

## ОПТИМИЗАЦИЯ КОМПОЗИЦИОННОГО СОСТАВА ТОПЛИВНЫХ БРИКЕТОВ

Т. Н. Александрова<sup>1</sup>, Н. В. Николаева<sup>1</sup>, И. С. Артамонов<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, 199106, Россия;

<sup>2</sup> Высшая школа технологии и энергетики, Санкт-Петербургский государственный университет  
промышленных технологий и дизайна, Санкт-Петербург, 198095, Россия

**Аннотация:** Одним из возможных вариантов утилизации отходов угольной и энергетической промышленности, а также отходов лесозаготовок и деревопереработки может стать брикетирование для получения брикетов с повышенной теплотворностью. Целью работы являлось обоснование композиционного состава топливных брикетов на основании исследования структуры компонентов, в том числе и термогравиметрическими методами. В качестве объектов в данном исследовании были приняты отходы угольной и лесоперерабатывающей промышленности, технический гидролизный лигнин (ТГЛ). Для прогнозирования теплотворной способности топливных брикетов различного состава было проведено по три термических измерения с различными скоростями нагрева для каждого компонента. Термическое исследование проводилось в воздушной среде при скорости нагрева 5, 10, 20 °С/мин. Результаты исследований показали, что, в зависимости от состава брикета и фракционного состава его составляющих, энергия активации изменяется в пределах от 128,4 до 295 кДж/моль. Это может быть связано с добавкой механоактивированного гидролизного лигнина в качестве связующего за счет его термопластификации, что также оказывает положительное влияние и на саму структуру брикета. Таким образом, при взаимодействии компонентов брикета, объединенных в систему, происходит их синхронизация под воздействием как внешних, так и внутренних факторов и технологическое поведение каждого отдельного компонента приобретает согласованную направленность. Следовательно, целенаправленное изменение рецептуры и технологических параметров обеспечивает получение топливных брикетов требуемого качества.

**Ключевые слова:** брикетирование, топливные брикеты, отходы углеобогащения, биотопливо, механоактивация, рациональное природопользование, термогравиметрические исследования, технический гидролизный лигнин.

**Для цитирования:** Александрова Т. Н., Николаева Н. В., Артамонов И. С. Оптимизация композиционного состава топливных брикетов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – № 6–2. – С. 149–160. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2022\_62\_0\_149.

### Optimisation of fuel briquettes composition

T. N. Aleksandrova<sup>1</sup>, N. V. Nikolaeva<sup>1</sup>, I. S. Artamonov<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Saint Petersburg Mining University, St. Petersburg, 199106, Russia;

<sup>2</sup> Higher School of Technology and Energy, St. Petersburg State University of Industrial  
Technology and Design, St. Petersburg, 198095, Russia

**Abstract:** One of the possible options for the utilization of waste coal and energy industry, as well as waste wood logging and wood processing can be briquetting to obtain briquettes with increased calorific value. The aim of the work was to justify the composition of fuel briquettes on the basis of the study of the structure of components using thermogravimetric methods. The objects in this study were taken as waste coal and wood processing industry, technical hydrolysis lignin (THL). In order to predict the calorific value of fuel briquettes of different composition, three thermal measurements with different heating rates for each component were carried out. The thermal study was carried out in an air environment at heating rates of 5, 10, 20 °C/min. The results showed that, depending on the composition of the briquette and the fractional composition of its components, the activation energy varies in the range from 128.4 to 295 kJ/mol. This can be attributed to the addition of mechanically activated hydrolysis lignin as a binder through its thermoplasticization, which also has a positive effect on the briquette structure itself. Thus, during the interaction of the components of the briquette, combined into a system, their synchronisation occurs under the influence of both external and internal factors and the technological behaviour of each individual component acquires a coordinated direction. Consequently, a purposeful change in the formulation and technological parameters ensures the production of fuel briquettes of the required quality.

**Key words:** Briquetting, fuel briquettes, carbon wastes, biofuels, mechanoactivation, environmental management, thermogravimetric studies, technical hydrolysis lignin.

**For citation:** Aleksandrova T.N., Nikolaeva N.V., Artamonov I.S. Optimisation of fuel briquettes composition. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022;(6-2):149–160. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2022\_62\_0\_149.

---

## Введение

Одной из актуальных проблем в настоящее время является получение энергии и тепла из биотоплива, особенно это очевидно на фоне роста цен на уголь и нефть [1–5]. Производство биотоплива постоянно растет, но его доля в общем объеме потребления энергии составляет всего порядка 15%. Для получения биотоплива используют кукурузу, сахарный тростник и растительные масла, отходы лесопереработки, а также отходы угольной промышленности. Производство биотоплива набирает популярность по всему миру, но основные мощности сосредоточены в США, ЕС, Японии и др. [6]. Использование отходов сельского хозяйства, лесопереработки и угольных отходов в качестве топлива для производства электроэнергии, например брикетов, может стать альтернативным решением проблем, связанных с их утилизацией [7–10]. Брикеты, произведенные из лигноцеллюлозных отходов,

благодаря простому процессу их получения и низкой стоимости являются отличным источником дешевой энергии и экологически безопасны, во многих случаях идеально подходят для замены ископаемого топлива, используемого сегодня, со значительными экономическими и экологическими преимуществами. Углеродсодержащие отходы различного генезиса представляют собой перспективную возобновляемую энергию, которая может стать альтернативой использованию ископаемых ресурсов. Являясь третьим по величине первичным энергетическим ресурсом в мире после угля и нефти [11], они удовлетворяют большую часть потребности в энергии в большинстве развивающихся стран. Использование сырья из биомассы и угольных отходов для замещения ископаемого топлива имеет дополнительное значение с точки зрения изменения климата, поскольку потенциально могут быть нейтральными к CO<sub>2</sub>.

Производство биотоплива из углеродсодержащих отходов различного генезиса целесообразно осуществлять методами брикетирования [12–14]. Так, например, композитный брикет из опилок является хорошим источником возобновляемой энергии для приготовления пищи в домашних условиях [15], а смешивание биомассы и угля при производстве брикетов дает продукцию лучшего качества, например, с хорошими свойствами горения, по сравнению с использованием только угля или опилок [16–19]. При совместном брикетировании угольных и органических отходов возникает ряд проблем, для решения которых необходима разработка новых или корректировка известных аппаратов и технологий, учитывающих инфраструктурные особенности объекта, а также разработка новых композиционных составов топливных брикетов. Склонность угольных шламов к образованию пыли при транспортировке является важной темой для исследования, так как угольная пыль представляет собой одну из основных причин возникновения аварий на предприятиях, а также опасна с точки зрения воздействия на окружающую среду, что также подтверждает актуальность разработки компонентного состава для топливных брикетов [20–22]. Перспективным направлением интенсификации процесса брикетирования является механоактивация, которая направлена на изменение структуры и поверхностной энергии наполнителей брикета, что оказывает значительное влияние на прочностные и структурные характеристики топлива [23].

Целью работы являлось обоснование композиционного состава топливных брикетов на основании исследования структуры компонентов, в том числе и термогравиметрическими методами.

## **Материалы и методы исследования**

В данной работе объектами исследований были выбраны отходы угольной и лесоперерабатывающей промышленности, а также технический гидролизный лигнин (ТГЛ) (рис. 1).

Минеральная часть компонентов брикетов была изучена с использованием рентгенофлуоресцентного анализа (спектрометр EDX-8000 Shimadzu) и электронной микроскопии (Tabletop microscope 3000, Hitachi) (табл.1). Результаты исследования элементарного состава компонентов приведены в табл. 2.

Брикетирование проводилось на таблеточном прессе PP-25 с использованием специально изготовленных пресс-форм. Исследование структуры полученных брикетов проводилось методом компьютерной томографии (SKYSCAN 1172). Для механоактивации ТГЛ применяли высокоскоростную планетарную мельницу Emax. На анализаторе SDT Q-600 фирмы TA Instruments проводились термогравиметрические исследования. Обработка результатов экспериментально-теоретических исследований осуществлялась с использованием программных средств MS Excel, Statistica, Regressia.

## **Результаты и обсуждения**

Для выбора композиционного состава топливных многокомпонентных брикетов, которые состоят из ТГЛ, опилок и отходов угольной промышленности, была изучена возможность повышения теплотворной способности за счет механоактивации ТГЛ. Для оценки возможности активирования технического гидролизного лигнина было проведено по три термических измерения с различными скоростями нагрева для ТГЛ до и после механоактивации (рис. 2). Термическое исследование проводилось в воздушной среде



Рис. 1. Объекты исследования  
Fig. 1. Objects of study

Таблица 1  
Элементный состав сырья минеральной части  
Elemental composition of mineral raw materials

	Оксидные содержания, %												
	CaO	SiO <sub>2</sub>	K <sub>2</sub> O	MnO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	ZnO	Cl	CuO	SO <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Rb <sub>2</sub> O
Береза	36,84	26,33	18,18	8,85	4,62	2,57	1,84	0,78	—	—	—	—	—
Сосна	42,36	26,67	14,97	1,65	6,48	0,72	—	0,79	6,38	—	—	—	—
Лигнин	11,45	32,86	8,14	0,34	34,95	—	—	0,37	6,89	4,28	0,32	0,13	0,27
	Элементные содержания, %												
	Ca	Si	K	Mn	Fe	Zn	Cl	Cu	S	Ti	P	Cr	Rb
Береза	26,33	12,31	15,09	6,86	3,23	2,06	1,84	0,63	—	—	—	—	—
Сосна	30,27	12,47	12,43	1,28	4,53	0,58	—	0,63	2,55	—	—	—	—
Лигнин	8,17	15,36	6,75	0,26	24,45	—	—	0,29	2,71	2,57	0,36	0,07	0,24

Таблица 2  
Элементарный состав компонентов  
Elemental composition of components

	C, %	H, %	O, %
ТГЛ	62,5	5,5	32,0
Береза	48,6	6,4	45,0
Сосна	49,6	6,4	44,0

при скорости нагрева 5, 10, 20 °С/мин. Для обработки полученных экспериментальных данных использовалась Программа для расчета энергии механоактивации сырья интерпретацией термограмм [24]. Для каждой выбранной степени превращения программа находит температуру нагрева путем нахождения минимального отклонения заданной и рассчитанной степени пре-

вращения. Далее определяются параметры, необходимые для нахождения угловых коэффициентов, методом наименьших квадратов.

Результаты термогравиметрических исследований исходного и механоактивированного ТГЛ представлены на рис. 3 и 4.

Расчет поверхностной энергии активации исходного и механоактивирован-

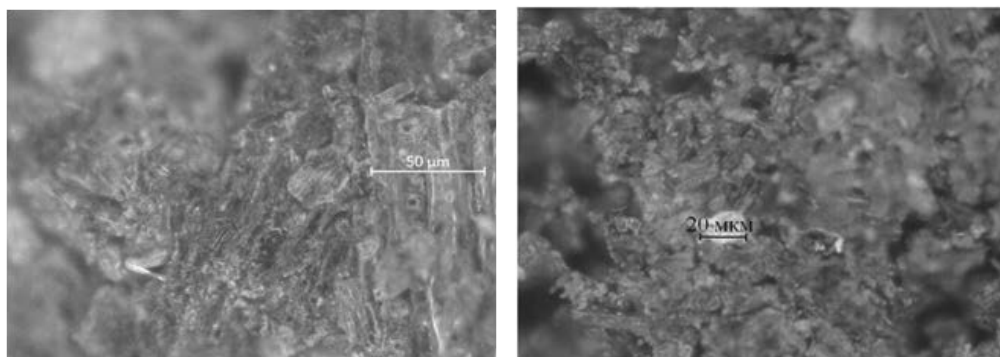


Рис. 2. Микрофотографии ТГЛ: справа — до механоактивации, слева — после механоактивации  
 Fig. 2. Microphotographs of THL: right — before mechanoactivation, left — after mechanoactivation

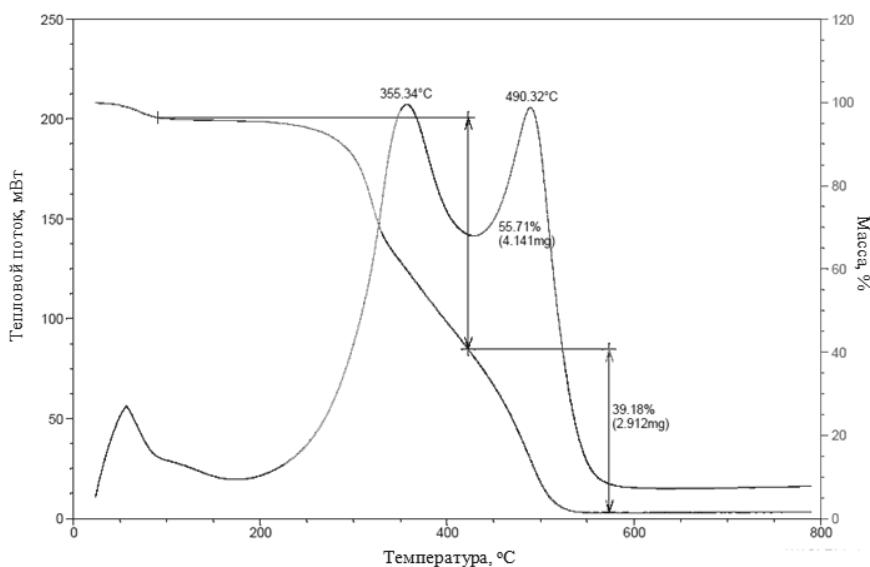


Рис. 3. Результаты ТГА И ДСК исходного ТГЛ в воздушной среде при скорости нагрева 10°С/мин  
 Fig. 3. TGA and DSC results of the original THL in air at a heating rate of 10°С/min.

ного ТГЛ проводился с использованием дифференциального метода Фридмана и метода Озавы–Флинна–Уолла [25–27]. Для ТГЛ до механоактивации получена точка максимального значения активации (169,89 кДж/моль) при степени превращения 0,58. Для ТГЛ после механоактивации наблюдается пик энергии активации (248 кДж/моль) при степени превращения – 0,98 (рис. 5).

Результаты исследований показали, что энергия активации ТГЛ увеличивается после механоактивации (среднее значение энергии активации составляет 141,2 кДж/моль и 178,17 кДж/моль для исходного и механоактивированного ТГЛ, соответственно).

Для исследования были сделаны многослойные топливные брикеты (уголь, опилки и ТГЛ) при разном соотношении компонентов: 1, 2, 3, 4 – с добавкой ТГЛ

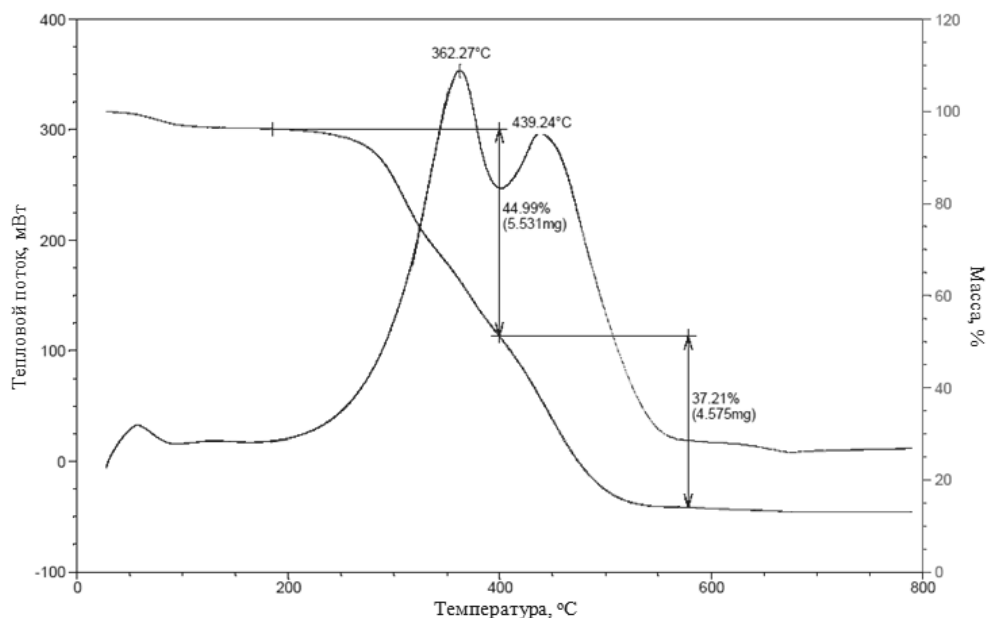


Рис. 4. Результаты ТГА и ДСК механоактивированного ТГЛ в воздушной среде при скорости нагрева 10 °С/мин

Fig. 4. TGA and DSC results of mechanically activated THL in air at a heating rate of 10 °C/min

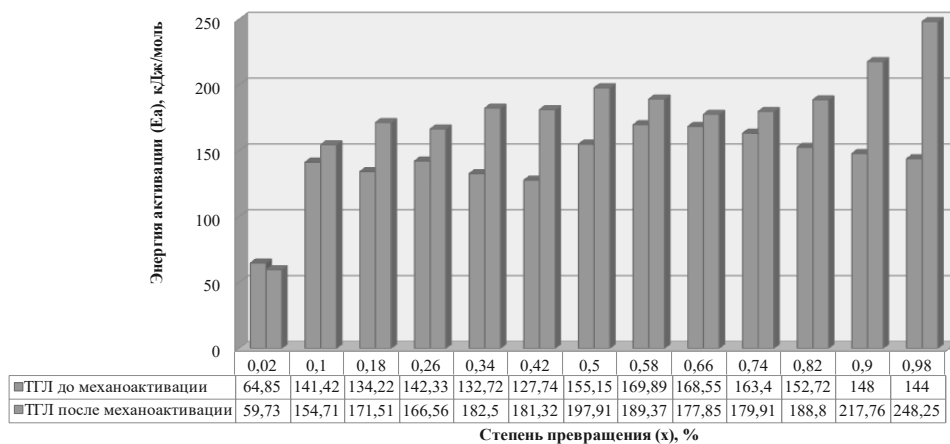


Рис. 5. Результаты расчета параметров кинетической модели термодеструкции для ТГЛ до и после механоактивации

Fig. 5. Calculation results of the parameters of the kinetic model of thermal degradation for THL before and after mechanoactivation

(10%, 15%, 5%, 0% соответственно). При исследовании теплотворной способности многослойных топливных

брикетов в зависимости от фракционного состава, структуры компонентов на основе интерпретации данных термо-

гравиметрических исследований были получены значения энергии топливного брикета в зависимости от процентного соотношения компонентов. Результаты исследований показали, что, в зависимости от состава брикета и фракционного состава его составляющих, энергия активации изменяется в пределах от 128,4 до 295 кДж/моль. Для характеристики и анализа морфометрических параметров, отражающих структурно-текстурные особенности брикета, были проведены следующие виды анализов: микротомография и электронная микроскопия (рис. 6 и 7).

Результаты исследования этих параметров представлены в табл. 3.

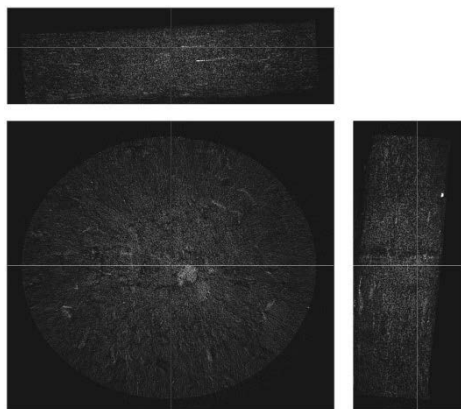


Рис. 6. Структура брикета с ТГЛ  
Fig. 6. Structure of the briquette with THL

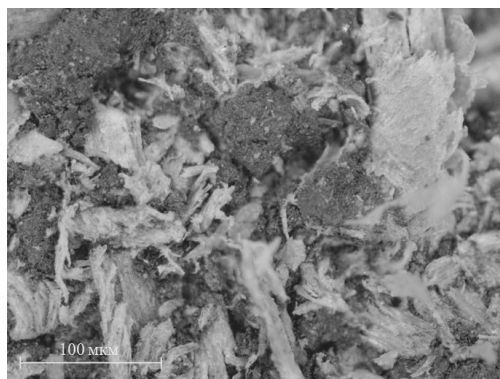


Рис. 7. Микрофотография брикета с ТГЛ  
Fig. 7. Microphotograph of a briquette with THL

Анализ результатов, полученных с использованием микротомографа, показал, что в зависимости от состава компонентов брикета пористость (как закрытая, так и открытая) значительно меняется. При интерпретации прочностных характеристик необходимо учитывать фактор пористости в связи с его определяющим значением [28, 29]. При анализе характеристик порового пространства брикетов было выявлено, что многокомпонентные брикеты обладают более низкой пористостью по сравнению с монобрикетом, что говорит о высокой прочности образца и подтверждает перспективность изготовления многокомпонентных топливных брикетов.

### Заключение

Для определения направления совершенствования технологий получения многокомпонентных топливных брикетов при варьировании компонентного состава необходимо знать особенности термического разложения как целого брикета, так и его составляющих. Кроме того, производство многокомпонентных топливных брикетов позволяет утилизировать углеродсодержащие отходы различного генезиса с одновременным снижением выбросов  $\text{CO}_2$ .

В результате проведения исследований было установлено, что прогнозировать получение из углеродсодержащих отходов различного генезиса многослойных топливных брикетов требуемого качества можно на основании вариации композиционного состава и технологических параметров брикетирования. Результаты исследований показали, что, в зависимости от состава брикета и фракционного состава его составляющих, энергия активации изменяется в пределах от 128,4 до 295 кДж/моль. Это может быть свя-

Таблица 3

**Анализ морфометрических показателей брикетов, полученных методами рентгеновской микротомографии**

**Analysis of morphometric indices of briquettes obtained by X-ray microtomography methods**

Параметр	Размерность	4 Монобрикет из опилок	2 Брикет с ТГЛ
Объем закрытых пор	мм <sup>3</sup>	2,64	0,29
Поверхность закрытых пор	мм <sup>2</sup>	515,22	3,05
Закрытая пористость	%	0,43	0,25
Объем открытых пор	мм <sup>3</sup>	389,63	196,86
Открытая пористость	%	60,62	8,49
Общий объем порового пространства	мм <sup>3</sup>	392,27	196,87
Общая пористость	%	61,05	8,74

зано с добавкой механоактивированного гидролизного лигнина в качестве связующего за счет его термопластификации, что также оказывает положительное влияние и на саму структуру брикета. Таким образом, при взаимодействии компонентов брикета, объединенных в систему, происходит их синхронизация под воздействием как внешних, так и внутренних факторов, и технологическое поведение каждого отдельного компонента приобретает согласованную направленность. Следовательно, целенаправленное изменение рецептуры и технологических параме-

тров обеспечивает получение топливных брикетов требуемого качества.

#### **Вклад авторов**

*Александрова Т. Н.* — разработка концепции исследования, постановка цели и задач исследования;

*Николаева Н. В.* — интерпретация полученных результатов и написание текста статьи;

*Артамонов И. С.* — проведение экспериментальных исследований по брикетированию и исследованию свойств брикетов.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

#### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Литвиненко В. С., Цветков П. С., Двойников М. В., Буслаев Г. В. Барьеры реализации водородных инициатив в контексте устойчивого развития глобальной энергетики // Записки Горного института. — 2020. — Т. 244. — С. 428–438. DOI: 10.31897/pmi.2020.4.5.
2. Litvinenko V.S. Digital economy as a factor in the technological development of the mineral sector // Natural Resources Research. — 2020. — vol. 29, no. 3, pp. 1521–1541. DOI: 10.1007/s11053-019-09568-4.
3. Nikulin A., Epifancev K. Selecting sustainable energetic & design parameters of a screw extruder for biofuel production // Ecology, Environment and Conservation. 2017, vol. 23, no. 2, pp.1037–1042.
4. Marinina O., Nevskaya M., Jonck-Kowalska I., Wolniak R., Marinin M. Recycling of coal fly ash as an example of an efficient circular economy: A stakeholder approach // Energies. 2021, vol. 14, no. 12, 3597. DOI: 10.3390/en14123597.
5. Que C. T., Nevskaya M., Marinina O. Coal mines in Vietnam: Geological conditions and their influence on production sustainability indicators. Sustainability (Switzerland). 2021, vol. 13, no. 21, 11800. DOI 10.3390/su132111800.



6. Хоруженко Е. С., Дорогов В. К. Развитие рынка биотоплива в мире // Инновационная экономика: материалы IV Междунар. науч. конф. (г. Казань, октябрь 2017 г.). – Казань: Бук, 2017. – С. 27–31.

7. Бажин В. Ю., Кусков В. Б., Кускова Я. В. Проблемы использования невостробованных угольных и других углеродсодержащих материалов в качестве энергетических брикетов // Уголь. – 2019. – № 4. – С. 50–54. DOI: 10.18796/0041-5790-2019-4-50-54.

8. Рассказова А. В. Обоснование рациональных параметров брикетирования бурого угля с применением механоактивации топливных компонентов. Автореферат дис... канд. техн. наук. – Чита: Забайк. гос. ун-т, 2015. – 22 с.

9. Александрова Т. Н., Кусков В. Б., Афанасова А. В., Кузнецов В. В. Совершенствование технологии флотационного обогащения тонких классов коксующихся углей // Обогащение руд. – 2021. – № 3. – С. 9–13. DOI: 10.17580/or.2021.03.02.

10. Соловьев Т. М., Буренина О. Н., Заровняев Б. Н., Николаева Л. А. Влияние температуры на адгезионную способность компонентов древесины и бурого угля при брикетировании // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2021. – № 11. – С. 109–122. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2021\_11\_0\_109.

11. Anca-Couce A. Reaction mechanisms and multi-scale modelling of lignocellulosic biomass pyrolysis // Progress in Energy and Combustion Science. 2016, no. 53, pp. 41–79. DOI:10.1016/j.peccs.2015.10.002.

12. Altun N. E., Hicyilmaz C., Bagci A. S. Combustion characteristics of coal briquettes. 1. Thermal features // Energy Fuels. 2013, vol. 17 (5), pp. 1266–1276.

13. Diez M. A., Alvarez R., Cimadevilla J. L. G. Briquetting of carbon-containing wastes from steelmaking for metallurgical coke production // Fuel. 2013, vol. 114, pp. 216–223.

14. Buravchuk N. I., Guryanova O. V. Technology for the joint briquetting of waste coal and sawdust // Solid Fuel Chemistry. 2018, vol. 52, no. 5, pp. 308–312.

15. Olawole A. K., Adegoke C. O. Comparative performance of composite sawdust briquette with kerosene fuel under domestic cooking condition // Australian Journal of Science and Technology. 2008, vol. 12, no. 1, pp. 57–61.

16. Moghtaderi B., Meesri C., Wall T. F. Pyrolytic characteristics of blended coal and woody biomass // Fuel. 2004, vol. 83, no. 6, pp. 745–750. DOI:10.1016/j.fuel.2003.05.003.

17. Onuegbu T. U., Ekpunobi U. E., Ogbu I. M., Ekeoma M. O., Obumselu F. O. Comparative studies of ignition time and water boiling test of coal and biomass briquettes blend // International Journal of Applied Science – Research and Review. 2011, vol. 7, no. 2, pp. 153–159.

18. Onuegbu T. U., Ogbu I. K., Ilochi N. O., Ekpunobi U. E., Ogbuagu A. S. Enhancing the properties of coal briquette using spear grass (*imperata cylindrica*) // Leonardo Journal Science. 2010, no. 17, pp. 47–58.

19. Pavlova U. M., Romashev A. O., Aleksandrova T. N. Researchment of carbonaceous ores dressability with the use of directional exposure // International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM. 2018, vol. 18, no 1.4, pp. 147–154. DOI: 10.5593/sgem2018/1.4/S04.020.

20. Мурко В. И., Баранова М. П. Обоснование инновационных направлений использования продуктов обогащения угля // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – № 6. – С. 131–141. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2022\_6\_0\_131.

21. Ким С. В., Богоявленская О. А., Кударинов С. Х., Орлов А. С., Орлова В. В. Перспективы получения брикетированного бездымного топлива из углей открытой добычи месторождений Казахстана // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2020. – № 9. – С. 147–158. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-3-0-87-95.

22. Гусева А. М., Яблонев А. Л. Оценка рациональных режимов производства кускового торфа фрезформовочной машиной по показателям плотности и прочности // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2020. – № 3. – С. 87–95. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-1-0-89-98.

23. Александров А. В., Афанасова А. В., Руденко А. П. Исследование механоактивации технического гидролизного лигнина как компонента топливного брикета // Химия растительного сырья. — 2020. — № 1. — С. 355–363. DOI: 10.14258/jcprm.2020016678.
24. Александрова Т. Н., Афанасова А. В., Иванов Е. А. Программа для расчета энергии механоактивации сырья интерпретацией термограмм. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2019666779, 13.12.2019. Заявка № 2019665530 от 29.11.2019. Бюллетень программ для ЭВМ №12.
25. Alexandrova T. N., Afanasova A. V., Heide G., Knoblich A. Investigation of the carbonaceous component of gold-bearing ores by means of thermal analysis // Paper presented at the Innovation-Based Development of the Mineral Resources Sector: Challenges and Prospects — 11th Conference of the Russian-German Raw Materials. 2018, pp. 459–466.
26. Александрова Т. Н., Хайдэ Г., Афанасова А. В. Оценка упорности золотосодержащих руд на основе интерпретации данных термического анализа // Записки Горного института. — 2019. — Т. 235. — С. 30–37. DOI: 10.31897/PMI.2019.1.30.
27. Кондрашева Н. К., Байталов Ф. Д., Бойцова А. А. Сравнительная оценка структурно-механических свойств тяжелых нефтей тимано-печорской провинции // Записки Горного института. — 2017. — Т. 225. — С. 320–329. DOI: 10.18454/pmi.2017.3.320.
28. Родионов В. А., Турсенев С. А., Скрипник И. Л., Ксенофонтов Ю. Г. Результаты исследования кинетических параметров самовозгорания каменноугольной пыли // Записки Горного института. — 2020. — Т. 246. — С. 617–622. DOI: 10.31897/PMI.2020.6.3.
29. Saltykova S. N., Nazarenko M. Y. Influence of technological factors on coal microhardness // — 2019, vol. 330, no. 11, pp. 172–178. DOI: 10.18799/24131830/2019/11/2363. **PLAS**

## REFERENCES

1. Kozlov A. V., Teslya A. B., Zhang S. Principles of assessment and methodology for managing the innovation potential of coal industry enterprises. *Journal of Mining Institute*. 2017, vol. 223, pp. 131–138. [In Russ]. DOI: 10.18454/pmi.2017.1.131.
2. Litvinenko V. S. Digital economy as a factor in the technological development of the mineral sector. *Natural Resources Research*. — 2020. — vol. 29, no. 3, pp. 1521–1541. DOI: 10.1007/s11053-019-09568-4.
3. Nikulin A., Epifancev K. Selecting sustainable energetic & design parameters of a screw extruder for biofuel production. *Ecology, Environment and Conservation*. 2017, vol. 23, no. 2, pp.1037–1042.
4. Marinina O., Nevskaya M., Jonek-Kowalska I., Wolniak R., Marinin M. Recycling of coal fly ash as an example of an efficient circular economy: A stakeholder approach. *Energies*. 2021, vol. 14, no. 12. DOI: 10.3390/en14123597.
5. Que C. T., Nevskaya M., Marinina O. Coal mines in Vietnam: Geological conditions and their influence on production sustainability indicators. *Sustainability (Switzerland)*. 2021, vol. 13, no. 21, 11800. DOI: 10.3390/su132111800.
6. Horuzhenko E. C., Dorogov V. K. Development of biofuel market in the world. *Innovative Economy: Proceedings of IV International Scientific Conference. (Kazan, October 2017)*. Kazan: Book, 2017. pp. 27–31. [In Russ].
7. Bazhin V. Y., Kuskov V. B., Kuskova Y. V. Problems of using unclaimed coal and other carbon-containing materials as energy briquettes. *Ugol*. 2019, no. 4, pp. 50–54. DOI: 10.18796/0041-5790-2019-4-50-54. [In Russ].
8. Rasskazova A. V. Justification of rational parameters of lignite briquetting using mechanoactivation of fuel components. Ph.D. thesis. *Transbaik. state university. Chita*. 2015, 22 p. [In Russ].
9. Aleksandrova T. N., Kuskov V. B., Afanasova A. V., Kuznetsov, V. V. (2021). Improvement of the fine coking coal flotation technology. *Obogashchenie Rud*. 2021, no. 3, pp. 9–13. [In Russ]. DOI:10.17580/or.2021.03.02.

10. Soloviev T. M., Burenina O. N., Zarovnyaev B. N., Nikolaeva L. A. Effect of temperature on the adhesion capacity of wood and lignite components during briquetting. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021, no. 11, pp. 109–122. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2021\_11\_0\_109.
11. Anca-Couce A. Reaction mechanisms and multi-scale modelling of lignocellulosic biomass pyrolysis. *Progress in Energy and Combustion Science.* 2016, no. 53, pp. 41–79. DOI: 10.1016/j.peccs.2015.10.002.
12. Altun N. E., Hicyilmaz C., Bagci A. S. Combustion characteristics of coal briquettes. 1. Thermal features. *Energy Fuels.* 2013, vol. 17 (5), pp. 1266–1276.
13. Diez M. A., Alvarez R., Cimadevilla J. L. G. Briquetting of carbon-containing wastes from steelmaking for metallurgical coke production. *Fuel.* 2013, vol. 114, pp. 216–223.
14. Buravchuk N. I., Guryanova O. V. Technology for the joint briquetting of waste coal and sawdust. *Solid Fuel Chemistry.* 2018, vol. 52, no. 5, pp. 308–312.
15. Olawole A. K., Adegoke C. O. Comparative performance of composite sawdust briquette with kerosene fuel under domestic cooking condition. *Australian Journal of Science and Technology.* 2008, vol. 12, no. 1, pp. 57–61.
16. Moghtaderi B., Meesri C., Wall T. F. Pyrolytic characteristics of blended coal and woody biomass. *Fuel.* 2004, vol. 83, no. 6, pp. 745–750. DOI: 10.1016/j.fuel.2003.05.003.
17. Onuegbu T. U., Ekpunobi U. E., Ogbu I. M., Ekeoma M. O., Obumselu F. O. Comparative studies of ignition time and water boiling test of coal and biomass briquettes blend. *International Journal of Applied Science – Research and Review.* 2011, vol. 7, no. 2, pp. 153–159.
18. Onuegbu T. U., Ogbu I. K., Ilochi N. O., Ekpunobi U. E., Ogbuagu A. S. Enhancing the properties of coal briquette using spear grass (*imperata cylindrica*). *Leonardo Journal Science.* 2010, no. 17, pp. 47–58.
19. Pavlova U. M., Romashev A. O., Aleksandrova T. N. Researchment of carbonaceous ores dressability with the use of directional exposure. *International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM.* 2018, vol. 18, no. 1.4, pp. 147–154. DOI: 10.5593/sgem2018/1.4/S04.020.
20. Murko V. I., Baranova M. P. Justification of innovative directions of use of coal preparation products. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022, no. 6, pp. 131–141. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2022\_6\_0\_131.
21. Kim S. V., Bogoyavlenskaya O. A., Kudarinov S. Kh., Orlov A. S., Orlova V. V. Prospects for obtaining briquetted smokeless fuel from coals of open-pit fields in Kazakhstan. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020, no. 9, pp. 147–158. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-3-0-87-95.
22. Guseva A. M., Yablonev A. L. Evaluation of rational modes of production of lumpy peat by a milling machine according to the indicators of density and strength. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020, no. 3, pp. 87–95. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-1-0-89-98.
23. Aleksandrov A. V., Afanasova A. V., Rudenko A. P. Analysis of mechanoactivation results of technical hydrolysis lignin using methods of thermographic studies and laser diffraction. *Coniferous Boreal Zone.* 2018, vol. 36, no. 2, pp. 205–210. [In Russ]. DOI: 10.14258/jcprm.2020016678.
24. Aleksandrova T. N., Afanasova A. V., Ivanov E. A. Software for calculation of raw material mechanoactivation energy by thermogram interpretation. Registration certificate for computer program RU 2019666779, 13.12.2019. Application number 2019665530 dated 29.11.2019. Bulletin of Programmes for EMV №12. [In Russ].
25. Alexandrova T. N., Afanasova A. V., Heide G., Knoblich A. Investigation of the carbonaceous component of gold-bearing ores by means of thermal analysis. *Paper presented at the Innovation-Based Development of the Mineral Resources Sector: Challenges and Prospects – 11th Conference of the Russian-German Raw Materials.* 2018, pp. 459–466.

26. Aleksandrova T. N., Heide G., Afanasova A. V. Assessment of refractory gold-bearing ores based of interpretation of thermal analysis data. *Journal of Mining Institute*. 2019, vol. 235, pp. 30–37. DOI: 10.31897/PMI.2019.1.30.

27. Kondrasheva N. K., Baitalov F. D., Boitsova A. A. Comparative assessment of structural and mechanical properties of heavy oils of Timan-Pechora province. *Journal of Mining Institute*. 2017, vol. 225, pp. 320–329. DOI: 10.18454/pmi.2017.3.320.

28. Rodionov V. A., Tursenev S. A., Skripnik I. L., Ksenofontov Yu. G. Results of the study of kinetic parameters of selfignition of coal dust. *Journal of Mining Institute*. 2020, vol. 246, pp. 617–622. DOI: 10.31897/PMI.2020.6.3.

29. Saltykova S. N., Nazarenko M. Y. Influence of technological factors on coal microhardness. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University, Geo Assets Engineering*. 2019, vol. 330, no. 11, pp. 172–178. DOI: 10.18799/24131830/2019/11/2363.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

*Александрова Татьяна Николаевна* — докт. техн. наук, профессор, заведующая кафедрой обогащения полезных ископаемых, <http://orcid.org/0000-0002-3069-0001>, Санкт-Петербургский горный университет, 199106, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия д.2, Россия, e-mail: [Aleksandrova\\_tn@pers.spmi.ru](mailto:Aleksandrova_tn@pers.spmi.ru);

*Николаева Надежда Валерьевна* — канд. техн. наук, доцент кафедры обогащения полезных ископаемых, <https://orcid.org/0000-0001-7492-1847>, Санкт-Петербургский горный университет, 199106, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия д.2, Россия, e-mail: [Nikolaeva\\_nv@pers.spmi.ru](mailto:Nikolaeva_nv@pers.spmi.ru);

*Артамонов Иван Сергеевич* — аспирант кафедры машин автоматизированных систем, Высшая школа технологии и энергетики, Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна, Санкт-Петербург, 198095, Россия e-mail: [peet.777@mail.ru](mailto:peet.777@mail.ru).

**Для контактов:** *Николаева Надежда Валерьевна*, e-mail: [Nikolaeva\\_nv@pers.spmi.ru](mailto:Nikolaeva_nv@pers.spmi.ru).

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*Aleksandrova T. N.*, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of minerals processing department, <http://orcid.org/0000-0002-3069-0001>, Saint Petersburg Mining University, 199106, St. Petersburg, Vasilievsky Island, 21 line 2, Russia, e-mail: [Aleksandrova\\_tn@pers.spmi.ru](mailto:Aleksandrova_tn@pers.spmi.ru);

*Nikolaeva N. V.*, Cand. Sci. (Eng.), teaching assistant of minerals processing department, <https://orcid.org/0000-0001-7492-1847>, Saint Petersburg Mining University, 199106, St. Petersburg, Vasilievsky Island, 21 line 2, Russia, e-mail: [Nikolaeva\\_nv@pers.spmi.ru](mailto:Nikolaeva_nv@pers.spmi.ru);

*Artamonov I. S.*, PhD student, Saint-Petersburg State University Industrial Technology and Design, St. Petersburg, 198095, Russia, e-mail: [peet.777@mail.ru](mailto:peet.777@mail.ru).

**Corresponding author:** *Nikolaeva Nadezhda Valerievna*, e-mail: [Nikolaeva\\_nv@pers.spmi.ru](mailto:Nikolaeva_nv@pers.spmi.ru).

Получена редакцией 14.01.2022; получена после рецензии 07.04.2022; принята к печати 10.05.2022.

Received by the editors 14.01.2022; received after the review 07.04.2022; accepted for printing 10.05.2022.

