

УДК 622.17, 622.807.2

**ВЫБОР СВЯЗУЮЩИХ РЕАГЕНТОВ ДЛЯ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ ПЫЛЕОБРАЗОВАНИЯ
НА ХВОСТОХРАНИЛИЩАХ ПЕРЕРАБОТКИ АПАТИТ-НЕФЕЛИНОВЫХ РУД**

**В. А. Маслобоев¹, А. В. Светлов², О. Т. Кониная³,
Г. В. Митрофанова⁴, А. В. Туртанов⁵, Д. В. Макаров²**

¹ФИЦ Кольский научный центр РАН, E-mail: masloboev@admksk.apatity.ru,
ул. Ферсмана, 14, 184209, г. Апатиты, Россия

²Институт проблем промышленной экологии Севера Кольского НЦ РАН,
ул. Ферсмана, 14а, 184209, г. Апатиты, Россия

³ЗАО “Орика СиАйЭс”, ул. Юбилейная, 2, 184250, г. Кировск, Россия

⁴Горный институт Кольского НЦ РАН, ул. Ферсмана, 24, 184209, г. Апатиты, Россия

⁵АО “Апатит”, ул. Ленинградская, 1, 184250, г. Кировск, Россия

Изучены методы рекультивации и консервации хвостохранилищ. Исследованы инженерно-геологические свойства хвостов обогащения апатит-нефелиновых руд АНОФ-2 АО “Апатит” на участках нанесения реагентов. Выполнен мониторинг состояния закрепленной поверхности, образованной связующими реагентами Alcotac DS1, Dustbind и Floset S44. Проведены лабораторные исследования физико-механических свойств и устойчивости по отношению к агрессивным воздействиям, влияния поступления связующих реагентов в оборотную воду на технологические показатели флотации апатит-нефелиновой руды. Рекомендован оптимальный связующий реагент Dustbind.

Хвосты обогащения апатит-нефелиновых руд, пылеподавление, закрепление поверхности хвостохранилищ, связующие реагенты

DOI: 10.15372/FTPRPI20180218

Основной источник фосфатного сырья в Российской Федерации — апатит-нефелиновые руды Мурманской области, объем добычи которых в 2016 г. составил 30 789 тыс. т [1]. АО “Апатит” — одно из крупнейших горно-обогатительных предприятий страны.

При разработке полезных ископаемых обогатительный передел предусматривает формирование хранилищ пустой породы. Современные хвостовые хозяйства представляют собой сложный комплекс гидротехнических сооружений, включающих системы гидротранспорта и гидрораскладки хвостов обогащения, очистки и отвода воды, возврата ее в оборот после осветления. Общая площадь хвостохранилищ АО “Апатит” более 2.5 тыс. га. Они являются самыми крупными техногенными массивами и наиболее интенсивными источниками аэротехногенного воздействия на окружающую среду в Мурманской области.

Одно из двух эксплуатируемых хвостохранилищ АО “Апатит” предназначено для складирования отвальных хвостов апатит-нефелиновой обогатительной фабрики № 2 (АНОФ-2), а также тонкодисперсных золошлаковых отходов Апатитской ТЭЦ. АНОФ-2 — это крупный

производственный комплекс по обогащению апатит-нефелиновых руд с выделением апатитового и нефелинового концентратов, а также сопутствующих алюмокремниевого коагулянта-флокулянта, сфенового и эгиринового концентратов. Хвостохранилище АНОФ-2 расположено в губе Белой оз. Имандра на расстоянии около 1.5 км на северо-запад от площадки основного производства АНОФ-2, в 3.1 км от границы селитебной зоны. Территория хвостохранилища общей площадью 7.8 км² вытянута с юго-востока на северо-запад, ограничена с востока Хибинским горным массивом, а с запада — оз. Имандра. Ежегодно с АНОФ-2 поступает более 6 млн м³ хвостов обогащения.

Высыхание поверхности хвостохранилища в летний период обеспечивает быструю потерю влаги верхними слоями хвостов, и под воздействием ветровой эрозии возникает пыление. Это приводит к ухудшению санитарно-гигиенической обстановки в г. Апатиты. Хвостохранилище АНОФ-2 — наиболее интенсивный источник пыли среди техногенных объектов Мурманской области.

Первое исследование потоков рассеивания элементов при хранении хвостов обогащения апатит-нефелиновых руд за счет аэротехногенного переноса и гипергенных процессов было выполнено в 1998 г. [2]. Результаты оценки загрязнения атмосферы г. Апатиты, проведенные позднее на основе численного моделирования для максимальной проектной высоты хвостохранилища АНОФ-2 с изменением скорости набегающего ветрового потока, показали, что при скорости ветра до 8 м/с опасность превышения предельно допустимой концентрации пыли отсутствует [3–5]. Однако при штормовых ветрах 20–23 м/с соблюдение санитарно-гигиенических норм можно обеспечить только за счет сокращения существующих площадей пыления.

В настоящее время выделяется три группы методов рекультивации и консервации промышленных отвалов: механический, физико-химический и биологический [6–27; и др.]. На действующих хвостохранилищах для кратковременного закрепления пылящих участков рекомендуется физико-химический метод, направленный на создание на поверхности промышленного отвала противоэрозионного покрытия путем обработки ее вяжущими составами [6, 10, 15–22; и др.].

Начиная с 2003 г. АНОФ-2 АО “Апатит” осуществлял закрепление хвостов анионной битумной эмульсией с разбавлением горячей водой в соотношении от 1:2 до 1:10. Она не теряет свои потребительские свойства при замораживании, что особенно важно в условиях Крайнего Севера. Существенным преимуществом эмульсии является долговечность, составляющая 14–6 мес. Это позволяет использовать ее для закрепления не только намывных пляжей, но и поверхностей откосов и оснований дамб. Однако при неблагоприятных метеорологических условиях (скорость ветра ≥ 10 м/с) под действием ветровой эрозии поверхностная пленка разрушалась. Кроме того, для битума характерна низкая растворимость в холодной воде и, как следствие, недостаточная технологичность процесса обработки хвостов. Наблюдались единичные случаи плохой адгезии эмульсии к поверхности пляжа из-за наличия шламовых частиц намывного материала, который образуется в местах вытекания струи пульпы. Именно эти участки не выдерживали ветровой нагрузки и становились центрами массовых срывов наносимых покрытий и основными источниками мелкодисперсной пыли.

В этой связи АО “Апатит” осуществляет поиск и испытание новых связующих реагентов. Цель настоящих исследований — обоснование выбора оптимального связующего реагента для закрепления пылящей поверхности хвостохранилища АНОФ-2.

ИССЛЕДОВАНИЯ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ХВОСТОВ НА УЧАСТКАХ НАНЕСЕНИЯ РЕАГЕНТОВ

На участках будущего применения связующих реагентов предварительно выполнены исследования некоторых инженерно-геологических свойств хвостов. Отобрано десять проб с поверхности, а также четыре пробы в шурфе с шагом 0.5 м на глубину 1.5 м. В двух точках вблизи фронта намыва взяты пробы с поверхности и глубины 0.7 м. Пробы хвостов с ненарушенной структурой отбирали методом режущего кольца.

На рис. 1 приведены кумулятивные кривые гранулометрического состава хвостов. Состав поверхностного слоя хвостов обогащения на участке применения реагентов достаточно однороден (рис. 1а). Преобладает фракция с размером зерен $-0.5+0.25$ мм (29.8–41.5%) и $-0.25+0.1$ мм (38.7–53.2%). В сумме эти фракции составляют 70–80% массы хвостов опытного участка. Хвосты поверхностного слоя участка применения связующих реагентов по литологической классификации можно отнести к мелко- и среднезернистым пескам [28]. Если сопоставить эти значения с данными гранулометрического состава пульпы перед подачей на хвостохранилище, то очевидно, что хвосты на участке применения реагентов характеризуются меньшим выходом мелких классов. Это объясняется гидравлической дифференциацией потока хвостовой пульпы, а также тем, что при высыхании хвостов мелкодисперсные частицы подверглись пылеуносу с поверхности и частично перешли в нижние горизонты вследствие суффозии. Такое же заключение можно сделать исходя из анализа кумулятивных кривых гранулометрического состава хвостов обогащения шурфа (рис. 1б).

На рис. 1в представлен гранулометрический состав хвостов обогащения текущего производства с поверхности и с глубины 0.7 м, при этом пробы отобраны с одинакового расстояния до уреза воды: в точке 1 намыв проведен раньше, чем в точке 2. Для свеженамытых хвостов характерно различие гранулометрического состава в зависимости от глубины отбора пробы. Так, если в пробах 2 и 4 с глубины 0.7 м преобладают фракции -0.05 мм (46.3 и 62.3%) и $-0.064+0.05$ мм (16.3 и 15.3%), то для пробы 1 отмечен наибольший выход классов $-0.5+0.25$ мм (21.1%) и $-0.25+0.1$ мм (47.0%). В пробе 3 преобладает класс -0.05 мм (38.3%), но по сравнению с пробой 4 увеличивается выход класса $-0.25+0.1$ мм. Это можно объяснить суффозионными явлениями: шламовые частицы проникают в нижние слои хвостов при движении растворов по мере высыхания хвостов. В этой связи гранулометрический состав хвостов в точке 1 с поверхности более соответствует составу хвостов участка применения связующих реагентов.

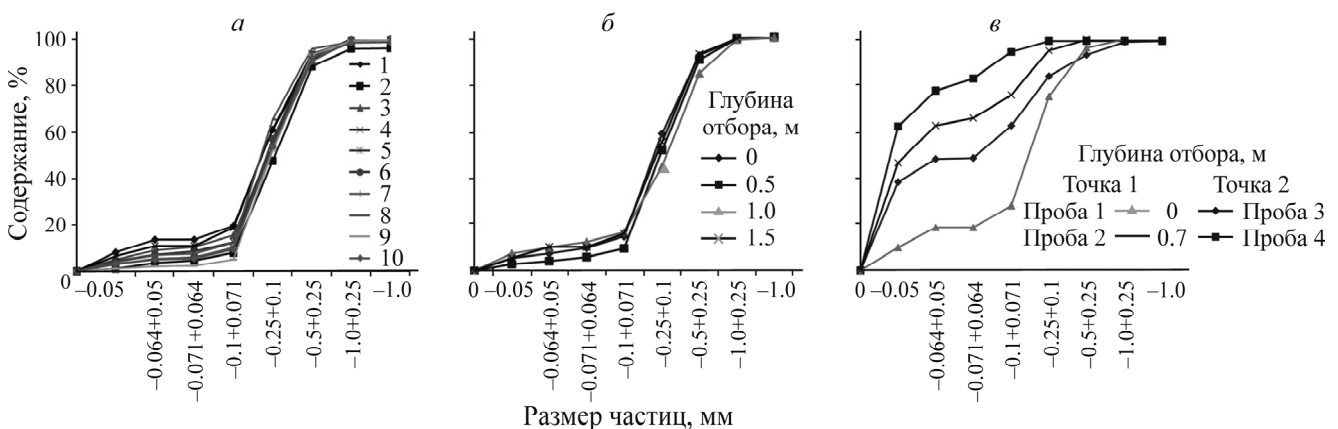


Рис. 1. Кумулятивные кривые гранулометрического состава хвостов обогащения на участке будущего применения реагентов: а — пробы поверхностного слоя; б — пробы шурфа; в — гранулометрический состав свежеуложенных хвостов обогащения

Плотность хвостов поверхностного слоя в естественном залегании варьирует незначительно и составляет в среднем 1.65 г/см^3 . Достаточно выдержаны и значения плотностей хвостов в естественном залегании и в сухом состоянии в шурфе ($1.58 - 1.68 \text{ г/см}^3$), а также свежеуложенных хвостов ($1.55 - 1.66 \text{ г/см}^3$).

Анализ влажности хвостов в шурфе показал, что она практически одинакова ($7.0 - 7.4\%$) и несколько снижается на глубине 1.5 м (4.43%). Для свеженамытых хвостов характерно преобладание большей влажности на глубине 0.7 м (проба 2 — 10.5 , проба 4 — 23.8%), чем на поверхности (проба 1 — 7.0 , проба 3 — 11.7%). Распределение влажности свежеуложенных хвостов по глубине подтверждает протекание суффозионных процессов при высыхании и свидетельствует о потенциальной возможности пыления хвостов уже на ранних стадиях их хранения после намыва.

Истинная плотность хвостов варьирует от 2.76 до 2.88 г/см^3 . По пористости хвосты соответствуют пескам в условиях естественного залегания ($25 - 45\%$), пористость проб свежеуложенных хвостов соответствует глинистым грунтам в условиях естественного залегания ($30 - 60\%$). Судя по коэффициенту пористости ($0.76 - 1.31$), исследованные пробы хвостов по плотности сложения относятся к рыхлым грунтам [28].

Химический состав усредненной пробы хвостов, отобранных с поверхности экспериментального участка, представлен в таблице. Преобладающим минералом в образцах является нефелин, содержание которого превышает 50% , а также эгирин, полевые шпаты, вторичные минералы по нефелину, апатит, титанит, магнетит, слюды.

Химический состав хвостов обогащения

Содержание, %												
SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	SO ₃	ппп	□
39.04	2.42	23.10	6.13	3.20	5.00	1.09	11.94	5.00	1.21	0.15	1.10	99.38

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОЧНОСТНЫХ И ФИЛЬТРАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОКРЫТИЙ СВЯЗУЮЩИХ РЕАГЕНТОВ

Площадь экспериментальной площадки, выделенной АО «Апатит» под хвостохранилище фабрики АНОФ-2 для исследования закрепления пылящих хвостов связующими реагентами Alcotac DS1, Dustbind и Floset S44, составила 8 га . Контроль закрепленной поверхности осуществляли в два этапа — через неделю после нанесения состава в августе 2015 г. и в начале холодного периода. В третьей декаде октября, когда наступили устойчивые отрицательные температуры воздуха и выпал снег, проведено опробование закрепленных площадей. Образцы продемонстрировали достаточную прочность в естественных условиях при температуре воздуха -4°C .

Для лабораторных исследований были приготовлены керны хвостов обогащения, отобранных с опытного участка хвостохранилища, площадь поверхности составляла 16.62 см^2 . Согласно предоставленным производителями инструкциям, приготовлены связующие реагенты с учетом удельного расхода на обрабатываемую поверхность 30 г/м^2 : Alcotac DS1 — 5% -й водный раствор, Floset S44 — 3% -й, Dustbind — 2% -й водный раствор. Раствор наносили на поверхность керна хвостов с помощью пульверизатора, при этом контролировали расход распыляемого раствора. Толщина защитного слоя реагентов составила: Alcotac DS1 — 10 мм ; Floset S44 — 1.5 мм ; Dustbind — 5.5 мм .

Измерение прочности покрытия обработанных связующими реагентами хвостов выполняли с помощью пенетрометра М-984 ПК. Масса плунжера с иглой составляла 50 г. Для каждой пробы измерение повторяли трижды, вычисляли среднее значение глубины погружения иглы, которое принимали обратно пропорциональным условной прочности.

Кинетику набора прочности защитными покрытиями измеряли в течение 10 сут (рис. 2а). Число пенетрации уменьшилось с течением времени, что свидетельствует об образовании на поверхности хвостов полимерного защитного слоя. Наиболее прочным оказалось покрытие, образованное реагентом Alcotac DS1. Этот же реагент демонстрировал наиболее быстрый набор прочности. Реагент Dustbind набирал прочность плавно, однако наибольшей прочности достиг через 1 сут после нанесения слоя. Реагент Floset S44 показал промежуточные прочностные характеристики начиная с 4 сут после нанесения, но набор прочности проходил медленно.

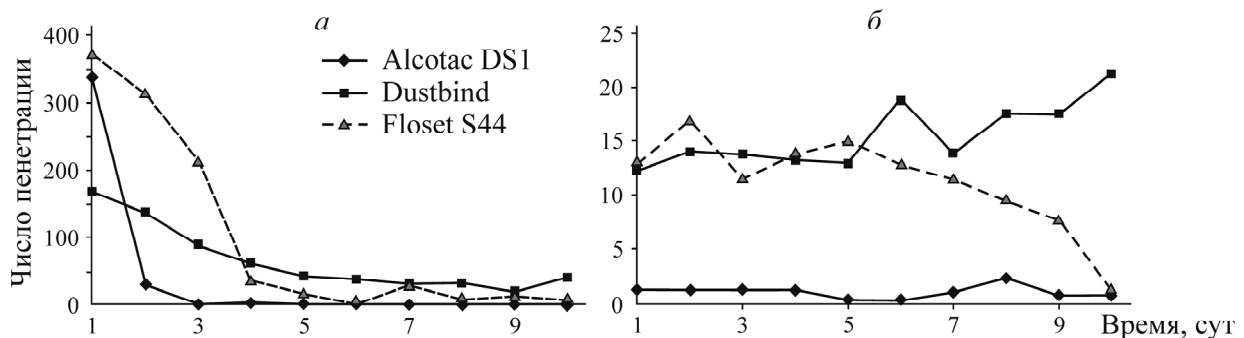


Рис. 2. Изменение условной прочности покрытия в течение 10 сут с момента нанесения раствора реагента (а) и в течение 10 сут (циклов) “замораживания – оттаивания” (б)

С учетом климатических характеристик района размещения хвостохранилища АНОФ-2 и результатов мониторинга к покрытиям, образованным связующими реагентами, предъявляются требования к устойчивости при переходе температуры воздуха к отрицательным значениям и обратно. В мае, первых числах июня и сентябре в районе хвостохранилища нередко наблюдаются заморозки. В этой связи проверена устойчивость покрытий после их обработки в режиме “замораживание – оттаивание”. Для этого покрытия после набора прочности в течение 10 сут помещали в морозильную камеру при температуре -18°C . Образцы выдерживали в течение 18 ч, затем их извлекали и оттаивали при комнатной температуре в течение 5 ч. Далее проводили измерение условной прочности методом пенетрации. Выполнено 10 циклов попеременного “замораживания – оттаивания”. Результаты измерений прочностных характеристик покрытий представлены на рис. 2б. Все покрытия показали хорошую устойчивость к циклическому воздействию отрицательных температур. Следует отметить, что в натуральных условиях при эксплуатации связующих реагентов подобный жесткий температурный режим маловероятен.

Водопроницаемость (коэффициент фильтрации) — один из важных параметров качества покрытия. Снижение водопроницаемости может приводить к образованию локальных обводненных участков в период дождей и взаимодействию покрытия с атмосферными выпадениями, а при последующем высыхании — к его повреждению. Фильтрационные свойства покрытий при обработке связующими реагентами необходимо учитывать в связи с тем, что образование прослоек закрепленных хвостов с коэффициентом фильтрации, значительно меньшим, чем у намытых хвостов, может привести к подъему уровня кривой депрессии и выклиниванию фильтрационного потока на низовой откос.

Коэффициент фильтрации K_{ϕ} образцов хвостов и хвостов с нанесенными покрытиями рассчитывали по формуле

$$K_{\phi} = \frac{964Q}{\tau Fl},$$

где 964 — переводной коэффициент (из см/с в м/сут); Q — объем профильтровавшейся воды, мл; τ — время, с; F — площадь поперечного сечения, см²; $l = 1$ — градиент напора.

Коэффициент фильтрации измеряли по истечении 7 сут после нанесения реагентов. Обработка хвостов закрепляющими реагентами приводила к существенному снижению коэффициента фильтрации. Коэффициент хвостов $K_{\phi} = 0.627$ м/сут соответствовал коэффициенту фильтрации пылеватых песков, после обработки связующими реагентами — суглинкам (0.005–0.4 м/сут). Степень водопроницаемости хвостов изменилась от водопроницаемых до слабопроницаемых. Наименьшее значение $K_{\phi} = 0.008$ м/сут получено при обработке хвостов реагентом Floset S44, наибольшее $K_{\phi} = 0.082$ м/сут — при обработке Alcotac DS1. Реагент Dustbind ($K_{\phi} = 0.013$ м/сут) занимает промежуточное положение.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ СВЯЗУЮЩИХ РЕАГЕНТОВ И ВЛИЯНИЯ ЭТИХ ПРОЦЕССОВ НА ФЛОТАЦИЮ АПАТИТА И ОСВЕТЛЕНИЕ ОБОРОТНОЙ ВОДЫ

Исследования выщелачивания компонентов реагентов проводили на образованных полимерных пленках. Предварительно растворы связующих реагентов выдерживали в течение 7 сут до получения пленок. Далее осуществляли водное выщелачивание при различных значениях pH среды (кислой, нейтральной и щелочной) в течение 4 и 7 сут. Соотношение Т : Ж составляло 1 : 50, температура 20°C. Для выщелачивания использовали буферные растворы при pH 1.68, 5.8 и 9.18. Растворы периодически перемешивали.

В процессе выщелачивания во всех растворах наблюдались потери массы полимерных пленок, образованных связующими реагентами (рис. 3). Отмечен рост потери массы пленок при повышении pH раствора, однако для пленок, образованных реагентами Dustbind и Floset S44, они незначительны: 3.3 и 4.3 % соответственно. Для пленки реагента Alcotac DS1 характерны более заметные потери массы во всем диапазоне pH растворов (рис. 3). При переходе к щелочному раствору зафиксирован ее резкий рост (51.81 % после 7 сут выщелачивания). Вероятно, с этим обстоятельством связана наибольшая величина коэффициента фильтрации хвостов, обработанных связующим реагентом Alcotac DS1.

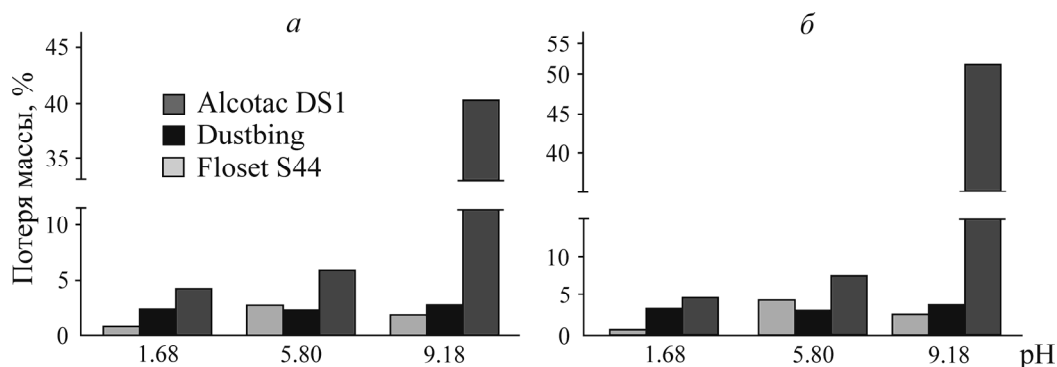


Рис. 3. Зависимость потери массы пленок реагентов после выщелачивания в течение 4 сут (а) и 7 сут (б) при различных значениях pH растворов

Проанализировано изменение концентраций общего углерода $C_{\text{общ}}$ в растворах после взаимодействия с полимерными пленками. На рис. 4 представлены зависимости концентраций общего углерода в растворе после выщелачивания пленок в течение 4 и 7 сут от pH среды. Для пленок, образованных реагентами Dustbind и Floset S44, максимальные концентрации $C_{\text{общ}}$ наблюдаются в кислых растворах (рис. 4б), для пленки Alcotac DS1 — в щелочной среде, причем с увеличением времени взаимодействия происходит рост концентраций с 4.7 до 6.0 г/л. Эти значения на порядок и более выше, чем $C_{\text{общ}}$ в растворе после взаимодействия с пленками, образованными реагентами Dustbind и Floset S44.

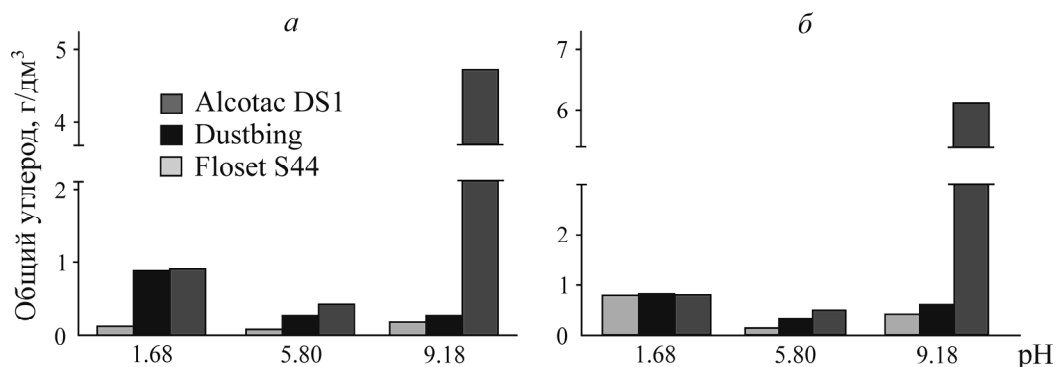


Рис. 4. Концентрация общего углерода в растворе после выщелачивания пленок реагентов в течение 4 сут (а) и 7 сут (б) при различных значениях pH растворов

Таким образом, растворимость полимерных пленок, особенно в щелочной среде (процесс флотации апатит-нефелиновых руд ведут при pH 9.6–9.7), необходимо учитывать при оценке свойств покрытий, образованных связующими реагентами.

Флотация апатита на АНОФ-2 осуществляется с использованием оборотной воды — слива хвостохранилища, где достигается высокая степень (~95 %) очистки стоков от взвешенных веществ. Кроме того, хвостохранилище является мощным буфером, обеспечивающим стабилизацию ионного состава оборотной воды. В нем происходит частичная очистка стоков от отдельных ионов вследствие протекающих различных физико-химических процессов (растворение, образование осадков, сорбция осадками, ионный обмен, поглощение углекислоты и т. д.), а также окисление органических реагентов.

Технологические показатели обогащения в условиях водооборота в значительной мере зависят от состава оборотной воды и минерального состава шламов, остаточной концентрации реагентов и продуктов их взаимодействия. Применение закрепляющих реагентов не исключает их попадание с атмосферными осадками в водную акваторию хвостохранилища. В связи с этим рассмотрение ассортимента используемых реагентов для закрепления пылящих поверхностей хвостохранилища требует оценки их влияния на процесс обогащения.

За максимально возможную принята концентрация, создаваемая в условиях, когда нанесенный на закрепляемую поверхность реагент полностью перейдет в акваторию хвостохранилища. Поскольку исследуемые связующие реагенты представляют собой водные эмульсии полимерных соединений, проведена оценка содержания в них воды. Массовая доля воды определялась методом отгонки с органическим растворителем — толуолом (метод Дина–Старка). Результаты использованы для расчета истинной (по сухому веществу) максимально возможной концентрации реагента в оборотной воде. Она составила: для Alcotac DS1 — 8.38, Dustbind — 8.25, Floset S44 — 7 мг/дм³.

Исследования выполняли на пробе апатит-нефелиновой руды, содержащей 13.8 % P_2O_5 . Раздробленная до крупности –2 мм руда измельчалась при Т:Ж:Ш = 1:0.5:6 до крупности –0.315 мм, при этом содержание в измельченной руде класса +0.16 мм составило 21.3–22.5 % и класса –0.063 мм — 30.0–32.5 %, что соответствует требованиям по гранулометрическому составу питания флотации на АНОФ-2.

Флотацию руды проводили в замкнутом цикле на 6 навесках (360 г) по схеме, которая моделирует фабричную схему флотации получения апатитового концентрата (рис. 5). Основную флотацию вели при содержании твердого 36 %, перечистные операции — 20–25 %. Для операций использовали оборотную воду хвостохранилища АНОФ-2. Необходимая концентрация связующего реагента в оборотной воде достигалась растворением расчетного количества реагента при 18°C. Обратная вода характеризовалась следующими показателями: рН 8.6, содержание (мг/л) взвешенных веществ — 1513, общих солей — 683, Ca^{2+} — 16.1, SO_4^{2-} — 278.3, SiO_2 — 7.1, CO_3^{2-} — 3.8, HCO_3^- — 170.5. Флотацию осуществляли при температуре пульпы ~18°C, рН 9.6–9.7, что создавалось добавлением едкого натра в количестве 30 г/т. В качестве депрессора сопутствующих апатиту минералов применяли жидкое стекло — 90 г/т (100 %-е). Собирателем служила четырехкомпонентная смесь, используемая при флотации апатита на АНОФ-2 и состоящая из 33 % Фосфолана РЕ 65, 19 % СТМ_{хв}, 31 % СТМ_{лист} и 7 % АБСК. Свойства пены, образуемой в основной флотации и при получении готового концентрата, оценивались по принятым в аналитическом центре АО “Апатит” коэффициентам пенообразования $K_{п}$ и разрушения $K_{р}$, а также минерализации пены M (%).

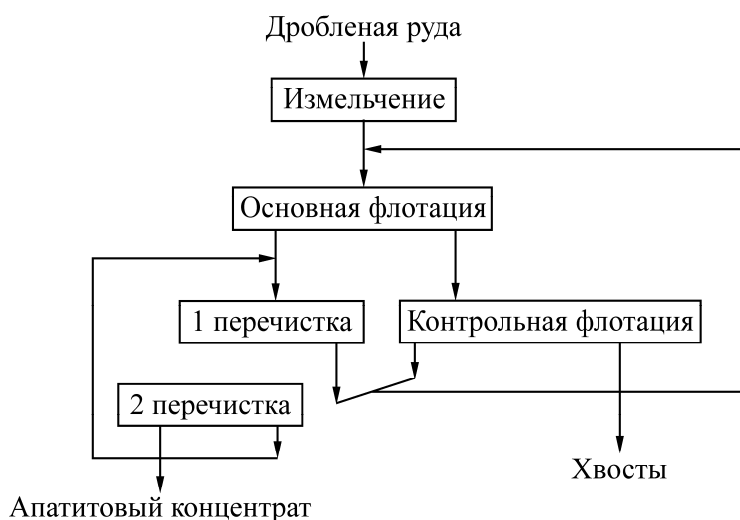


Рис. 5. Схема флотации апатит-нефелиновой руды в замкнутом цикле

Коэффициент пенообразования представляет собой отношение объема пенного слоя $V_{п}$ к массе сухого твердого продукта в пенном слое $m_{тв}$:

$$K_{п} = \frac{V_{п}}{m_{тв}},$$

а коэффициент разрушения — отношение разности объемов исходной $V_{исх}$ и разрушенной пены $V_{р}$ к объему исходного пенного слоя:

$$K_{р} = \frac{V_{исх} - V_{р}}{V_{исх}}.$$

Минерализация пены M — отношение массы сухого твердого продукта $m_{\text{ТВ}}$ к массе пенного продукта $m_{\text{п}}$: $M = m_{\text{ТВ}} / m_{\text{п}} \cdot 100\%$.

Установлено, что реагенты Dustbind и Floset S44 при максимально возможных концентрациях в оборотной воде (8.5 и 3.6–7.2 мг/л соответственно) не оказывают заметного негативного влияния на технологические показатели получения апатитового концентрата. При концентрации Floset S44 в оборотной воде 7.2 мг/л наблюдалось повышение пенообразования ($K_{\text{п}} = 2.8$ против 2.3–2.5 в штатном режиме) и образование в перечистной операции более устойчивой пены ($K_{\text{р}} = 0.44$ против 0.47–0.53 в штатном режиме), однако это не нарушало селективности процесса. Для реагентов Dustbind и Floset S44 минерализация находилась на уровне штатного режима ($M = 43 - 44\%$).

Реагент Alcotac DS1 при максимально возможной концентрации 8.6 мг/л приводит к повышению пенообразования ($K_{\text{п}} = 2.7 - 2.9$ против 2.3–2.5 в штатном режиме), образуемая при этом пена характеризуется меньшей устойчивостью: $K_{\text{р}}$ в основной флотации 0.52–0.58 против 0.48 и в перечистной операции 0.61–0.65 против 0.47–0.53 в штатном режиме. Для реагента Alcotac DS1 зафиксирована минерализация несколько меньше штатной — 39–41%. Активация флотации сопровождалась увеличением выхода апатитового концентрата и снижением содержания в нем P_2O_5 : 39.0–39.06 против 39.26–39.46% в штатном режиме. Сохранение качества апатитового концентрата на уровне показателей штатного режима путем снижения расхода собирателя с 95 до 80 г/т не дало положительных результатов: получены некондиционные концентраты при тенденции увеличения устойчивости пены ($K_{\text{р}} = 0.34$). При меньшей в 2 раза концентрации Alcotac DS1 в оборотной воде (4.6 мг/л) негативного его влияния не наблюдалось.

Проведена оценка влияния связующих реагентов на процесс осаждения тонкодисперсных и коллоидных частиц в оборотной воде хвостохранилища АНОФ-2 АО «Апатит», характеризующейся значительным содержанием взвешенных веществ — 1650 мг/л.

Методика исследования заключалась в следующем. В цилиндр объемом 1 л помещали оборотную воду с добавлением заданного количества исследуемого реагента, соответствующего максимально возможной его концентрации. Параллельно ставился холостой опыт. Через определенные промежутки времени измеряли объем осветленной фазы. Полученные закономерности представлены на рис. 6.

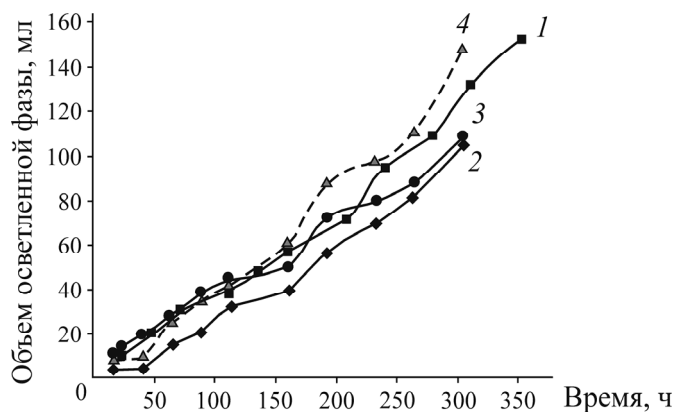


Рис. 6. Кинетика осветленной оборотной воды (1) и оборотной воды при концентрации реагента, мг/л: 8.6 — Alcotac DS1 (2), 8.5 — Dustbind (3), 7.2 — Floset S44 (4)

Результаты свидетельствуют о том, что при заданных концентрациях реагент Floset S44 способствует более быстрому осаждению взвешенных веществ в воде. Для других реагентов проявляется тенденция к повышению устойчивости суспензии, особенно для Alcotac DS1.

ВЫВОДЫ

Представлен краткий обзор существующих и перспективных способов пылеподавления хвостов обогащения. Наименее затратным и наиболее широко применяемым способом пылеподавления хвостохранилищ является физико-химический метод, основанный на формировании искусственных покрытий путем обработки поверхности хвостовых отложений связующими реагентами.

В условиях хвостохранилища АНОФ-2 выполнены мониторинг и лабораторные исследования свойств покрытий, образованных связующими реагентами Alcotac DS1, Dustbind и Floset S44. Все исследованные связующие реагенты показали близкие характеристики.

К преимуществам реагента Alcotac DS1 можно отнести наибольшую прочность покрытия, стойкость в циклах “замораживание – оттаивание”. Однако для данного реагента характерны высокая стоимость обработки, возможное отрицательное влияние на селективность флотации и осветление оборотной воды, чему способствует его недостаточная устойчивость к выщелачиванию.

Реагент Floset S44 продемонстрировал наибольшую устойчивость к выщелачиванию в водных растворах. Вместе с тем атмосферостойкость, кинетика набора прочности и водопроницаемость покрытия оказались наихудшими по сравнению с остальными образцами. Данный реагент не оказывает негативного влияния как на показатели флотации, так и на кинетику осветления оборотной воды.

Наиболее предпочтительным связующим реагентом признан реагент Dustbind. Основные преимущества — низкая стоимость обработки, хорошие атмосферостойкость, водопроницаемость и устойчивость к выщелачиванию в водных растворах. Реагент Dustbind не оказывает негативного влияния на флотацию апатита и кинетику осветления оборотной воды.

В настоящее время реагент Dustbind успешно применяется АО “Апатит” для пылеподавления хвостохранилища АНОФ-2 вместо анионной битумной эмульсии, обеспечивая не только существенное сокращение трудозатрат, но и снижение времени обработки единицы площади хвостов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Доклады о состоянии и об охране окружающей среды Мурманской области в 1997–2016 гг., <http://www.gov-murman.ru/envcond/>.
2. Приймак Т. И., Зосин А. П., Федоренко Ю. В., Кошкина Л. Б., Калабин Г. В. Экологические аспекты процессов геохимической трансформации хвостов обогащения апатито-нефелиновых руд Хибинского месторождения. — Апатиты: КНЦ РАН, 1998. — 51 с.
3. Маслобоев В. А., Бакланов А. А., Мазухина С. И., Ригина О. Ю., Амосов П. В. Численное моделирование процессов пыления хвостохранилища АНОФ-2 // Вестн. МГТУ. — 2014. — Т. 17. — № 2. — С. 376–384.
4. Маслобоев В. А., Бакланов А. А., Амосов П. В. Результаты оценки интенсивности пыления хвостохранилищ // Вестн. МГТУ. — 2016. — Т. 19. — № 1. — С. 13–19.
5. Амосов П. В., Бакланов А. А., Маслобоев В. А. Результаты оценки загрязнения атмосферы при пылении хвостохранилища (на базе трехмерного моделирования) // Горн. журн. — 2017. — № 6. — С. 87–94.
6. Михайлова Т. Л., Хохряков А. В. Рациональное землепользование в цветной металлургии // Горн. журн. — 1993. — № 6. — С. 97–137.

7. **Панов С. Н., Бутаков О. Н., Атавина Т. М.** Хвостохранилища: биологическое закрепление и ускоренная рекультивация // Экология про-ва. — 2014. — № 11. — С. 58–61.
8. **Переверзев В. Н., Подлесная Н. И.** Биологическая рекультивация промышленных отвалов на Крайнем Севере. — Апатиты: КФ АН СССР, 1986. — 104 с.
9. **Месяц С. П., Волкова Е. Ю.** Базовые положения стратегии возвращения нарушенных земель техногенных ландшафтов биосферному фонду // ГИАБ. Экология ресурсопользования. Спец. выпуск. — 2014. — № 12. — С. 3–11.
10. **Лычагин Е. В., Сеница И. В.** Совершенствование методов закрепления пылящих поверхностей // ГИАБ. — 2007. — № 8. — С. 136–140.
11. **Бруев В. П.** Михайловский ГОК наращивает темпы производства // Горн. журн. — 2004. — № 1. — С. 25–28.
12. **Мелентьев В. А., Колпашников Н. П., Волнин Б. А.** Намывные гидротехнические сооружения. — М.: Энергия, 1973. — 248 с.
13. **Кретинин А. В., Борисов В. Г., Жушман В. Н.** Способ борьбы с пылью на действующих хвостохранилищах // Цв. металлургия. — 1988. — № 3. — С. 55–57.
14. **Немировский А. В.** Разработка метода формирования намывного хвостохранилища, устойчивого к ветровым потокам: автореф. дис. ... канд. техн. наук. — М., 2016. — 19 с.
15. **Пат. 2029775 РФ.** Обеспыливающий состав / В. Ф. Малярчук, Л. И. Тесленко, А. И. Веретенников, В. Г. Большунов, В. В. Бойко, Н. Н. Левчук // Оpubл. в БИ. — 1995. — № 6.
16. **Пат. 2137923 РФ.** Состав для закрепления пылящих поверхностей / Е. В. Кичигин, И. В. Тикунова, Л. А. Дейнека // Оpubл. в БИ. — 1999. — № 26.
17. **Пат. 2148720 РФ.** Состав для закрепления пылящих поверхностей / А. И. Перепелицын, В. И. Мочалов, В. И. Шмигирилов // Оpubл. в БИ. — 2000. — № 13.
18. **Браунер Е. Н.** Физико-химическое обоснование способов повышения эффективности закрепления пылящих поверхностей на объектах горнодобывающего комплекса Забайкалья: автореф. дис. ... канд. техн. наук. — Чита, 2000. — 23 с.
19. **Пат. 2151301 РФ.** Способ закрепления пылящих поверхностей / В. В. Ушаков, Е. Н. Браунер // Оpubл. в БИ. — 2000. — № 17.
20. **Patent WO2013108057 A1.** Dust suppressant compositions, methods for making and methods for using / R. M. Devi, N. Madhavan, N. Adhavan, A. Bhattacharyya, N. Arumugam, Publication Date 25.07.2013.
21. **Пат. 2513786 РФ.** Способ закрепления пылящих поверхностей / Ф. И. Лобанов, Е. М. Чукалина, Л. Н. Козлов, Е. Ю. Глоба, Ю. В. Каплунов, Ю. В. Каплунов // Оpubл. в БИ. — 2014. — № 11.
22. **Пат. 2303700 РФ.** Способ закрепления пылящих поверхностей хранилищ отходов обогащения железных руд / С. В. Сергеев, И. В. Сеница, Е. В. Лычагин // Оpubл. в БИ. — 2007. — № 21.
23. **Сеница И. В.** Разработка и исследование параметров способа закрепления пылящих поверхностей хвостохранилищ: автореф. дис. ... канд. техн. наук. — Тула, 2008. — 23 с.
24. **Пат. 2407891 РФ.** Способ закрепления пылящих поверхностей / Ю. В. Шувалов, М. А. Пашкевич, В. П. Ковшов, Ю. Д. Смирнов, С. В. Ковшов, М. М. Малышкин, А. С. Щербо // Оpubл. в БИ. — 2010. — № 36.
25. **Пат. 2175065 РФ.** Устройство для закрепления пылящих поверхностей хвостохранилищ и отвалов горных пород / В. П. Мязин, В. А. Бабелло, В. Ф. Офицеров, Д. В. Ходкевич // Оpubл. в БИ. — 2001. — № 29.
26. **Пат. 2272147 РФ.** Способ пылеподавления на пляжах хвостохранилища и устройство для его осуществления / В. П. Бруев, В. И. Минеев, Ю. С. Спиридонов, Е. В. Кичигин, В. П. Петриченко // Оpubл. в БИ. — 2006. — № 8.
27. **Стриженок А. В.** Управление экологической безопасностью намывных техногенных массивов ОАО «Апатит» в процессе их формирования: автореф. дис. ... канд. техн. наук. — СПб., 2015. — 20 с.
28. **Ломтадзе В. Д.** Инженерная геология. Инженерная петрология. — Л.: Недра, 1984. — 511 с.