

ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ТОПЛИВА И ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ВЕЩЕСТВ

DOI: 10.26730/1999-4125-2021-4-21-28

УДК 662.7

**ВЛИЯНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ СОСТАВА ИСХОДНОЙ СЫРЬЕВОЙ СМЕСИ НА
СВОЙСТВА ПОЛУЧАЕМОГО ГРАНУЛИРОВАННОГО ТВЕРДОГО ТОПЛИВА**

**INFLUENCE OF CHANGE IN THE INITIAL RAW MATERIAL COMPOSITION
ON THE PROPERTIES OF THE RESULTING GRANULAR SOLID FUEL**

Ушаков Андрей Геннадьевич,
доцент, e-mail: uag.httt@kuzstu.ru
Andrey G. Ushakov, C. Sc. in Engineering, Associate Professor
Ушакова Елена Сергеевна,
доцент, e-mail: ushakovaes@kuzstu.ru
Elena S. Ushakova, C. Sc. in Engineering, Associate Professor
Боголюбова Ирина Владимировна,
аспирант, e-mail: irina15151@mail.ru
Irina V. Bogolubova, postgraduate student

Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, 650000, Россия,
г. Кемерово, ул. Весенняя, 28
T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, 28 Vesennyaya Street, Kemerovo, 650000,
Russian Federation

Аннотация:

В работе сделан акцент на вопросе изменения свойств получаемого продукта – твердотопливных гранул – в зависимости от процентного соотношения исходных сырьевых компонентов, входящих в смесь, формуемую методом окатывания. Отмечено, что использование органических отходов в качестве связующего вещества и угольных отходов в качестве наполнителя смеси делает необходимым тщательное управление процессами смешения и формования ввиду неоднородности отходов и значительного варьирования их физико-химических свойств. По результатам проведенных анализов предложено математическое описание влияния изменения состава исходной сырьевой смеси на выход летучих веществ получаемого твердого топлива.

Ключевые слова: твердое топливо, технический анализ, выход летучих веществ, угольные отходы, органические отходы, окатывание, математическая обработка.

Информация о статье: поступило в редакцию 01.06.2021

Abstract:

The article deals with the issue of changing the properties of the resulting product – solid fuel pellets – depending on the percentage of raw material components included in the mixture formed by the granulation method. It is noted that the use of organic waste as a binder and coal waste as a mixture filler makes it necessary to carefully manage the mixing and molding processes due to the heterogeneity of the waste and the significant change in their physical and chemical properties. Based on the results of the conducted analyses, a mathematical description of the effect of changes in the composition of the initial raw mixture on the yield of volatiles of the resulting solid fuel is proposed.

Keywords: solid fuel, technical analysis, volatile matter yield, coal waste, organic waste, pelletizing, mathematical processing.

Article info: received June 01, 2021

Статистика показывает, что за период 2015-2020 гг. объемы использования угля возросли более чем на 30%. Очевидно, что такие темпы неизбежно приводят к росту числа отходов и некондиционных продуктов, образующихся в технологическом процессе добычи и обогащения сырья [1-4].

На сегодняшний день перспективным являются технологические подходы, которые рассматривают все некондиционные продукты, полупродукты и отходы как вторичные сырьевые ресурсы, способные повысить рентабельность производства за счет внедрения наилучших доступных технологий [5-8].

Необходимость сочетания целей охраны окружающей среды в промышленной деятельности, поиска подходящих технических возможностей и экономического обоснования с целью получения положительного эффекта приводит к расширению технологических подходов, предлагаемых для решения вышеобозначенных проблем, например [9-12]:

- использование угольных отходов в строительстве;
- выделение редкоземельных элементов;
- сжигание непосредственно высокочемического топлива;
- получение гранулированного и брикетированного топлива;
- термохимическая переработка с получением газообразного топлива.

Сочетание нескольких подходов может повысить эффективность переработки и позволит достичь синергетического эффекта [13].

За последние годы все активнее идет речь о необходимости замены классических технологий сжигания угля более экологически чистыми. Именно пиролиз и газификация рассматриваются как альтернативные решения по превращению твердого топлива в энергию. Перевод топлива в газообразную форму и последующее сжигание газа позволяет получать более высокую теплоту сгорания энергоносителя и значительно меньший ущерб окружающей природной среде [14, 15].

В широком смысле процессы газификации и пиролиза заключаются в деструктивном превращении (термическом разложении) органических соединений в углеводороды с меньшей молекулярной массой при воздействии высокой температуры, ограниченном доступе кислорода и присутствии водяного пара (газификация) или полностью отсутствующем доступе кислорода (пиролиз). Конечный результат зависит от выбранного направления проведения процесса и созданных условий в реакторе.

Для прогнозирования объема выделяющегося газа при термической переработке твердого топлива может быть использован показатель – выход летучих веществ, определяемый в рамках технического анализа. Данный показатель является важной характеристикой твердого топлива, поскольку с ним связан целый ряд свойств горючего, которые определяют пригодность для тех или иных целей и прежде всего пригодность топлива для термохимической переработки.

Формование исходной смеси методов окатывания предполагает создание исходной смеси органического связующего и наполнителя в виде угольных отходов различных фракций. Очевидным является необходимость изучения влияния процентного соотношения компонентов на выход летучих веществ. Помимо этого, важно определить граничные условия содержания связующего вещества, при которых возможно формование гранулы достаточного фракционного размера и прочности для дальнейшей транспортировки и использования.

Таким образом, целью работы является определение состава угольных и органических отходов для получения высококалорийного газа методом газификации на основе углеродсодержащих отходов промышленных предприятий, в частности отходов угледобычи и переработки угля.

Для достижения данной цели были поставлены следующие задачи:

- провести технический анализ исходных угольных и органических отходов, применяемых в качестве наполнителя и связующего вещества соответственно;
- определить оптимальное соотношение угольные отходы / связующее для получения гранул заданного фракционного состава;
- изучить влияние процентного соотношения наполнитель/связующее на выход летучих веществ получаемых топливных гранул.

Таблица 1. Технический анализ исходного сырья для получения топливных гранул
 Table 1. Technical analysis of feedstock for fuel pellets production

Наименование отхода	W ^a , %	A ^a , %	V ^{daf} , %
Угольный шлам	2,13±0,02	42±0,3	13,5±0,3
Коксовая пыль УСТК	0,4±0,01	35,2±0,1	15,7±0,1
Коксовая мелочь	0,9±0,01	31,21±0,1	15,4±0,1
Обезвоженный избыточный активный ил	75-80±0,7	25,41±0,1	10,4±0,1

Таблица 2. Основные характеристики барабанного гранулятора, выбранные для проведения процесса окатывания смеси

Table 2. Initial data for calculating material flows at the stage of producing gaseous fuel (synthesis gas)

Скорость вращения, об/мин	Материал	Время вращения, мин	Температура, °С	Угол наклона, градусы
50±2	Нержавеющая сталь	30-60	25-50	2-5

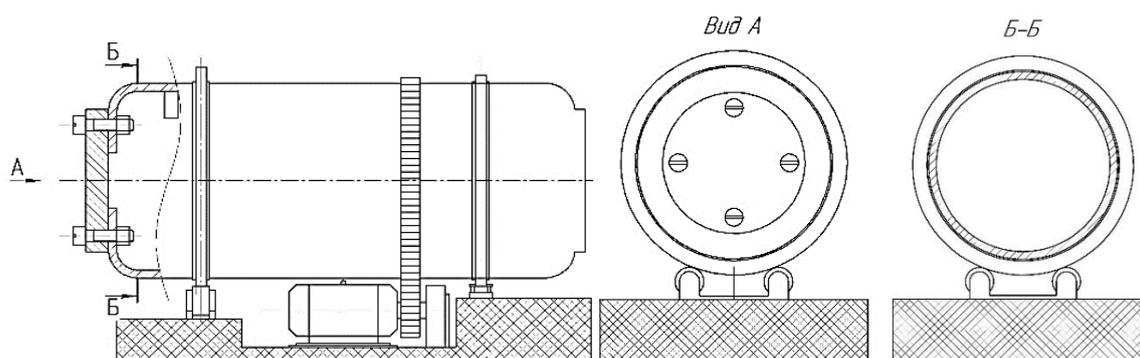


Рис. 1 Барабанный гранулятор
 Fig. 1. Drum granulator



Рис. 2 Влияние содержания связующего вещества на выход топливных гранул фракции 25-35 мм
 Fig. 2. Effect of the binder content on the yield of fuel pellets of the 25-35 mm fraction

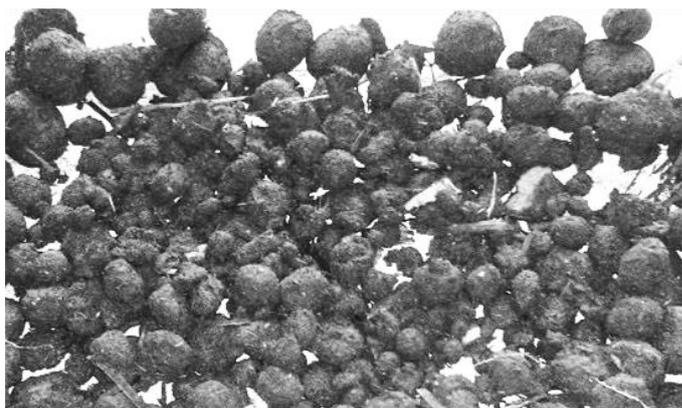


Рис. 3. Внешний вид топливных гранул с содержанием связующего вещества 50 % мас.

Fig. 3. Appearance of fuel pellets with a binder content of 50% by weight.

Технический анализ исходных образцов сырья выполняли в соответствии со стандартными методиками по определению влажности W^a , зольности A^d , выхода летучих веществ V^{daf} . Результат технического анализа представлен в таблице 1.

Если рассматривать дальнейшее получение гранулированного топлива, то можно выделить следующие этапы:

1. Приготовление исходной смеси с заданными соотношениями наполнитель/связующее.

2. Формование топливных гранул в барабанном грануляторе.

3. Сушка гранул как в естественных условиях, так и при температуре 105 ± 5 °С в сушильном шкафу.

Барабанный гранулятор, в котором происходило окатывание исходной смеси (рис. 1), представляет собой загрузочный барабан, $d_{\text{внут}} = 200$ мм. Внутри барабана на стенках закреплены две симметрично расположенные съемные стальные полосы длиной 70 мм и шириной 30 мм. Скорость вращения барабана позволяет регулирование в пределах 10-100 об./мин. Для проведения эксперимента среднюю скорость варьировали в пределах 50 ± 2 об./мин. Более подробные характеристики гранулятора, выбранные для проведения экспериментальных исследований, представлены в таблице 2.

На рисунке 1 представлен чертеж гранулятора барабанного типа, используемого для проведения экспериментов по окатыванию исходной сырьевой смеси.

В процессе окатывания смеси и дальнейших исследованиях установлено, что наиболее подходящим для термической переработки фракционным размером топливных гранул является $d_{\text{ср}} = 25-35$ мм.

Проанализирована зависимость выхода гранул данной фракции в зависимости от содержания связующего вещества в смеси (рис. 2).

В результате исследований двухкомпонентных смесей отмечено, что при соотношении смеси «угольные отходы: связующее» в пропорции 50:50 формование топливных гранул происходит не в полном объеме (рис. 3), так как смесь имеет высокий показатель влажности. Гранулы при окатывании слипаются, прилипают к внутренней поверхности гранулятора.

При соотношении 80:20 формование топливных гранул происходит без налипания гранул на внутреннюю поверхность, при этом образующиеся топливные гранулы имеют высокую



Рис. 4. Внешний вид топливных гранул с содержанием связующего вещества 30-35% мас.

Fig. 4. Appearance of fuel pellets with a binder content of 30-35% by weight.

пористую структуру, которая в свою очередь уменьшает их прочность.

Отмечено, что удовлетворительное окатывание и получение топливных гранул диаметром более 30 мм возможно при содержании связующего вещества в пределах 30-35% мас. (рис. 4).

Далее проводили определение выхода летучих веществ полученных топливных гранул с содержанием связующего вещества от 20% до 60%. Каждую серию экспериментов повторяли 10 раз, после чего данные были обработаны с помощью методов математической статистики. Алгоритм обработки экспериментальных данных состоял из следующих этапов:

1. Расчет среднего арифметического:

$$x = \frac{\sum x_j}{n} \quad (1)$$

2. Определение среднеквадратичного отклонения:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (x_i - x)^2}{n-1}} \quad (2)$$

3. Расчет доверительного интервала:

$$\Delta X = tP, f \frac{s}{n}, \quad (3)$$

где t, P, f – коэффициент Стьюдента, характеризующий влияние объема выборки (числа

Таблица 3. Обработка экспериментальных данных по выходу летучих веществ

Table 3. Processing of experimental data by the yield of volatile substances

№ определения	Выход летучих, V_{daf}	Среднее арифметическое x	Отклонение от среднего $x_i - x$	Квадрат отклонений от среднего $(x_i - x)^2$
1	13,53	$\sum x_i / n = 14,76$	1,23	1,51
2	14,71		0,05	0,00
3	13,84		0,92	0,85
4	15,14		0,38	0,14
5	14,49		0,27	0,07
6	15,72		0,96	0,92
7	16,91		2,15	4,62
8	15,47		0,71	0,50
9	13,66		1,10	1,21
10	14,12		0,64	0,41
			Среднее = 0,84	$\sum (x_i - x)^2 = 10,25$

Таблица 4. Сводные данные по выходу летучих веществ топливных гранул различного состава

Table 4. Summary data by the yield of volatile substances of fuel pellets of various compositions

Содержание связующего вещества, %	Выход летучих веществ, V_{daf} ($\sum x_i / n$)	Отклонение от среднего $x_i - x$	Квадрат отклонений от среднего $\sum (x_i - x)^2$	Среднее квадратичное отклонение, S	Доверительный интервал, ΔX	Доверительные границы $(x \pm \Delta x)$
20	28,08	0,62	5,92	0,27	0,07	28,01 - 28,1
30	14,76	0,84	10,25	0,36	0,09	14,67 - 14,85
40	16,58	0,33	1,42	0,13	0,03	16,55 - 16,61
50	21,49	0,64	6,34	0,28	0,07	21,42 - 21,56
60	24,01	0,37	2,35	0,17	0,04	23,97 - 24,05

параллелей) на доверительный интервал. При доверительной вероятности $P=0,95$ коэффициент Стьюдента принимали равным 2,262.

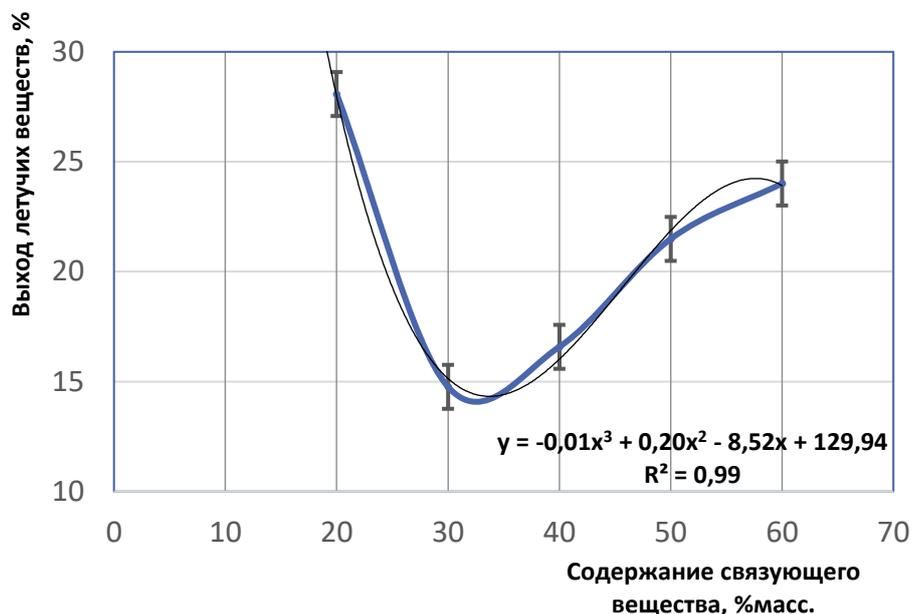


Рис. 5. Графическая зависимость выхода летучих веществ от содержания связующего вещества в смеси.

Fig. 5. Graphical dependence of the yield of volatile substances on the content of the binder in the mixture.

В таблице 3 представлены экспериментальные данные, полученные в процессе определения выхода летучих веществ в течение 7 минут при температуре 900 ± 7 °С и содержании связующего вещества – 30-35% масс.

В результате проведенных расчетов для гранул данного состава определено $\Delta X = 0,09$. Доверительные границы ($x \pm \Delta x$) при этом находятся в пределах от 14,67% до 14,85%.

Аналогичным образом были получены и обработаны экспериментальные данные (табл. 4) по выходу летучих веществ для топливных гранул оставшихся содержаний связующего вещества (от 20 до 60% масс.) и построена графическая зависимость (рис. 5).

Вывод:

В результате поставленных экспериментов исследованы и определены технологические стадии процесса формования и получения топливных гранул из угольных и органических отходов. Установлено, что наиболее подходящее соотношение для формования топливных гранул «угольные отходы/связующее» находится в диапазоне 30-35% мас., для формования гранул диаметром более 30 мм также была определена средняя скорость вращения барабана, которая находится в пределах 50 ± 2 об./мин.

Математическая обработка массива экспериментальных данных позволила определить среднеквадратичное отклонение, доверительный интервал и доверительные границы, а также установить зависимость выхода летучих веществ от содержания связующего вещества в смеси.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Харионовский А.А. Экология угольной промышленности: состояние, проблемы, пути решения/ Харионовский А.А., Калушев А.Н., Васева В.Н, Симанова Е.И. // Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. – 2018. – № 2. – С. 70-81.

2. Харионовский А.А. Оценка влияния на окружающую среду открытого и подземного способов добычи угля / Харионовский А.А., Литвинов А.Р., Данилова М.Ю., Махмуд Т. – Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=28092693> [24.11.2019].
3. Терентьев Б.Д. Пути решения проблемы отходов при подземной разработке углей. – Режим доступа: http://www.giab-online.ru/files/Data/2012/Terentyev_2012_1.pdf [21.02.2021].
4. Корчагина Т.В. Состояние окружающей среды в регионах размещения горного производства/ Корчагина Т.В., Стась Г.В., Прохоров Д.О., Коряков А.Е. – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/sostoyanie-okruzhayushey-sredy-v-regionah-razmescheniya-gornogo-proizvodstva> [13.11.2020].
5. Рыбак Л.В. Анализ использования природно-техногенного потенциала угледобывающих предприятий России. – Режим доступа: http://www.giab-online.ru/files/Data/2012/2/Rybak_2_2012.pdf [02.03.2021].
6. Харионовский, А.А. Современное экологическое состояние Кузбасса // Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. – 2018. – № 3. – С. 34-38.
7. Ефимов В.И. К вопросу образования отходов производства от предприятий угольной отрасли Кузбасса / Ефимов В.И., Сидоров Р.В., Корчагина Т.В. // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2017. – №1. – С. 85-96.
8. Козлов, В.А. Сжигание высокозольных шламов как путь к безотходной технологии обогащения углей / В.А. Козлов, В. Гарбер // Уголь. – 2017. – № 8. – С. 140-145.
9. Дмитриева В.А. К вопросу об образовании отходов угольной промышленности. – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/k-voprosu-ob-obrazovanii-othodov-ugolnoy-promyshlennosti> [23.03.2021].
10. Багрянцев В.И. Практика и перспективы использования твердых углеродсодержащих отходов в качестве топлива для теплоэнергетических агрегатов / Багрянцев В.И., Казмиров С.А., Куценко А.И., Подольский А.П., Рыбушкин А.А., Темлянец М.В. – Режим доступа: <https://www.sibsiu.ru/downloads/public/vestniksibgiu/vestnik5.pdf> [17.01.2021].
11. Волюшкина Е.П. Анализ состояния и проблем переработки техногенных отходов в России. – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-sostoyaniya-i-problem-pererabotki-tehnogennyh-othodov-v-rossii> [23.03.2021].
12. Ефимов В.И. К вопросу минимизации негативного воздействия горного производства на окружающую среду/ Ефимов В.И., Минибаев Р.Р., Корчагина Т.В., Новикова Я.А. – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/k-voprosu-minimizatsii-negativnogo-vozdeystviya-gornogo-proizvodstva-na-okruzhayuschuyu-sredu> [19.01.2020].
13. Ushakov A.G. Carbon-containing waste of coal enterprises in magnetic sorbents technology / Ushakov A., Kvashevaya E., Ushakova E. // Access mode: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20172101003> [21.01.2020].
14. Ушаков А.Г. Изучение распределения фракционного состава при гранулировании смеси угольных и органических отходов / Ушаков А.Г., Боголюбова И.В. // Безопасность жизнедеятельности предприятий в промышленно развитых регионах: Материалы XIII Международной научно-практической конференции. Под редакцией С.Г. Костюк. – 2019. – С. 303-1 – 303-4.
15. Ушаков А.Г. Твердое композиционное топливо на основе отходов угольных предприятий и избыточного активного ила / Ушаков А.Г., Ушакова Е.С., Ушаков Г.В. – Режим доступа: <http://elib.spbstu.ru/dl/2/4866.pdf/download> [18.02.2020].

REFERENCES

1. Kharionovskiy A.A., Kalushev A.N., Vaseva V.N., Simanova E.I. Ekologiya ugol'noy promyshlennosti: sostoyanie, problemy, puti resheniya [Ecology of the coal industry: state, problems, solutions] Vestnik nauchnogo tsentra po bezopasnosti rabot v ugol'noy promyshlennosti [Bulletin of the scientific center for work safety in the coal industry]. 2018. No 2. P. 70-81. (rus).
2. Kharionovskiy A.A., Kharionovskiy A.A., Litvinov A.R., Danilova M.Yu., Makhmud T. Otsenka vliyaniya na okruzhayushchuyu sredu otkrytogo i pod-zemnogo sposobov dobychi uglya [Assessment of the impact on the environment of open and under-ground coal mining methods]. Access mode:

<https://elibrary.ru/item.asp?id=28092693> [24.11.2019].

3. Terent'ev B.D. Puti resheniya problemy otkhodov pri podzemnoy razrabotke ugley [Ways to solve the problem of waste in underground mining of coal mines]. Access mode:

http://www.giab-online.ru/files/Data/2012/Terentyev_2012_1.pdf [21.02.2021].

4. Korchagina T.V., Stas' G.V., Prokhorov D.O., Koryakov A.E. Sostoyanie okruzhayushchey sredy v regionakh razmeshcheniya gornogo proizvodstva [Ways to solve the problem of waste in underground mining of coal mines] Access mode: <https://cyberleninka.ru/article/n/sostoyanie-okruzhayushchey-sredy-v-regionah-razmeshcheniya-gornogo-proizvodstva> [13.11.2020].

5. Rybak L.V. Analiz ispol'zovaniya prirodno-tekhnogenogo potentsiala ugledo-byvayushchikh predpriyatii Rossii [Analysis of the use of natural and man-made potential of coal-producing enterprises in Russia]. Access mode: http://www.giab-online.ru/files/Data/2012/2/Rybak_2_2012.pdf [02.03.2021].

6. Kharionovskiy, A. A. . Sovremennoe ekologicheskoe sostoyanie Kuzbassa [Modern ecological state of Kuzbass]. Vestnik nauchnogo tsentra po bezopasnosti rabot v ugol'noy promyshlennosti [Bulletin of the scientific center for work safety in the coal industry]. 2018. No 3. P. 34-38. (rus).

7. Efimov V.I., Sidorov R.V., Korchagina T.V. K voprosu obrazovaniya otkhodov pro-izvodstva ot predpriyatii ugol'noy otrasli Kuzbassa [On the issue of production waste generation from the enterprises of the Kuzbass coal industry] / Gornyy informatsiono-analiticheskiy byulleten' [Gorny information and analytical Bulletin]. 2017. No 1. P. 85-96. (rus)/

8. Kozlov V.A., Garber V. Szhiganiye vysokozol'nykh shlamov kak put' k bezotkhodnoy tekhnologii obogashcheniya ugley. Ugol' [Coal]. 2017. No 8. – P. 140-145. (rus).

9. Dmitrieva V.A. K voprosu ob obrazovanii otkhodov ugol'noy promyshlennosti [On the formation of waste from the coal industry]. Access mode: <https://cyberleninka.ru/article/n/k-voprosu-ob-obrazovanii-otkhodov-ugolnoy-promyshlennosti> [23.03.2021].

10. Bagryantsev V. I., Kazimirov S. A., Kutsenko A. I., Podol'skiy A. P., Rybushkin A. A., Temlyantsev M. V. Praktika i perspektivy ispol'zovaniya tverdykh uglerodsoder-zhashchikh otkhodov v kachestve topliva dlya teploenergeticheskikh agregatov [Practice and prospects of using solid carbon-containing waste as fuel for heat power units]. Access mode: <https://www.sibsiu.ru/downloads/public/vestniksibgiu/vestnik5.pdf> 17.01.2021].

11. Volynkina E.P. Analiz sostoyaniya i problem pererabotki tekhnogenykh otkhodov v Rossii [Analysis of the state and problems of processing technogenic waste in Russia]. Access mode: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-sostoyaniya-i-problem-pererabotki-tehnogenykh-otkhodov-v-rossii> [23.03.2021].

12. Efimov V.I., Minibaev R.R., Korchagina T.V., Novikova Ya.A. K voprosu minimizatsii negativnogo vozdeystviya gornogo proizvodstva na okruzhayushchuyu sredyu [On the issue of minimizing the negative impact of mining production on the environment]. Access mode: <https://cyberleninka.ru/article/n/k-voprosu-minimizatsii-negativnogo-vozdeystviya-gornogo-proizvodstva-na-okruzhayushchuyu-sredyu> [19.01.2020].

13. Ushakov A.G., Kvashevaya E.A., Ushakova E.S. Carbon-containing waste of coal enterprises in magnetic sorbents technology. Access mode: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20172101003> [21.01.2020].

14. Ushakov A.G., Bogolyubova I.V. Izuchenie raspredeleniya fraktsionnogo sostava pri granulirovani smesi ugol'nykh i organicheskikh otkhodov [Study of the distribution of fractional composition when granulating a mixture of coal and organic waste]. Bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti predpriyatii v promyshlenno razvitykh regionakh: Materialy XIII Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. Pod redaktsiei S.G. Kostyuk [Safety of life of enterprises in industrially developed regions Materials of the XIII International scientific and practical conference. Edited by S.G. Kostyuk]. 2019. P. 303-1 – 303-4. (rus).

15. Ushakov A.G., Ushakova E.S., Ushakov G.V. Tverdoe kompozitsionnoe toplivo na osnove otkhodov ugol'nykh predpriyatii i izbytochnogo aktivnogo ila [Solid composite fuel based on waste from coal enterprises and excess activated sludge] / Access mode: <http://elib.spbstu.ru/dl/2/4866.pdf/download> [18.02.2020].

Библиографическое описание статьи

Ушаков А.Г., Ушакова Е.С., Боголюбова И.В. Влияние изменения состава исходной сырьевой смеси на свойства получаемого гранулированного твердого топлива // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2021. – № 4 (146). – С. 21-28.

Reference to article

Ushakov A.G., Ushakova E.S., Bogolyubova I.V. Influence of change in the initial raw material composition on the properties of the resulting granular solid fuel. Bulletin of the Kuzbass State Technical University, 2021, no.4 (146), pp. 21-28.