

УДК 622.17

**ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ СВЯЗУЮЩИХ РЕАГЕНТОВ
ОТЕЧЕСТВЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА
ДЛЯ СНИЖЕНИЯ ПЫЛЕНИЯ ХВОСТОВ ОБОГАЩЕНИЯ**

Е. А. Красавцева^{1,2}, Д. В. Макаров², А. В. Светлов²

*¹Лаборатория природоподобных технологий и техносферной безопасности Арктики
ЦНМ ФИЦ “Кольский научный центр РАН”,*

E-mail: vandeleur2012@yandex.ru, ул. Ферсмана, 14, 184209, г. Апатиты, Россия

²Институт проблем промышленной экологии Севера

ФИЦ “Кольский научный центр РАН”, мкр. Академгородок, 14а, 184209, г. Апатиты, Россия

Представлены результаты исследований свойств связующих реагентов отечественного производства для пылеподавления хвостохранилища на примере одного из предприятий горно-промышленного комплекса Мурманской области. Определены динамика набора прочности образованных покрытий, изменение прочности в режиме “увлажнение – высыхание”, оценено влияние реагентов на водопроницаемость обработанного материала хвостов, проведено выщелачивание полимеризовавшихся концентратов в слабокислой и щелочной среде. Показана необходимость проведения комплексного исследования для обоснованного выбора связующего реагента.

Хвосты обогащения, пыление, пылеподавление, связующие реагенты, хвостохранилище

DOI: 10.15372/FTPRPI20230318

Развитие горнопромышленного комплекса приводит к ухудшению экологической ситуации в районах добычи и обогащения полезных ископаемых. Пыление хвостовых отвалов отходов обогащения руд негативно воздействует на воздушный и водный бассейны, почвы, экосистемы прилегающих территорий и здоровье населения, проживающего в непосредственной близости от данных техногенных объектов [1 – 10]. Высокие концентрации пылевых частиц оказывают значительное влияние на процессы закисления и эвтрофикации экосистем [11], а также приводят к возникновению респираторных и сердечно-сосудистых заболеваний у человека [12].

Для эффективной борьбы с пылением существует несколько основных направлений [13]:

- создание искусственных препятствий, изменение аэродинамики;
- гидротехнические приемы, включающие увеличение зеркала пруда оборотного водоснабжения хвостохранилища, организацию водяных завес, увлажнение пляжей;
- применение различных групп связующих реагентов, которые можно подавать как в хвостовую пульпу, так и наносить на поверхность пляжей и откосов хвостохранилища.

Реализация первых двух пунктов проблематична в связи со значительными размерами хвостохранилищ. Создание заградительных барьеров, как, например, при перевалке угля в портах или складировании на крупных угольных ТЭЦ, железнодорожных узлах, — чрезвычайно дорогое и технически сложное решение ввиду громоздких габаритов возможных конструкций. Изменение аэродинамики преобразованием рельефа объекта подобных размеров также является непростой задачей при невысокой гарантии достижения реальной эффективности.

Организация максимально возможного зеркала озера и, как результат, сокращение площади пылящих пляжей чревато перегрузкой стенок дамбы, что может привести к крупной техногенной аварии. Попытка реализовать водяную завесу потребует организации сложной, громоздкой технической инфраструктуры, большого числа мощных насосов, форсунок. Для основных элементов такой оросительной системы обратная вода, представляющая собой, как правило, сложный коллоидный раствор, — крайне агрессивная среда.

Применение различных групп связующих реагентов дает возможность достичь определенных успехов в пылеподавлении за счет обработки поверхности сухих хвостов. Отметим, что введение в пульпу вяжущих может негативно отразиться на качестве оборотной воды, что в дальнейшем, возможно, приведет к снижению показателей флотации.

Закрепление пылящих поверхностей различными связующими реагентами — относительно недорогой и эффективный метод. В предыдущих работах были представлены результаты исследований по подбору связующих реагентов и технологических режимов их нанесения на хвосты обогащения апатит-нефелиновых руд для эффективной борьбы с пылением [2, 14]. Однако в условиях санкционных ограничений закупка реагентов зарубежного производства для предприятий становится трудно выполнимой задачей.

Цель настоящей работы — проведение экспериментов по подбору связующих реагентов отечественного производства для пылеподавления хвостохранилища на примере предприятия по добыче редких металлов.

КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ОБЪЕКТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объекты исследования — связующие реагенты отечественных фирм: Волтес ПП-300 (ООО ВПО “Волгохимнефть”), Синтекс-65 (ООО “Синтекс”), Лукойл DD 3000 (ООО “ЛЛК-Интернешнл”). Связующие реагенты наносили на ранее изученные в [15] хвосты обогащения лопаритовых руд, отобранные на выведенном из эксплуатации хвостохранилище одного из предприятий горнопромышленного комплекса Мурманской области. Зависимость выхода фракций от размера частиц представлена на рис. 1.

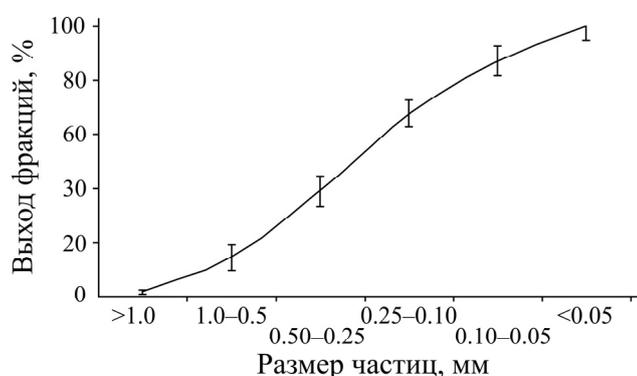


Рис. 1. Гранулометрический состав поверхностного слоя хвостов обогащения лопаритовых руд

Характеристика минерального и химического составов хвостов обогащения приведена ниже, %:

Минеральный состав		Химический состав	
Нефелин	59.57	SiO ₂	48.080
Полевой шпат	16.07	TiO ₂	1.100
Апатит	1.05	Al ₂ O ₃	22.470
Лопарит	0.94	Fe ₂ O ₃ об.	6.030
Эгирин	20.42	MnO	0.230
Содалит	1.58	CaO	1.630
Ломоносовит	0.15	MgO	0.450
Лампрофиллит	0.21	K ₂ O	4.240
Эвдиалит	0.01	Na ₂ O	13.330
Рамзаит	зн.	P ₂ O ₅	0.790
Натролит, пектолит, диопсид	д. зн.	SrO	0.330
Энигматит, сфалерит, амфибол	ед. зн.	F	0.079
Слюда, пирротин, молибденит	—	SO ₃	0.085
		П. п. п	1.200
Итого	100.00	Итого	99.970

Примечание: ед. зн. — до 5 знаков, зн. — до 25 знаков, д. зн. — более 25 знаков, п. п. п. — потери при прокаливании

ОЦЕНКА ПРОЧНОСТИ ПОЛИМЕРНЫХ ПОКРЫТИЙ

Условную прочность покрытия оценивали с помощью пенетromетра М-984 ПК. Подробно методика описана в работах [2, 14]. Определенное количество реагента наносилось на поверхность хвостов, помещенных в пластиковые контейнеры. Кинетику набора прочности покрытия оценивали в течение 10 сут. Затем эксперимент проводили в режиме “увлажнение – высыхание”, увлажняя поверхность в течение 10 сут дистиллированной водой, имитируя атмосферные осадки.

На сухие хвосты наносили растворы исследуемых реагентов, варьируя концентрацию и расход рабочего раствора (табл. 1).

ТАБЛИЦА 1. Режим нанесения связующих реагентов

Реагент	Концентрация рабочего раствора, %	Расход рабочего раствора, л/м ²
Синтекс-65	3, 5	1, 2
Лукойл DD 3000	3, 5, 8	1, 2
Волтес ПП-300	3	1, 2

Кинетика набора прочности защитными покрытиями представлена на рис. 2. Снижение числа пенетрации указывает на образование на поверхности хвостов полимерного защитного слоя. На хвостах, обработанных реагентами Волтес ПП-300, Синтекс-65 и Лукойл DD 3000, сформировались прочные покрытия. Покрытия, образованные реагентами Волтес ПП-300 и Синтекс-65, менее эластичные. Они выдерживали давление, оказываемое падающей иглой пенетromетра, однако ломались при боковом воздействии (3 и 5 %). Покрытия, созданные реагентом Лукойл DD 3000, эластичные. Под их верхним слоем образовывались агломераты из частиц, которые придают дополнительную прочность.

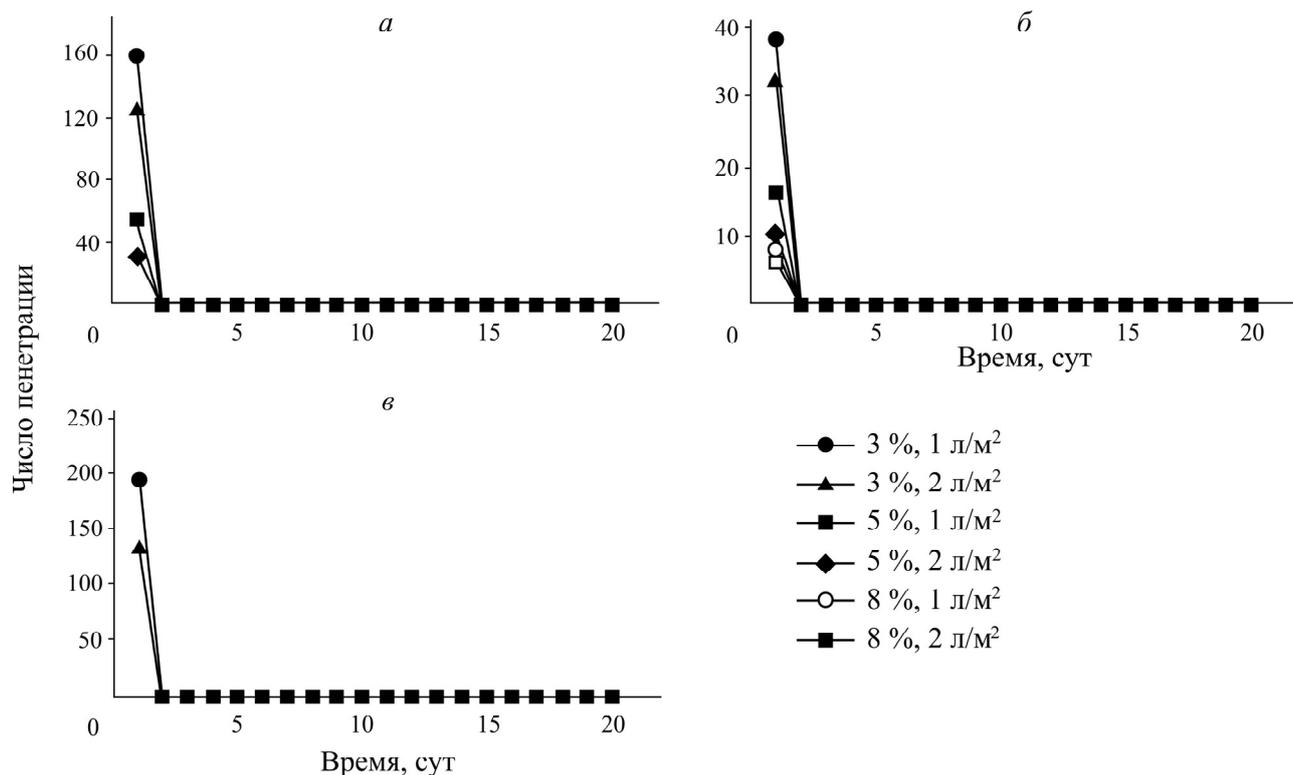


Рис. 2. Кинетика набора прочности реагентами: *а* — Синтекс-65; *б* — Лукойл DD 3000; *в* — Волтес ПП-300

ОЦЕНКА ИЗМЕНЕНИЯ ВОДОПРОНИЦАЕМОСТИ ОБРАБОТАННЫХ ХВОСТОВ

Водопроницаемость грунтов, особенно в условиях сложной конструкции гидротехнического сооружения — важный параметр. В этой связи была проведена серия экспериментов для оценки снижения водопроницаемости обработанных реагентами хвостов обогащения.

Хвосты обогащения помещали в делительные воронки диаметром 2.7 см, площадью поверхности 5.72 см², высота загрузки составляла 20 см. Далее наносились связующие реагенты с учетом удельного расхода на обрабатываемую поверхность, равного 2 л/м². В качестве контроля выступала колонка с хвостами без реагентов. По истечении 7 сут после нанесения реагентов в колонки подавали определенное количество дистиллированной воды, засекали время фильтрации τ с помощью секундомера.

Результаты исследований доказывают, что обработка хвостов закрепляющими реагентами приводит к существенному снижению водопроницаемости (табл. 2).

ТАБЛИЦА 2. Водопроницаемость хвостов, обработанных реагентами

Реагент	Концентрация, %	τ , с
Синтекс-65	3	324
	5	355
Лукойл DD 3000	3	363
	5	385
	8	477
Волтес ПП-300	3	494
Без реагента		265

Значительное увеличение времени фильтрации воды через слой хвостов отмечено при обработке реагентами Волтес и Лукойл концентраций 3 и 8 % в 1.9 и 1.8 раз соответственно. Данные результаты приведены для расхода 2 л/м². Можно ожидать, что при расходе 1 л/м² снижение проницаемости будет не столь значительным.

Изменение водопроницаемости необходимо учитывать при обработке хвостов связующими реагентами. Увеличение времени фильтрации может привести к снижению гибкости покрытия при сложном рельефе, а в крайних случаях к образованию застойных переувлажненных зон.

ОЦЕНКА РАСТВОРИМОСТИ ПОЛИМЕРНЫХ ПОКРЫТИЙ

Исследования выщелачивания компонентов связующих реагентов проводились с целью оценки растворения покрытий под действием атмосферных осадков и оборотной воды. Растворы связующих реагентов предварительно выдерживали в течение 7 сут до получения пленок. Анализировалось изменение концентраций общего углерода $C_{\text{общ}}$ в растворах после взаимодействия с полимерными пленками. Поскольку испытанные связующие реагенты имеют в составе органические вещества, концентрация общего углерода в растворе после выщелачивания пленок будет свидетельствовать о растворении уже полимеризовавшегося реагента.

Водное выщелачивание пленок, образованных концентрированными растворами реагентов, проводили при различных значениях pH среды (слабокислой и щелочной) в течение 7 сут. Для выщелачивания использовали буферный раствор — тетраборнокислый натрий (pH 9.18) и дистиллированную воду (pH 5.68). Соотношение Т : Ж = 1 : 50, температура составляла 20 °С. Растворы периодически перемешивали.

На рис. 3 представлены концентрации общего углерода в растворе после выщелачивания пленок в течение 7 сут в зависимости от pH среды

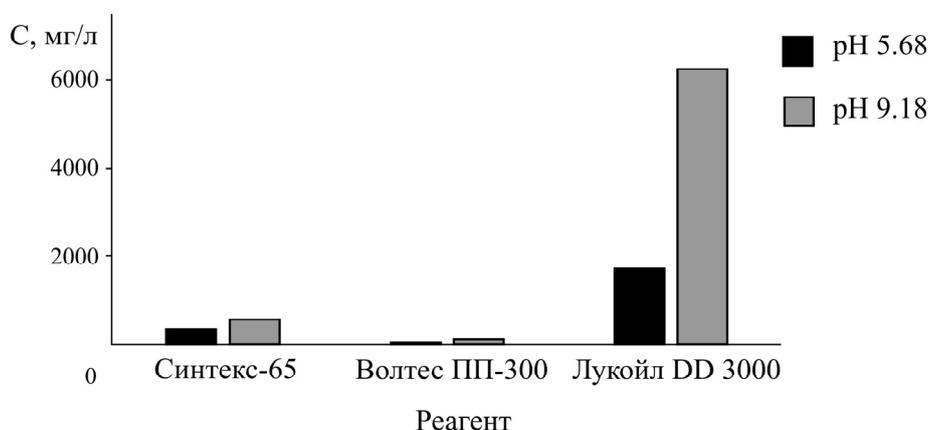


Рис. 3. Концентрации общего углерода в растворе после выщелачивания пленок концентратов реагентов в течение 7 сут при различных pH среды

Для пленок, образованных реагентом Волтес ПП-300, характерны минимальные концентрации $C_{\text{общ}}$ в нейтральных и щелочных растворах после 7 сут выщелачивания. Большие концентрации $C_{\text{общ}}$ обнаружены в растворах после выщелачивания пленок Синтекс-65 и Лукойл DD 3000.

Практически для всех пленок минимальные концентрации $C_{\text{общ}}$ зафиксированы после взаимодействия с дистиллированной водой, при переходе к раствору с pH 9.18 концентрации $C_{\text{общ}}$ повышались. Существенный рост концентраций $C_{\text{общ}}$ в щелочной среде наблюдается для пленок, образованных реагентом Лукойл DD 3000.

Растворимость образованных полимерных пленок, в том числе при рН 5.68 (водородный показатель соответствует атмосферным осадкам) и в щелочной среде (процесс флотации, например, апатит-нефелиновых руд ведут при рН 9.6–9.7) необходимо учитывать при оценке свойств образованных связующими реагентами покрытий. Можно констатировать, что отечественные связующие не уступают по ключевым характеристикам импортным образцам, приведенным в работах [1, 2].

ВЫВОДЫ

Оптимальные прочностные характеристики установлены для реагента Лукойл DD 3000, образующего эластичное прочное покрытие. Значительное снижение водопроницаемости отмечено при обработке хвостов реагентами Волтес ПП-300 и Лукойл DD 300 концентраций 3 и 8% соответственно при расходе 2 л/м².

По итогам комплекса лабораторных исследований для укрупненных испытаний на хвостохранилище рекомендован связующий реагент Лукойл DD 3000. Необходимо отметить, что все рассматриваемые в работе связующие создают покрытия, препятствующие пылению. Однако окончательный выбор в пользу того или иного реагента необходимо делать, основываясь на размерах нуждающихся в обработке площадей и данных вещественного и гранулометрического состава пылящей поверхности.

Авторы выражают благодарность сотрудникам Института проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН Н. А. Ильиной, А. В. Тимохину и А. А. Горячеву за помощь в отборе проб хвостов обогащения и определении инженерно-геологических характеристик.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Макаров Д. В., Светлов А. В., Горячев А. А., Кони́на О. Т., Маслoбoев В. А. К проблеме пыления хвостохранилищ в связи с изменением климата на примере горного предприятия Крайнего Севера России // ГИАБ. — 2021. — Т. 5. — С. 122–133.
2. Маслoбoев В. А., Светлов А. В., Кони́на О. Т., Митрофанова Г. В., Туртанов А. В., Макаров Д. В. Выбор связующих реагентов для предотвращения пылеобразования на хвостохранилищах переработки апатит-нефелиновых руд // ФТПРПИ. — 2018. — № 2. — С. 161–171.
3. Noble T. L., Parbhakar-Fox A., Berry R. F., and Lottermoser B. Mineral dust emissions at metalliferous mine sites, *Environmental Indicators in Metal*, Switzerland, 2017. — P. 281–306.
4. Jain R. K., Cui Z. C., and Domen J. K. *Environmental impact of mining and mineral processing: Management, monitoring, and auditing strategies*, Oxford, 2016. — P. 153–157.
5. Chen D. W., Nie W., Cai P., and Liu Z. Q. The diffusion of dust in a fully-mechanized mining face with a mining height of 7 m and the application of wet dust-collecting nets, *J. Cleaner Production*, 2018, Vol. 205. — P. 463–476.
6. Loredó J., Soto J., Álvarez R., and Ordóñez A. Atmospheric monitoring at abandoned mercury minesites in Asturias (NW Spain), *Env. Monitoring Assessment*, 2007, Vol. 130. — P. 201–214.
7. Corriveau M. C., Jamieson H. E., Parsons M. B., Campbell J. L., and Lanzirótti A. Direct characterization of airborne particles associated with arsenic-rich mine tailings: particle size, mineralogy and texture, *Applied Geochemistry*, 2011, Vol. 26. — P. 1639–1648.
8. Lilic N., Cvjetic A., Knezevic D., Milisavljevic V., and Pantelic U. Dust and noise environmental impact assessment and control in Serbian mining practice, *Minerals*, 2018, Vol. 8, No. 2. — P. 34.

9. **Buikema N. D., Zwissler B., Seagren E. A., Oommen T., and Vitton S.** Stabilisation of iron mine tailings through biocalcification, *Environmental Geotechnics*, 2018, Vol. 5, No. 2. — P. 94–106.
10. **Доклад** о состоянии и об охране окружающей среды Мурманской области в 2020 г. [Электронный ресурс], 2021.
11. **Gašparac G., Jeričević A., Kumar P., and Grisogono B.** Regional-scale modelling for the assessment of atmospheric particulate matter concentrations at rural background locations in Europe, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2020, Vol. 20, No. 11. — P. 6395–6415.
12. **Wang J., Xie X., and Fang C.** Temporal and spatial distribution characteristics of atmospheric particulate matter (PM₁₀ and PM_{2.5}) in Changchun and analysis of its influencing factors, *Atmosphere*, 2019, Vol. 10. — P. 651.
13. **Makarov D. V., Konina O. T., and Goryachev A. A.** Dusting suppression at tailings storage facilities, *J. Min. Sci.*, 2021, Vol. 57, No. 4. — P. 681–688.
14. **Красавцева Е. А., Макаров Д. В., Максимова В. В., Светлов А. В.** Подбор оптимального расхода связующего реагента для закрепления поверхности хранилища хвостов обогащения лопаритовых руд // *Маркшейдерия и недропользование*. — 2021. — № 4. — С. 9–14.
15. **Krasavtseva E. A., Makarov D. V., Maksimova V. V., Selivanova E. A., and Ikkonen P. V.** Studies of properties and composition of loparite ore mill tailings, *J. Min. Sci.*, 2021, Vol. 57. — P. 531–538.

Поступила в редакцию 06/IV 2023

После доработки 14/V 2023

Принята к публикации 18/V 2023