

DOI: 10.17516/1999-494X-0422

УДК 697.432

Development of Technology of Receiving Water Coal Fuel from Brown Coals of a Field a Kara-Keche of the Kyrgyz Republic

Vasilii I. Murko^{*a},
Ahmet K. Dzhundubayev^b, Myrzatay S. Sultanaliyev^b,
Vladimir A. Kulagin^c and Marina P. Baranova^{c, d}

^a*Siberian State Industrial University
Novokuznetsk, Russian Federation*

^b*Power and Economy Research Institute
at the Ministry of Energy of the Kyrgyz Republic
Bishkek, Kyrgyzstan*

^c*Siberian Federal University
Krasnoyarsk, Russian Federation*

^d*Krasnoyarsk Agrarian University
Krasnoyarsk, Russian Federation*

Received 13.07.2022, received in revised form 21.07.2022, accepted 19.09.2022

Abstract. Results of development of technology of receiving water coal fuel from brown coals of a field Kara-Keche of the Kyrgyz Republic are presented. Laboratory researches, tests in trial conditions have shown possibility of receiving such fuel with demanded structural and rheological and heattechnical characteristics. The plasticizing additive, allowing to reach values of viscosity less than 500 MPas · with at the maintenance of a firm phase of 53 % and the lowest warmth of combustion not less than 10,5 MDZh/kg (2500 kcal/kg) is developed.

Keywords: brown coal, water coal suspensions, rheological models of a current, granulometric structure, the lowest warmth of combustion of fuel.

Citation: Murko, V. I., Dzhundubayev, A.K., Sultanaliyev, M. S., Kulagin, V.A., Baranov, M.P. Development of technology of receiving water coal fuel from brown coals of a field a Kara-Keche of the Kyrgyz Republic. J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol., 2022, 15(6), 648–657. DOI: 10.17516/1999-494X-0422

Разработка технологии получения водоугольного топлива из бурых углей месторождения Кара-Кече Кыргызской Республики

**В. И. Мурко^а, А. К. Джундубаев^б,
М. С. Султаналиев^б, В. А. Кулагин^в, М. П. Баранова^{в, г}**
*^аСибирский государственный индустриальный университет
Российская Федерация, Новокузнецк
^бНаучно-исследовательский институт
энергетики и экономики при Министерстве энергетики
Кыргызской Республики
Кыргызстан, Бишкек
^вСибирский федеральный университет
Российская Федерация, Красноярск
^гКрасноярский аграрный университет
Российская Федерация, Красноярск*

Аннотация. Представлены результаты разработки технологии получения водоугольного топлива из бурых углей месторождения Кара-Кече Кыргызской Республики. Лабораторные исследования, испытания в опытно-промышленных условиях показали возможность получения такого топлива с требуемыми структурно-реологическими и теплотехническими характеристиками. Разработана пластифицирующая добавка, позволяющая достичь значений вязкости менее 500 мПа·с при содержании твердой фазы 53 % и низшей теплоте сгорания не менее 10,5 МДж/кг (2500 ккал/кг).

Ключевые слова: бурый уголь, водоугольное топливо, реологические модели течения, гранулометрический состав, низшая теплота сгорания топлива.

Цитирование: Мурко, В. И. Разработка технологии получения водоугольного топлива из бурых углей месторождения Кара-Кече Кыргызской Республики / В. И. Мурко, А. К. Джундубаев, М. С. Султаналиев, В. А. Кулагин, М. П. Баранова // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии, 2022, 15(6). С. 648–657. DOI: 10.17516/1999-494X-0422

Введение

Кыргызстан обладает большими запасами энергетических ресурсов и способен обеспечить ими все свои потребности, однако в настоящее время возможности топливно-энергетического комплекса республики по разным причинам реализуются не в полной мере. Суммарные запасы месторождений угля составляют 2,2 млрд т. Наиболее доступны на данный момент угли Кавакского бурогоугольного бассейна. Сложные горно-геологические условия залегания угля и его добычи не позволяют использовать общепринятые схемы транспортировки. Решением вопроса может стать применение трубопроводного гидравлического транспорта угля к потребителям в виде водоугольных суспензий [1, 2].

Ранее проведены исследования реологических характеристик и стабильности водоугольных суспензий на основе бурого угля месторождения Агулак этого же бассейна. Была показана возможность получения высококонцентрированных водоугольных топливных суспензий, пригодных для гидротранспортирования и последующего прямого сжигания [1–4]. В настоя-

щее время наиболее подготовлено к освоению Кара-Кеченское бурого угольного месторождение, которое считается крупнейшим в стране: его запасы составляют 312,6 млн т (23,3 % запасов Киргизии). Добыча угля осуществляется открытым способом. Угли месторождения Кара-Кече имеют достаточно высокую низшую теплоту сгорания, малосернистые, с низкими значениями зольности и влажности [3–5].

Чтобы водоугольное топливо (ВУТ) можно было транспортировать по трубопроводу с последующим прямым сжиганием в топках ТЭЦ и котельных, необходимо получать суспензии с требуемыми структурно-реологическими и теплотехническими характеристиками, статической и динамической стабильностью. Особое внимание следует уделять качеству распыливания перед подачей на топливопотребляющие устройства. Для этого были проведены специальные исследования пневматического распыливания ВУТ из Кара-Кеченского бурого угля в топочном объеме [6–10].

Цель данной работы – исследование возможности получения суспензионного водоугольного топлива из бурого угля месторождения Кара-Кече с необходимыми структурно-реологическими и теплотехническими характеристиками, требуемыми для гидротранспортирования по трубопроводам и прямого сжигания в котлах ТЭЦ и котельных.

При проведении исследований были решены следующие задачи:

- выбор пластифицирующей добавки;
- определение основных структурно-реологических характеристик полученного суспензионного топлива;
- приготовление опытной партии ВУТ.

Экспериментальная часть

Представительная проба бурого угля Кара-Кече была отобрана в соответствии с нормативными требованиями из пласта «Основной» предприятия «Кыргызкомур». Характеристика исходного угля представлена в табл. 1.

Полученные на основе данного угля порции ВУТ анализировали на гранулометрический состав, зольность, влажность и вязкость.

Таблица 1. Характеристика исходного угля

Table 1. Characteristics of initial coal

Марка угля	Б-3
Влага общая, W_t^r , %	12,5
Зольность, A^d , %	16,7
Выход летучих веществ, %	28,7*
Общая сера, S_t^d , %	0,65*
Низшая теплота сгорания, Q_r^r , МДж/кг (ккал/кг)	20,23(4832)
Высшая теплота сгорания, Q_s^{daf} , МДж/кг (ккал/кг)	27,47 (6560) *

* Данные ГП «Кыргызкомур».

Массовую долю твердой фазы в ВУС определяли стандартным методом по ГОСТ 52911–2020, гранулометрический состав – согласно ГОСТ 2093–82. Зольность определяли по ГОСТ 55661–2013. Для определения срединного диаметра частиц исходного угля и твердой фазы в ВУТ применяли аналитическую зависимость гранулометрического состава в виде распределения Розина-Раммлера [8–14].

Для исследования особенностей процесса приготовления ВУТ и выбора эффективных пластифицирующих добавок использовали вибростенд СВУ-2, в котором возможно осуществлять как перемешивание (в смесительной камере), так и измельчение (в помольной емкости) исходных компонентов.

Определение структурно-реологических характеристик ВУТ производили с использованием ротационного вискозиметра «RHEOTEST» в диапазоне скоростей сдвига от 1,0 до 437,4 с⁻¹ со стандартной системой цилиндров S 2. Температура измерений составляла 20±5 °С.

Учитывая, что водоугольные суспензии с массовой долей твердой фазы более 50 % являются существенно неньютоновскими жидкостями, для каждой из исследуемых проб ВУТ по результатам измерений напряжений на различных скоростях сдвига определяли коэффициенты степенного и бингамовского реологических уравнений [12–17].

Результаты и их обсуждение

Технический анализ угля Кара-Кеченского месторождения показал, что зольность угля составила порядка 16 %, а влажность 12–13 %. На первом этапе работы исследованы элементы технологии приготовления водоугольного топлива в лабораторных условиях. Были разработаны составы эффективных комплексных пластифицирующих добавок для бурых углей месторождения Кара-Кече и определены значения основных структурно-реологических характеристик полученного топлива [4, 5, 15].

Согласно методике в вибростенд загрузали уголь, комплексную добавку и воду. Для определения наиболее эффективной добавки в процессе получения ВУТ использовали несколько видов комплексных добавок. Добавки состояли как из одного, так и из двух компонентов: разжижающего и стабилизирующего. Количество добавки менялось в зависимости от ее типа и содержания твердой фазы в ВУТ. Также менялось соотношение компонентов в составе комплексных добавок.

Эффективность добавки определяли по минимальным значениям вязкости при наибольшем содержании твердой фазы в ВУТ и статической стабильности, которая должна быть не менее 10 суток [13, 16].

В ходе проведения лабораторных исследований установлен оптимальный состав пластифицирующей добавки. Точный состав добавки является коммерческой тайной. Количество вводимой пластифицирующей добавки составило 0,3 % на массу угля в ВУТ при максимально возможном содержании твердой фазы в ВУТ $C_{ТВ} = 52,9$ % и эффективной вязкости при скорости сдвига 81 с⁻¹ менее 500 мПа·с. (табл. 2).

Для оптимальной по реологическим характеристикам пробы построены кривые течения (рис. 1) для степенной ($\tau = k \cdot \dot{\gamma}^n$) и бингамовской ($\tau = \tau_0 + \mu_0 \cdot \dot{\gamma}$) моделей, где τ – напряжение сдвига, Па; k – коэффициент консистенции, Па·сⁿ; $\dot{\gamma}$ – скорость сдвига, с⁻¹; n – показатель степени; τ_0 – начальное напряжение сдвига, Па; μ_0 – структурная вязкость, Па·с.

Таблица 2. Значения коэффициентов реологических моделей течения ВУТ из бурого угля разреза «Кара-Кече»

Table 2. Values of coefficients of rheological models of a current of CWS from brown coal of Kara-Keche coal mine

№ пробы	Реологические модели течения							
	Степенная (псевдопластичная)					Бингамовская (вязкопластичная)		
	Эффективная вязкость при скорости сдвига 9 c^{-1} , η	Эффективная вязкость при скорости сдвига 81 c^{-1} , η	Коэффициент консистентности, K , ПаЧ	Индекс потока, n	Среднеквадратичное отклонение, s	Начальное напряжение сдвига, t	Структурная вязкость, m	Среднеквадратичное отклонение, s
1	2862	474	10,26	0,29	0,04	24,98	0,09	0,19
2	1822	489	1,55	0,75	0,21	13,59	0,31	0,09
3	3841	652	15,65	0,21	0,59	34,17	0,04	0,74
4	2709	785	3,37	0,69	0,20	20,05	0,48	0,30
5	2438	563	2,80	0,67	0,34	8,77	0,35	0,13
6	2050	948	1,75	0,88	0,10	11,09	0,82	0,10

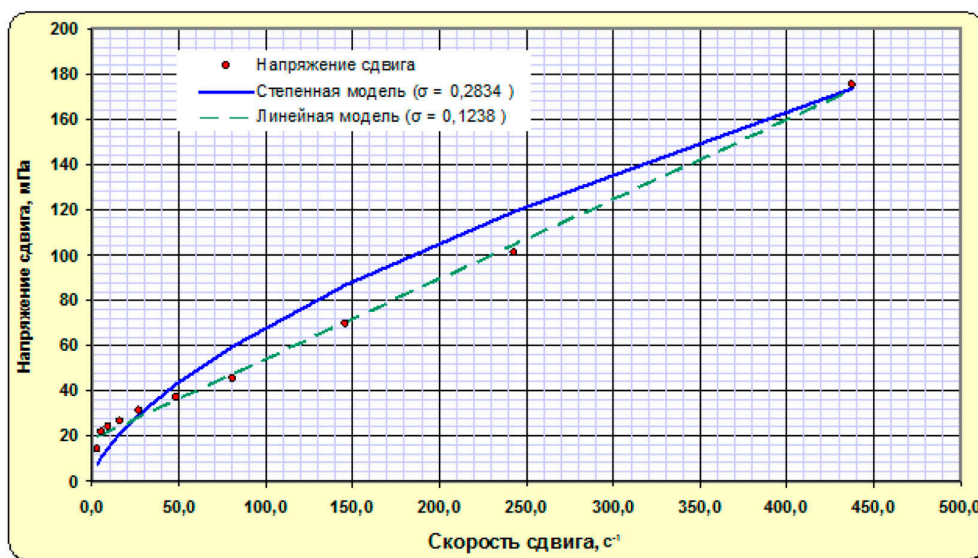


Рис. 1. Реологические кривые течения ВУТ

Fig. 1. Rheological curve currents of CWS

В табл. 3 представлены структурно-реологические характеристики ВУТ, полученные в ходе лабораторных исследований, которые позволили определить наиболее эффективный тип добавки, ее количество, максимально возможное содержание твердой фазы, гранулометрическое распределение частиц угля и низшую теплоту сгорания такого топлива.

Как показывают данные табл. 2 и 3, при максимально возможном содержании твердой фазы в ВУТ ($C_T = 52,3\%$) эффективная вязкость при скорости сдвига 81 c^{-1} составила $415 \text{ мПа}\cdot\text{с}$.

Таблица 3. Характеристика ВУТ из бурого угля разреза «Кара-Кече»

Table 2. CWS characteristic from brown coal of Kara-Keche coal mine

№ пробы	Наименование добавки	Количество добавки, %	Содержание твердой фазы в ВУТ, C_T , %	Гранулометрический состав, классы, мм					Низшая теплота сгорания, Q_f^r , МДж/кг (ккал/кг)
				+1,0	0,355÷1,0	0,250÷0,355	0,071÷0,250	-0,071	
1	Без реагента	-	51,5	-	-	0,5	20,9	78,6	10,10 (2413)
2	Тип Т	0,3	52,9	0,1	0,2	0,4	21,4	77,9	10,48 (2502)
3	Тип L	1,5	53,6	0,1	0,1	0,2	21,2	77,8	10,67 (2549)
4	Тип С	0,3	53,3	-	0,1	0,3	21,0	78,6	10,61 (2535)
5	Вариант А5	0,3	52,7	0,2	0,3	0,1	21,7	77,7	10,44 (2493)
6	Вариант В2	2,0	53,6	-	0,1	0,7	21,1	78,1	10,67 (2549)

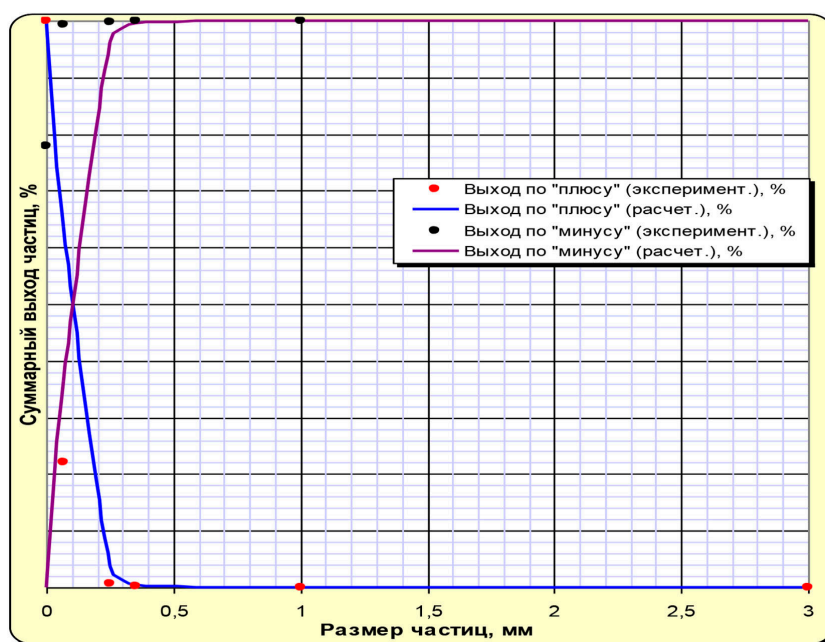


Рис. 2. Гранулометрическое распределение частиц в ВУТ из бурого угля

Fig. 2. Granulometric distributions of particles in CWS from brown coal

После измельчения в вибрационной мельнице срединный диаметр частиц угля уменьшился в 6,5 раза – от $d_{\text{сред.}} = 0,481$ мм (в исходном угле) до $d_{\text{сред.}} = 0,074$ мм (в ВУТ).

Время измельчения в виброкамере составляло, как правило, 4 минуты. Обработка гранулометрического состава твердых частиц в ВУТ по уравнению Розина-Рамлера показала, что полученные зависимости хорошо описывают экспериментальные значения (рис. 2) [1, 6–11].

Полученное топливо имело необходимые текучие свойства и сохраняло седиментационную устойчивость в течение 14 суток.

Результаты, полученные при приготовлении ВУТ из бурого угля Кара-Кече на вибростенде СВУ-2, позволили перейти к подготовке и исследованию опытной партии ВУТ из этого

угля. Опытная партия ВУТ была получена на демонстрационном стенде СибГИУ [1, 4, 5]. Смешивание предварительно отсеянного от класса 0–6 мм бурого угля Кара-Кече класса 0–3 мм с раствором пластификатора осуществляли в лопастном смесителе. Смеситель работал в дискретном режиме. За час происходило два цикла перемешивания, часовая производительность смесителя составляла 3 м³/ч по готовому продукту. При плотности гидросмеси в среднем 1,23–1,25 т/м³ объём полученной суспензии был равен 3,7 и 3,75 т/ч соответственно.

Гранулометрический состав опытной партии суспензионного ВУТ из бурого угля Кара-Кече показан на рис. 3.

Исследования показали, что структурно-реологические (рис. 4) и теплотехнические характеристики опытной партии ВУТ соответствуют аналогичным характеристикам лабораторных порций, полученных на вибростенде, что указывает на практическую реализуемость разработанной технологии получения ВУТ.

Полученное топливо пригодно для гидротранспортирования и прямого сжигания в топках котлов ТЭЦ и котельных [16].

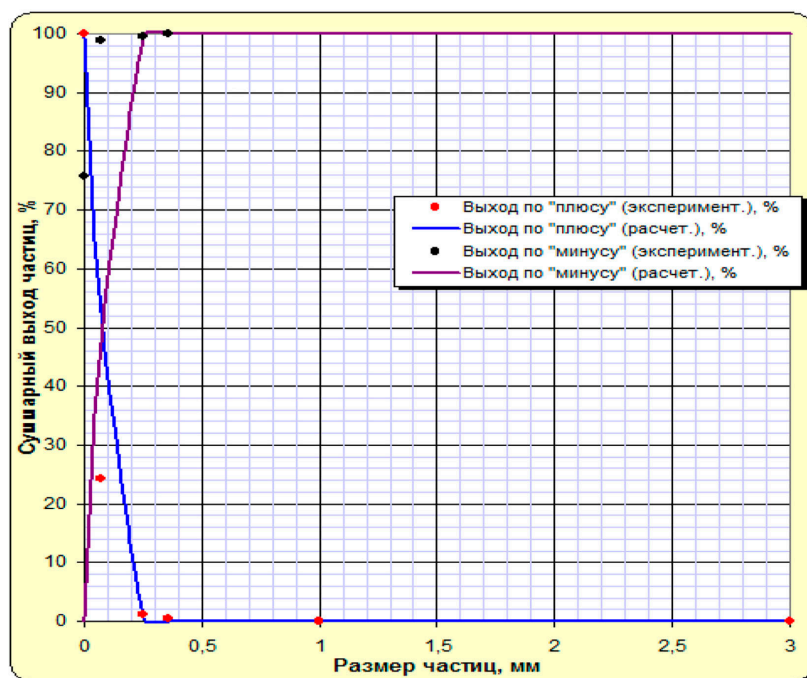


Рис. 3. Характеристики гранулометрического состава опытной партии ВУТ из бурого угля (разрез «Кара-Кече»)

Fig. 3. Characteristics of granulometric structure of a pilot batch of CWS from brown coal (Kara-Kече coal mine)

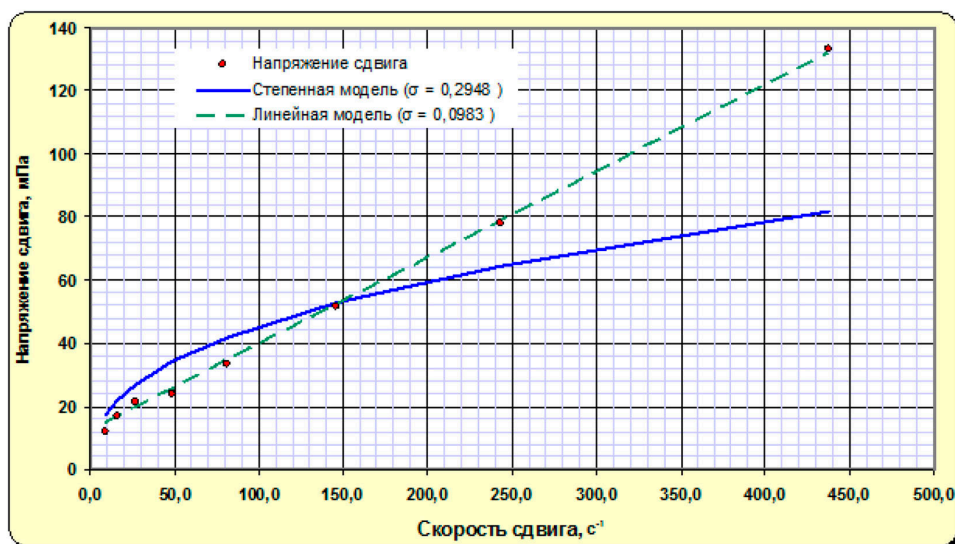


Рис. 4. Реологические кривые течения (опытная партия ВУТ)

Fig. 4. Rheological curve currents (pilot batch of CWS)

Заклучение

Выполненные исследования показали возможность получения суспензионного угольного топлива из бурых углей месторождения Кара-Кече с необходимыми структурно-реологическими и теплотехническими характеристиками:

- массовая доля твердой фазы – до 53,0 %;
- зольность – от 16,0 до 17,0 %;
- эффективная вязкость при скорости сдвига 81 с⁻¹ при температуре 20 °С – от 400 до 450 мПа·с;
- низшая теплота сгорания ВУТ – от 10,1 до 10,7 МДж/кг (2413 до 2549 ккал/кг);
- гранулометрический состав: 0–250 мкм – до 5,0 %, 0,071 мкм – 60,0–80,0 %; – статическая стабильность до 15 сут.

Список литературы / References

[1] Мурко В. И., Джундубаев А. К., Баранова М. П., Бийбосунов А. И., Кулагин В. А. *Гидротранспортные топливно-энергетические комплексы. Российско-кыргызское научно-техническое сотрудничество в области теплоэнергетики*. Красноярск: Сиб. федер. ун-т. 2015. 250 с. [Murko V. I., Dzhundubayev A. K., Baranova M. P., Biybosunov A. I., Kulagin V. A. *Hydrotransport fuel and energy complexes. The Russian-Kyrgyz scientific and technical cooperation in the field of power system*. Krasnoyarsk: Krasnoyarsk. Sib. Fed. Univ. 2015. 250 p. (in Russian)].

[2] Махутов Н. А., Москвичев В. В., Кулагин В. А. Современные технологии топливно-энергетического комплекса и возможности развития железнодорожного транспорта Сибири. *Современные технологии. Системный анализ. Моделирование*. 2019. № 1 (61). С. 64–73. [Makhutov N. A., Moskvichev V. V., Kulagin V. A. Modern technologies of fuel and energy complex and possibility of development of railway transport of Siberia, *Modern Technologies. System Analysis. Modeling*. 2019, 61(1), 64–73 (in Russian)].

[3] Баранова М.П., Кулагина Л.В., Екатеринбург В.М. *Физико-химические основы промышленных теплотехнологий*. Красноярск. Гротеск, 2018. 148 с. [Baranova M.P., Kulagina L.V., Ekaterinchev V.M. *Physical and chemical bases of industrial heat technologies*. Krasnoyarsk. Grotesk Publ., 2018. 148 p. (in Russian)].

[4] Джундубаев А.К., Мурко В.И., Баранова М.П., Султаналиев М.С. Гидротранспортные трубопроводные системы для доставки углей потребителям в Кыргызской Республике, *Вестник Ассоциации выпускников КГТУ*. Красноярск. Сиб. фед. ун-т, 2017. Вып. 24. С. 52–55. [Dzhundubayev A.K., Murko V.I., Baranova M.P., Sultanaliev M.S. Hydrotransport pipeline systems for delivery of coals to consumers in the Kyrgyz republic. *The Messenger of Association of graduates of KGTU*. Krasnoyarsk. Sib. Fed. Univ., 2017, 24, 52–55. (in Russian)].

[5] Джундубаев А.К., Султаналиев М.С., Мурко В.И., Кулагина Л.В., Баранова М.П. Режимы течения топливных водоугольных суспензий в каналах распыливающих устройств, *Журнал СФУ. Техника и технологии*, 2018, 11(2), 242–249. [Dzhundubayev A.K., Sultanaliev M.S., Murko V.I., Kulagina L.V., Baranova M.P. Modes of a current of fuel water coal suspensions in channels the raspylivayushchikh of devices, *J. Sib. Fed. Univ. Eng. technol.*, 2018, 11(2), 242–249 (in Russian)].

[6] Janiszewski J. *Int. J. Solids and Struct*, 2012, 49(7–8), 1001.

[7] Kijo-Kleczkowska A. Combustion of coal-water suspensions, *Fuel*, 90, 2011, 2, 865–867.

[8] Мурко В.И., Карпенко В.И., Баранова М.П. Вихревой способ сжигания водоугольного топлива из шламов углеобогащения, *Журнал СФУ. Техника и технологии*, 2022, 15(3), 338–345. [Murko, V.I., Karpenok, V.I. and Baranova, M.P. Vortex method of water-coal combustion fuel from coal preparation sludge, *J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol.*, 2022, 15(3), 338–345. (in Russian)].

[9] Мурко В.И., Вахрушева Г.Д., Федяев В.И., Карпенко В.И., Мастихина В.П., Дзюба Д.А. Исследование получения суспензионного угольного топлива на основе тонкодисперсных отходов углеобогащения, *Журнал СФУ. Техника и технологии*, 2011, 11(4), 522–526. [Murko V.I., Vakhrusheva G.D., Fedyaev V.I., Karpenok V.I., Mastihina V.P., Dzyuba D.A. Research of receiving suspension coal fuel on the basis of fine waste of coal preparation, *J. Sib. Fed. Univ. Eng. technol.*, 2011, 11(4), 522–526 (in Russian)].

[10] Мурко В.И., Хямляйнен В.А., Волков М.А., Баранова М.П. Возможности и перспективы реализации отходов технологии обогащения углей. *Горный информационно-аналитический бюллетень*, 2019, 6, 165–172. [Murko V., Khyamyalyainen V., Volkov M., Baranova M. The opportunities and prospects for the implementation of non-waste coal preparation technology, *Journal Mountain Information and Analytical Bulletin*, 2019, 6, 165–172 (in Russian)].

[11] Alaa Musalam M. and Abdel Fattah A. Qaraman. The thermal behavior of the coal-water fuel (CWF). *International Journal of Energy and Environmental Research*, 2016, 4(3), 27–36.

[12] Murko V., Baranova M., Grishina I The intensification of the solid fuel grate-firing process. *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2019, 1261, 012024.

[13] Проэнергомаш [Электронный ресурс]. Режим доступа: www.pem-energo.ru [Proenergomash [Electronic resource]. Access: www.pem-energo.ru

[14] Мурко В.И., Баранова М.П. Обоснование инновационных направлений использования продуктов обогащения угля. *Горный информационно-аналитический бюллетень*, 2022, 6, 131–141. [Murko V., Baranova M. Justification of the innovative directions of use of products of enrichment of coal, *Journal Mountain Information and Analytical Bulletin*, 2022, 6, 131–141. (in Russian)].

[15] Yuxing Zhang, Zhiqiang Xu, Dinghua Liu, Yang Chen, Wei Zhao, Guanlin Ren The influence of water occurrences in CWSs made of lignite and bituminous coal on slurring performances, *Powder Technology*, 2022, 117150.

[16] Xiaofeng Jiang, Shixing Chen, Lifeng Cui, Enle Xu, Hongji Chen, Xianliang Meng, Guoguang Wu. Eco-friendly utilization of microplastics for preparing coal water slurry: rheological behavior and dispersion mechanis, *Journal of Cleaner Production*, 2022, 330, 129881.

[17] Зайденварг В. Е., Трубецкой К. Н., Мурко В. И., Нехороший И. Х. *Производство и использование водоугольного топлива*, М. Изд-во Академии горных наук, 2001. 176 с. [Zaydenvarg V. E., Trubetskoy K. N., Murko V. I., Nehoroshiy I. H. *Production and use of water coal fuel*, Moscow, 2001. 176 p. (in Russian)].