

На правах рукописи



Салахов Ильмир Наильевич

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ
ФОРМИРОВАНИЯ ШТАБЕЛЯ НА ОСНОВЕ
ГИДРОМЕХАНИЗИРОВАННОГО СПОСОБА НАМЫВА ДЛЯ
КУЧНОГО ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ**

Специальность 25.00.22 – «Геотехнология (подземная, открытая и
строительная)»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва 2022

Работа выполнена на кафедре геотехнологических способов и физических процессов горного производства Российского государственного геологоразведочного университета имени Серго Орджоникидзе

Научный руководитель:	Дробаденко Валерий Павлович доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ
Официальные оппоненты:	Багазеев Виктор Константинович, доктор технических, профессор, профессор кафедры горного дела ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет» Казаков Владимир Александрович, кандидат технических наук, доцент кафедры геотехнологии освоения недр ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»
Ведущая организация:	ФГБОУ ВО «Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова»

Защита состоится «07» сентября 2022 г. в 14-15 на заседании диссертационного совета Д212.121.09 в Российском государственном геологоразведочном университете имени Серго Орджоникидзе по адресу: 117997, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, дом 23, аудитория 4-73

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Российского государственного геологоразведочного университета имени Серго Орджоникидзе и на сайте: https://www.mgri.ru/science/scientific-and-innovative-activity/dissertation-council/download/Diss_Salakhov_IN.pdf

Автореферат разослан: «31» мая 2022 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор технических наук



А. Л. Вильмс

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы.

Технология кучного выщелачивания как высокорентабельного, требующего относительно минимальных затрат и достаточно простого оборудования для извлечения металлов применяется как в нашей стране, так и многих зарубежных: в первую очередь США, а также Канаде и Австралии, Перу, Чили и др. и успешно внедряется в практику многих других стран благодаря простоте организации, эффективности и накопленному производственному опыту.

Анализ результатов исследований ведущих организаций, в том числе ВНИИХТ, ВНИИ-1, ЗабГУ, Читинского филиала ИГД СО РАН, ИРГИРЕДМЕТ, МГРИ, СФУ, ЦНИГРИ, ЮРГПУ (НПИ) имени М. И. Платова, и др. показывает, что использование методов физико-химической геотехнологии позволяет повысить уровень извлечения ценных компонентов при незначительных капитальных вложениях.

Одним из наиболее ответственных технологических процессов, определяющим технико-экономические показатели, является сооружение рудного штабеля. Однако, при его отсыпке цикличной сухой рудой и транспортной техникой, за счет их неоднократных наездов на сооружаемый штабель в течение всего цикла, уплотняется его структура, что влияет на слеживаемость отсыпаемых слоев горной массы. Также, под воздействием вибраций происходит сегрегация частиц. При неправильной укладке штабеля происходит консолидация мелких частиц, кольтматация, суффозия, образование отдельных фильтрационных каналов, вывалов, свищей, что может привести к разрушению штабеля.

Альтернативным является сооружение штабеля намывом гидротранспортными установками, который обладает такими преимуществами, как поточность технологических операций; возможность высокой степени механизации и автоматизации; малочисленный обслуживающий персонал; снижение экологической нагрузки на окружающую среду.

Таким образом, совершенствование процесса кучного выщелачивания, на основе формирования штабеля методом намыва является актуальной задачей.

Цель работы – повышение эффективности сооружения штабеля методом намыва для формирования разуплотненной структуры массива с увеличенной проницаемостью, а также равномерной и приемлемой фильтрационной способностью по всему его объему.

Идея работы. Разуплотненный штабель для кучного выщелачивания формируется высоконасыщенной пульпой с объемной концентрацией более 30% и регулированием при намыве параметров гидротранспортирования (удельного расхода и плотности гидросмеси) с поочередным выпуском ее на пониженных скоростях рассредоточенным эстакадным способом или с гребней дамб первичного или последующего обвалования.

Задачи исследований:

- краткий анализ технологических процессов кучного выщелачивания и негативных факторов, присущих формированию штабеля цикличной сухойорной и транспортной техникой;
- анализ и установление оптимальных условий работы гидротранспортного оборудования для формирования и подачи высоконасыщенных гидросмесей;
- обоснование рационального метода пересчета расчетно-напорных характеристик грунтонасосов и землесосов с воды на гидросмесь на основе анализа различных известных аналитических уравнений;
- анализ результатов тестирования в производственных условиях расходно-напорных характеристик ЗГМ-2М и ГрТ-1600/25 и аналитическое сопоставление результатов с расчетными данными;
- анализ опытно-промышленных исследований по намыву гидроотвалов торцевым выпуском гидросмеси;
- разработка экспериментального гидротехнологического комплекса и проведение исследований по намыву отложений рассредоточенным способом;
- обоснование и разработка рациональных способов и технологических схем формирования штабелей методом намыва в различных морфологических условиях.

Научные методы исследований. Для решения поставленных задач диссертационного исследования использовались обзор, анализ и обобщение отечественной и зарубежной литературы и практического опыта; проводилось аналитическое исследование результатов опытно-промышленных и лабораторных работ; эмпирические зависимости определялись аппроксимацией полученных данных, а также математическими расчетами, в т. ч. с использованием ЭВМ.

Научная новизна:

1. На основе составленной впервые систематизации и анализа методов расчета расходно-напорных характеристик грунтонасосов

установлены их функциональные количественные показатели с учетом использования факторов гранулометрического состава, объемной концентрации гидросмеси, а также основных параметров рабочего колеса грунтонасосов.

2. Установленные в производственных условиях и сопоставленные с расчетными расходно-напорными характеристиками землесоса ЗГМ-2М и грунтонасоса ГрТ-1600/25 позволили рекомендовать для их определения метод ВНИИ Гидромаш с поправочными коэффициентами, вычисляемыми по аппроксимирующим уравнениям с погрешностью 1-3%.

3. Опытнo-промышленными исследованиями выявлены зависимости изменения средневзвешенного диаметра d_{cp} по длине гидроотвала, характеризующие продольное фракционирование пород при торцевом намыве, влияющие на неравномерность распределения гранулометрического состава, и, как следствие фильтрационной способности массива.

4. Установлены функциональные зависимости снижения плотности намываемых отложений до 20% при увеличении объемной концентрации до 34% и уменьшении удельного расхода (скорости) транспортируемой гидросмеси.

5. Экспериментальными исследованиями установлено, что равномерный рассредоточенный выпуск гидросмеси с регулированием объемной концентрации и скоростей выпуска гидросмеси позволяют формировать разуплотненную структуру намытого массива с повышенной водопроницаемостью по всему его объему.

6. Обоснована поточная технология сооружения штабеля для кучного выщелачивания растворонамывом – при подаче реагента непосредственно в гидротранспортную установку и далее в пульповод с режимами движения гидросмеси, которые характеризуются высокой степенью турбулизации и массообмена с рассредоточенным выпуском пород в фильтрационном режиме.

Научное значение. Обоснована концепция сооружения штабеля способом гидротранспортирования высоконасыщенных гидросмесей >30% по объему, с регулируемыми параметрами (скоростью и концентрацией), формирующим разуплотненную структуру массива с равномерной повышенной проницаемостью и приемлемой фильтрационной способностью по всему объему.

Личный вклад автора состоит в обзоре, анализе и обобщении отечественного и зарубежного опыта в области формирования штабеля

кучного выщелачивания и его фильтрационных характеристик; выполнении теоретических и экспериментальных исследований; обработке и интерпретации результатов опытно-промышленных и лабораторных исследований по формированию намываемых массивов; разработке контрольно-измерительного стенда для лабораторного многофункционального гидрокомплекса.

Научные положения, выносимые на защиту:

1. Структура массива штабеля формируется способом намыва высоконасыщенной твердыми частицами гидросмесью с объемной концентрацией более 30% загрузочными аппаратами вихревого пульпоприготовления или грунтонасосами, расходно-напорные характеристики которых рассчитываются по методике ВНИИ Гидромаш, с установленными в работе корректирующими коэффициентами, а также другими гидротранспортными устройствами с учетом вакуумметрической высоты всасывания – подпором столба жидкости.

2. Разуплотненный намывной массив штабеля с приемлемой фильтрационной способностью и равномерной водопроницаемостью достигается регулированием режима гидротранспортирования (удельного расхода и объемной концентрации пульпы) и рассредоточенным выпуском гидросмеси с пониженными скоростями на карты (ярусы) намыва через распределительный пульповод, уложенный на эстакадах или гребне дамбы первичного или попутного обвалования.

3. Интенсификация технологии сооружения штабеля может осуществляться непосредственной загрузкой реагента с рудной массой в гидротранспортную установку, образующую активную рабочую среду, с повышенным массообменом в поточной технологической цепи: установка – трубопровод – намывной массив; либо гидронамывом с дальнейшим использованием оросительных систем, причем выпуск высоконасыщенной гидросмеси в обоих вариантах осуществляется с чередованием на карты намыва в фильтрационном режиме.

Практическая значимость работы заключается в обосновании способа намыва штабеля для кучного выщелачивания как специального гидротехнического сооружения с гидроизолирующим основанием, уложенными определенными технологическими операциями и схемами с учетом морфологии рельефа местности.

Реализация выводов и рекомендаций. Результаты проведенных исследований используются кафедрой геотехнологических способов и физических процессов горного производства МГРИ для чтения лекций по предметам «Гидротранспорт и складирование горной массы» и

«Скважинная геотехнология», а также разработанный контрольно-измерительный комплекс – для проведения лабораторных и практических работ.

Апробация работы. Результаты проведенных исследований докладывались на международных научно-практических конференциях: «Стратегия развития геологического исследования недр: настоящее и будущее (к 100-летию МГРИ–РГГРУ)», (Москва, МГРИ, 2018); «Новые идеи в науках о Земле» (Москва, МГРИ, 2019); «Проблемы освоения недр в XXI веке глазами молодых» (Москва, ИПКОН РАН, 2019); «Молодые – наукам о Земле» (Москва, МГРИ, 2020); «Проблемы освоения недр в XXI веке глазами молодых» (Москва, ИПКОН РАН, 2021); «Новые идеи в науках о Земле» (Москва, МГРИ, 2021).

Публикации. Основные результаты исследований и научные положения опубликованы в 13 работах, в том числе 5 – в изданиях, рекомендованных ВАК России.

Объем работы. Диссертационная работа изложена на 139 страницах машинописного и состоит из введения, пяти глав, заключения и содержит 51 рисунок, 14 таблиц, список литературы из 119 наименований.

Автор выражает глубокую признательность и благодарность научному руководителю – доктору технических наук, профессору, заслуженному деятелю науки РФ **Дробаденко Валерию Павловичу**, за постоянное внимание и неоценимую помощь в выполнении данной диссертации, а также всему коллективу кафедры геотехнологических способов и физических процессов горного производства МГРИ, за помощь при проведении лабораторных экспериментов и консультации.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении приводится общая характеристика работы, обосновывается ее актуальность, определяется цель, идея, задачи и методы их решения, излагаются научная новизна, защищаемые положения и практическая значимость, приводятся сведения об апробации результатов работы и публикационной активности автора.

В первой главе, на основании анализа работ В. Ж. Аренса, П. Б. Авдеева, В. А. Артушкевича, А. Е. Воробьева, Л. И. Водолазова, В. П. Дробаденко, Н. П. Лаверова, Н. Г. Малухина, А. В. Рашкина, М. И. Фазлуллина, Г. Х. Хчеяна, В. А. Чантурии, Л. В. Шумиловой, И. А. Яшкина и многих других специалистов, представлен обзор и анализ методов кучного выщелачивания, в т. ч. технологии формирования

штабеля. Определены основные негативные факторы, снижающие эффективность процесса кучного выщелачивания при отсыпке рудной массы сухойной техникой.

Вторая глава посвящена обоснованию условий эксплуатации грунтонасосов на гидросмесьях повышенной концентрации ($>20\%$ по объему). Проведен анализ различных конструкций гидротранспортных установок (пульпоприготовительных, безвакуумного устройства непрерывного действия и др.), создающих условия для подачи высоконасыщенных гидросмесей. Систематизированы и проанализированы уравнения пересчета расходно-напорных характеристик грунтонасосов с воды на гидросмесь. На основе полученных при тестировании грунтонасоса ГрТ-1600/25 и землесоса ЗГМ-2М при разработке россыпного месторождения в Магаданской области и сопоставления их с результатами расчетов выявлено, что для корректного расчета расходно-напорных характеристик необходимо использовать уравнение ВНИИ Гидромаш с установленными в работе поправочными коэффициентами.

В третьей главе проведен анализ опытно-промышленных исследований по намыву гидротвалов. Определены основные параметры намываемого массива при торцевом выпуске: его плотностные характеристики и продольное фракционирование частиц в зависимости от параметров гидротранспортирования. При этом выявлено, что торцевой способ намыва не позволяет конструировать штабель с однородной структурой по всему его объему.

В четвертой главе представлены результаты экспериментальных исследований, проведенных на специально разработанном технологическом гидрокомплексе по формированию штабеля загрузочными аппаратами вихревого пульпоприготовления рассредоточенным способом. Установлены зависимости плотности намывных пород от режимов гидротранспортирования. Обосновано формирование разрыхленной структуры массива, зависящей от параметров движения гидросмеси и способов намыва.

В пятой главе обоснована новая технология формирования штабеля растворонамывом, а также определены схемы укладки при гидронамыве в зависимости от условий рельефа. Рассмотрены основные параметры подготовки и создания непроницаемого основания и дамб обвалования.

В заключении отражены основные выводы и рекомендации, обобщающие основные положения диссертационной работы.

Первое защищаемое научное положение:

Структура массива штабеля формируется способом намыва высоконасыщенной твердыми частицами гидросмесью с объемной концентрацией более 30% загрузочными аппаратами вихревого пульпоприготовления или грунтонасосами, расходно-напорные характеристики которых рассчитываются по методике ВНИИ Гидромаш, с установленными в работе корректирующими коэффициентами, а также другими гидротранспортными устройствами с учетом вакуумметрической высоты всасывания – подпором столба жидкости.

При формировании штабеля для кучного выщелачивания необходимым условием является пульпоприготовление и подача высоконасыщенных гидросмесей объемной концентрацией $>20\%$ (оптимально $>30\%$), в зависимости от грансостава намываемых пород, которые осуществляются разработанным в МГРИ загрузочным аппаратом с использованием коаксиально-закрученных жидкостных струй (вихревого пульпоприготовления), новизна которого подтверждена патентами РФ и зарубежных стран (рис. 1).

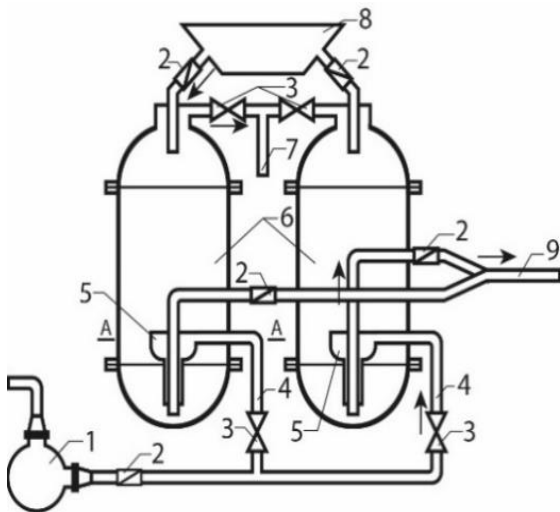


Рис. 1. Принципиальная схема загрузочного аппарата с вихревым пульпоприготовлением в цилиндрическом исполнении. 1 – водяной насос; 2 – обратные клапаны; 3– задвижки; 4 – напорные водоводы; 5 – камеры закручивания; 6 – загрузочно-обменные емкости; 7 – сливной трубопровод; 8 – загрузочный бункер; 9 – пульповод

Различные его конструкции успешно прошли апробацию в производственных условиях (рис. 2): при гидротранспортировании хвостов обогащения на расстояние более 2 км на Верхне-Днепровском ГМК, чернового ильменитового концентрата на Иршинском ГОКе, при

разработке одного из полигонов Сусуманского ГОКа, а также при гидроподъеме твердого в акватории Черного моря близ г. Новороссийск (Южморгеология).

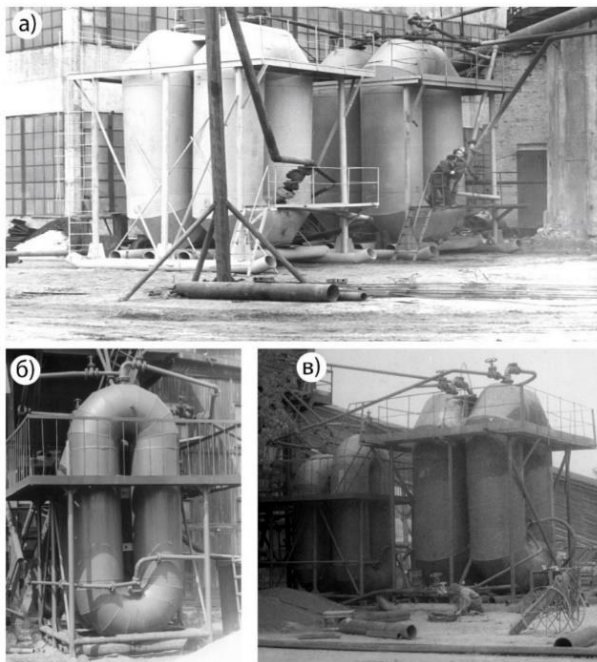


Рис. 2. *Опытно-промышленные испытания загрузочных аппаратов вихревого пульпо-приготовления: а, б) при гидротранспорте хвостов обогащения на Верхнеднепровском ГМК; в) – Иршинский ГОК при гидротранспорте ильменитосодержащего черного концентрата*

Другим гидротранспортным оборудованием являются центробежные грунтонасосы. Однако, их паспортные расходно-напорные характеристики, устанавливаемые заводом изготовителем по воде, принимаются в качестве стандарта или эталона, а их значения для работы по гидросмесьям рассчитываются по различным методам. Нами проведены аналитические исследования всех известных в технической литературе уравнений пересчета грунтонасосов с воды на гидросмесь в зависимости от средневзвешенного диаметра и объемной концентрации. Некоторые из них представлены на рис. 3. Анализ результатов показал их неоднозначность и значительные расхождения между ними с максимальной погрешностью до 94%.

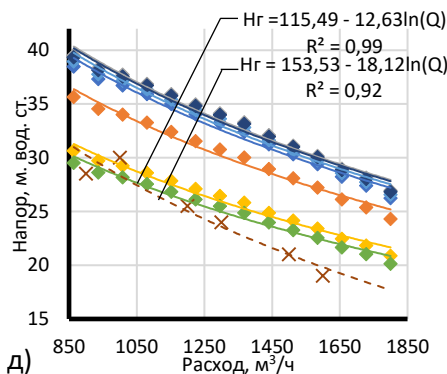
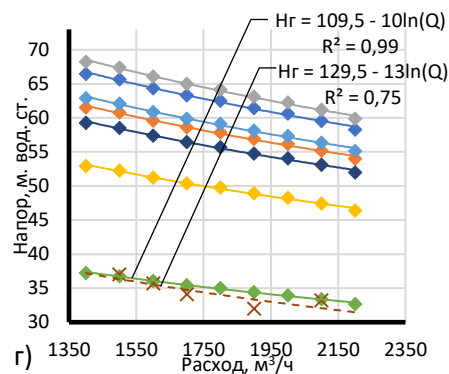
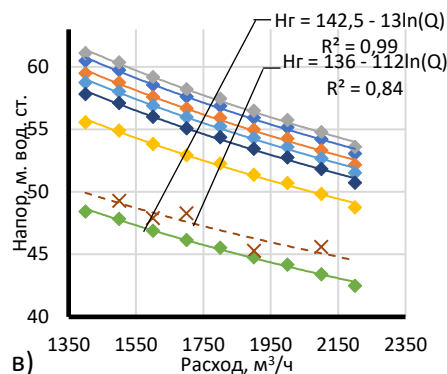
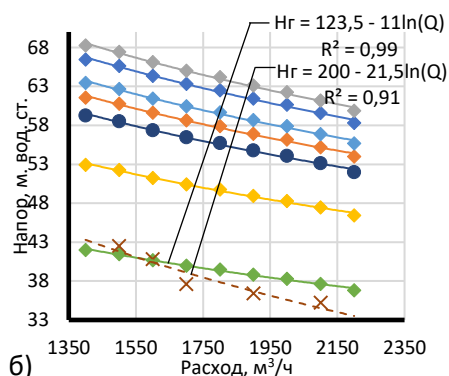
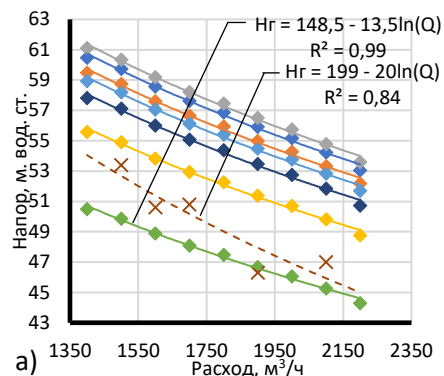


Рис. 3. Сравнение расчетных и тестируемых расходно-напорных характеристик грунтонасосов:
 а – ЗГМ-2М при $d_{cp}=9,3$ мм, $S=7,3\%$; б – ЗГМ-2М при $d_{cp}=9,3$ мм, $S=20\%$; в – ЗГМ-2М при $d_{cp}=24$ мм, $S=7,3\%$; г – ЗГМ-2М при $d_{cp}=24$ мм, $S=20\%$; д – ГрТ-1600/25 при $d_{cp}=1,0$ мм, $S=20\%$.
 ■ Смолдырев А. Е.; ■ Шкундин Б. М.; ■ Холин Н. Д.; ■ Буржес К. Е.; ■ ВНИИ им. Веденеева; ■ ВНИИ Гидромаш; ■ Животовский Л. С.;
 ✕ результаты тестирования

Поэтому было проведено тестирование при эксплуатации землесоса ЗГМ-2М и грунтонасоса ГрТ-1600/25 на одном из полигонов при бульдозерно- и экскаваторно-гидравлической разработке россыпи Сусуманского ГОКа (Магаданская обл.). Полученные при этом фактические расходно-напорные характеристики определялись контрольно-измерительной аппаратурой переменного перепада давления (расходомером трубы «Антивентури», плотномером с шаровым датчиком К. В. Диминского, техническими манометрами с разделителями). Эти устройства были смонтированы на наклонном пульповоде диаметром 425 мм при подаче гидросмеси на промывочный прибор ПГШ- II-75 (рис. 4).

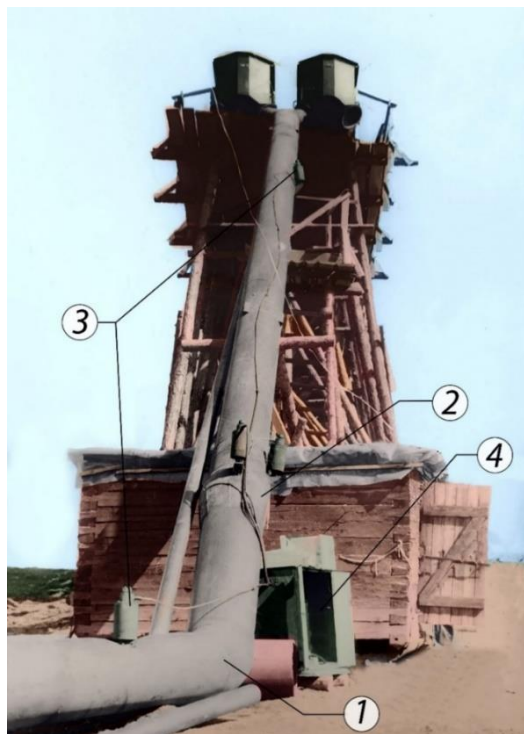


Рис. 4. Измерительный участок расхода и плотности гидросмеси при ее подаче на промывочный прибор ПГШ-II-75. 1 – пульповод; 2 – расходомер с расширяющим устройством типа Антивентури; 3 – отборники давления для измерения плотности гидросмеси; 4 – шкаф для дифманометра ДМ-23537.

Полученные при тестировании фактические значения расходно-напорных характеристик сопоставлялись с расчетными показателями по различным уравнениям. Наиболее близкие результаты расчетной зависимости с тестированием определяются методикой ВНИИ Гидромаш, что является основанием считать ее базовой для определения расходно-напорной характеристики.

В итоге расходно-напорную характеристику предлагается определять по уравнению:

$$H_r = H_0 \cdot \left[1 - \sum K_H^i \cdot \frac{\rho_r^i - \rho_0}{\rho_r} \right] - K_{\text{попр}}$$

где:

K_H^i – коэффициенты снижения напора для каждого диаметра:

$$K_H^i = 0,15 \cdot \left(\frac{\rho_r - \rho_0}{\rho_0} - 1 \right) + 0,56 \cdot \lg 10 \cdot d_{\text{иср}}$$

$d_{\text{ср}}$ – средний размер частиц каждой итой фракции, м;

ρ_r^i – парциальная плотность гидросмеси, кг/м³:

$$\rho_r^i = \frac{q_i \cdot S_0}{100 \cdot 100} \cdot (\rho_r - \rho_0) + \rho_0$$

q_i – содержание частиц i-той фракции;

ЗГМ-2М, $d_{\text{ср}}=9,3$ мм и $S=10\%$

ЗГМ-2М, $d_{\text{ср}}=9,3$ мм и $S=20\%$

ЗГМ-2М, $d_{\text{ср}}=24,0$ мм и $S=10\%$

ЗГМ-2М, $d_{\text{ср}}=9,3$ мм и $S=10\%$

ГрТ-1600/25, $d_{\text{ср}}=1,0$ мм и $S=20\%$

- $K_{\text{нопр}} = (6,5 \cdot \ln(Q) - 50,8)$;

- $K_{\text{нопр}} = (10,4 \cdot \ln(Q) - 76,6)$;

- $K_{\text{нопр}} = (1,0 \cdot \ln(Q) - 6,1)$;

- $K_{\text{нопр}} = (2,8 \cdot \ln(Q) - 20)$;

- $K_{\text{нопр}} = (2 \cdot \ln(Q) - 14,4)$.

Сравнительные результаты расчетов по предложенным аппроксимирующим уравнениям и показаниям при тестировании представлены на рис. 5.

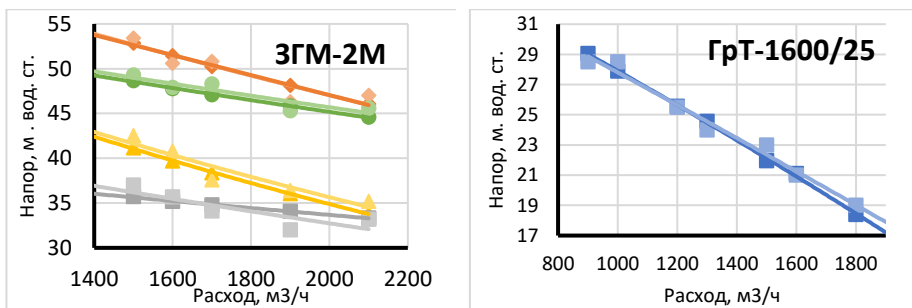


Рис. 5. Сравнительные результаты расчетов по предложенным аппроксимирующим уравнениям и результатам тестирования. ■ расчет $d_{\text{ср}}=9,3$ мм, $S=7,3\%$; ■ тест $d_{\text{ср}}=9,3$ мм, $S=7,3\%$; ▲ расчет $d_{\text{ср}}=9,3$ мм, $S=20\%$; ▲ тест $d_{\text{ср}}=9,3$ мм, $S=20\%$; ● расчет $d_{\text{ср}}=24$ мм, $S=7,3\%$; ● тест $d_{\text{ср}}=24$ мм, $S=7,3\%$; ■ расчет $d_{\text{ср}}=24$ мм, $S=20\%$; ■ тест $d_{\text{ср}}=24$ мм, $S=20\%$; ■ расчет $d_{\text{ср}}=1$ мм, $S=20\%$; ■ тест $d_{\text{ср}}=1$ мм, $S=20\%$;

Таким образом, результаты расчетов по предлагаемым уравнениям показывают высокую сходимость с данными, полученными при тестировании (отклонения составляют в среднем 1-3%), что позволяет рекомендовать их при проектировании гидрокомплекса для намыва штабелей для кучного выщелачивания.

В диссертации для намыва штабеля кучного выщелачивания также обосновывается применение гидротранспортных устройств типа пульпоприготовительных установок (ППУ), разнообразные конструкции которых испытывались на некоторых горных предприятиях. В них при эксплуатации грунтонасосов используется фактор влияния на повышение концентрации гидросмеси вакуумметрической высоты всасывания, которая характеризует максимальное разрежение при входе в агрегат. Поэтому при его расположении ниже уровня гидросмеси работа осуществляется с подпором столба жидкости, т. е. он всегда находится под самозаливом и в погружном состоянии геодезическая высота всасывания не влияет на потери во всасывающей линии, что способствует увеличению объемной концентрации транспортируемой гидросмеси.

При испытаниях ППУ со встроенной в него роторной дробилкой на Иршинском ГОКе концентрация подаваемой на обогатительную фабрику на расстояние ~1000 м составляла 50-55%.

На некоторых карьерах добычи и переработки нерудных материалов использование безвакуумного гидротранспортного устройства непрерывного действия (ГУБС) позволило качественно улучшить и регулировать процесс пульпоприготовления и загрузки горной массы в гидротранспортную систему.

При значительных количествах негабаритных включений в горной массе для повышения пропускной способности узлов пульпоприготовления грунтонасоса имеется успешный опыт применения роторной дробилки, устанавливаемой в его всасе, которая показала надежность в эксплуатации. Так, использование ее на Южно-Лебединском карьере КМА позволило повысить часовую производительность агрегата.

Второе защищаемое научное положение:

Разуплотненный намывной массив штабеля с приемлемой фильтрационной способностью и равномерной водопроницаемостью достигается регулированием режима гидротранспортирования (удельного расхода и объемной концентрации пульпы) и рассредоточенным выпуском гидросмеси с пониженными скоростями на

карты (ярусы) намыва через распределительный пульповод, уложенный на эстакадах или гребне дамбы первичного или попутного обвалования.

В отличие от проведенных опытно-промышленных работ по гидроотвалообразованию, задачей которых являлось увеличение приемной способности отвальной емкости за счет плотной укладки пород, научным направлением настоящих исследований является обоснование формирования разрыхленной структуры штабеля для кучного выщелачивания при установлении оптимальных способов намыва и параметров гидротранспортирования. Так, при исследовании качественных характеристик намывных отложений при торцевом способе выпуска гидросмеси за счет возникновения транзитных потоков наблюдалось продольное фракционирование – раскладка частиц по крупности по длине гидроотвала (рис. 6, 7). При этом были установлены функциональные зависимости изменения средневзвешенного диаметра $d_{ср}$ по длине намыва, т. е. формирование неравномерной по гранулометрическому составу структуры массива (по площади и объему) (рис. 8). Следствием этого отмечены различные плотностные свойства (рис. 9) и фильтрационная способность намывных пород, что крайне нежелательно при формировании штабеля для кучного выщелачивания, так как эти факторы негативно влияют на его водопроницаемость и раствороприемистость, снижая в итоге полноту извлечения ценных компонентов.



Рис. 6.
*Торцевой
намыв пород
при
скорости
выпуска
 $V=3,1$ м/с
(расходе
гидросмеси
 $1500 \text{ м}^3/\text{ч}$)*

Из анализа графика на рис. 8 было установлено, что продольное фракционирование по длине гидроотвала несколько уменьшается со снижением скоростей выпуска гидросмеси.

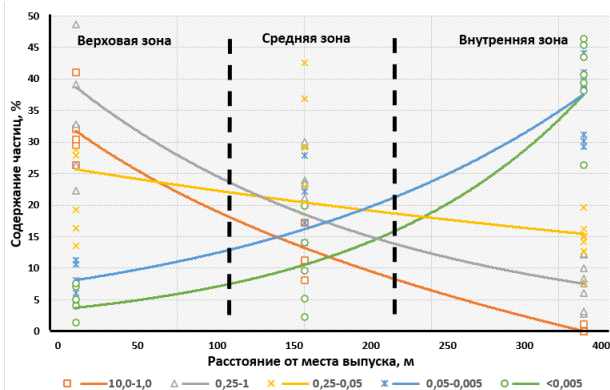


Рис. 7.
Аппроксимирующие кривые распределения частиц по крупности (фракционирование) на гидроотвалах при торцевом выпуске пульпы.

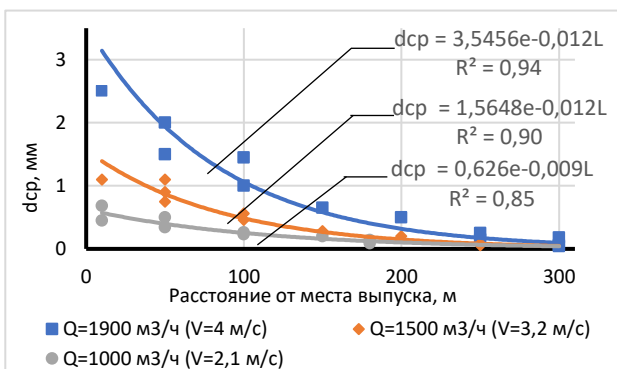


Рис. 8.
Аппроксимирующие кривые распределения средневзвешенного диаметра d_{cp} по длине намываемого массива при различных удельных расходах (скоростях) гидросмеси.

На графиках рис. 9, 10 показано влияние параметров гидротранспортирования на плотность намывых отложений.

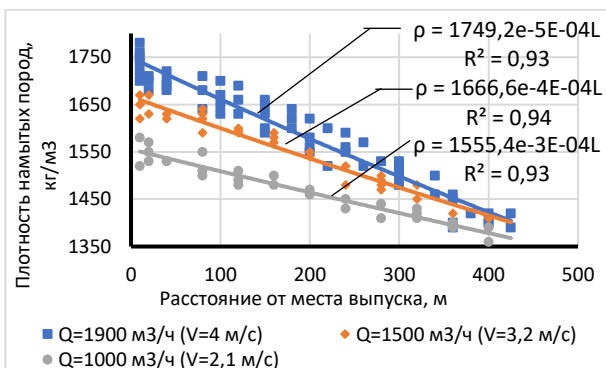
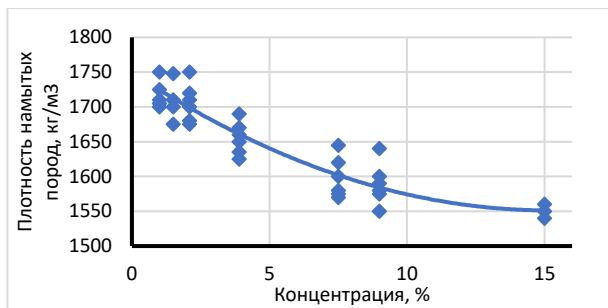


Рис. 9.
Аппроксимирующие кривые изменения плотности намываемых пород при различных удельных расходах (скоростях) гидросмеси по длине гидроотвала.



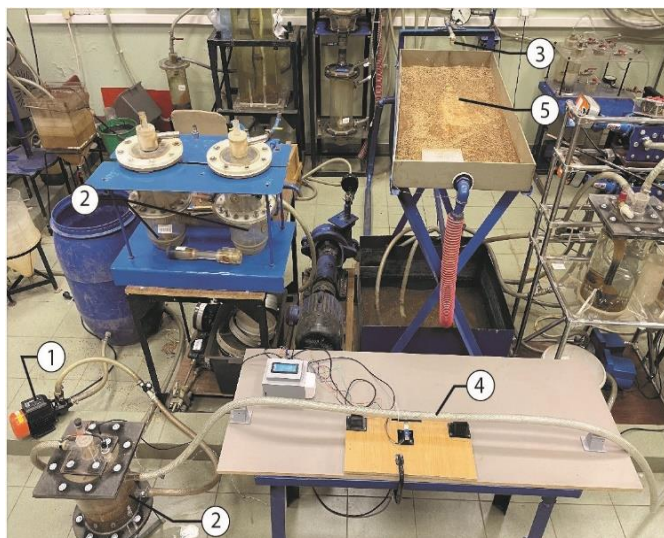


Рис. 12.
 Эксперимен-
 тальный
 технологический
 гидрокомплекс
 для намыва
 гидроизоляцион-
 ного основания
 и штабеля:
 1 - насос; 2 -
 загрузочный
 аппарат; 3 -
 выпуск; 4 -
 измерительный
 участок; 5 -
 карта намыва.

Проведенные исследования при рассредоточенном способе намыва частиц с $d_{cp}=1-2$ мм, показали, что основные параметры массива зависят от расхода (скорости) гидросмеси и ее объемной концентрации.

В ходе исследований были отобраны пробы для определения плотностных характеристик в разных частях массива в зависимости от скорости выпуска гидросмеси. При этом отмечалось, что при повышенных скоростях выпуска гидросмеси, плотность по длине массива имела различные значения, однако при снижении скоростного режима характеризовалась однородной структурой. Это можно объяснить тем, что при невысоких скоростях, а также высокой концентрации гидросмеси мелкие частицы остаются вблизи места выпуска и формируется структура равномерная по гранулометрическому составу, а также по плотностным и фильтрационным свойствам по всей площади (рис. 13).

Рассредоточенным способом возможно регулировать процессы гидротранспортирования с поддержанием оптимальных скоростей движения гидросмеси, при которых достигается максимальная ее плотность, а выпуск пульпы при этом производится на пониженных скоростях, что приводит к отсутствию фракционирования пород по длине намывного массива.

За счет такого режима также снижается и плотность намываемого массива, что приводит к разрыхленной структуре штабеля, которая сохраняется по всей его длине (рис. 14).



Рис. 13. Намыв массива загрузочным аппаратом торцевым и рассредоточенным выпуском гидросмеси. 1 – торцевой выпуск, $S=15\%$; 2 – два патрубка $S=35\%$; 3 – четыре патрубка $S=15\%$; 4 – структура разрыхленного массива при формировании штабеля рассредоточенным выпуском.

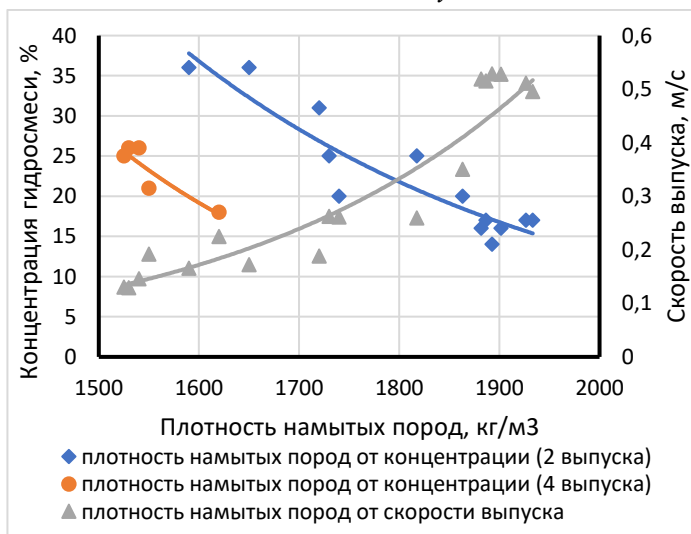


Рис. 14.
Зависимость плотности намываемых пород от объемной концентрации и скорости гидросмеси.

Полученные результаты исследований показали (рис. 14), что наименьшая плотность, и, соответственно, рыхлая структура намываемых пород (рис. 13) достигается повышением концентрации гидросмеси и уменьшением скоростей ее выпуска. Так, при увеличении объемной концентрации гидросмеси с 15 до 34% плотность массива снижается с ~1930 до ~1560 кг/м³, что составляет 20%.

Таким образом, при поддержании оптимальных параметров (режимов) гидротранспортирования мелких частиц возможно формировать штабель рассредоточенным способом из нескольких выпусков в пульповоде с пониженными скоростями движения гидросмеси по карте намыва. При этом, путем переключения одновременно работающих выпусков, гидросмесь равномерно распределяется вдоль фронта намыва по всему объему массива.

Третье защищаемое научное положение:

Интенсификация технологии сооружения штабеля может осуществляться непосредственной загрузкой реагента с рудной массой в гидротранспортную установку, образующую активную рабочую среду, с повышенным массообменом в поточной технологической цепи: установка – трубопровод – намывной массив; либо гидронамывом с дальнейшим использованием оросительных систем, причем выпуск высоконасыщенной гидросмеси в обоих вариантах осуществляется с чередованием на карты намыва в фильтрационном режиме.

Интенсивность технологического процесса обосновывается предлагаемыми вариантами подачи смеси к месторасположению массива штабеля. Гидротранспортные установки, в т.ч. загрузочные аппараты вихревого пульпоприготовления могут работать в двух технологических режимах (рис. 15).

Первый – предусматривает проведение процесса формирования штабеля на стадии подачи горной массы с реагентом в загрузочно-обменные емкости гидротранспортной установки в т. ч. с использованием закрученных кольцевых струй жидкости при пульпоприготовлении (рис. 15а)

При этом реагент загружают непосредственно в гидротранспортное устройство и процесс выщелачивания осуществляется при взаимодействии твердых частиц исходного материала с коаксиально-закрученными струями раствора реагента, значительно увеличивая массообмен между ними и образуя высоконасыщенную смесь (>30% по объему), которая за счет избыточного давления подается из аппарата в трубопровод и далее для намыва штабеля в фильтрационном режиме.

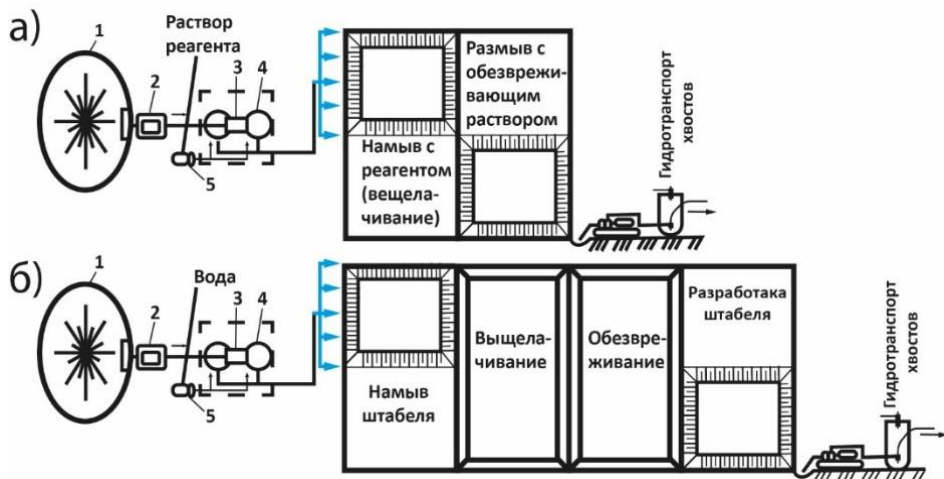


Рис. 15. Варианты формирования штабеля методом намыва: а – намыв штабеля с раствором реагента и размыв его с обезвреживающим раствором; б – гидронамыв штабеля с последующим выщелачиванием; 1 – навал горной массы; 2 – погрузчик с перегружателем для загрузки; 3 – загрузочный бункер; 4 – гидротранспортный аппарат вихревого пульпоприготовления; 5 – насос для воды или раствора реагента..

Таким образом, в системе загрузочный аппарат – транспортный трубопровод возникает высокотурбулентный режим перемешивания раствора с рудной массой, который увеличивает относительную поверхность контакта твердых частиц с раствором реагента и уменьшает толщину диффузионного слоя с определенным градиентом давления. Это позволяет ликвидировать лимитирующие пленки внешней диффузии и инициирует процессы внутренней диффузии в порах обрабатываемого материала, что значительно интенсифицирует процесс извлечения ценных компонентов.

В итоге, рудный материал находится в полном контакте с выщелачивающими растворами на всех стадиях, в высокотурбулентном вихреобразовании гидротранспортного аппарата, а также при напорном движении гидросмеси в трубопроводе, а за счет герметичности всей гидротранспортной системы – технологический процесс в ней экологически безопасен.

В этом случае гидродинамическая обстановка при намыве штабеля отличается фильтрационным режимом движения смеси, при которых он растекается сплошным потоком по порам, трещинам и пустотам в отличие

от инфильтрационного, когда раствор только смачивает или покрывает тонкой пленкой поверхности, по которой перемещается.

Второй вариант (рис. 15б) формирования штабеля для кучного выщелачивания гидротранспортными средствами – аналогичный процессу гидроотвалообразования, когда несущей средой твердого материала является напорный поток воды, образующий при выпуске намывной массив с последующей укладкой на его поверхности оросительных систем, которые могут быть точечными, капельными, с равномерным разбрызгиванием и прудковым смачиванием. Укладка оросителей может быть как открытой, так и закрытой.

Кроме того, нет необходимости в прокладке дополнительных систем орошения, а для подачи рабочих реагентов возможно использование ранее проложенных трубопроводов, с равномерной подачей их через выпускные патрубки.

При рассредоточенном гидронамыве штабеля он имеет все преимущества рыхлой структуры, но перед началом кучного выщелачивания необходимо, чтобы штабель дренировался в течение двух-пяти суток.

Ниже показаны технологические схемы намыва штабеля, которые влияют на качественное распределение горной массы по всему его объему. Так, на рис. 16 представлено формирование массива кольцевым способом при использовании в качестве несущей среды раствора реагента и размещение основных элементов кучного выщелачивания. При этом распределительный трубопровод с рассредоточенными выпусками, расстояние между которыми составляет 8-10 м, располагается на дамбах обвалования или эстакадах малой высоты.

Условные обозначения к рис. 16, а также к рис. 17, 18, 19 приводятся ниже:

1 – загрузочные аппараты вихревого пульпоприготовления; 2 – грунтонасос; 3 – зумпф; 4 – магистральный пульповод; 5 – распределительный трубопровод; 6 – выпуски; 7 – дамбы первичного и последующих обвалований; 8 – намытая рудная масса; 9 – гидронепроницаемое основание; 10 – эстакады или выступы; 11 – проектный контур штабеля; 12 – водоотводящая или перфорированная труба для отвода продуктивных растворов; 13 – насос; 14 – водосбросной колодец; 15 – прудок-отстойник; 16 – карта продуктивных растворов; 17 – карта маточных растворов; 18 – дренажная канава; 19 – рудная масса; 20 – погрузчик с перегружателем для загрузки; 21 – бункер для загрузки; 22

– слив глинистой суспензии и самотечный гидротранспорт к месту складирования.

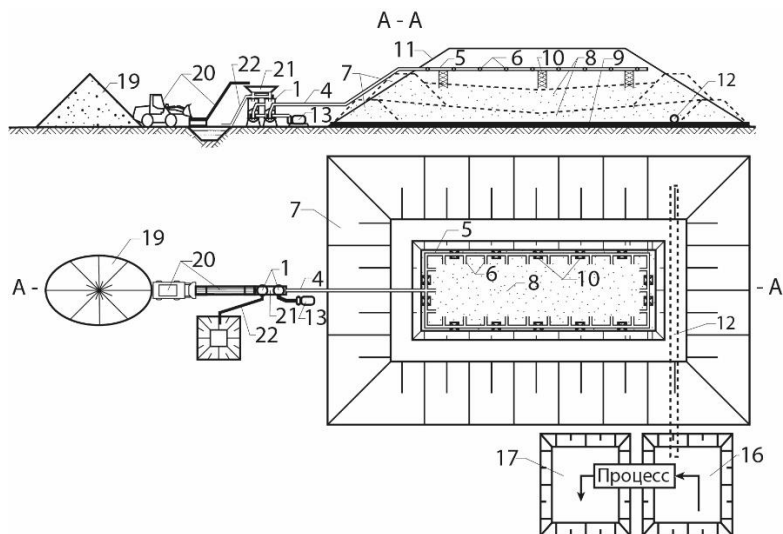


Рис. 16. Схема растворонамыва штабеля кольцевым способом.

Двухсторонняя схема (рис. 17) может применяться для способа гидронамыва. Прудок-отстойник при этом может устраиваться в центре сооружения, а распределительные трубопроводы вдоль откосов дамбы параллельно друг-другу.

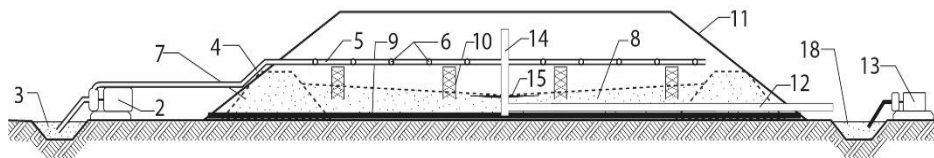


Рис. 17. Схема двухстороннего гидронамыва.

Для намыва штабеля в условиях долинного, овражно-балочного и косогорного рельефа, когда перепад высотных отметок по контуру превышает высоту дамбы обвалования, она возводится не по всему периметру, а высота изменяется от максимально принятой отметки до нуля. При этом более предпочтительна схема намыва от плотины к верховью (откосам), но также возможно применение от верховья морфологической структуры к плотине.

Такой рельеф (рис. 18) позволяет осуществлять дамбовое выщелачивание, особенностью которого является подготовка к размещению рудной массы и сохранение раствора в пределах самого штабеля за водоудерживающей плотиной. Выщелачивание при этом производится с последовательным подъемом площадки под основание штабеля вверх по склону. Причем она является ответственным гидротехническим сооружением, отвечающим всем требованиям, предъявляемым к водоудерживающей плотине.

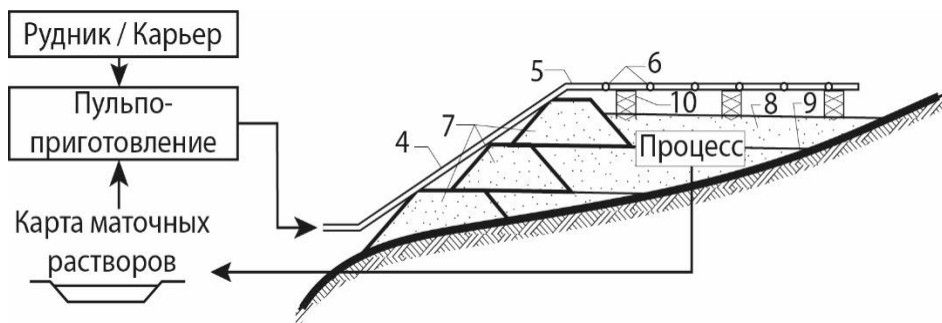


Рис. 18. Схема дамбового выщелачивания.

Дамбовое выщелачивание предполагает сохранение раствора в пределах самого штабеля. При этом отвод растворов для переработки или рециркуляции может быть осуществлен путем откачки из отстойников или дренированием из более низких уровней в пределах штабеля. Продуктивный раствор после фильтрации через штабель собирается с помощью системы дренажных труб или траншей, ведущих к прудкам продуктивных растворов, в которых аккумулируются металлосодержащие растворы, просачивающиеся из штабеля.

На рис. 19. показан вариант намывного массива из мелкозернистых частиц. Его формирование производят подачей гидросмеси из распределительного пульповода на гребне дамб обвалования или на их выступах, специально сооружаемых для этого длиной ~1 м через каждые ~10 м по оси друг от друга (рис. 5.6 а, б).

Рассредоточенные выпуски пульпы осуществляют через 5-6 м один от другого посредством шиберных задвижек с расходом около 280-360 м³/ч. Толщина слоя намыва может составлять 0,3-1,0 м. После формирования яруса определённой высоты обвалование отсыпают вновь, на выступах как на эстакадах перекладываются распределительные пульповоды и цикл укладки повторяется.

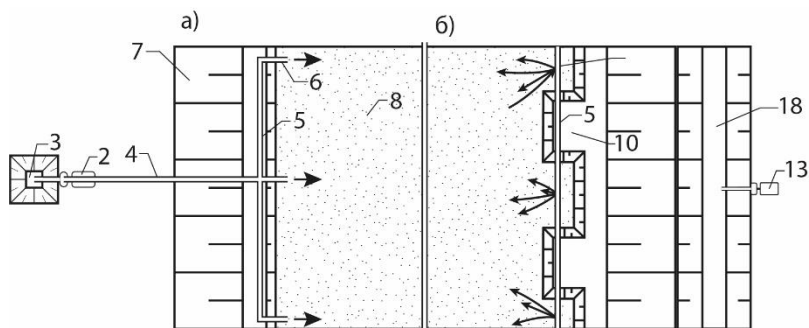


Рис. 19. Схема намыва штабеля с дамб обвалования: а) с гребня дамб; б) с выступов дамб.

Технологическая схема завершающей операции – разборки и обезвреживания штабеля может осуществляться гидромониторно-грунтотранспортным или экскаваторно-гидравлическим способами с последующим гидротранспортом. Это позволяет прежде всего организовать поточный процесс с минимальными затратами и сокращением землеройно-транспортной техники. Гидротранспорт выщелоченной породы значительно увеличивает производительность организуемого грузопотока путем подачи на большие расстояния гидросмеси высокой плотности к месту постоянного складирования. Также процесс можно совместить с обезвреживанием путем транспортирования пустой породы в потоке нейтрализующего либо обезвреживающего реагента, что значительно ускоряет процесс отработки штабеля.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ.

1. Формирование штабеля высоконасыщенными (не менее 20% по объему, оптимально >30%) гидросмесями в зависимости от гранулометрического состава может осуществляться загрузочными аппаратами вихревого пульпоприготовления, а также работающими в оптимальных условиях грунтотранспортом и другими гидротранспортными устройствами с учетом вакуумметрической высоты всасывания – подпором столба жидкости.
2. Расходно-напорные характеристики грунтотранспортов с высоконасыщенными гидросмесями установленные при тестировании грунтотранспорта ГрТ-1600/25 и землесоса ЗГМ-2М в производственных условиях наиболее корректно определяются (со средними отклонениями 1-3%) по методике ВНИИ Гидромаш с учетом установленных в работе поправочных коэффициентов ($K_{попр}$) с погрешностью 1-3%.

3. Выявленные функциональные зависимости средневзвешенного диаметра частиц и плотности намытых пород по длине гидроотвала, показали, что при торцевом способе, образующиеся транзитные потоки приводят к продольному фракционированию пород по крупности и неоднородности структуры массива по грансоставу, что снижает фильтрационную способность и водопроницаемость штабеля по всему объему.

4. Установленные функциональные зависимости при рассредоточенном выпуске гидросмеси показали, что разрыхленная структура массива с уменьшением плотности укладываемых пород (до 20%) достигается повышением объемной концентрации гидросмеси с 15 до 34% и снижением скорости ее выпуска на карты намыва.

5. Выявлена количественная взаимосвязь скоростей выпуска гидросмеси, характеристик грансостава в виде средневзвешенного диаметра $d_{ср}$ с расчетными значениями при этом коэффициентов фильтрации K_f , изменяющиеся от 1,1 до 36 м/сут.

6. Обоснована и апробирована в лабораторных условиях технология подготовки и создания непроницаемого основания под штабель при подаче сгущенной гидросмеси со специальными кольматирующими добавками или реагентами, обеспечивающими быстрое твердение уложенного материала и надежное предохранение его от протечек.

7. Обоснована поточная технология сооружения штабеля гидротранспортными аппаратами, позволяющая интенсифицировать процесс кучного выщелачивания за счет увеличения турбулизации и массообмена в замкнутой технологической цепи: установка – транспортный трубопровод с рассредоточенным выпуском смеси в фильтрационном режиме на карты (ярусы) намыва.

8. Предложены технологические схемы намыва штабеля кучного выщелачивания (кольцевая, двухсторонняя, дамбовая) с учетом морфологических особенностей рельефа, а также способы разборки, обезвреживания и транспортирования выщелоченной горной массы средствами гидромеханизации к месту постоянного складирования.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ:

В изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. Дробаденко В. П., Салахов И. Н. Особенности определения расходно-напорных характеристик грунтонасосов при работе на

гидросмесьях различных плотности и грансостава // Недропользование XXI век. 2020. № 6 (89). С. 122-131.

2. Дробаденко В. П., Луконина О. А., Некоз К. С., Салахов И. Н. Повышение эффективности процесса гидротранспортирования путем контроля рациональных режимов работы грунтонасосов, измеряемых гидродинамическим расходомером переменного перепада давления // Недропользование XXI век. 2021. № 5-6 (92). С. 64-69.

3. Дробаденко В. П., Малухин Г. Н., Луконина О. А., Салахов И.Н. Современное состояние проблем освоения твердых минеральных ресурсов дна морей и океанов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2021. № 3-1. С. 99-109.

4. Маркелов С.В., Дробаденко В.П., Вильмис А.Л., Салахов И.Н. Насыщение рудных кусков технологическими растворами в процессе подземного и кучного выщелачивания // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2021. № 3-1. С. 307-317.

5. Дробаденко В. П., Салахов И. Н. Обоснование технологии сооружения штабелей кучного выщелачивания методом намыва гидротранспортными установками // Недропользование XXI век. 2022. №2. С. 22-29.

В других изданиях:

6. Салахов И. Н. Анализ технологий формирования штабелей минерального сырья для кучного выщелачивания // В сборнике: Новые идеи в науках о Земле. Материалы XV Международной научно-практической конференции. В 7-ми томах. Москва, 2021. С. 120-123.

7. Салахов И. Н. Технологические аспекты намыва штабеля кучного выщелачивания // В сборнике: Новые идеи в науках о Земле. Материалы XIV Международной научно-практической конференции: в 7-ми томах. 2019. С. 312-315.

8. Салахов И. Н. Анализ методов пересчета расходно-напорных и мощностных характеристик насосов с воды на гидросмесь // Проблемы освоения недр в XXI веке глазами молодых. Материалы 14 Международной научной школы молодых ученых и специалистов. 2019. С. 168-170.

9. Салахов И. Н. Анализ способов формирования штабелей минерального сырья для кучного выщелачивания // Проблемы освоения недр в XXI веке глазами молодых. Материалы 15 Международной научной школы молодых ученых и специалистов. 2021 С. 120-123.

10. Салахов И. Н., Дробаденко В.П. Обоснование применения землесоса ЗГМ-2М для намыва штабеля горной массы при кучном выщелачивании // В сборнике: Молодые - Научкам о Земле. Материалы IX Международной научной конференции молодых ученых. В 7-ми томах. Редколлегия: В.А. Косьянов, В.Ю. Керимов, В.В. Куликов. 2020. С. 277-280.
11. Дробаденко В. П., Вильмис А. Л., Луконина О. А., Салахов И. Н. Технология сооружения штабеля кучного выщелачивания средствами гидротранспортирования // В сборнике: Стратегия развития геологического исследования недр: настоящее и будущее (к 100-летию МГРИ–РГГРУ). Материалы Международной научно-практической конференции. В 7-ми томах. 2018. С. 30-32.
12. Маркелов С. В., Вильмис А. Л., Салахов И. Н. Локальное движение технологических растворов при насыщении рудных кусков в процессе выщелачивания // В книге: Новые идеи в науках о Земле. Материалы XIV Международной научно-практической конференции: в 7 томах. 2019. С. 56-58.
13. Дробаденко В. П., Малухин Г. Н., Салахов И. Н. К вопросу пересчета паспортных характеристик грунтонасосов с воды на гидросмесь // В книге: Новые идеи в науках о Земле. Материалы XIV Международной научно-практической конференции: в 7 томах. 2019. С. 178-181.