London Limited, 2011. 242 p. <https://doi.org/10.1007/978-1-84996-393-0>.
8. Михайлов, А. В. Угле-торфяные композиции для сжигания в котельных / А. В. Михайлов // Записки Горного института. 2016. Т. 220. С. 538–544.
9. Упрочняющие добавки для формованного древесного топлива / А. А. Макеев [и др.] // Труды БГТУ. Серия 2. 2018. № 2. С. 51–54.
10. Табакаев, Р. Б. Твердое композитное топливо из низкосортного сырья / Р. Б. Табакаев, А. В. Казаков, А. С. Заворин // Известия Томского политехнического университета. Техника и технологии в энергетике. 2014. Т. 325, № 4. С. 56–64.
11. Christoforou, E. Advances in Solid Biofuels / E. Christoforou, P. A. Fokaides // Springer Nature Switzerland AG, 2019. 130 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-00862-8>.
12. Томсон, А. Э. Торф и продукты его переработки / А. Э. Томсон, Г. В. Наумова. Минск: Беларус. навука, 2009. 328 с.
13. Наумович, В. М. Искусственная сушка торфа / В. М. Наумович. М.: Недра, 1984. 222 с.
14. The Influence of Raw Material Characteristics on the Industrial Pelletizing Process and Pellet Quality / M. Arshadi [et al.] // Fuel Processing Technology. 2008. Vol. 89, Iss. 12. P. 1442–1447. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2008.07.001>.
15. Experimental Verification of Novel Pellet Model Using a Single Pelleter Unit / J. K. Holm [et al.] // Energy and Fuels. 2007. Vol. 21, Iss. 4. P. 2446–2449. <https://doi.org/10.1021/EF070156L>.
16. Овчинников, Л. Н. Исследование процесса получения комплексных гранулированных органоминеральных удобрений пролонгированного действия на основе торфа / Л. Н. Овчинников // Известия высших учебных заведений. Серия: Химия и химическая технология. 2017. Т. 60, № 9. С. 100–104.
17. Application of the Theory of Markov Chains to Theoretical Study of Processes in a Circulating Fluidized Bed / A. Mitrofanov [et al.] // Particulate Science and Technology. 2017. Vol. 37, Iss. 8. P. 1028–1033. <https://doi.org/10.1080/02726351.2018.1525459>.
18. Ахназарова, С. Л. Оптимизация эксперимента в химии и химической технологии / С. Л. Ахназарова, В. В. Кафаров. М.: Высш. школа, 1978. 319 с.
19. Адлер, Ю. П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю. П. Адлер, Е. В. Маркова, Ю. В. Грановский. М.: Наука, 1976. 279 с.

Поступила 09.04.2022 Подписана в печать 14.06.2022 Опубликовано онлайн 31.01.2023

REFERENCES

1. Korsak E. P. (2019) Formation of the System of Threats to Energy Security of the Republic of Belarus. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 62 (4), 388–398. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-4-388-398> (in Russian).
2. Fortov V. E., Popel' O. S. (2014) The Current Status of the Development of Renewable Energy Sources Worldwide and in Russia. *Thermal Engineering*, 61 (6), 389–398. <https://doi.org/10.1134/S0040601514060020>.
3. Pekhota A. N., Filatov S. A. (2022) Investigation of Energy Properties of Briquetated Multi-component 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).
4. Laitinen S., Laitinen J., Fagernäs L., Korpiljärvi K., Korpinen L., Ojanen K., Aatamila M., Jumpponen M., Koponen H., Jokiniemi J. (2016) Exposure to Biological and Chemical Agents at Biomass Power Plants. *Biomass and Bioenergy*, 93, 78–86. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2016.06.025>.
5. Tabakaev R., Shanenkov I., Kazakov A., Zavorin A. (2017) Thermal Processing of Biomass into High-Calorific Solid Composite Fuel. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 124, 94–102. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2017.02.016>.
6. Maryandyshev P. A., Mukhreva I. I., Lyubov V. K., Schonnenbeck C., Trouve G., Brillard A., Brilhac J.-F. (2019) Thermal Decomposition and Combustion of Peat Fuel. *Solid Fuel Chemistry*, 53 (5), 283–288. <https://doi.org/10.3103/S0361521919050094>.
7. Grammelis P. (ed.) (2011) Solid Biofuels for Energy. A Lower Greenhouse Gas Alternative. London – Dordrecht – Heidelberg – New York, Springer-Verlag. 242. <https://doi.org/10.1007/978-1-84996-393-0>.
8. Mikhailov A. V. (2016) Coal-Peat Composition for Co-Combustion in Local Boilers. *Journal of Mining Institute*, 220, 538–544. <https://doi.org/10.18454/pmi.2016.4.538>.
9. Makeyenko A. A., Naumova G. V., Khmyzov I. A., Solov'yeva T. V. (2018) Strengthening Additives for Formatted Wood Fuel. *Trudy BGTU. Seriya 2: Khimicheskie Tekhnologii, Biotekhnologiya, Geoekologiya* [Proceedings of BSTU. Ser. 2], (2), 51–54 (in Russian).
10. Tabakaev R. B., Kazakov A. V., Zavorin A. S. (2014). Solid Composite Fuel from Low-Grade Raw (Technological Aspect). *Izvestiya Tomskogo Politehnicheskogo Universiteta. Tekhnika i Tekhnologii v Energetike = Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Engineering and Technology in the Energy Sector*, 325 (4), 56–64 (in Russian).
11. Christoforou E., Fokaides P. A. (2019) *Advances in Solid Biofuels*. Cham, Springer. 130. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-00862-8>.
12. Thomson A. E., Naumova G. V. (2009) *Peat and its Processed Products*. Minsk, Belaruskaya Navuka Publ. 328 (in Russian).
13. Naumovich V. M. (1984) *Artificial Drying of Peat*. Moscow, Nedra Publ. 222 (in Russian).
14. Arshadi M., Gref R., Geladi P., Dahlqvist S.-A., Lestander T. (2008) The Influence of Raw Material Characteristics on the Industrial Pelletizing Process and Pellet Quality. *Fuel Processing Technology*, 89 (12), 1442–1447. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2008.07.001>.
15. Holm J. K., Henriksen U. B., Wand K., Hustad J. E., Posselt D. (2007) Hustad and Dor the Posselt. Experimental Verification of Novel Pellet Model Using a Single Pelleter Unit. *Energy and Fuels*, 21 (4), 2446–2449. <https://doi.org/10.1021/EF070156L>.
16. Ovchinnikov L. N. (2017). Investigation of Process of Obtaining Complex Granulated Organo-Mineral Fertilizers of Prolonged Action Based on Peat. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Khimiya i Khimicheskaya Tekhnologiya = ChemChemTech*, 60 (9), 100–104 (in Russian).
17. Mitrofanov A., Mizonov V., Camelo A., Tannous K. (2019) Application of the Theory of Markov Chains to Theoretical Study of Processes in a Circulating Fluidized Bed. *Particulate Science and Technology*, 37 (8), 1032–1038. <https://doi.org/10.1080/02726351.2018.1525459>.
18. Akhnazarova S. L., Kafarov V. V. (1978) *Optimization of Experiment in Chemistry and Chemical Technology*. Moscow, Vysshaya Shkola Publ. 319 (in Russian).
19. Adler Yu. P., Markova E. V., Granovsky Yu. V. (1976) *Experiment Planning in the Search for Optimal Conditions*. Moscow, Nauka Publ. 279 (in Russian).