УДК 504.55.054:622(470.6) DOI: 10.21440/0536-1028-2021-3-13-27

Исследование и разработка составов твердеющей смеси на основе нетрадиционных отходов производства

Голик В. И.[1], Разоренов Ю. И.[2], Вагин В. С.[2], Ляшенко В. И.[3]*

[1] Северо-Кавказский государственный технологический университет, г. Владикавказ, Россия

[2] Южно-Российский государственный политехнический университет, г. Новочеркасск, Россия

[3] Украинский научно-исследовательский и проектно-изыскательский институт промышленной технологии, г. Желтые Воды, Украина

e-mail: vilyashenko2017@gmail.com

Реферат

Актуальность. *Одним из наиболее распространенных отходов горного производства является фосфогипс – продукт химической переработки апатитов. Утилизация фосфогипса пока не имеет широкого распространения, поэтому ее стоимость невелика. Для определения технологической возможности и экономической целесообразности применения фосфогипсов, шламов и доломитов в качестве вяжущих при конверсии технологий добычи руд выполнены комплексные исследования.*

Цель исследований *– разработка составов твердеющей смеси на основе нетрадиционных отходов производства, определение технологической возможности и экономической целесообразности применения фосфогипсов, шламов, доломитов и других доступных малоактивных минералов в качестве заменителя дорогостоящего и относительно дефицитного вяжущего.*

Методология исследования. *Исследуются исходные данные отходов, обладающих вяжущими свойствами. Эффективность их добавки определяется по прочности изготовленных в лабораторных условиях контрольных образцов твердеющих закладочных смесей. На основании выполненных исследований создается банк данных для практического использования результатов в развитии горного производства.*

Результаты. *Получены составы твердеющих смесей на основе нетрадиционных отходов производства, включающих хвосты гидрометаллургического и обогатительного переделов, топливных шлаков, низкосортных песков, золы тепловых электростанций (ТЭС), химического производства. Рекомендован оптимальный состав смеси на 1 м^3: хвосты обогащения – 600–750 кг; зола ТЭС – 180–220 кг; цементная пыль – 250–315 кг; цемент – 35–40 кг; вода затворения – 450–515 л при подвижности смеси согласно показателям прибора ПГР (конуса СтройЦНИЛа) около 14 см. Для обеспечения радиационной безопасности твердеющей смеси на основе нетрадиционных отходов производства рекомендовано учитывать не только показатели их химического и физико-механического составов, но и величину эффективной активности природных радионуклидов.*

Выводы. *Установлено, что прочность смесей, содержащих гипс, увеличивается в 1,5–2,0 раза и при сроке твердения 3, 6 и 12 мес составляет соответственно 3,1; 5,7 и 7,6 МПа. Показано, что составы с расходом вяжущего 450 кг на 1 м^3 при соотношении цемент : шлак 1 : 2 обеспечивают прочность от 2,8 до 4,9 МПа через 28 дней. Содержание отмучиваемых частиц низкосортных песков достигает 20 % и более. Классы с удельной поверхностью 28,4 м^2/кг относятся к группе мелкого песка, а с удельной поверхностью 27,7 м^2/кг – к средней группе. Прочность составов в возрасте 28 дней достигает 0,5 МПа, 90 дней – 0,9 МПа в зависимости от расхода цемента. Обосновано, что вяжущие, приготовленные на основе фторгипсов, фосфогипсов и белитовых шламов путем совместного помола гранулированного доменного шлака с феррохромовым шлаком и фосфогипсом до 70 %, крупностью 0,08 мм обеспечивают прочность гипсового вяжущего до 3,0 МПа с расходом 450 кг на 1 м^3 смеси.*

Ключевые слова: *отходы производства; твердеющая смесь; вяжущее; зола ТЭС; золошлак; цемент; фторгипс; фосфогипс; инертные заполнители; белитовые шламы; природные радионуклиды.*

В создании, совершенствовании и внедрении научных разработок принимали участие специалисты Южно-Российского государственного политехнического университета, г. Новочеркасск, Россия; ГП «УкрНИПИИпромтехнологии» и ГП «ВостГОК» (г. Желтые Воды, Украина); Национального технического университета «Днепровская политехника», г. Днепр, Украина и др.

Введение. Для приготовления твердеющей закладки при добыче руд в качестве вяжущего используют преимущественно портландцемент. Он является дефицитным и дорогостоящим материалом, поэтому заменяется местными материалами, например доменными гранулированными шлаками, топливными шлаками и золой, белитовыми и нефелиновыми шламами [1, 2]. Одним из наиболее распространенных отходов является фосфогипс – продукт химической переработки апатитов. Утилизация его пока не имеет широкого распространения, поэтому ее стоимость невелика [3, 4]. Эти обстоятельства благоприятствуют применению фосфогипса на Садонском месторождении (РСО-Алания). Не менее распространены отходы алюминиевого производства – белитовые шламы, также обладающие вяжущими свойствами [5, 6]. Широко используются отходы карбонатов, например доломита, по запасам которого Северная Осетия занимает первое место в мире. Для определения технологической возможности и экономической целесообразности применения фосфогипсов, шламов и доломитов в качестве вяжущих при конверсии технологий добычи руд выполняются комплексные исследования [7, 8].

Таблица 1. Содержание кристаллизационной воды при дегидратации фосфогипса, %
Table 1. The content of water of crystallization under phosphogypsum dehydration, %

Время дегидратации, ч	Температура обработки, °С		
	160	180	200
1,5	9,0	7,3	5,1
2,0	7,1	5,3	3,5
2,5	5,0	3,4	2,0
3,0	3,4	1,6	0,4

В трудах отечественных и зарубежных ученых сформулирована глобальная проблема накопления отходов горного производства вследствие отставания возможностей переработки минерального сырья от возможностей его добычи из недр. Указанная проблема характеризуется продолжающимся накоплением хвостов переработки на земной поверхности. Поэтому проблема поисков альтернативных и комплексных вяжущих на основе нетрадиционных отходов производства – важная научная, практическая и социальная задача, требующая оперативного решения.

Цель работы – исследование и разработка состава твердеющей смеси на основе нетрадиционных отходов производства, определение технологической возможности и экономической целесообразности применения фосфогипсов, шламов и доломитов и других доступных малоактивных минералов в качестве заменителя дорогостоящего и относительно дефицитного вяжущего при конверсии технологий добычи руд.

Методы. Для достижения поставленной цели исследуются исходные и приобретенные в результате переработки свойства отходов, обладающих вяжущими свойствами. Эффективность их добавки определяется по прочности изготовлен-

ных в лабораторных условиях контрольных образцов твердеющих закладочных смесей. На основании выполненных исследований создается банк данных для практического использования результатов в развитии горного производства [9, 10].

Теория вопроса. При использовании фосфогипсов преобладает направление утилизации β-модификации без промывки и нейтрализации исходного материала. Наиболее рациональным способом получения β-модификации полугидрата сульфата кальция является термообработка нейтрализованного фосфогипса

Таблица 2. Свойства вяжущего из фосфогипса
Table 2. Phosphogypsum binder properties

Показатель	Немолотый	Молотый
При водовяжущем отношении 0,8		
Сроки схватывания, мин:		
начало	5	5
конец	8	8
Предел прочности при изгибе, МПа, в возрасте:		
3 ч	1,34	2,10
3 сут	1,43	2,10
28 сут	1,98	4,54
Предел прочности при сжатии, МПа, в возрасте:		
3 ч	1,72	2,88
3 сут	1,96	3,28
28 сут	3,40	6,80
При водовяжущем отношении 1,0		
Сроки схватывания, мин:		
начало	5	5
конец	14	14
Предел прочности при изгибе, МПа, в возрасте:		
3 ч	1,18	1,72
3 сут	1,27	1,82
28 сут	2,15	2,70
Предел прочности при сжатии, МПа, в возрасте:		
3 ч	1,22	2,06
3 сут	1,26	2,22
28 сут	2,88	4,20

при температуре около 200 °С. Обязательной операцией является сушка нейтрализованного фосфогипса до влажности не более 10 %. Это связано с тем, что применяемое оборудование не рассчитано на термообработку материала большей влажности. В лаборатории Садонского свинцово-цинкового комбината (ССЦК), поселок Мизур, РСО-Алания, термообработку фосфогипса проводили при температуре 160–200 °С в течение 1,5–3,0 ч [11, 12].

При обработке двуводного гипса в виде пара выделяется кристаллизационная вода:

$$CaSO_4 \cdot 2H_2O = CaSO_4 \cdot 0,5H_2O + 0,5H_2O \uparrow . \quad (1)$$

При переходе в полугидрат гипс теряет 15 % воды. Так как фосфогипс содержит 90–95 % $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ и 5–10 % примесей, содержание кристаллизационной воды после дегидратации фосфогипса не превышает 6 % (табл. 1).

Для получения вяжущего полугидрата β-модификации на основе фосфогипса оптимальна температура дегидратации 180 °С и время дегидратации 2 ч. Фосфогипс исследовали на лабораторном стенде, представляющем собой цилиндр из нержавеющей стали, в котором смонтирован шнек. Нагрев цилиндра до заданной температуры осуществляется с помощью электронагревателей на наружной поверхности цилиндра. Цилиндр со шнеком помещен в металлический кожух. Пространство между цилиндром и кожухом изолировано. Шнек приводится в движение от электродвигателя через червячный редуктор и ременную передачу [13, 14].

Таблица 3. Влияние добавок на свойства фосфогипса
Table 3. The impact of admixtures on phosphogypsum properties

Состав вяжущего	Водовяжущее отношение	Предел прочности, МПа			
		2 ч		28 сут	
		Изгиб	Сжатие	Изгиб	Сжатие
Добавка хлорида натрия					
Фосфогипс (ФГ)	0,8	1,40	1,87	2,7	5,69
ФГ + 0,5 % NaCl	0,8	2,04	2,58	1,84	2,98
ФГ + 1,0 % NaCl	0,8	1,71	2,54	1,87	2,30
ФГ	1,0	0,87	0,94	1,40	2,19
ФГ + 0,5 % NaCl	1,0	1,41	1,68	1,32	1,67
ФГ + 1,0 % NaCl	1,0	1,42	1,73	1,14	1,48
Добавка сульфата натрия					
ФГ	0,8	14,0	18,7	27,0	56,9
ФГ + 0,5 % Na_2SO_4	0,8	18,0	23,3	25,7	46,2
ФГ + 1,0 % Na_2SO_4	0,8	16,9	20,0	21,1	36,6
ФГ	1,0	8,7	9,4	14,0	21,9
ФГ + 0,5 % Na_2SO_4	1,0	12,6	14,4	19,0	33,2
ФГ + 1,0 % Na_2SO_4	1,0	12,6	15,2	9,70	13,0
Добавка СДБ					
ФГ	0,80	14,0	18,7	27,0	56,9
ФГ + 0,1 % СДБ	0,70	22,5	34,7	37,4	80,6
ФГ + 0,3 % СДБ	0,68	21,6	29,6	39,3	70,3
ФГ + 0,5 % СДБ	0,60	20,3	32,0	34,7	67,0
ФГ	1,00	8,7	9,4	14,0	21,9
ФГ + 0,1 % СДБ	0,72	21,8	32,5	34,7	63,6
ФГ + 0,3 % СДБ	0,70	20,2	32,9	37,7	66,6
ФГ + 0,5 % СДБ	0,68	25,2	41,1	42,7	63,8

Состав твердеющих смесей на основе нетрадиционных отходов производства. Для повышения достоверности опытов исследовали фосфогипс двух химических предприятий с несколько различающимися технологическими свойствами. Фосфогипс загружается через верхний фланец, а разгружается через нижний фланец. Вяжущее из фосфогипса предприятия 1 имеет удельную поверхность 5850 см^2/г и содержание гидратной воды 5,84 %. Изменение удельной поверхности от начальной для двуводного фосфогипса от 3285 до 5850 см^2/г для полугидрата фосфогипса β-модификации объясняется тем, что в процессе появления нового кристаллообразования частицы трутся друг о друга. Для улучшения

свойств вяжущего его мололи в шаровой мельнице в течение 10 мин. Образцы размерами 40 × 40 × 160 мм готовили при водовяжущем отношении 0,8 и 1,0 с твердением в естественных условиях и испытывали на прессе (табл. 2).

При увеличении удельной поверхности до 6300 см^2/г прочность образцов по сравнению с базовым значением увеличилась в 2 раза. В возрасте 28 сут предел прочности при сжатии при отношении 0,8 составил 6,8 МПа против 3,4 МПа, а при отношении 1,0 – 4,2 МПа против 2,9 МПа. Установлено увеличение прочности фосфогипса при добавке фтористых соединений с нейтрализующим компонентом $CaCO_3$ или $Ca(OH)_2$. Кроме фосфогипса были опробованы добавки NaCl, Na_2SO_4 и сульфитно-дрожжевой бражки (СДБ). Добавка NaCl вводилась в количестве 0,5 и 1,0 % от массы фосфогипса [15, 16].

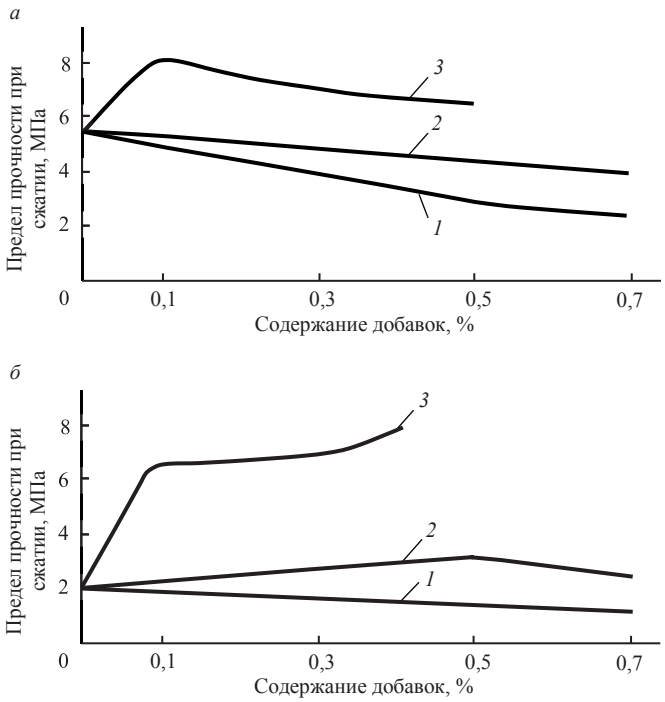

Рис. 1. Зависимость прочности вяжущего из фосфогипса в возрасте 28 сут от добавок:
а – при водовяжущем отношении 0,8; *б* – при водовяжущем отношении 1,0; *1* – NaCl; *2* – Na_2SO_4; *3* – СДБ

Fig. 1. Dependence between the 28 days phosphogypsum binder robustness and the admixture:
а – under the water-binder ratio of 0.8; *б* – under the water-binder ratio of 1.0; *1* – NaCl; *2* – Na_2SO_4; *3* – sulfite-yeast mash

Приготовленные образцы твердели в естественных условиях и испытывались в возрасте 2 ч и 28 сут (табл. 3). При водовяжущем отношении 0,8 предел прочности при сжатии и изгибе образцов, твердеющих в течение 2 ч в естественных условиях, увеличился на 28–45 %, а при водовяжущем отношении 1,0 – на 60–80 %. В дальнейшем прочность не увеличивалась. Более того, образцы с добавкой хлорида натрия в возрасте 28 сут естественного твердения имели прочность в 1,5–2 раза ниже, чем без добавок. Установлено, что изменение водовяжущего отношения с 1,0 до 0,8 и 0,6 увеличивает прочность образцов соответственно в 1, 2 и 4 раза. Это свидетельствует о том, что при применении добавок прочность твердеющей смеси можно увеличить.

Установлено, что добавка NaCl увеличивает прочность смеси в начальный период твердения (рис. 1, *а*). Аналогично влияние и Na_2SO_4 (рис. 1, *б*). СДБ вводилась в количестве 0,1, 0,3 и 0,5 % от массы смеси. При сохранении прежней подвижности водовяжущее отношение смеси снижается с 0,8 до 0,6 и с 1,0 до 0,68, а прочность увеличивается в 1,5–3 раза. Оптимальна добавка СДБ в количестве 0,1–0,3 % по массе. Прочность образцов при этом достигает 8,0 МПа, что достаточно для самых ответственных конструкций в горной практике.

Таблица 4. Зависимость прочности образцов от температуры обработки

Table 4. Dependence between the robustness of the samples and the treatment temperature

Температура, °С	Удельная поверхность, см²/г	Предел прочности при сжатии, МПа	
		7 сут	28 сут
100	3500–4000	0,07	0,08
400	3500–4000	0,15	0,16
500	3500–4000	0,16	0,21
600	3500–4000	0,20	0,24
700	3500–4000	0,22	0,72
800	3500–4000	0,19	0,40

Лабораторными исследованиями установлено, что при термообработке в течение 1,5 ч и температуре 180 °С из фосфогипса возможно получение вяжущего материала с пределом прочности при сжатии в возрасте 28 сут 5,7 МПа при водовяжущем отношении 0,8. Предел прочности образцов из вяжущего с добавкой СДБ достигает 8 МПа. Термообработка исследуемого белитового шлама Павлодарского алюминиевого завода (Республика Казахстан) осуществлялась при температуре 100, 400, 500, 600, 700 и 800 °С на металлических поддонах при толщине слоя 3–5 см.

Испытанием образцов на прессе установлено, что при определенных условиях они набирают прочность. Образцы, полученные прессованием при давлении 15 МПа, твердевшие в воздушно-влажных условиях в течение 7, 28, 56, 90, 180 и 365 сут, имеют предел прочности при сжатии от 0,8 до 5,5 МПа. Поскольку шлам является грубодисперсным материалом (более 70 % частиц крупнее 0,315 мм), обожженный шлам мололи в шаровой мельнице 3,5 ч до достижения удельной поверхности примерно 4000 см²/г. При увеличении температуры обжига от 100 до 800 °С большую прочность на сжатие имеют образцы из шлама, обжигаемого при 700 °С. При увеличении или уменьшении оптимальной температуры обжига прочность образцов снижается. Образцы размерами 40 × 40 × 160 мм готовили при водовяжущем отношении 0,4 с твердением в течение 7 и 28 сут в естественных условиях (табл. 4).

Большая прочность получена при температуре 700 °С в течение 2 ч. Свойства вяжущего определяли при водовяжущем отношении 0,4, обеспечивающем усадку конуса не менее 120 м. Установлено, что большей прочностью обладают образцы, твердевшие в естественных условиях (t = 20 °С, W = 60 %). Прочность образцов, твердевших в камере (t = 20 °С, W = 90 %) значительно меньше. Эти образцы в воде не затвердели. Предел прочности образцов, твердевших в естественных условиях в течение 28 сут, составил 0,9 МПа [17, 18].

Для установления оптимального времени обжига шлам подвергали термообработке при температуре 700 °С в течение 2, 4 и 6 ч (табл. 5).

Для улучшения вяжущих свойств шлама исследовали добавки: хлориды натрия и кальция, фосфогипс и известь. Хлорид натрия вводили в количестве от 0,5 до 2,5 % от массы шлама. При твердении в естественных условиях образцы в возрасте 7 и 28 сут не набрали прочности. При добавке хлорида кальция $CaCl_2$ в количестве 0,5 и 1,0 % по массе прочность образцов в возрасте 7 сут увеличилась: 0,40 и 0,44 МПа при добавке 0,5 % хлорида кальция; и 0,23 и 0,25 МПа – при добавке 1,0 % (табл. 6). При увеличении сроков твердения образцов до 28 сут прочность не изменилась. Известь вводилась в обожженный при температуре 700 °С в течение 2 ч и измельченный до удельной поверхности 3700 см^2/г шлак при затворении водой в количестве от 1 до 15 % по массе. Образцы изготавливали при

Таблица 5. Зависимость прочности образцов от времени термообработки

Table 5. Dependence between the robustness of the samples and the heat treatment time

Температура, °С	Время, ч	Удельная поверхность, см^2/г	Прочность при сжатии, МПа	
			7 сут	28 сут
700	2	3500–4000	0,18	0,92
700	4	3500–4000	0,22	0,93
700	6	3500–4000	0,25	0,96

водовяжущем отношении 0,4. Образцы твердели в естественных условиях и испытывались в возрасте 7 и 28 сут (табл. 7). Из полугидрата фосфогипса β-модификации были изготовлены две партии образцов. Первая партия приготавливалась при постоянном водовяжущем отношении, равном 0,4, и содержании добавки полугидрата фосфогипса до 15 % по массе. Вторая партия изготавливалась при переменном водовяжущем отношении, но из равноподвижных смесей. Количество полугидрата фосфогипса от 0 до 50 % по массе. Добавка полугидрата фосфогипса в количестве до 15 % по массе при постоянном водовяжущем отношении увеличивает прочность образцов при сжатии до 9 МПа, при изгибе – до 12 МПа.

Установлено, что известь значительно улучшает вяжущие свойства шлама. Добавка извести в количестве от 1 до 10 % по массе увеличивает предел прочности образцов при сжатии и изгибе соответственно с 0,72 и 0,59 МПа до 11,61 и 4,53 МПа (рис. 2).

При добавке извести в шлам более 10 % прочность уменьшается. Ввиду большой водопотребности полугидрата фосфогипса с увеличением его содержания в шламе снижается подвижность смеси, и при введении более 15 % смесь становится малоподвижной, что неприемлемо из условий технологии ее укладки. Поэтому выполнена оценка влияния добавки полугидрата фосфогипса в количестве от 1 до 50 % на образцах из равноподвижных смесей.

Количество полугидрата фосфогипса β-модификации достигало 15 % по массе. Известь вводилась последовательно в количестве 1, 3, 5 %. Наибольшее повышение прочности достигается при введении в обожженный шлам полугидрата фосфогипса в количестве 15 % и извести в количестве 1 % по массе. Прочность при введении комплексной добавки оказалась значительно выше, чем у образцов, изготовленных из шлама с добавками только из извести или фосфогипса в тех же количествах. Добавка 10 % извести обеспечивает прочность 11,6 МПа.

Установлено, что на основе шлама, обожженного при температуре 700 °С и измельченного до 3500–4000 см^2/г, и минеральных добавок можно получить вя-

жущее с прочностью при сжатии до 11 МПа. Исследованиями белитовых шламов установлена принципиальная возможность получения твердеющей закладки с требуемыми для горной технологии свойствами. Наибольшая прочность – 5,0 МПа – достигается при водовяжущем отношении 0,45 и добавке полугидрата фосфогипса в количестве 15 % (рис. 3).

Составы смеси на основе хвостов гидрометаллургического передела. Крупность частиц не превышает 0,2 мм. Прочность смесей, содержащих гипс, увеличивается в 1,5–2,0 раза. Включение хвостов улучшает транспортабельность смеси. Отсутствие твердого компонента в смеси лишает ее структурного скелета и повышает компрессионные способности. Прочность образцов при сроке твердения 3, 6, 12 мес составляет 3,1; 5,7 и 7,6 МПа [19, 20].

Таблица 6. Свойства вяжущего в зависимости от условий твердения
Table 6. Binder properties depending on the hardening conditions

Показатель	Условия твердения		
	Естественные	В камере	В воде
Сроки схватывания, ч:			
начало	2,50	–	–
окончание	5,50	–	–
Осадка конуса, мм	120	120	120
Предел прочности при изгибе, МПа, в возрасте:			
7 сут	0,13	0,08	Нет
28 сут	0,59	0,36	Нет
Предел прочности при сжатии, МПа, в возрасте:			
7сут	0,18	0,12	Нет
28 сут	0,72	0,40	Нет

Составы смеси на основе хвостов обогатительного передела. В качестве вяжущих используют клинкерный цемент и золу ГРЭС. Подвижность твердеющей смеси согласно конусу СтройЦНИЛа составляет около 14 см, прочность на одноосное сжатие в возрасте 60 сут – 3,5–4,0 МПа. Оптимальный состав на 1 м^3 смеси: хвосты обогащения – 600–750 кг; зола – 180–220 кг; цементная пыль – 250–315 кг; цемент – 35–40 кг; вода затворения – 450–515 л. Закладочные смеси, приготовленные на хвостах с содержанием слюды более 50 %, требуют увеличения вяжущего до 400 кг/м^3.

Составы смеси на основе топливных шлаков. Продукты термохимических и фазовых превращений углей менее активны, чем шлаки металлургического производства. Они используются в качестве вяжущего для получения смесей прочностью до 4,0–5,0 МПа с добавками цемента в количестве от 5 до 25 %. Шлаки дробят в дробилке с зазором щек 5 мм, а затем в шаровой мельнице до 55 и 75 % тонкости (проход через сито +0,08 мм). Составы с расходом вяжущего 450 кг на 1 м^3 при соотношении *цемент* : *шлак* 1 : 2 обеспечивают прочность от 2,8 до 4,9 МПа в 28-дневном возрасте. Увеличение тонкости помола шлака с 55 до 75 % повышает прочность до 30 % базовой величины.

Составы смеси на основе низкосортных песков. Содержание отмучиваемых частиц достигает 20 % и более. Классы крупностью до 1,845 с удельной поверхностью 28,4 м^2/кг относятся к группе мелкого песка, а крупностью до 2,185 с удельной поверхностью 27,7 м^2/кг – к средней группе. Прочность в смеси в возрасте 28 дней достигает 0,5 МПа, а 90 дней – 0,9 МПа в зависимости от расхода цемента. Соотношение твердого и жидкого в смеси доходит до 1,85 : 1 при нор-

мативном значении 3,5 : 1. Отклонения содержания глинистых включений радикально изменяют качество искусственных массивов и не обеспечивают надежности обнажений.

Составы смеси на основе золы. Зола обладает вяжущими свойствами без добавления цемента. Затворение смесей 3 %-ми растворами HCl и $CaCl_2$ увеличивает прочность смесей и ускоряет сроки схватывания.

Таблица 7. Влияние добавок на прочность твердеющей смеси
Table 7. The impact of admixtures on the robustness of the hardening mixture

Состав вяжущего	Тонкость помола, $см^2/г$	Отношение	Предел прочности, МПа			
			7 сут		28 сут	
			Изгиб	Сжатие	Изгиб	Сжатие
Добавка извести						
Шлам	3700	0,400	1,3	2,2	5,9	7,2
Шлам + 1 % извести	3700	0,400	4,0	4,4	6,8	7,7
Шлам + 3 % извести	3700	0,400	5,5	9,4	14,1	13,6
Шлам + 5 % извести	3700	0,400	24,5	50,4	35,3	88,9
Шлам + 10 % извести	3700	0,400	31,2	70,6	45,3	116,1
Шлам + 15 % извести	3700	0,400	26,9	65,6	36,0	107,6
Добавка полугидрата фосфогипса						
Шлам	3700	0,400	1,3	2,2	5,9	7,2
Шлам + 1 % ФГ	3700	0,400	7,2	16,5	13,2	18,7
Шлам + 3 % ФГ	3700	0,400	13,5	27,1	20,9	47,8
Шлам + 5 % ФГ	3700	0,400	12,1	35,6	18,0	63,1
Шлам + 10 % ФГ	3700	0,400	10,8	39,6	22,1	74,0
Шлам + 15 % ФГ	3700	0,400	12,5	49,0	20,9	93,0
Шлам + 1 % ФГ	3700	0,400	7,2	16,5	13,2	18,7
Шлам + 3 % ФГ	3700	0,425	10,8	19,4	10,8	24,8
Шлам + 5 % ФГ	3700	0,432	12,7	26,7	11,3	43,6
Шлам + 10 % ФГ	3700	0,447	7,2	21,8	8,3	42,6
Шлам + 15 % ФГ	3700	0,450	7,8	18,4	11,4	48,8
Шлам + 25 % ФГ	3700	0,472	8,6	25,6	13,3	52,4
Шлам + 50 % ФГ	3700	0,537	10,0	20,4	15,5	42,3
Добавка полугидрата фосфогипса и извести						
Шлам + 15 % ФГ	3700	0,450	7,8	18,4	11,4	48,8
Шлам + 15 % ФГ + 1 % извести	3700	0,450	20,1	82,5	44,1	138,5
Шлам + 15 % ФГ + 3 % извести	3700	0,450	12,6	52,6	36,4	101,3

Составы смеси на основе отходов химического производства. В смеси добавляют ССБ, СДБ, кремнегель и оксиэтилированную жирную кислоту. По сравнению с базовым составом, включающим 160 кг цемента и 220 кг золы на 1 $м^3$ смеси, ее прочность с добавкой кремнегеля в количестве 5–7 кг выше на 15–20 %. С увеличением кремнегеля более 9 $кг/м^3$ составы быстро схватываются. ССБ повышает пластичность, подвижность, морозоустойчивость, водонепроницаемость, долговечность смеси. Добавление в смеси 0,2 % СДБ от количества цемента увеличивает прочность в 60-дневном возрасте на 30 %. При уменьшении цемента на 20 кг прочность увеличивается на 10 %, но меньше на 20 %, чем

смесей с расходом цемента 160 кг/м^3. Добавка пластификаторов ССБ увеличивает прочность на 10–30 % при одинаковой пластичности или снижает расход цемента на 10–15 % при одинаковой прочности [21, 22].

Перспективные направления исследований. Авторы отмечают перспективные работы по использованию фосфогипса в качестве вяжущего для заполнения техногенных пустот шахт. Вяжущие готовят путем совместного помола гранулированного доменного шлака с феррохромовым шлаком и фосфогипсом до 70 % крупностью 0,08 мм. Фосфогипс содержит до 95 % фракций крупностью 0,08 мм. Прочность 3,0 МПа достигается при расходе гипсового вяжущего 450 кг/м^3 [23, 24].

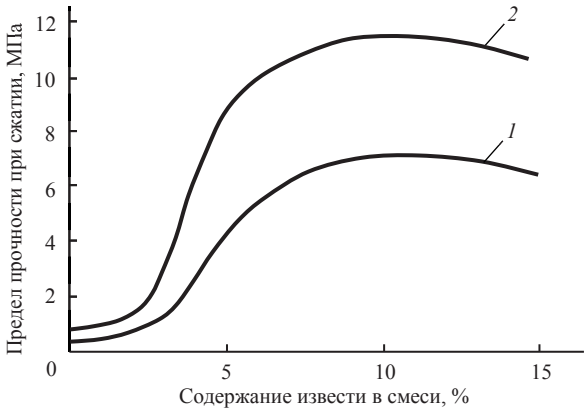

Рис. 2. Зависимость прочности смешанного вяжущего (шлам + известь) от количества добавляемой извести
Fig. 2. Dependence between the mixed binder robustness (sludge + lime) and the amount of the added lime

Фосфогипс, как объект утилизации, в своем составе содержит более 90 % кристаллов $CaSO_4 \cdot 2H_2O$. Примеси, которые содержатся в фосфогипсе – это в основном продукты недоразложения фосфатного сырья и фториды, причем суммарно содержание F и P_2O_5 не более 1,5–2 %. Имеется несколько направлений, дающих перспективу масштабному использованию как свежесформованного фосфогипса, так и фосфогипса, накопленного в отвалах.

Рекомендовано учитывать не только показатели химического состава фосфогипса, но и величину эффективной активности природных радионуклидов $A_{эф}$, Бк/кг, по известной формуле:

$$Э_{эф} = A_{эф}Ra + 1,31A_{эф}Th + 0,085A_{эф}K, \quad (2)$$

где 1,31 и 0,085 – сужающие коэффициенты для тория-232 и калия-40 соответственно по отношению к радию-226.

Таким образом, реализация идеи замены цемента вяжущими добавками требует совершенствования процессов горного производства, в первую очередь измельчения и активации минералов [25, 26]. Полученные в результате исследований закономерности и выводы применимы в различных отраслях народного хозяйства и носят универсальный характер, являясь одновременно природоохранной и ресурсосберегающей технологиями. Использование результатов открывает перспективы выживания в условиях формирующегося рынка [27, 28].

Выводы. *Установлено*, что возможность применения фосфогипсов, шламов, доломитов и других доступных малоактивных минералов в качестве заменителя

дорогостоящего и относительно дефицитного вяжущего определяется по прочности изготовленных контрольных образцов твердеющих закладочных смесей в лабораторных условиях. Так, прочность смесей, содержащих гипс, увеличивается в 1,5–2,0 раза и при сроке твердения 3, 6 и 12 мес составляет соответственно 3,1; 5,7 и 7,6 МПа.

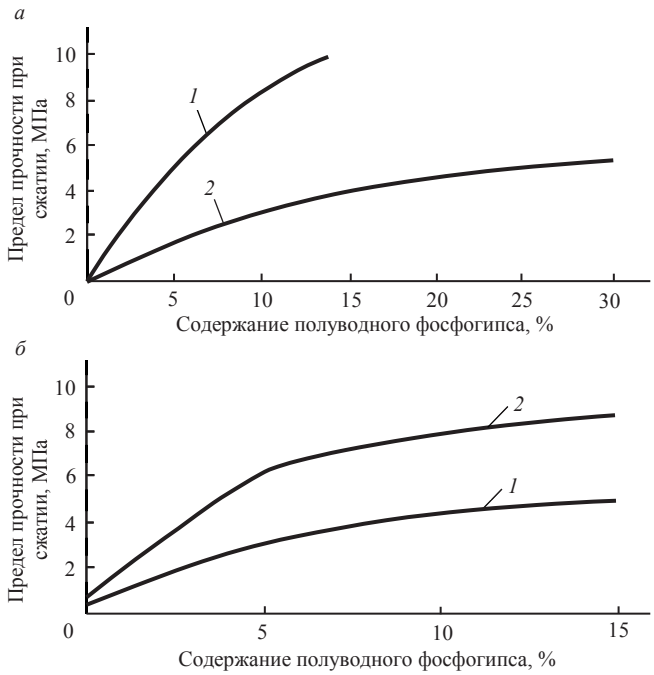

Рис. 3. Зависимость прочности сложного вяжущего (шлам + фосфогипс) от добавки фосфогипса:
а – 28 дней; *1* – при водовяжущем отношении 0,4; *2* – при равной подвижности; *б* – при водовяжущем отношении 0,4; *1* – 7 дней; *2* – 28 дней
Fig. 3. Dependence between the complex binder robustness (sludge + phosphogypsum) and the added phosphogypsum:
а – 28 days; *1* – under the water-binder ratio of 0.4; *2* – under the same fluidity; *б* – under the water-binder ratio of 0.4; *1* – 7 days; *2* – 28 days

Показано, что составы с расходом вяжущего 450 кг на 1 м^3 при соотношении *цемент : шлак* 1 : 2 обеспечивают прочность от 2,8 до 4,9 МПа в 28-дневном возрасте. Увеличение тонкости помола шлака с 55 до 75 % увеличивает прочность до 30 % базовой величины. Содержание отмучиваемых частиц низкосортных песков достигает 20 % и более. Классы с удельной поверхностью 28,4 м^2/кг относятся к группе мелкого песка, а с удельной поверхностью 27,7 м^2/кг к средней группе. Прочность составов в возрасте 28 дней достигает 0,5 МПа, 90 дней – 0,9 МПа в зависимости от расхода цемента.

Обосновано, что вяжущие, приготовленные на основе фторгипсов, фосфогипсов и белитовых шламов путем совместного помола гранулированного доменного шлака с феррохромовым шлаком и фосфогипсом до 70 %, крупностью 0,08 мм обеспечивают прочность гипсового вяжущего до 3,0 МПа с расходом 450 кг на 1 м^3 смеси.

Рекомендовано учитывать не только показатели химического и физико-механического составов нетрадиционных отходов производства, но и величину эффективной активности природных радионуклидов. Это обеспечит радиационную безопасность твердеющей закладочной смеси.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Bian Zhengfu, Miao Xiexing, Shaogang Lei, Chen Shen-en, Wang Wenfeng, Struthers Sue. The challenges of reusing mining and mineral-processing wastes // Science. 2012. Vol. 337. No. 6095. P. 702–703.

2. Franks D. M., Boger D. V., Côte C. M., Mulligan D. R. Sustainable development principles for the disposal of mining and mineral processing wastes // Resources Policy. 2011. Vol. 36. No. 2. P. 114–122.

3. Packey D. J. Multiproduct mine output and the case of mining waste utilization // Resour. Policy. 2012. Vol. 37. No. 1. P. 104–108.

4. Capilla A. V., Delgado A. V. The destiny of the Earth's mineral resources. London: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd.; 2015.

5. Ляшенко В. И., Голик В. И., Штеле В. И. Ресурсосберегающие технологии погашения пустот при ведении подземных горных работ // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 1990. № 5. С. 93–101.

6. Ляшенко В. И., Голик В. И., Штеле В. И. Обоснование параметров ресурсосберегающих технологий погашения подземных пустот // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 1991. № 2. С. 94–101.

7. Голик В. И. Извлечение металлов из хвостов обогащения комбинированными методами активации // Обогащение руд. 2010. № 5. С. 38–40.

8. Голик В. И., Комащенко В. И. Отходы обогащения железистых кварцитов как сырье для доизвлечения металлов и использования в качестве закладочных смесей // Горный журнал. 2017. № 3. С. 43–47. DOI: 10.17580/GZH.2017.03.08

9. Каплунов Д. Р., Рыльникова М. В., Радченко Д. Н. Научно-методические основы проектирования экологически сбалансированного цикла комплексного освоения и сохранения недр Земли // ГИАБ. 2015. № 4 (спец. вып. 15). С. 5–11.

10. Дмитрак Ю. В., Камнев Е. Н. АО «Ведущий проектно-изыскательский и научно-исследовательский институт промышленной технологии» – путь длиной в 65 лет // Горный журнал. 2016. № 3. С. 6–12.

11. Haifeng Wang, Yaqun He, Chenlong Duan, Yuemin Zhao, Youjun Tao, Cuiling Ye. Development of mineral processing engineering education in China University of Mining and Technology // Advances in Computer Science and Engineering. AISC 141. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2012. P. 77–83.

12. Hu Zhenqi, Wang Peijun, Li Jing. Ecological restoration of abandoned mine land in China // Journal of Resources and Ecology. 2012. No. 3(4). P. 289–296.

13. Karimi N. S., Atashpanjeh A., Mollaei F. M. R. Design considerations of heap leaching at the sarcheshmeh copper open pit mine // International Mining Congress of Turkey – IMCET. 2001. P. 513–516.

14. Абрамкин Н. И., Мирошниченко К. С., Дородний А. В. Обоснование рациональных способов утилизации и обезвреживания твердых бытовых отходов при перспективном использовании геотехнологических методов // ГИАБ. 2018. № 1. С. 83–91.

15. Бригида В. С., Кожиев Х. Х., Сарян А. А., Джиоева А. К. Пространственно-временные задачи геоэкологии – междисциплинарный подход // ГИАБ. 2020. № 4. С. 20–32. DOI: 10.25018/0236-14932020-4-0-20-32

16. Дзапаров В. Х., Харебов Г. З., Стась В. П., Стась П. П. Исследование сухих строительных смесей на основе отходов производства для подземного строительства // Сухие строительные смеси. 2020. № 1. С. 35–38.

17. Дмитрак Ю. В., Цидаев Б. С., Дзапаров В. Х., Харебов Г. Х. Минерально-сырьевая база цветной металлургии России // Вектор ГеоНаук. 2019. Т. 2. № 1. С. 9–18.

18. Ефимов В. И., Сидоров Р. В., Корчагина Т. В. К вопросу образования отходов производства от предприятий угольной отрасли в Кузбассе // ГИАБ. 2017. № 1. С. 85–96.

19. Клюев Р. В., Босиков И. И., Майер А. В., Гаврина О. А. Комплексный анализ применения эффективных технологий для повышения устойчивого развития природно-технической системы // Устойчивое развитие горных территорий. 2020. № 2. С. 283–290.

20. Масленников С. А. Оценка влияния температуры на скорость набора прочности бетоном // ГИАБ. 2010. № 9. С. 309–312.

21. Ляшенко В. И., Франчук В. П. Повышение эффективности активации компонентов твердеющей закладочной смеси в установках вибрационного трубопроводного транспорта // Известия вузов. Горный журнал. 2017. № 4. С. 92–100.

22. Ляшенко В. И., Голик В. И., Дятчин В. З. Повышение экологической безопасности снижением техногенной нагрузки в горнодобывающих регионах // Известия вузов. Черная металлургия. 2020. Том 63. № 7. С. 529–538. DOI: 10.17073/0368-0797-2020-7-529-538

23. Ляшенко В. И., Хоменко О. Е., Голик В. И. Развитие природоохранных и ресурсосберегающих технологий подземной добычи руд в энергонарушенных массивах // Горные науки и технологии. 2020. № 5(2). С. 104–118. DOI: 10.17073/2500-0632-2020-2-104-118

24. Lyashenko V., Khomenko O., Topolnij F., Golik V. Development of natural underground ore mining technologies in energy distributed massifs // Technology Audit and Production Reserves. 2020. No. 1(3(51)). P. 17–24. doi:10.15587/2312-8372.2020.195946

25. Трунова И. А., Сидоренко Р. В., Вакал С. В., Карпович Э. А. Анализ основных направлений утилизации фосфогипса – отхода производства фосфорной кислоты // Екологічна безпека. 2010. № 2/10. С. 31–35.

26. Чекушина Т. В., Боумаза Б., Ляшенко В. И. Экологическая и экономическая эффективность использования цементной пыли в качестве частичной замены цемента // Безопасность труда в промышленности. 2020. № 3. С. 33–39. DOI: 10.24000/0409-2961-2020-3-33-39

27. Lyashenko V., Khomenko O., Golik V., Topolnij F., Helevera O. Substantiation of environmental and resource-saving technologies for void filling under underground ore mining // Technology Audit and Production Reserves. 2020. No. 2(3(52)). P. 9–16. doi:10.15587/2312-8372.2020.200022

28. Хоботова Э. Б., Игнатенко М. И., Беличенко Е. А., Поникаровская С. В. Радиационные свойства отходов угледобывающей и теплоэнергетической отраслей // Безопасность труда в промышленности. 2020. № 8. С. 60–67. DOI: 10.24000/0409-2961-2020-8-60-67

Поступила в редакцию 4 февраля 2021 года

Сведения об авторах:

Голик Владимир Иванович – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры горного дела Северо-Кавказского государственного технологического университета. E-mail: v.i.golik@mail.ru

Разоренов Юрий Иванович – доктор технических наук, профессор, ректор Южно-Российского государственного политехнического университета. E-mail: yiri1963@mail.ru

Вагин Владимир Стефанович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой социальных и гуманитарных наук Южно-Российского государственного политехнического университета. E-mail: rektorat@npi-tu.ru

Ляшенко Василий Иванович – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, начальник научно-исследовательского отдела государственного предприятия Украинского научно-исследовательского и проектно-изыскательского института промышленной технологии. E-mail: vilyashenko2017@gmail.com

DOI: 10.21440/0536-1028-2021-3-13-27

Study and development of hardening mixture composition based on unconventional industrial waste

Vladimir I. Golik[1], Iurii I. Razorenov[2], Vladimir S. Vagin[2], Vasilii I. Liashenko[3]

[1] North Caucasian Institute of Mining and Metallurgy (State Technological University), Vladikavkaz, Russia.

[2] Platov South-Russian State Polytechnic University, Novocherkassk, Russia.

[3] Ukranian Research and Design Institute of Industrial Technology, Zhovti Vody, Ukraine.

Abstract

Relevance. *Phosphogypsum, the product of apatites chemical processing, is one of the most common mining wastes. Phosphogypsum utilization is not widespread yet, therefore its cost is low. Integrated research has been carried out to determine the technological capacity and economic feasibility of phosphogypsum, sludge, and dolomite utilization as binders in the conversion of ore production techniques.*

Research aim *is to develop a hardening mixture composition based on unconventional industrial waste, determine the technological capacity and economic feasibility of utilizing phosphogypsum, sludge, dolomite, and other accessible low activity wastes as a substitute for expensive and relatively scarce binder material.*

Research methodology. *Initial data are studied of the wastes possessing binding properties. The efficiency of admixing them is determined from the robustness of hardening backfill mixtures control samples that have been produced in laboratory conditions. Based on the research, a database is created to apply the results in practice for mining development.*

Results. *The hardening materials compositions were obtained based on unconventional industrial waste including hydrometallurgical and dressing tailings, furnace clinker, low-grade sand, thermal power plants (TPP) and chemical industry ashes. The optimal composition of the mixture per cubic meter: tailings – 600–750 kg; TPP ash – 180–220 kg; cement dust – 250–315 kg; cement – 35–40 kg; tempering water – 450–515 l under the mixture's fluidity of about 14 cm according to the readings of the mortar consistency measuring device (StroyTsNIL cone). To ensure radiation safety of the hardening mixture that is based on unconventional industrial waste, it is advisable to take into account not only their chemical and physical-mechanical indicators but the value of naturally radioactive nuclides' effective activity as well.*

Conclusions. *It has been stated that the robustness of mixtures containing gypsum is 1.5–2.0 times higher, and under the hardening time of 3, 6 and 12 months makes up 3.1; 5.7 and 7.6 MPa correspondingly. It has been shown that the compositions with the binder's flow rate of 450 kg per cubic meter under the cement : sludge ratio of 1 : 2 show the robustness from 2.8 to 4.9 MPa in 28 days. The content of low-grade sand levigate particles reaches 20% and more. Classes with a specific area of 28.4 m^2/kg refer to fine sand, and with a specific area of 27.7 m^2/kg refer to medium sand. The robustness of the 28 days old composition reaches 0.5 MPa, 90 days – 0.9 MPa depending on the cement flow rate. It has been substantiated that binders based on fluorine gypsum, phosphogypsum, and belite sludge by mixed grinding of the granulated*

blast-furnace slug with the ferrochrome sludge and phosphogypsum up to 70%, 0.08 mm size, show the robustness of the binder up to 3.0 MPa with the flow rate of 450 kg per a cubic meter of the mixture.

Keywords: *industrial waste; hardening mixture; binder; PPT ash; ash and slag; cement; fluorine gypsum; phosphogypsum; non-reactive aggregate; belite sludge; naturally radioactive nuclides.*

Acknowledgements. *Specialists from Platov South-Russian State Polytechnic University (Novocherkassk, Russia), Ukrainian Research and Design Institute of Industrial Technology (Zhovti Vody, Ukraine), Vostochnyy (Eastern) Mining and Enrichment Combine (Zhovti Vody, Ukraine), Dnipro University of Technology (Dnipro, Ukraine) and others took part in creating, improving, and introducing R&D.*

REFERENCES

1. Bian Zhengfu, Miao Xiexing, Shaogang Lei, Chen Shen-en, Wang Wenfeng, Struthers Sue. The challenges of reusing mining and mineral-processing wastes. *Science*. 2012; 337(6095): 702–703.

2. Franks D. M., Boger D. V., Côte C. M., Mulligan D. R. Sustainable development principles for the disposal of mining and mineral processing wastes. *Resources Policy*. 2011; 36(2): 114–122.

3. Packey D. J. Multiproduct mine output and the case of mining waste utilization. *Resour. Policy*. 2012; 37(1): 104–108.

4. Capilla A. V., Delgado A. V. The destiny of the Earth's mineral resources. London: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd.; 2015.

5. Liashenko V. I., Golik V. I., Shtele V. I. Resource-saving technologies for void extinguishing during underground ore mining. *Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh = Journal of Mining Science*. 1990; 5: 93–101. (In Russ.)

6. Liashenko V. I., Golik V. I., Shtele V. I. Rationale for the parameters of resource-saving technologies for void extinguishing. *Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh = Journal of Mining Science*. 1991; 2: 94–101. (In Russ.)

7. Golik V. I. Metals recovery from mineral processing tailings by combined activation methods. *Obogashchenie Rud = Mineral Processing*. 2010; 5: 38–40. (In Russ.)

8. Golik V. I., Komashchenko V. I. Carbonate-facies iron formation processing waste as raw material for metal recovery and utilization as backfill material. *Gornyi zhurnal = Mining Journal*. 2017; 3: 43–47. Available from: DOI: 10.17580/GZH.2017.03.08 (In Russ.)

9. Kaplunov D. R., Rylnikova M. V., Radchenko D. N. Scientific and methodological bases of design of ecologically balanced cycle of comprehensive exploitation and conservation of the Earth's reserves. *Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten (nauchno-tekhnicheskii zhurnal) = Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*. 2015; 4 (special issue 15): 5–11. (In Russ.)

10. Dmitrak Iu. V., Kamnev E. N. Design & Survey and Research & Development Institute of Industrial Technology, JSC. 65 years of journey. *Gornyi zhurnal = Mining Journal*. 2016; 3: 6–12. (In Russ.)

11. Haifeng Wang, Yaqun He, Chenlong Duan, Yuemin Zhao, Youjun Tao, Cuiling Ye. Development of mineral processing engineering education in China University of Mining and Technology. *Advances in Computer Science and Engineering. AISC 141*. Springer, Berlin, Heidelberg; 2012. P. 77–83.

12. Hu Zhenqi, Wang Peijun, Li Jing. Ecological restoration of abandoned mine land in China. *Journal of Resources and Ecology*. 2012; 3(4): 289–296.

13. Karimi N. S., Atashpanjeh A., Mollaei F. M. R. Design considerations of heap leaching at the sarcheshmeh copper open pit mine. *International Mining Congress of Turkey – IMCET*. 2001: 513–516.

14. Abramkin N. I., Miroshnichenko K. S., Dorodnii A. V. Justification of efficient recycling and neutralization methods for municipal solid waste using promising geotechnologies. *Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten (nauchno-tekhnicheskii zhurnal) = Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*. 2018; 1: 83–91. (In Russ.)

15. Brigida V. S., Kozhiev Kh. Kh., Sarian A. A., Dzhioeva A. K. Time-space problems in geoecology: an inter-disciplinary approach. *Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten (nauchno-tekhnicheskii zhurnal) = Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*. 2020; 4: 20–32. Available from: DOI: 10.25018/0236-14932020-4-0-20-32 (In Russ.)

16. Dzaparov V. Kh., Kharebov G. Z., Stas V. P., Stas P. P. Research of drymixtures based on production waste for underground construction. *Sukhie stroitelnye smesi = Dry Mortar*. 2020; 1: 35–38. (In Russ.)

17. Dmitrak Iu. V., Tsidaev B. S., Dzaparov V. Kh., Kharebov G. Kh. Mineral and raw materials base of coloured metallurgy of Russia. *Vektor GeoNauk = Vector of Geosciences*. 2019; 2(1): 9–18. (In Russ.)

18. Efimov V. I., Sidorov R. V., Korchagina T. V. The issue of waste production from the coal industry in Kuzbass. *Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten (nauchno-tekhnicheskii zhurnal) = Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*. 2017; 1: 85–96. (In Russ.)

19. Kliuev R. V., Bosikov I. I., Maier A. V., Gavrina O. A. Comprehensive analysis of the effective technologies application to increase sustainable development of the natural-technical system. *Ustoichivoe razvitie gornykh territorii = Sustainable Development of Mountain Territories*. 2020; 2: 283–290. (In Russ.)

20. Maslennikov S. A. Assessing the impact made by the temperature on concrete strength gain rate. *Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten (nauchno-tekhnicheskii zhurnal) = Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*. 2010: 9: 309–312. (In Russ.)

21. Liashenko V. I., Franchuk V. P. Hardening stowage mixture components activation efficiency improvement in vibration pipeline transport plants. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2017; 4: 92–100. (In Russ.)

22. Liashenko V. I., Golik V. I., Diatchin V. Z. Increasing environmental safety by reducing technogenic load in mining regions. *Izvestiia vuzov. Chernaia metallurgiia = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2020; 63(7): 529–538. Available from: DOI: 10.17073/0368-0797-2020-7-529-538 (In Russ.)

23. Liashenko V. I., Khomenko O. E., Golik V. I. Development of environment-friendly and resource-saving methods of underground ore mining in disturbed rock masses. *Gornye nauki i tekhnologii = Mining Science and Technology (Russia)*. 2020; 5(2): 104–118. Available from: DOI: 10.17073/2500-0632-2020-2-104-118 (In Russ.)

24. Lyashenko V., Khomenko O., Topolnij F., Golik V. Development of natural underground ore mining technologies in energy distributed massifs. *Technology Audit and Production Reserves*. 2020; 1(3(51)): 17–24. Available from: doi:10.15587/2312-8372.2020.195946

25. Trunova I. A., Sidorenko R. V., Vakal S. V., Karpovich E. A. Analysis of basic directions of utilization of fosfogips – departure of production of phosphoric acid. *Ekologichna bezpeka*. 2010; 2/10: 31–35.

26. Chekushina T. V., Boumaza B., Liashenko V. I. Environmental and economic efficiency of using cement dust as a partial replacement for cement. *Bezopasnost truda v promyshlennosti = Occupational Safety in Industry*. 2020; 3: 33–39. Available from: DOI: 10.24000/0409-2961-2020-3-33-39 (In Russ.)

27. Lyashenko V., Khomenko O., Golik V., Topolnij F., Helevera O. Substantiation of environmental and resource-saving technologies for void filling under underground ore mining. *Technology Audit and Production Reserves*. 2020; 2(3(52)): 9–16. Available from: doi:10.15587/2312-8372.2020.200022

28. Khobotova E. B., Ignatenko M. I., Belichenko E. A., Ponikarovskaia S. V. Radiation properties of coal and thermal industries waste. *Bezopasnost truda v promyshlennosti = Occupational Safety in Industry*. 2020; 8: 60–67. Available from: DOI: 10.24000/0409-2961-2020-8-60-67 (In Russ.)

Received 4 February 2021

Information about authors:

Vladimir I. Golik – DSc (Engineering), Professor, professor of Mining Department, North Caucasian Institute of Mining and Metallurgy (State Technological University). E-mail: v.i.golik@mail.ru
Iurii I. Razorenov – DSc (Engineering), Professor, Rector of Platov South-Russian State Polytechnic University. E-mail: yiri1963@mail.ru
Vladimir S. Vagin – DSc (Engineering), Professor, Head of the Department of Social Sciences and Humanities, Platov South-Russian State Polytechnic University. E-mail: rektorat@npi-tu.ru
Vasilii I. Liashenko – PhD (Engineering), senior researcher, Head of the Research and Development Department, Ukrainian Research and Design Institute of Industrial Technology. E-mail: vilyashenko2017@gmail.com

Для цитирования: Голик В. И., Разоренов Ю. И., Вагин В. С., Ляшенко В. И. Исследование и разработка составов твердеющей смеси на основе нетрадиционных отходов производства // Известия вузов. Горный журнал. 2021. № 3. С. 13–27. DOI: 10.21440/0536-1028-2021-3-13-27
For citation: Golik V. I., Razorenov Iu. I., Vagin V. S., Liashenko V. I. Study and development of hardening mixture composition based on unconventional industrial waste. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2021; 3: 13–27 (In Russ.). DOI: 10.21440/0536-1028-2021-3-13-27