

ОТХОДЫ ДОБЫЧИ И ПЕРЕРАБОТКИ УГЛЕЙ. МЕТОДИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ К ОЦЕНКЕ ИХ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ И НАПРАВЛЕНИЙ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ.

Часть 4. КРИТЕРИИ ОЦЕНКИ РИСКОВ ДРЕНАЖА КИСЛЫХ СТОКОВ ПРИ СКЛАДИРОВАНИИ И ИСПОЛЬЗОВАНИИ ОТХОДОВ

Т.О. Гущина¹, Е.Е. Соколовская¹, С.А. Эпштейн¹, Н.А. Фоменко¹

¹ НИТУ «МИСиС», Москва, Россия, e-mail: apshstein@yandex.ru

Аннотация: Процессы образования кислых вод при контакте отходов, образующихся при добыче и переработке углей, с влагой являются одной из основных проблем горно-перерабатывающей промышленности. Для предварительной оценки рисков дренажа кислых стоков в зарубежных странах наиболее распространенным является метод определения потенциала нейтрализации отходов. Ключевым вопросом в оценке рисков образования кислых дренажных вод является интерпретация результатов определения потенциала нейтрализации (Net NP). В настоящей работе на основе экспериментальных исследований определения потенциала нейтрализации в отходах разного происхождения, выбраны оптимальные критерии оценки рисков образования кислых дренажных вод и предложены рекомендации: по расчету потенциалов нейтрализации в тоннах эквивалента кальция (Ca) на 1000 т отхода; по диапазонам и поддиапазонам значений потенциала нейтрализации, соответствующим различным рискам образования кислых и щелочных стоков; по форме предоставления данных. Показано, что для оценки рисков образования кислых или щелочных стоков при контакте отходов с водой, целесообразно привлекать дополнительную информацию об элементном составе этих отходов, в том числе их водорастворимых форм. Приведены примеры интерпретации результатов определения потенциалов нейтрализации отходов добычи и сжигания углей разных месторождений Канско-Ачинского угольного бассейна. Отходы добычи углей этого бассейна различаются по степени опасности образования дренажа не только кислых, но и щелочных стоков. Продукты сжигания углей: золы уноса, шлаки и золошлаковые отходы проявляют более низкую опасность образования кислых стоков, в отличие от отходов добычи углей.

Ключевые слова: потенциал нейтрализации, кислотный потенциал, дренаж кислых стоков (ARD), отходы добычи и переработки углей, зола уноса, шлак, золошлаковые отходы, критерии оценки.

Благодарность: Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, грант 19-35-90117.

Для цитирования: Гущина Т. О., Соколовская Е. Е., Эпштейн С. А., Фоменко Н. А. Отходы добычи и переработки углей. Методические подходы к оценке их экологической безопасности и направлений использования. Часть 4. Критерии оценки рисков дренажакислых стоков при складировании и использовании отходов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2021. – № 4. – С. 69–84. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_4_0_69.

Wastes from coal mining and processing. Methodological approaches to the assessment of their ecological safety and directions for use. Part 4. Criteria for assessing the risks of acid drainage during storage and use of wastes

T.O. Gushchina¹, E.E. Sokolovskaya¹, S.A. Epshtein¹, N.A. Fomenko¹

¹ National University of Science and Technology «MISIS», Moscow, Russia, e-mail: epshtein@yandex.ru

Abstract: The processes of formation of acid drainage during the contact of waste generated during mining and processing of coal with atmospheric moisture are one of the main problems of the mining and processing industry. In the world, the most common method for a preliminary assessment of the risks of acid rock drainage is to determine the neutralization potential of waste. The key issue in assessing the risks of acid rock drainage formation is the interpretation of the neutralization potential (Net NP) results. In this work the optimal criteria for assessing the risks of acid drainage formation were decided on the basis of experimental studies of determining the neutralization potential in wastes of various origins, and the following recommendations are proposed. They are: for calculating neutralization potentials in tonnes of calcium equivalent (Ca) per 1000 tons of waste; on ranges and sub-ranges of neutralization potential values corresponding to different risks of formation of acidic and alkaline effluents; on the the form of data representation. It is shown that, in order to assess the risks of formation of acidic or alkaline effluents after contact of waste with water, it is recommended to involve additional information on the elemental composition of these waste including their water-soluble forms. Examples of the interpretation of the results of determining the neutralization potentials of waste from mining and combustion of coals from different deposits of the Kansk-Achinsk coal basin are given. Wastes from coal mining in this basin differ in the degree of risk of the formation of drainage not only of acidic, but also alkaline wastewater. Coal combustion products such as fly ash, slag and ash and slag wastes are of a lower risk of acid effluent formation, in contrast to coal mining waste.

Key words: neutralization potential, acid potential, acid rock drainage (ARD), coal mining and processing waste, fly ash, slag, ash and slag waste, evaluation criteria.

Acknowledgements: The work was carried out with the financial support of the Russian Foundation for Basic Research, grant 19-35-90117.

For citation: Gushchina T. O., Sokolovskaya E. E., Epshtein S. A., Fomenko N. A. Wastes from coal mining and processing. Methodological approaches to the assessment of their ecological safety and directions for use. Part 4. Criteria for assessing the risks of acid drainage during storage and use of wastes. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021;(4):69-84. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_4_0_69.

Введение

При добыче полезных ископаемых, в частности при открытых горных работах, образуются значительные объемы отходов горных пород. Отходы добычи характеризуются высокой неоднородностью по своим минералогическим и фи-

зическим свойствам [1 – 3]. Развитие процессов образования кислых вод при контакте отходов добычи и переработки углей с влагой является одной из основных проблем при освоении месторождений и обогащении полезных ископаемых. При складировании образующихся

отходов, а также при их использовании, в том числе для целей рекультивации, важным является наличие надежных тестов, позволяющих прогнозировать риски образования кислых вод. Такое прогнозирование является основой выбора мероприятий, позволяющих минимизировать риски образования не только кислых, но и щелочных стоков и попадание в них соединений потенциально опасных элементов [4–6].

В соответствии с зарубежной практикой [7, 8], наиболее распространенным методом для предварительной оценки риска образования кислых стоков является определение потенциала нейтрализации отходов (так называемый метод статического теста A. Sobek (ABA) [9], либо его модификации [10, 11]).

В настоящее время в России отсутствует нормативное обеспечение определения потенциала нейтрализации в отходах добычи, переработки и сжигания углей. Авторами статьи [12] была предложена методика определения потенциала нейтрализации для вышеуказанных отходов. В той же работе было отмечено, что статические испытания дают возможность прогнозировать кислотность дренажа путем сравнения кислотного потенциала (AP) отхода с его общим потенциалом нейтрализации (NP). Алгебраическая разность между общим (NP) и кислотным потенциалами нейтрализации (AP) определяет величину потенциала нейтрализации (Net NP) отхода.

Отсутствие согласованных подходов при интерпретации результатов количественного определения потенциала нейтрализации является причиной неоднозначных оценок степени рисков образования кислых стоков при складировании или использовании отходов добычи, переработки и сжигания углей, в том числе, для целей рекультивации. В связи с этим, в настоящей работе, на основе литературного анализа мирового опыта и резуль-

татов экспериментальных исследований отходов различного состава и происхождения, будут предложены дополнительные критерии оценки рисков дренажа кислых вод, что позволяет прогнозировать риски более дифференцированно.

Зарубежный опыт интерпретации результатов определения потенциала нейтрализации отходов

В зарубежной практике [13] потенциал нейтрализации в отходах оценивают по следующим критериям. Если величина потенциала нейтрализации (Net NP) менее (-20), то существует вероятность того, что отходы при контакте с водой могут образовывать кислые стоки. Такое значение Net NP свидетельствует о нехватке в той или иной степени щелочных веществ для нейтрализации кислоты в отходах и существовании вероятности, что образующиеся стоки обладают той или иной степенью кислотности. Если значение Net NP более (+20) — это указывает на то, что образующаяся кислота полностью нейтрализуется и вероятность образования кислых стоков, может быть либо незначительной, либо полностью отсутствовать, либо могут образовываться щелочные стоки.

Если значение Net NP составляет от (-20) до (+20), прогнозирование рисков образования кислых стоков является наиболее сложным. В этом случае рекомендуют [7] использовать дополнительный критерий — отношение общего потенциала нейтрализации к кислотному (NP/AP). Как показывает опыт многочисленных исследований [14], существуют следующие зависимости:

- если отношение (NP/AP) превышает 3:1 — существует небольшой риск образования дренажа кислых стоков;
- если отношение (NP/AP) составляет от 1:1 до 3:1 — вероятность образования кислых стоков находится в зоне

неопределенности. В этом случае обычно рекомендуют проведение дополнительных кинетических тестов;

- если отношение (NP/AP) менее 1:1 — имеется наибольший риск образования дренажа кислых стоков.

В работах [15—17] обсуждаются вопросы, связанные с сопоставлением результатов определения потенциала нейтрализации в отходах. Авторы показывают, что результаты статических тестов определения потенциала нейтрализации отходов (метод А. Sobek (ABA) [9] или его модификации [10, 11]), в большинстве случаев согласуются с результатами кинетических тестов и данными по реальной кислотности промышленных стоков.

Анализ и интерпретация результатов определения потенциала нейтрализации отходов добычи, переработки и сжигания углей

В табл. 1 и 2 представлены результаты экспериментальных исследований по определению потенциала нейтрализации в отходах добычи, переработки и сжигания углей [12], а также добавлены дополнительные результаты испытаний других отходов добычи и сжигания углей. В таблицах приведены значения потенциалов нейтрализации (NP, AP и Net NP), а также рассчитано отношение общего потенциала нейтрализации и кислотного (NP/AP) для отходов, в которых Net NP находится в диапазоне значений от (–20) до (+20).

Сопоставление отношения (NP/AP) с показателем потенциала нейтрализации (Net NP), показало, что для большинства отходов со значением Net NP, находящемся в диапазоне значений от (–20) до (+20), существует риск дренажа кислых стоков. Следует отметить, что для отходов, содержание серы в которых ниже предела определения (н.п.о.), т.е. прак-

тически равно нулю, отношение общего и кислотного потенциала нейтрализации отхода (NP/AP), по известным причинам, не определяют. В таких случаях рекомендуют проводить оценку только по величине потенциала нейтрализации (Net NP). При попадании значения потенциала нейтрализации (Net NP) в диапазон от (–20) до (+20), вероятность образования кислых стоков для таких отходов отсутствует.

В соответствии с классическим методом статического теста А. Sobek [9] все потенциалы нейтрализации рассчитывают в тоннах эквивалента на 1000 т отхода в пересчете на CaCO_3 . Расчет на CaCO_3 предполагает, что все элементы, ответственные за степень кислотности (основности) стоков, входят только в состав карбонатов. При этом не учитывается, что за нейтрализацию отвечают не только катионы кальция, но и катионы других щелочных и щелочноземельных элементов. Это вносит существенную, хотя и не критичную ошибку в расчеты. Но расчет в предположении, что все соли являются карбонатами, эту ошибку значительно увеличивают.

В связи с этим, была предложена несколько иная оценка рисков кислотного дренажа отходов. В частности, мы предложили оценивать значение потенциала нейтрализации не в тоннах эквивалента CaCO_3 на 1000 т отхода, а рассчитывать его в тоннах эквивалента кальция (Ca^{+2}) на 1000 т отхода. Пересчет потенциала нейтрализации на ион Ca^{+2} исключает ошибку, связанную с условным предположением, что и все анионы в солях имеют одинаковую природу.

При таком пересчете мы получаем значения величин, разброс которых значительно сужен (по сравнению с величинами, рассчитанными на CaCO_3), что облегчает разбиение диапазона этих значений на поддиапазоны при дифференцировании отходов по рискам.

Таблица 1

Результаты определения потенциала нейтрализации для отходов добычи углей различных месторождений Канско-Ачинского угольного бассейна (КАБ)

Results of determining the neutralization potential for coal mining wastes of various Kansk-Achinsk deposits

№ пробы	Содержание серы (S) в пробе на сухое состояние, %	рН пасты	Общий потенциал нейтрализации (NP)		Кислотный потенциал нейтрализации (AP)		Потенциал нейтрализации (Net NP)		Отношение NP:AP	Оценка величины отклонения NP:AP	Заключение о риске образования кислотных или щелочных дренажных вод
			в тоннах эквивалента СаСО ₃ на 1000 т	в тоннах эквивалента Са на 1000 т	в тоннах эквивалента Са на 1000 т	в тоннах эквивалента Са на 1000 т	в тоннах эквивалента Са на 1000 т	в тоннах эквивалента Са на 1000 т			
1	н.п.о.	7,0	2,7	1,1	—	—	2,7	1,1	—	—	Отсутствие риска дренажа кислотных стоков
2	0,18	6,0	10,2	4,1	5,6	2,3	4,6	1,8	1,8	от 1 до 3	Зона неопределенности
3	0,59	7,0	7,4	3,0	18,4	7,4	-11,0	-4,4	0,4	<1	Риск дренажа кислотных стоков
4	1,29	7,0	5,8	2,3	40,3	16,1	-34,6	-13,8	—	—	Значительный риск дренажа кислотных стоков
5	0,03	6,0	0,3	0,1	0,9	0,4	-0,6	-0,2	0,3	<1	Риск дренажа кислотных стоков
6	0,01	6,0	8,7	3,5	0,3	0,1	8,4	3,4	27,9	>3	Незначительный риск дренажа кислотных стоков
7	0,07	7,0	5,4	2,2	2,2	0,9	3,2	1,3	2,5	от 1 до 3	Зона неопределенности
8	0,04	7,0	3,4	1,4	1,3	0,5	2,2	0,9	2,7	от 1 до 3	Зона неопределенности
9	0,02	7,0	104,7	41,9	0,6	0,3	104,1	41,6	—	—	Риск образования щелочных стоков
10	н.п.о.	6,0	10,8	4,3	—	—	10,8	4,3	—	—	Отсутствие риска дренажа кислотных стоков
11	0,01	7,0	7,2	2,9	0,3	0,1	6,9	2,8	23,0	>3	Незначительный риск дренажа кислотных стоков
12	н.п.о.	6,0	9,3	3,7	—	—	9,3	3,7	—	—	Отсутствие риска дренажа кислотных стоков
13	0,01	7,0	14,1	5,6	0,3	0,1	13,8	5,5	45,1	>3	Незначительный риск дренажа кислотных стоков

14	0,03	7,0	60,8	24,3	0,9	0,4	59,9	24,0	—	—	Отсутствие риска дренажа кислотных стоков
15	0,01	6,0	10,3	4,1	0,3	0,1	9,9	4,0	33,1	>3	Незначительный риск дренажа кислотных стоков
16	0,04	7,0	67,7	27,1	1,3	0,5	66,4	26,6	—	—	Отсутствие риска дренажа кислотных стоков
17	0,07	7,0	156,1	62,4	2,2	0,9	153,9	61,5	—	—	Риск образования щелочных стоков
18	0,04	6,0	9,3	3,7	1,3	0,5	8,1	3,2	7,4	>3	Незначительный риск дренажа кислотных стоков
19	0,03	7,0	16,4	6,6	0,9	0,4	15,5	6,2	17,5	>3	Незначительный риск дренажа кислотных стоков
20	0,06	7,0	31,8	12,7	1,9	0,8	29,9	12,0	—	—	Отсутствие риска дренажа кислотных стоков
21	н.п.о.	6,0	2,0	0,8	—	—	2,0	0,8	—	—	Отсутствие риска дренажа кислотных стоков
22	0,04	7,0	29,9	11,9	1,3	0,5	28,6	11,4	—	—	Отсутствие риска дренажа кислотных стоков
23	0,05	7,0	18,2	7,3	1,6	0,6	16,7	6,7	11,7	>3	Незначительный риск дренажа кислотных стоков
24	0,06	7,0	26,3	10,5	1,9	0,8	24,4	9,8	—	—	Отсутствие риска дренажа кислотных стоков
25	0,07	7,0	4,5	1,8	2,2	0,9	2,3	0,9	2,0	от 1 до 3	Зона неопределенности
26	0,05	7,0	8,2	3,3	1,6	0,6	6,6	2,6	5,2	>3	Незначительный риск дренажа кислотных стоков
27	0,05	7,0	50,4	20,2	1,6	0,6	48,8	19,5	—	—	Отсутствие риска дренажа кислотных стоков
28	0,05	7,0	24,5	9,8	1,6	0,6	23,0	9,2	—	—	Отсутствие риска дренажа кислотных стоков
29	0,03	7,0	128,2	51,3	0,9	0,4	127,3	50,9	—	—	Риск образования щелочных стоков

Примечание: н.п.о. — ниже предела определения

Таблица 2

Результаты определения потенциала нейтрализации для отходов сжигания углей различных месторождений Канско-Ачинского угольного бассейна

Results of determining the neutralization potential for coal combustion wastes of various Kansk — Achinsk deposits

№ пробы	Содержание серы (S) в пробе на сухое состояние, %	pH пасты	Общий потенциал нейтрализации (NP)		Кислотный потенциал нейтрализации (AP)		Потенциал нейтрализации (Net NP)		Отношение NP:AP	Оценка величины отложения NP:AP	Заключение о риске образования кислотных или щелочных дренажных вод
			в тоннах эквивалента CaCO ₃ на 1000 т	в тоннах эквивалента Ca на 1000 т	в тоннах эквивалента Ca на 1000 т	в тоннах эквивалента CaCO ₃ на 1000 т	в тоннах эквивалента Ca на 1000 т	в тоннах эквивалента Ca на 1000 т			
Золошлаковые отходы от сжигания углей											
1	0,28	7,0	155,4	62,2	8,8	3,5	146,7	58,7	—	—	Риск образования щелочных стоков
2	0,95	12,0	347,7	139,1	29,7	11,9	318,1	127,2	—	—	Риск образования щелочных стоков
3	0,17	5,0	283,0	113,2	5,3	2,1	277,7	111,1	—	—	Риск образования щелочных стоков
4	0,20	12,0	342,9	137,1	6,3	2,5	336,6	134,6	—	—	Риск образования щелочных стоков
5	0,25	7,0	26,6	10,6	7,8	3,1	18,7	7,5	3,4	>3	Незначительный риск дренажа кислых стоков
6	0,11	12,0	56,1	22,5	3,4	1,4	52,7	21,1	—	—	Отсутствие риска дренажа кислых стоков

Шлаки от сжигания углей												
7	1,14	12,0	87,1	34,8	35,6	14,3	51,4	20,6	—	—	—	Отсутствие риска дренажа кислотных стоков
8	0,49	6,0	23,2	9,3	15,3	6,1	7,9	3,2	1,5	от 1 до 3	Зона неопределенности	
9	0,21	7,0	28,6	11,5	6,6	2,6	22,1	8,8	—	—	Отсутствие риска дренажа кислотных стоков	
10	0,30	6,0	21,7	8,7	9,4	3,8	12,4	4,9	2,3	от 1 до 3	Зона неопределенности	
11	0,34	9,0	33,7	13,5	10,6	4,3	23,1	9,2	—	—	Отсутствие риска дренажа кислотных стоков	
12	0,11	11,0	24,3	9,7	3,4	1,4	20,9	8,4	—	—	Отсутствие риска дренажа кислотных стоков	
Золы уноса от сжигания углей												
13	3,16	12,0	852,7	341,1	98,8	39,5	753,9	301,6	—	—	Риск образования щелочных стоков	
14	1,52	12,0	576,3	230,5	47,5	19,0	528,8	211,5	—	—	Риск образования щелочных стоков	
15	1,35	12,0	784,5	313,8	42,2	16,9	742,3	296,9	—	—	Риск образования щелочных стоков	
16	0,40	12,0	33,3	13,3	12,5	5,0	20,8	8,3	—	—	Отсутствие риска дренажа кислотных стоков	
17	0,30	9,0	33,3	13,3	11,6	4,6	21,7	8,7	—	—	Отсутствие риска дренажа кислотных стоков	
18	0,19	12,0	81,6	32,6	5,9	2,4	75,6	30,2	—	—	Отсутствие риска дренажа кислотных стоков	
19	0,46	11,0	33,6	13,4	14,4	5,8	19,2	7,7	2,3	от 1 до 3	Зона неопределенности	
20	0,37	6,0	101,2	40,5	11,6	4,6	89,6	35,8	—	—	Отсутствие риска дренажа кислотных стоков	
21	0,79	8,0	10,8	4,3	24,7	9,9	-13,9	-5,5	0,4	<1	Риск дренажа кислотных стоков	

В табл. 1 и 2 приведены потенциалы нейтрализации, пересчитанные на эквивалент иона Ca^{+2} . Все полученные значения потенциала нейтрализации (Net NP) укладываются в диапазон от (-13,8) до (+61,5) для отходов добычи углей (табл. 1) и от (-5,5) до (+301,6) для отходов сжигания углей (табл. 2).

Проанализировав весь диапазон значений потенциалов нейтрализации для исследованных нами отходов в тоннах эквивалента кальция (Ca^{+2}) на 1000 т отхода (табл. 1, 2), стало возможным разбить его на ряд поддиапазонов, каждому из которых соответствуют риски образования кислого или щелочного дренажа (табл. 3).

Для диапазона Net NP (-8) – (+8) также как и в международной практике введены дополнительные поддиапазоны по значениям отношения NP/AP. Но нами предложены другие их обозначения:

- отношение NP/AP менее 1:1 записывать как $\text{NP/AP} < 1$;
- отношение NP/AP от 1:1 до 3:1 записывать как $1 < \text{NP/AP} < 3$;
- отношение NP/AP более 3:1 записывать как $\text{NP/AP} > 3$.

Следует отметить, что классический расчет потенциала нейтрализации (Net NP) на карбонат кальция не дает воз-

можности сопоставить полученный потенциал нейтрализации с результатами определения элементного состава отходов. А такое сопоставление интересно с точки зрения проверки достоверности результатов, полученных приведенным выше методом в сравнении с суммой кислых и щелочных элементов в отходах. При этом необходимо учитывать, что в процессах дренажа вод в местах складирования отходов мы имеем дело, как правило, с водорастворимыми формами элементов.

Рассмотрим возможность такого сопоставления на примере двух проб вскрышных пород. Для удобства потенциалы нейтрализации из единиц т эквивалента (Ca^{+2}) на 1000 т отхода пересчитаны в %. Содержание элементов в общей массе всех водорастворимых форм [18 – 20], создающих основность дренажных вод (Ca, Ba, Mg, Fe, Zn) и их кислотность (P, S) также рассчитаны в %.

Данные, иллюстрирующие сопоставимость потенциалов нейтрализации отходов с процентным содержанием каждого элемента в общей массе водорастворимых форм в них, сведены в табл. 4.

Из табл. 4 видно, что для пробы А сумма содержаний элементов (в общей массе всех водорастворимых форм), опре-

Таблица 3

Оценка степени риска дренажа кислых или щелочных вод
Assessment of the degree of risk of drainage of acidic or alkaline waters

Значение потенциала нейтрализации в т эквивалент кальция (Ca) на 1000 т отхода	Заключение о риске образования кислотных или щелочных дренажных вод
Менее (-8) включительно	Значительный риск дренажа кислых стоков
Более (-8) до (+8) (включительно)	- при $\text{NP/AP} < 1$: риск дренажа кислых стоков - при $1 < \text{NP/AP} < 3$: зона неопределенности* - при $\text{NP/AP} > 3$: незначительный риск дренажа кислых стоков
Более (+8) до (+40)	Отсутствие риска дренажа кислых стоков
Более (+40)	Риск дренажа щелочных стоков
Примечание: * при $1 < \text{NP/AP} < 3$ вероятность образования кислых стоков находится в зоне неопределенности. В этом случае рекомендуется проведение дополнительных кинетических тестов.	

Таблица 4

Состав отходов добычи углей и их потенциалы нейтрализации
Composition of coal mining wastes and their neutralization potentials

Проба	Потенциалы нейтрализации, %			Содержание элементов в общей массе их водорастворимых форм в отходах добычи углей, %						
	NP	AP	Net NP	Ca	Ba	Mg	Fe	Zn	P	S
A	0,58	4,03	-3,46	7,25	0,012	2,19	0,35	0,008	0,17	14,8
B	12,82	0,09	12,73	16,15	0,12	3,26	0,59	0,031	0,013	2,66

деляющих щелочность дренажных вод составляет 9,80%, а их кислотность — 14,97%. Эти цифры согласуются с общим выводом по установленным потенциалам нейтрализации, свидетельствующим, что для данного отхода возникает значительный риск дренажа кислых вод, так как кислотообразующих веществ в отходе больше, чем веществ, создающих щелочную среду.

Для пробы В сумма содержаний элементов (в общей массе всех водорастворимых форм), определяющих щелочность дренажных вод составляет 20,12%, а их кислотность — 2,67%. Эти цифры согласуются с общим выводом по установленным потенциалам нейтрализации, свидетельствующим, что для данного отхода отсутствует риск дренажа кислых вод, так как кислотообразующих веществ в отходе гораздо меньше, чем веществ, создающих щелочную среду.

Приведенные расчеты по данным табл. 4 носят ориентировочный характер, т. к. они не могут учесть все факторы образования и взаимодействия веществ и их водорастворимых форм в отходах, а также стехиометрические соотношения такого взаимодействия. Распространение таких оценок на все разнообразие отходов требует дополнительных исследований. Такую оценку целесообразно применять и в том случае, когда отношение NP/AP невозможно рассчитать. Это бывает тогда, когда массовая доля серы в отходе близка нулю или незначительна. Соответственно кислот-

ный потенциал тоже формально близок к нулю, так как рассчитывается по содержанию серы в отходе, однако здесь можно учесть наличие других кислотообразующих элементов (фосфора, галогенов и т.п.).

*Анализ и интерпретация
результатов определения
потенциала нейтрализации
в отходах добычи углей различных
месторождений Канско-Ачинского
бассейна (КАБ)*

В табл. 1 и на рис. 1 — 2 показаны результаты испытаний отходов добычи углей, приведенные в работе [12], а также дана оценка рисков образования кислотных и щелочных дренажных вод из отходов. Вскрышные породы характеризуются различным содержанием общей серы, в диапазоне от 0,01% до 1,29%, а также нейтральным значением показателя «рН пасты» от 6,0 до 7,0 ед. рН. Из рисунков видно, что отходы добычи углей характеризуются различной степенью риска образования не только кислых, но и щелочных стоков. Вскрышные породы № 3, № 4 и № 5 имеют наибольший риск кислотного дренажа. Для отходов № 9, № 17 и № 29 величина потенциала нейтрализации в т эквивалента Ca^{+2} на 1000 т находится в диапазоне от (+41,6) до (+61,5). Такие отходы характеризуются риском образования щелочных стоков.

Для отходов добычи углей № 1, № 10, № 12 и № 21 полученные значения по-

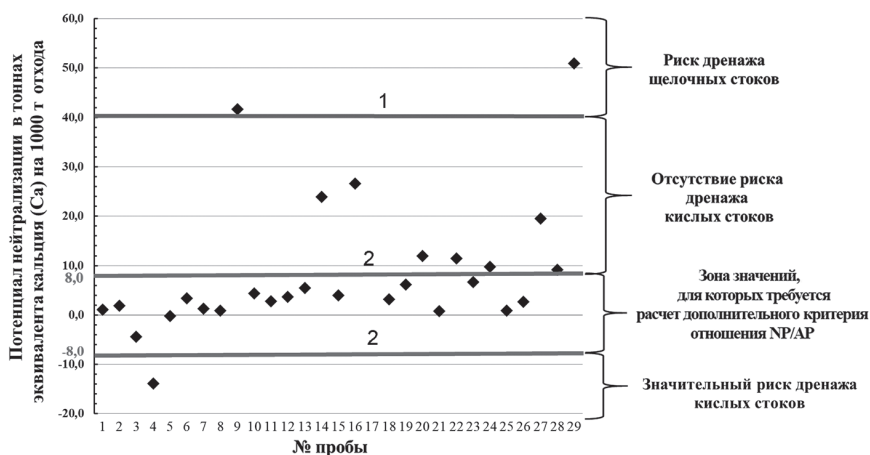


Рис. 1. Результаты оценки рисков образования кислотных и щелочных стоков из отходов добычи углей различных месторождений КАБ

Fig. 1. Results of assessing the risks of acid and alkaline effluents from coal mining wastes of various KAB deposits

тенциала нейтрализации (Net NP), рассчитанные в т эквивалента Ca^{+2} на 1000 т, попадают в диапазон от (-8) до (+8), а кислотный потенциал нейтрализации (AP) здесь равен нулю (в связи с тем, что массовая доля серы в данных отходах близка нулю или ниже предела определения). Соответственно дать оценку по отношению NP/AP в представленных отходах невозможно. Однако, как было отмечено ранее, риск образования кис-

лых стоков из отходов, содержание серы в которых ниже предела определения (н.п.о.), маловероятен.

Оценки рисков образования кислотных дренажных вод из исследованных отходов добычи углей, значения потенциала нейтрализации (Net NP) в которых находится в диапазоне от (-8) до (+8), более подробно показаны на рис. 2. Полученным значениям Net NP, представленным в табл. 1 и сгруппированным по

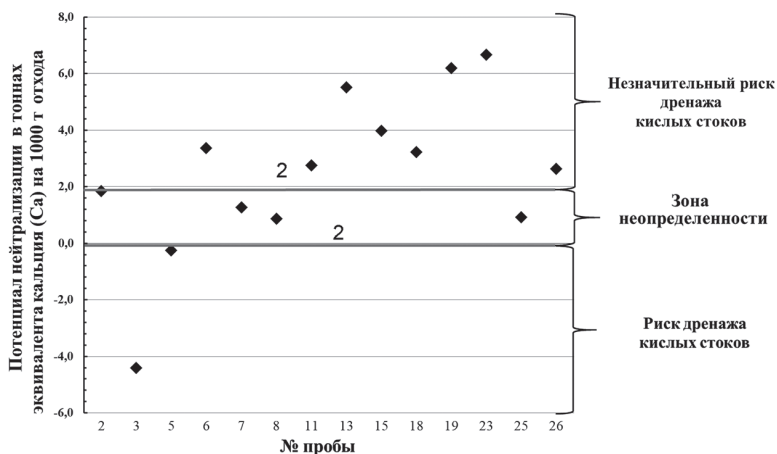


Рис. 2. Результаты оценки рисков образования кислотных и щелочных стоков из отходов добычи углей, в которых Net NP находится в диапазоне значений от (-8) до (+8).

Fig. 2. Results of assessing the risks of acid and alkaline effluents from coal mining wastes with Net NP within the range of (-8) to (+8)

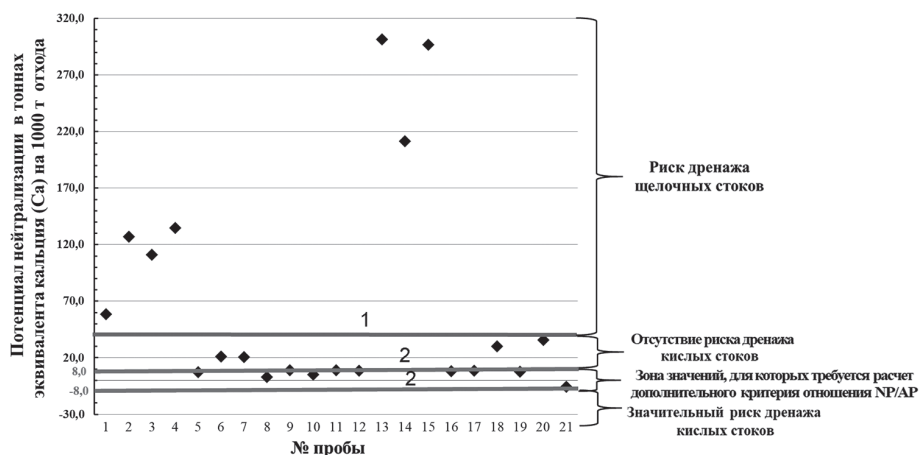


Рис. 3. Результаты оценки рисков образования кислотных и щелочных стоков из отходов сжигания углей различных месторождений КАБ

Fig. 3. Results of risk assessment of acid and alkaline effluents from coal combustion wastes of various KAB deposits

поддиапазоном, можно поставить в соответствие значения отношений NP/AP:

- от (-4,4) до (-0,2) для отходов с отношением — $NP/AP < 1$;
- от (+0,9) до (+1,8) для отходов с отношением — $1 < NP/AP < 3$;
- от (+2,6) до (+6,7) для отходов с отношением — $NP/AP > 3$.

Представленные результаты делают оценку рисков образования кислотных стоков из отходов более наглядной.

Анализ и интерпретация результатов определения потенциала нейтрализации в отходах сжигания углей различных месторождений КАБ

В табл. 2 и на рис. 3–4 показаны результаты испытаний отходов сжигания углей, приведенные в работе [12], а также дана оценка рисков образования кислотных и щелочных дренажных вод из отходов. Зола уноса, шлаки и золо-

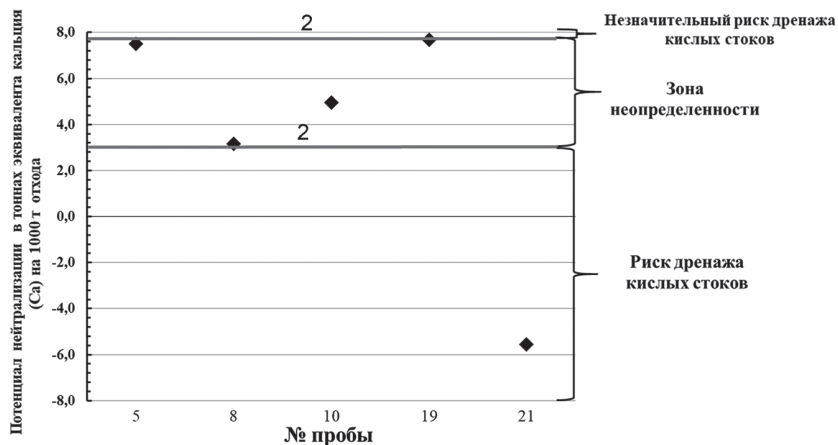


Рис. 4. Результаты оценки рисков образования кислотных и щелочных стоков из отходов сжигания углей, в которых Net NP находится в диапазоне значений от (-8) до (+8).

Fig. 4. Results of assessing the risks of acid and alkaline effluents from coal combustion wastes with Net NP within the range of (-8) to (+8)

шлаковые отходы углей различных месторождений характеризуются содержанием общей серы в диапазоне от 0,11% до 3,16%. Показатель «рН пасты» в отходах находится в пределах от 5,0 до 12,0 ед.

На рис. 3 видно, что отходы сжигания углей составляют более низкую опасность образования кислых стоков и практически все характеризуются отсутствием риска кислотного дренажа, в отличие от отходов добычи углей. Исключение составляют некоторые пробы, значения потенциала нейтрализации в т эквивалента Ca^{+2} на 1000 т которых находятся в диапазоне от (+3,2) до (+7,7). Такие отходы характеризуются незначительным риском образования кислотного дренажа или находятся в зоне неопределенности (рис. 4). Наибольшую опасность образования кислых стоков представляет проба золы от сжигания угля № 21, в которой величина потенциала нейтрализации указывает на риск образования дренажа кислых стоков.

Стоит отметить, что из всех исследованных отходов сжигания углей только золошлаковые отходы и золы уноса имеют наибольший риск образования щелочных стоков (рис. 3). Шлаки от сжигания углей характеризуются отсутствием риска дренажа кислых стоков. Исключение составляют пробы № 8 и № 10, которые находятся в зоне неопределенности (рис. 4).

Выводы

1. Проведен анализ зарубежного опыта интерпретации результатов определения потенциала нейтрализации отходов. Показано, что в настоящее время нет единых подходов для таких интерпретаций результатов, что является причиной неоднозначных оценок степени рисков образования кислых стоков при складировании или использовании отходов добычи и переработки углей, в том числе, для целей рекультивации.

2. По результатам экспериментальных исследований определения потенциала нейтрализации в отходах, выбраны оптимальные критерии оценки рисков образования кислых дренажных вод, которые применяются в зарубежной практике, а также предложены рекомендации по расчету потенциалов нейтрализации и форме предоставления данных:

- значение потенциала нейтрализации рассчитывают в тоннах эквивалента кальция (Ca^{+2}) на 1000 т отхода;
- весь диапазон значений потенциалов нейтрализации разбит на поддиапазоны, которым соответствуют различные риски образования кислых и щелочных стоков;
- изменены обозначения отношения NP/AP для диапазона значений Net NP (-8) – (+8).

3. Для оценки рисков образования кислых или щелочных стоков при контакте отходов с водой, особенно для отходов, потенциал нейтрализации которых лежит в диапазоне Net NP (-8) – (+8), целесообразно привлекать дополнительную информацию об элементном составе этих отходов, в том числе их водорастворимых форм. Окончательное решение о рисках образования кислых и щелочных стоков должно быть основано на анализе всей совокупности характеристик этих отходов.

4. Приведены примеры интерпретации результатов определения потенциалов нейтрализации отходов добычи и сжигания углей разных месторождений Канско-Ачинского угольного бассейна. Показано, что отходы добычи различаются по степени опасности образования не только кислых, но и щелочных стоков. Продукты сжигания углей – золы уноса, шлаки и золошлаковые отходы, проявляют более низкую опасность образования кислых стоков, в отличие от отходов добычи углей. Такие отходы в основном характеризуются риском образования щелочных дренажных вод.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шпирт М. Я., Артемьев В. Б., Силютин С. А. Использование твердых отходов добычи и переработки углей. — М.: Горное дело ООО «Киммерийский центр», 2013. — 432 р.
2. Силютин С. А., Эпштейн С. А. Отходы добычи и переработки углей. Методические подходы к оценке их экологической безопасности и направлений использования. Ч. 1. Характеристика твердых отходов добычи и переработки углей в зарубежных странах // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2020. — № 4. — С. 5—19. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-5-0-5-19.
3. Журавлева Н. В., Иваныкина О. В., Исмагилов З. Р. Изучение распределения токсичных элементов в золошлаковых отходах предприятий топливно-энергетического комплекса Кемеровской области // Химия в интересах устойчивого развития. — 2013. — Т. 21. — С. 479—486.
4. Haywood L. C., de Wet B., de Lange W., Oelofse S. Legislative challenges hindering mine waste being reused and repurposed in South Africa // The Extractive Industries and Society. 2019. Vol. 6. No. 4. Pp. 1079—1085. DOI: 10.1016/j.exis.2019.10.008
5. Силютин С. А., Эпштейн С. А., Гущина Т. О. Отходы добычи и переработки углей. Методические подходы к оценке их экологической безопасности и направлений использования. Ч. 2. Методы определения мобильных форм макро- и микроэлементов в отходах добычи, переработки и сжигания углей // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2020. — № 5. — С. 5—16. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-5-0-5-16.
6. Журавлева Н. В., Потокина Р. Р., Исмагилов З. Р., Нагайцева Н. В. Изучение распределения макро- и микроэлементов в отходах углеобогащения // Химия в интересах устойчивого развития. — 2016. — Т. 24. — № 6. — С. 761—767. DOI: 10.15372/KhUR20160606.
7. Price W.A. Prediction manual for drainage chemistry from sulphidic geologic materials, MEND Report 1.20.1. 2009. 579 p.
8. Dold B. Acid rock drainage prediction. A critical review // Journal of Geochemical Exploration. 2017. Vol. 172. Pp. 120—132. DOI: 10.1016/j.gexplo.2016.09.014.
9. Sobek A., Schuller W., Freeman J., Smith R. Field and laboratory methods applicable to overburdens and minesoils. Environmental Protection Agency, Washington, 1978.
10. Lapakko K.A. Evaluation of neutralization potential determinations for metal mine waste and a proposed alternative / International land reclamation and mine drainage conference and third international conference on the abatement of acidic drainage. Pittsburgh PA. 1994. Pp. 129—137.
11. Lapakko K.A. Characterization and static testing of ten gold mine tailings / American Society for Surface Mining and Reclamation meeting. Duluth, Minnesota, 1996. Pp. 370—384.
12. Гущина Т. О., Соколовская Е. Е., Хао Цзе, Эпштейн С. А. Разработка отечественной методики оценки рисков образования кислых стоков при складировании и использовании отходов добычи и переработки углей // Горный журнал. — 2021. — № 2. — [В печати].
13. Acid mine drainage prediction. Technical Document. U.S. Environmental Protection Agency. Washington, 1994.
14. Bouzahzah H., Benzaazoua M., Plante B., Bussiere B. A quantitative approach for the estimation of the «fizz rating» parameter in the acid-base accounting tests. A new adaptations of the Sobek test // Journal of Geochemical Exploration. 2015. Vol. 153. Pp. 53—65. DOI: 10.1016/j.gexplo.2015.03.003.
15. Elghali A., Benzaazoua M., Bouzahzah H., Bussiere B., Villarraga-Gómez H. Determination of the available acid-generating potential of waste rock, part I: Mineralogical approach // Applied Geochemistry. 2018. Vol. 99. Pp. 31—41. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2018.10.021.
16. Plante B., Bussiere B., Benzaazoua M. Static tests response on 5 Canadian hard rock mine tailings with low net acid-generating potentials // Journal of Geochemical Exploration. 2012. Vol. 114. Pp. 57—69. DOI: 10.1016/j.gexplo.2011.12.003.

17. Elghali A., Benzaazoua M., Bussière B., Genty T. Spatial mapping of acidity and geochemical properties of oxidized tailings within the former Eagle/Telbel mine site // *Minerals*. 2019. Vol. 9. Pp. 1 – 23. DOI: 10.3390/min9030180.

18. ГОСТ Р 58914-2020 Топливо твердое минеральное. Определение выхода и состава водорастворимых форм веществ. – М., 2021.

19. Фоменко Н.А. Применение окисленных бурых углей для повышения экологической безопасности утилизации золошлаковых отходов. Диссертация на соискание степени канд. техн. наук. – М.: НИТУ «МИСиС», 2019. , 110 р.

20. Гущина Т.О. Силютин С.А., Соколовская Е.Е. Эпштейн С.А. Отходы добычи и переработки углей. Методические подходы к оценке их экологической безопасности и направлений использования. Часть 3. Обоснование и разработка методики определения содержания водорастворимых форм макро- и микроэлементов в отходах добычи, переработки и сжигания углей // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. – 2020. – № 8. – С. 145 – 162. DOI: 0.25018/0236-1493-2020-8-0-145-162. **МИАБ**

REFERENCES

1. Shpirt M. Ya., Artemyev V. B., Silyutin S. A. *Ispol'zovanie tverdykh otkhodov dobychi i pererabotki ugley* [Use of solid waste from coal mining and processing], Moscow, Gornoe delo OOO «Kimmeriyskiy tsentr», 2013, 432 p.

2. Silyutin S. A., Epshtein S. A. Wastes from coal mining and processing. Methodological approaches to the assessment of their ecological safety and directions for use. Part 1. Characterization of solid wastes from coal mining and processing in foreign countries. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020, no 4, pp. 5 – 19. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-5-0-5-19.

3. Zhuravleva N. V., Ivanykina O. V., Ismagilov Z. R. Study of the distribution of toxic elements in ash and slag wastes of enterprises of the fuel and energy complex of the Kemerovo region. *Khimiya v interesakh ustoychivogo razvitiya*. 2013, vol. 21, pp. 479 – 486. [In Russ].

4. Haywood L. C., de Wet B., de Lange W., Oelofse S. Legislative challenges hindering mine waste being reused and repurposed in South Africa. *The Extractive Industries and Society*. 2019. Vol. 6. No. 4. Pp. 1079 – 1085. DOI: 10.1016/j.exis.2019.10.008

5. Silyutin S. A., Epshtein S. A., Gushchina T. O. Wastes from coal mining and processing. Methodological approaches to the assessment of their ecological safety and directions for use. Part 2. Methods for the determination of mobile forms of macroand microelements in the wastes of coal mining, processing and combustion. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020, no 5, pp. 5 – 16. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-5-0-5-16.

6. Zhuravleva N. V., Potokina R. R., Ismagilov Z. R., Nagaytseva N. V. Study of the distribution of macroand micrelements in coal beneficiation wastes. *Khimiya v interesakh ustoychivogo razvitiya*. 2016, vol. 24, no 6, pp. 761 – 767. [In Russ]. DOI: 10.15372/KhUR20160606.

7. Price W. A. Prediction manual for drainage chemistry from sulphidic geologic materials, MEND Report 1.20.1. 2009. 579 p.

8. Dold B. Acid rock drainage prediction. A critical review. *Journal of Geochemical Exploration*. 2017. Vol. 172. Pp. 120 – 132. DOI: 10.1016/j.gexplo.2016.09.014.

9. Sobek A., Schuller W., Freeman J., Smith R. *Field and laboratory methods applicable to overburdens and minesoils*. Environmental Protection Agency, Washington, 1978.

10. Lapakko K. A. Evaluation of neutralization potential determinations for metal mine waste and a proposed alternative. *International land reclamation and mine drainage conference and third international conference on the abatement of acidic drainage*. Pittsburgh PA. 1994. Pp. 129 – 137.

11. Lapakko K. A. Characterization and static testing of ten gold mine tailings. *American Society for Surface Mining and Reclamation meeting*. Duluth, Minnesota, 1996. Pp. 370 – 384.

12. Gushchina T. O., Sokolovskaya E. E., Hao Tse., Epshtein S. A. Development of a domestic methodology for assessing the risks of acid wastewater formation during storage and use of wastes from mining and processing of coals. *Gornyi Zhurnal*. 2021, no 2. [In press]. [In Russ].

13. *Acid mine drainage prediction. Technical Document.* U.S. Environmental Protection Agency. Washington, 1994.

14. Bouzahzah H., Benzaazoua M., Plante B., Bussiere B. A quantitative approach for the estimation of the «fizz rating» parameter in the acid-base accounting tests. A new adaptations of the Sobek test. *Journal of Geochemical Exploration.* 2015. Vol 153. Pp. 53 – 65. DOI: 10.1016/j.gexplo.2015.03.003.

15. Elghali A., Benzaazoua M., Bouzahzah H., Bussiere B., Villarraga-Gómez H. Determination of the available acid-generating potential of waste rock, part I: Mineralogical approach. *Applied Geochemistry.* 2018. Vol. 99. Pp. 31 – 41. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2018.10.021.

16. Plante B., Bussiere B., Benzaazoua M. Static tests response on 5 Canadian hard rock mine tailings with low net acid-generating potentials. *Journal of Geochemical Exploration.* 2012. Vol. 114. Pp. 57 – 69. DOI: 10.1016/j.gexplo.2011.12.003.

17. Elghali A., Benzaazoua M., Bussière B., Genty T. Spatial mapping of acidity and geochemical properties of oxidized tailings within the former Eagle/Telbel mine site. *Minerals.* 2019. Vol. 9. Pp. 1 – 23. DOI: 10.3390/min9030180.

18. *Toplivo tverdoe mineral'noe. Opredelenie vykhoda i sostava vodorastvorimykh form veshchestv. GOST R 58914-2020* [Solid mineral fuel. Determination of water-soluble matter content and composition. State Standart R 58914-2020], Moscow, 2021. [In Russ].

19. Fomenko N.A. *Primenenie okislennykh burykh ugley dlya povysheniya ekologicheskoy bezopasnosti utilizatsii zoloshlakovykh otkhodov* [The use of oxidized brown coals to improve the environmental safety of ash and slag waste disposal], Candidate's thesis, Moscow, NITU «MISiS», 2019, 110 p.

20. Gushchina T. O., Silyutin S. A., Sokolovskaya E. E. Epshtein S. A. Wastes from coal mining and processing. Methodological approaches to the assessment of their ecological safety and directions for use. Part 3. Development and validation of test procedure to determine macroand micro-elements contents in coal mining, processing and combustion wastes. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020, no 8, pp. 145 – 162. [In Russ]. DOI: 0.25018/0236-1493-2020-8-0-145-162.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Гушчина Татьяна Олеговна¹ – аспирант, инженер, e-mail: gushchina.t.o@gmail.com,

Соколовская Елена Ефимовна¹ – ведущий инженер, e-mail: sesokolovska@mail.ru,

Эпштейн Светлана Абрамовна¹ – д-р техн. наук, зав. лабораторией,

e-mail: apshtein@yandex.ru,

Фоменко Наталья Александровна¹ – канд. техн. наук,

ведущий инженер, e-mail: natali92@mail.ru,

¹ Научно-учебная испытательная лаборатория «Физико-химии углей»,

НИТУ «МИСиС».

Для контактов: Эпштейн С.А., e-mail: apshtein@yandex.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

T.O. Gushchina¹, Graduate Student, Engineer, e-mail: gushchina.t.o@gmail.com,

E.E. Sokolovskaya¹, Leading Engineer, e-mail: sesokolovska@mail.ru,

S.A. Epshtein¹, Dr. Sci. (Eng.), Head of Laboratory, e-mail: apshtein@yandex.ru,

N.A. Fomenko¹, Cand. Sci. (Eng.), Leading Engineer, e-mail: natali92@mail.ru,

¹ Scientific and Educational Testing Laboratory «Physics and Chemistry of Coals», National University of Science and Technology «MISiS», 119049, Moscow, Russia.

Corresponding author: S.A. Epshtein, e-mail: apshtein@yandex.ru.

Получена редакцией 12.12.2020; получена после рецензии 18.02.2021; принята к печати 10.03.2021.

Received by the editors 12.12.2020; received after the review 18.02.2021; accepted for printing 10.03.2021.