



МИНОБРНАУКИ РОССИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ГЕОЛОГОРАЗВЕДОЧНЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ СЕРГО ОРДЖОНИКИДЗЕ»
(МГРИ)

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)**

**диссертация
на соискание ученой степени кандидата технических наук**

Научный руководитель:

**Заслуженный деятель науки РФ,
доктор технических наук, профессор**

Дробаденко Валерий Павлович

Москва – 2022

Содержание:

ВВЕДЕНИЕ	4
ГЛАВА 1. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ КУЧНОГО ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ МИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ	11
1.1. Краткий анализ устройства площадок под основания штабеля и способов их покрытия.....	15
1.2. 1.2. Способы формирования штабелей минерального сырья.....	19
1.2.1. Формирование штабеля автосамосвалами.....	19
1.2.2. Формирование штабеля конвейером.....	22
1.3. Способы орошения и дренажа.....	23
1.4. Анализ основных факторов, снижающих эффективность процесса КВ при формировании штабеля землеройной техникой.....	26
ГЛАВА 2. АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ РАБОТЫ ГИДРОТРАНСПОРТНОГО ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ И ПОДАЧИ ВЫСОКОНАСЫЩЕННЫХ ГИДРОСМЕСЕЙ ДЛЯ НАМЫВА ШТАБЕЛЯ	30
2.1. Основные факторы, определяющие особенности намывных сооружений гидротранспортными установками.....	30
2.2. Анализ методов пересчета расходно-напорных характеристик грунтонасосов с воды на гидросмеси различных концентраций.....	36
2.3. Установление расходно-напорных характеристик землесоса ЗГМ- 2М и грунтонасоса ГрТ-1600/25 при тестировании в производственных условиях.....	51
2.3.1. Проведение тестирования грунтонасоса ГрТ-1600/25 и землесоса ЗГМ-2М при разработке россыпного месторождения.....	51
2.3.2. Анализ результатов тестирования грунтонасосных агрегатов.....	55
2.4. Гидротранспортные установки, работающие с подпором жидкости	61
2.4.1. Пульпоприготовительные установки.....	62
2.4.2. Дробилка, установленная во всасе землесоса.....	65
2.4.3. Безвакуумное струйное гидротранспортное устройство непрерывного действия.....	67
2.4.4. Загрузочный аппарат вихревого пульпоприготовления.....	68
Выводы по главе 2.....	74
ГЛАВА 3. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ОПЫТНО-ПРОМЫШЛЕННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО ФОРМИРОВАНИЮ МАССИВОВ ТОРЦЕВЫМ СПОСОБОМ НАМЫВА	76
3.1. Особенности гидроотвалообразования вскрышных пород на опытно-промышленном участке.....	76

3.2. Основные методические аспекты экспериментальных исследований.....	79
3.3. Анализ результатов исследований формирования намывных отложений при торцевом способе укладки пород в гидроотвал.....	83
3.4. Анализ влияния параметров гидротранспортирования на процесс намыва пород.....	86
3.4.1. Влияние параметров удельного расхода гидросмеси на процесс намыва пород.....	86
3.4.2. Исследования плотности и оценка фильтрационной способности формируемого намываемого массива.....	89
Выводы по главе 3.....	95
ГЛАВА 4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НАМЫВА МАССИВА ШТАБЕЛЯ В ЛАБОРАТОРНЫХ УСЛОВИЯХ РАССРЕДОТОЧЕННЫМ СПОСОБОМ.....	97
4.1. Разработка экспериментального гидротехнологического комплекса на основе загрузочного аппарата вихревого пульпоприготовления.....	97
4.2. Анализ результатов экспериментальных исследований.....	101
Выводы по главе 4.....	107
ГЛАВА 5. ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ НАМЫВНОГО МАССИВА ШТАБЕЛЯ.....	108
5.1. Технологические особенности подготовки основания под рудный штабель.....	108
5.2. Сооружение дамб обвалования.....	111
5.3. Анализ технологических факторов, обеспечивающих интенсивность процесса выщелачивания при формировании массива штабеля.....	113
5.4. Технологические схемы намыва массива штабеля.....	117
Выводы по главе 5.....	124
Заключение.....	126
Список использованной литературы.....	128

ВВЕДЕНИЕ

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 циклической сухой горной 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, кольтация, 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 сухойройной 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 $d_{ср}$ 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 намывого 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.

Защищаемые научные положения

1. Структура массива штабеля формируется способом намыва высоконасыщенной твердыми частицами гидросмесью с объемной концентрацией более 30% грузочными 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.

ГЛАВА 1. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ КУЧНОГО ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ МИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ

Как известно, кучное выщелачивание (КВ) – это процесс извлечения ценных компонентов методом растворения подготовленного и уложенного в специальный штабель минерального сырья (раздробленных забалансовых руд и отвалов бедных руд, а так же хвостов обогатительной фабрики), с последующим их выделением (осаждением) из циркулирующих растворов [97].

В развитии технологии кучного выщелачивания известны работы отечественных ученых: П. Б. Авдеева, В. Ж. Аренса, В. А. Артушкевича, В. А. Бочарова, А. Е. Воробьева, Л. И. Водолазова, С. С. Гудкова, В. П. Дробаденко, В. Я. Кофмана, Г. С. Крылковой, Н. П. Лаверова, Д. П. Лобанова, В. В. Лодейщикова, Н. Г. Малухина, Г. Г. Минеева, В. П. Мязина, А. В. Рашкина, Ю. Н. Резника, Ю. И. Рубцова, Г. В. Сидельниковой, Г. А. Строганова, А. П. Татарина, М. И. Фазлуллиной, А. В. Фатьянова, Г. Х. Хчеяна, В. А. Чантурии, Л. В. Шумиловой, И. А. Яшкина и многих других.

Согласно литературным данным, в России запасы руд цветных и редких металлов, возможных для отработки геотехнологическими методами превышают 6-10 млрд т [97, 54, 3, 99, 73, 20]. Это сырье находится в отвалах карьеров, хвостах обогащения, целиках, забалансовых запасах и небольших месторождениях, в связи с тем, что традиционные методы разработки не обеспечивают должного уровня извлечения ценных компонентов и безотходности производства.

Кроме того, ежегодно происходит снижение запасов богатых руд, которые рентабельно отрабатывать открытым или подземным способами. Многие месторождения оставлены на стадии поисковых геологоразведочных работ, т. к. вводить их в эксплуатацию технически невозможно или экономически невыгодно, что связано с повышенной окисленностью руды, низким содержанием полезных компонентов, маломощностью

месторождения, необогащаемостью руд и другими причинами. [19, 16, 73, 99, 3, 36, 20].

Анализ результатов исследований ведущих организаций, в том числе ВНИИХТ, ВНИИ-1, ЗабГУ, ИПРЭК 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, а также в определенной степени снизить минимальное промышленное содержание металла, необходимое для разработки объекта [97, 54, 3, 99, 73].

В настоящее время этими методами можно перерабатывать сырье с содержанием золота $\sim 0,65$ г/т, что позволяет даже при относительно низком извлечении (золота – 75% и серебра – 65%) обеспечивать увеличение запасов используемого сырья в месторождении в десятки раз [16].

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, наличию научных основ процесса и накопленному производственному опыту [16].

Впервые работы по кучному выщелачиванию золота в СССР были проведены на Мурунтаунском (Узбекистан) и Васильевском (Казахстан) месторождениях [97, 16].

Данный метод позволяет одновременно перерабатывать значительные объемы минерального сырья (до нескольких миллионов тонн). Так, в США и Канаде действуют установки КВ производительностью до 2 млн т в год [16]. Это обуславливает экономическую целесообразность переработки данным методом бедного минерального сырья, руд малых месторождений и хвостов обогащения.

Технологический процесс КВ состоит из [3]:

- подачи рудного материала из карьера или рудника;
- подготовки руды посредством дробления или агломерации (при необходимости);
- подготовки основания и сооружение штабеля;
- подачи выщелачивающих растворов и отведение продуктивных растворов;
- извлечения полезных компонентов и получение готовой продукции;
- хранилища маточных растворов.

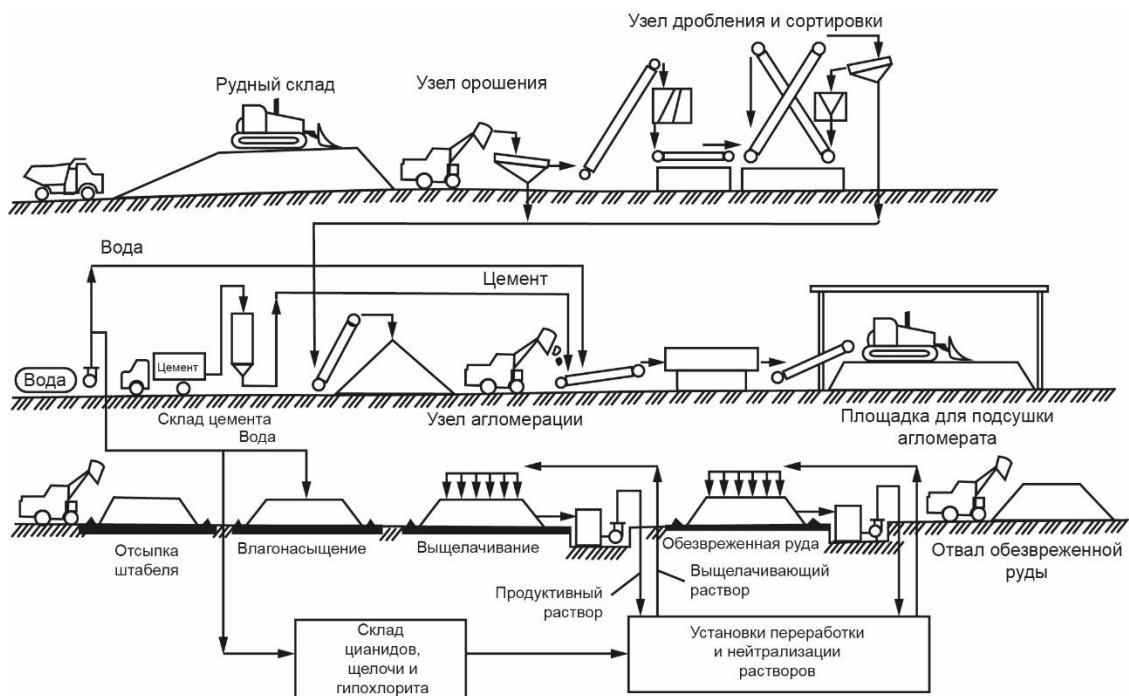


Рис. 1.1. Принципиальная схема кучного выщелачивания золотосодержащего минерального сырья [16].

Основными типами используемых руд при КВ являются [3]:

- окисленные руды с рассеянным золотом;
- сульфидные руды, в которых золото не ассоциировано с сульфидными минералами;
- руды жильных или пластовых месторождений, содержащие тонкие частицы золота с высоким отношением их площади поверхности к массе;
- уран, медь, цинк, никель, марганец, железо и другие металлы.

Если горная масса с забоя обеспечивает приемлемое извлечение металла, то дополнительного дробления не требуется. Она поступает на дамбовое выщелачивание [16]. В практике может использоваться руда с размерами кусков 10-70 мм.

При значительном содержании глинистых частиц, для предотвращения закупоривания фильтрационных каналов и частичного или полного прекращения просачивания выщелачивающих растворов используют процесс агломерации – создания крупных пористых кусков из глин и пылеватых частиц.

Одним из наиболее ответственных технологических процессов, определяющим технико-экономические показатели является сооружение рудного штабеля, который включает следующие элементы: основание с противотрафиционным экраном, систему орошения с подачей растворов выщелачивания на рудную массу, систему дренажа для вывода и сброса продуктивных растворов, которые во многом зависят от рельефа местности и типа грунта поверхности [3].

При этом они располагаются на равнинах, косогорах, площадях, примыкающих к рекам и водохранилищам, холмистой местности, с большим количеством оврагов, на предгорьях и склонах гор, что влияет на выбор площадки, которые могут быть: горизонтальными, наклонными для одиночного или сгруппированных штабелей, в отработанном карьере, в природной ложбине или на склоне горы с выемкой (*рис. 1.2*).

Обычно в естественных условиях форма штабеля определяется морфологией. В практике сооружают штабели с прямоугольным, квадратным или трапецидальным основанием, ввиду их простоты для отсыпки и возможности достигать значительных размеров. Нередко их устраивают в виде усеченной пирамиды, с призмой в нижней части, для чего формируют котлован или траншею для размещения горной массы.

Возведение ограждающих дамб рекомендуется вблизи водных источников (водоемов, рек, колодец), а также на наклонной местности и с

естественными рельефными складками для предотвращения растекания растворов за пределы установки кучного выщелачивания.

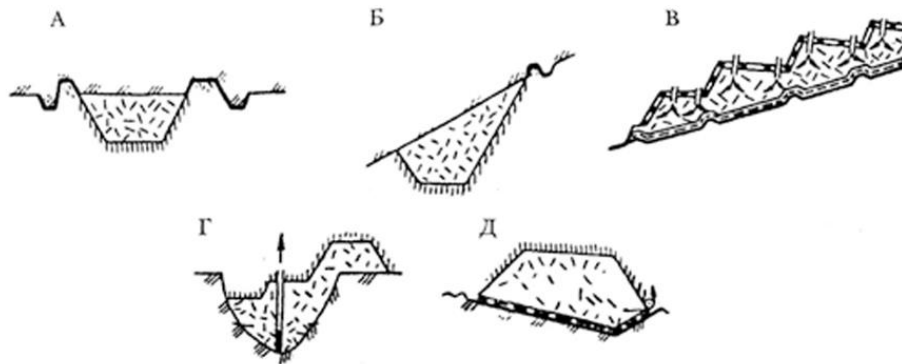


Рис. 1.2. Принципиальные схемы расположения рудных штабелей для кучного выщелачивания в различных топографических условиях. А – горизонтальная площадка; Б – наклонная – для одиночного штабеля; В – наклонная – для сгруппированных рудных штабелей; Г – в отработанном карьере; Д – на поверхности горного склона с выемкой [19].

Для обеспечения приемлемой фильтрации и дренажа, наилучшего контакта раствора со всеми частицами горная масса должна быть гомогенной, т.е. быть однородной по грансоставу по всему объему штабеля [3, 17].

1.1. Краткий анализ устройства площадок под основания штабеля и способов их покрытия

Для рационального размещения штабеля кучного выщелачивания в настоящее время используют три типа площадок под основания: повторно-используемые (ПИП), постоянно наращиваемые (ПНП), а также для дамбового выщелачивания [16]. Основная их задача (в т. ч. штабеля) обеспечить устойчивость массива, включающего в себя твердую и жидкую фазы.

Площадки повторного использования (ПИП) [97, 3] применяются при долговременной, многократной эксплуатации, для чего устраивается твердое гидроизоляционное покрытие, способное выдержать давление рудного массива, погрузочно-разгрузочных и транспортных механизмов. При этом установка оборудования (насосов, трубопроводов и т. д.) производится

единоразово и не требует их дальнейшего разбора и переноса при использовании, но процесс выщелачивания должен быть непродолжительным, а горная масса иметь постоянный и стабильный состав для каждой укладываемой партии (рис. 1.3).

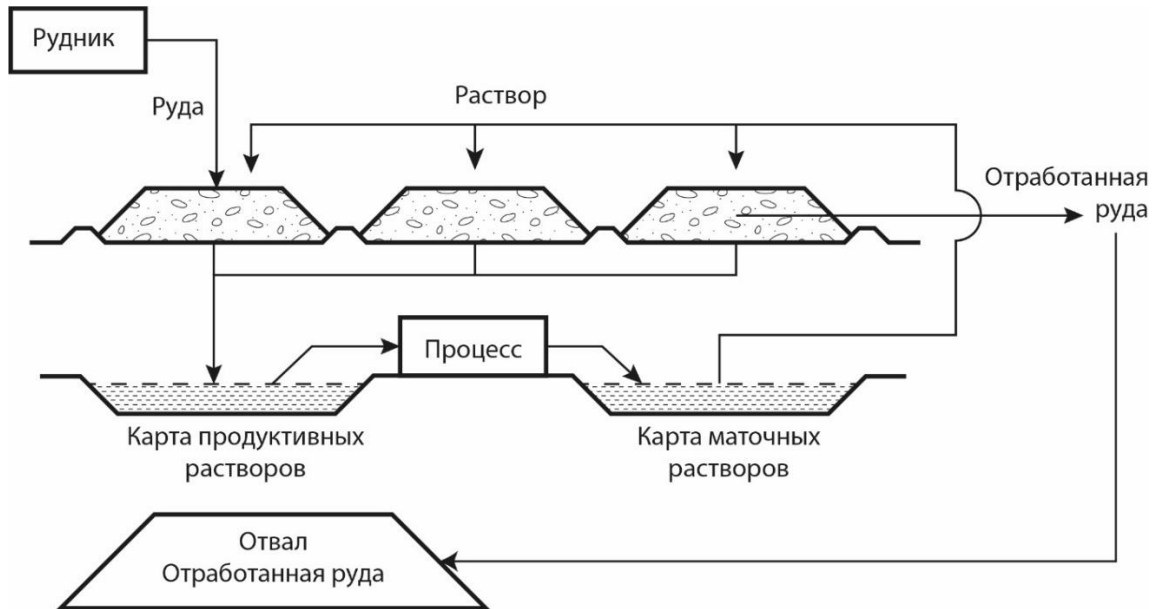


Рис. 1.3. Схема технологии выщелачивания на площадках повторного использования [97].

Метод постоянно наращиваемых площадок (ПНП) [97, 3] наиболее распространен в практике. В этом варианте выщелоченная руда остается на месте, поэтому нет необходимости в дополнительных площадях под хвостохранилища и устройстве твердых оснований (рис. 1.4).



Рис. 1.4. Схема кучного выщелачивания руды на постоянно используемых площадях [97].

Применение метода дамбового выщелачивания возможно на различных рельефах местности (в т. ч. крутых склонах) и в широком диапазоне климатических условий за счет хранения продуктивных растворов в штабеле (рис. 5.5). Использование данной технологии зависит от прочности горной массы и ее способности оставаться проницаемой под нагрузками после последовательной закладки новых порций горной массы. Накопительная способность порового пространства руды часто используется для сохранения продуктивного раствора, поэтому, ограничивает или исключает необходимость сооружения хранилищ. Не исключается также возможность иметь отдельную карту насыщенных растворов вместо оставления их в самом штабеле. В этом случае необходимо тщательное сооружение трубчатых дренажей и их распределения внутри штабеля.

В зависимости от условий расположения площадок под основания, применяют различные виды покрытий. Так, для постоянно используемой – асфальт, защищенная синтетика или глина, а для наращиваемых площадок используется высокоплотный полиэтилен, гипалон, поливинилхлорид, глина. Обычно материалами для экрана являются геомембраны, покрытия из грунтов и специально обработанных пород [3, 97].

Один из таких вариантов – уплотнение шламами. В этом случае отсыпают горную массу крупностью 10 мм, затем покрывают рудными шламами и укатывают катками. Сверху насыпают гравий для создания дренирующего слоя.

Для снижения водопроницаемости основания также возможна их обработка различными синтетическими смолами. Так, для скрепления песчаных пород используют мочевиноформальдегидные (карбамидные) смолы [12].

Помимо этого, существует множество типов и других смол, которые можно применять в зависимости от условий и характеристик твердого (связуемого) материала.

Еще одним видом гидроизоляции оснований является покрытие поверхности листами геомембран [97]. Для избежания утечек продуктивных или выщелачивающих растворов их соединяют термическими (электричество, горячий воздух, горячие заклинователи), экструзивной сваркой, либо склеиванием изолирующими материалами.

При выборе геомембраны обычно учитывают:

- температура и солнечный свет влияют на долговечность мембраны: они могут разрушаться под действием сил ультрафиолета, растягиваться/сжиматься при изменении температур;
- ветер может сдувать или даже рвать геомембраны;
- сцепления геомембран с различными материалами (например с глиной или песком) неодинаково, и, при неправильном подборе они могут скатываться под нагрузкой, что также зависит от уклона местности;
- толщина геомембраны влияет на ее ударопрочность – техника или острые куски могут пробивать тонкие покрытия, что приводит к утечкам растворов.

Помимо листовых геомембран, также используют напыляемые материалы – тканевые основания (покрытия) обработанные нефтепроизводными материалами [97].

Для обеспечения целостности геомембран их покрывают геотекстилем, который амортизирует удары частиц, тем самым защищая геомембрану от механических повреждений, а также является дренирующим материалом, заменяющим песок и гравий.

Для снижения просачивания растворов за пределы основания устраивают двойные или тройные основания. При этом, при утечке растворов через первый слой, снижается напор на последующий. Обычно нижний слой отсыпают из глины, мелких и тонких песков и уплотняют, однако такие материалы есть не всегда, поэтому иногда дробят имеющиеся материалы, либо

увеличивают толщину мембраны. Двойные покрытия должны обеспечивать водопроводимость ниже 10^{-6} см/сек [3].

Для площадок повторного использования в качестве основания можно укладывать асфальт, толщиной 100-300 мм. При том, что первоначальные затраты получаются завышенные, однако за счет его многократного использования, конечная стоимость его укладки дешевле.

1.2. Способы формирования штабелей минерального сырья

Варианты сооружения штабелей включают отсыпку самосвалами, погрузчиками, перемещение бульдозерами, укладку конвейерами или укладчиками [3, 97]. От качества отсыпки во многом зависят дальнейшие показатели извлечения.

1.2.1. Формирование штабеля автосамосвалами

В зависимости от типа руды применяется несколько методов отсыпки штабеля автосамосвалами.

Первый – сооружение штабелей из несортированной руды высококремнистого состава, не образующей большого количества рудной мелочи, даже при движении по кровле штабеля гусеничной техники, которая поступает непосредственно с рудника [97].

Обычно, из пустой породы сооружают оконтуривающую рампу, для доступа к одной из сторон штабеля, вдоль которой устраивают узкую дорогу, по которой самосвалы могут подъезжать к краю и ссыпать руду в пределах угла естественного откоса (*рис. 1.5*) [97, 3]. Штабель наращивается к центру и после укладки первого слоя рудовозы движутся по нему, укладывая последующие слои, а их движение при этом организуют так, чтобы не было чрезмерного уплотнения поверхности. Отсыпанную руду выравнивают бульдозером. В случае переуплотнения материала поверхность разрыхляют серией взрывов через неглубокие скважины. Для равномерного пропитывания

и фильтрации выщелачивающих растворов, слой руды обычно орошают сразу после рыхления.

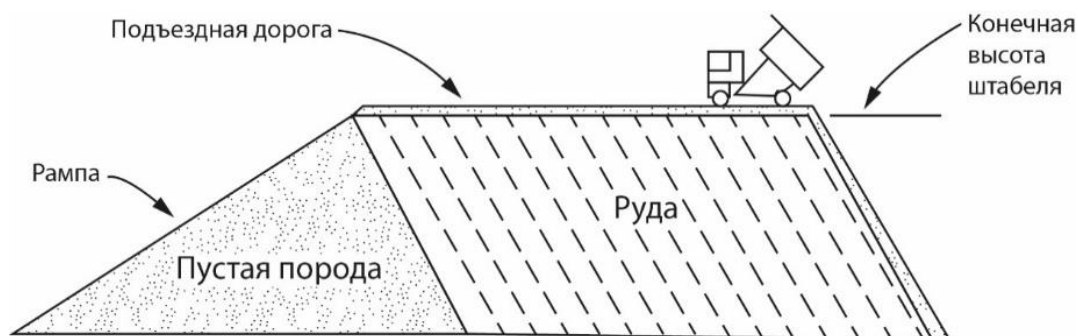


Рис. 1.5. Сооружение штабелей с отсыпкой руды самосвалами.

Для данного метода возможно формирование штабеля сочетанием следующих механизмов [80, 82]:

- самосвалы; используются при высоте кучи не более 1,3 м. При этом планировка верхнего основания производится вручную, а при больших площадях штабелей – скрепером;
- самосвал – экскаватор; формируются ленты штабеля, высотой до 1 м. Самосвалами руда ссыпается на приемную площадку, далее перегружается экскаваторами до проектной высоты. Возможно использование грейферных погрузчиков;
- самосвал – фронтальный погрузчик – грейдер (бульдозер); фронтальным погрузчиком формируется штабель (возможная высота может превышать 10 м), а грейдером или бульдозером выполняется планировка поверхности верхнего основания;
- дробилка – транспортер; дробилку устанавливают рядом с основанием штабеля и дробленую руду по транспортеру подают на штабель. Распределение руды по площади штабеля осуществляется перестановкой транспортера, либо с помощью скреперов [82];
- скреперование; при работе скрепера поддерживается постоянная структура рудного материала, т. е. руда не переуплотняется и дополнительно

не дробится, хотя, это связано с дополнительными монтажными операциями по перемещению скреперов по мере загрузки.

Второй метод используется для агломерированной руды, или когда руда образует большое количество тонкого материала, при механическом воздействии на нее [97, 3].

Данный метод предусматривает укладку куч, высотой до 2 м, которые перекрывают друг друга при отсыпке самосвалами, на слой дробленой руды (высотой 30-50 см), расположенный на синтетической изоляции (*рис. 1.6*) [16]. В результате, верх отсыпанного штабеля имеет серию впадин, которые используются для подачи растворов. После выщелачивания этот слой выравнивают и рыхлят для создания основания следующего. Для доступа автосамосвалов возводят рампу на высоту выщелоченного слоя. Последующие слои формируются аналогичным способом. Этот метод характеризуется очень слабым воздействием на руду ввиду отсутствия уплотнения верха штабеля движущимся транспортом [3].

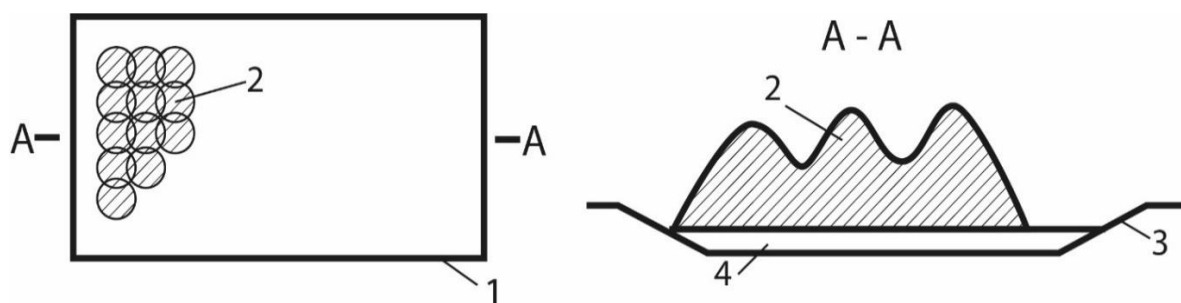


Рис. 1.6. Отсыпка штабелей автосамосвалами с перекрытием рудной массы: 1 – границы штабеля; 2 – отсыпанная руда; 3 – синтетическая изоляция; 4 – защитная изоляция [97].

В случае, если руда разрушается или уплотняется (особенно в придонном слое) в результате воздействия бульдозера при выравнивании поверхности, возможно снижение фильтрации, и, как следствие, уменьшение извлечения выщелачиваемого компонента. При возникновении таких проблем на практике обычно не выравнивают поверхность штабелей перед отсыпкой следующего яруса. В большинстве случаев максимальное извлечение

достигается, когда каждый слой руды перед отсыпкой следующего будет выщелочен почти до конца.

1.2.2. Формирование штабеля конвейером

При использовании агломерированной руды или хвостов обогащения, для предотвращения ее разрушения, необходимо снижать давление на поверхность штабеля. Поэтому специалистами предлагается использовать способ отсыпки конвейером, при котором воздействие на горную массу минимально [16, 82]. Основные принципы этих систем однотипны. Последовательность укладки показана на рис. 1.7.

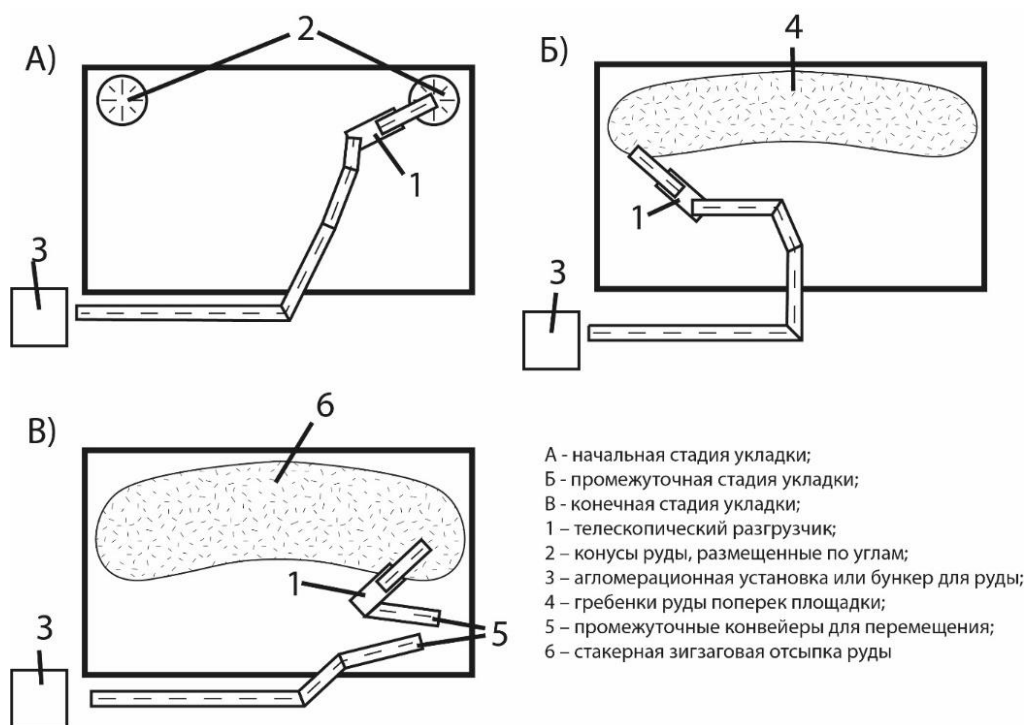


Рис. 1.7. Укладка рудного штабеля с помощью конвейера.

Рудный материал подают из бункера на главный конвейер, откуда она поступает на промежуточные звенья системы и далее на радиальный рычажный конвейер. Обычно на первом этапе, в углах площадки отсыпают два конуса, после чего установка, двигаясь по зигзагообразной траектории формирует штабель. Обычно его высота составляет 6 м [16].

Конвейерный укладчик достаточно мобильный и может двигаться в любом направлении за счет установленных на нем поворотных колес. Такая

система позволяет получить практически ровную поверхность массива. Однако, при этом способе формирования штабеля применяется сочетание работы поточных и циклических механизмов.

1.3. Способы орошения и дренажа

Система орошения штабеля (рис. 1.8) является одной из основных и завершающих операций кучного выщелачивания, которая должна распределять раствор реагента равномерно по всей площади (поверхности), тем самым обеспечивать максимальный контакт выщелачивающего раствора с рудной массой, а также сводить к минимуму каналобразование и проскоки реагентов, что в значительной степени влияет на качество извлечения ценных компонентов [3].

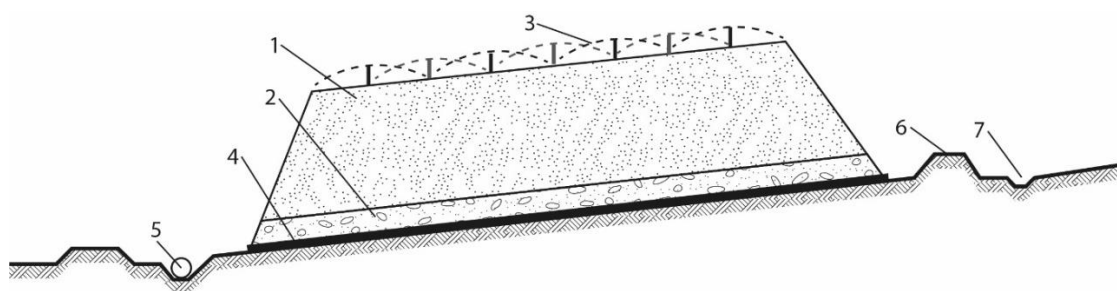


Рис. 1.8. Схема движения выщелачивающих растворов через рудный штабель. 1 – руда или отходы обогащения; 2 – дренажная подушка; 3 – система орошения; 4 – непроницаемое основание; 5 – система сбора растворов; 6 – оконтуривающая берма; 7 – отводная канава.

Обычно оросители устанавливают на верхней части штабеля и растворы подаются со скоростью $0,002 - 0,003 \text{ л/с}\cdot\text{м}^2$ способом нисходящей перколяции или просачиванием под действием силы тяжести. Это позволяет жидкости обволакивать поверхность частиц с проникновением кислорода через жидкую пленку без затопления их [17].

Немаловажным является размещение их согласно геометрическим параметрам штабеля, а также режимы орошения, которые осуществляют одновременным насыщением, а также непрерывным и циклическим орошением.

Подача растворов для выщелачивания может осуществляться по различным схемам [3]:

- точечная производится через отверстия в перфорированных трубопроводах, которые укладываются на определенном расстоянии друг от друга; возможна через вертикально установленные патрубки, смонтированные в шахматном порядке по площади штабеля;
- капельная – по раствороподающим шлангам с равномерным и минимальным расходом;
- разбрызгивание посредством избыточного давления через насадки (форсунки), может охватить всю площадь массива.
- прудковое орошение – устройство заполненных раствором канав, траншей или прудков.

Укладка оросителей может быть как открытой, так и закрытой [18].

Открытую укладку (трубопроводов, шлангов и емкостей) применяют чаще в тех случаях, когда растворы выщелачивания не оказывают отрицательного влияния на окружающую среду, рабочий персонал и технику.

Закрытая – более эффективна и безопасна для высоких (более 4 м) и многоярусных штабелей за счет равномерного распределения раствора и исключения испарения.

Для подачи растворов используются насосы, вращающиеся импульсные разбрызгиватели, распылители Вобблера, виглеры, погружные эмиттеры, напорные шланговые распределители [18, 3].

Применяют также вертикальные перфорированные трубы для орошения рудных штабелей, которые вводятся в слой руды через равные интервалы. Это облегчает поступление раствора и воздуха в глубину слоя и интенсифицирует процесс выщелачивания. Такая система помогает снять проблемы потерь раствора за счет испарения, особенно в засушливых районах и разрешить проблемы замерзания подаваемых выщелачивающих растворов на поверхности штабеля при плохих погодных условиях [18].

Продуктивные растворы после фильтрации через штабель собираются в дренажную систему – слой рудного высокопроницаемого материала, обеспечивающего дренирование и отвод продуктивных растворов из штабеля. Она должна предотвращать миграцию растворов за пределы площадки КВ [18]. Обычно вокруг штабеля сооружают берму, которая поддерживает определенный уровень подтопления кучи, через которую продуктивный раствор переливается в отводящую канаву, и далее на карту продуктивных растворов [16]. Также дренажный слой служит для защиты изоляции штабеля. Используют следующие схемы дренажа при КВ:

- дренаж через песчано-гравийный слой, который применяется при укладке штабеля на наклонном основании. Растворы стекают через дренажный слой в приемный зумпф или траншею [3];
- отвод через дренажные перфорированные трубы, которые укладываются в основании штабеля на песчаной подушке и соединяются со сборным коллектором, способствуя сбору растворов, а также помогают предотвратить формирование давления свободной воды на основание площадки. Трубы могут быть связаны с системой труб, ведущих к картам сбора или направлены через обводную сборную канаву [18];
- дренаж в откачные скважины, когда растворы поступают в них через фильтры, из которых их потом извлекают раствороподъемными устройствами (эрлифтами, насосами). Скважины сооружают по прямоугольной сетке либо в шахматном порядке [18, 3];
- сбор в дренажные колодцы или траншеи, которые сооружаются в песчано-гравийном слое и по канавам растворы отводятся в сборные емкости.

Система дренажа также должна служить как фильтр, чтобы мелкие частицы не сдвигались и не перемещались растворами в сборные трубы и траншеи. Она поддерживает зону насыщения на низком уровне и обеспечивает минимальный градиент потока растворов, а также должна быть химически устойчивой к выщелачивающим растворам [18].

1.4. Анализ основных факторов, снижающих эффективность процесса КВ при формировании штабеля землеройной техникой

Важным фактором эффективности выщелачивания является равномерность распределения растворов в объеме штабеля, которая зависит от фильтрационных характеристик всего массива [16, 81]. Приемлемые показатели проницаемости и отвода продуктивных растворов возможны в случаях, когда штабель является гомогенным по всему объему.

Формирование штабеля сухой землеройной техникой (рис. 1.9) обычно характеризуется использованием различных циклических механизмов на транспортно-отвальных работах, а также – погрузочных и транспортных машин для вывоза выщелоченной горной массы, которые под собственной силой тяжести и неоднократных наездах в течение всего цикла на сооружаемый штабель уплотняют его структуру и влияют на слеживаемость отсыпаемых слоев горной массы [38].



Рис. 1.9. Формирование штабеля по традиционной схеме (методом отсыпки)

Скопление слеживаемых тонкодисперсных частиц рудного материала штабеля могут закупоривать фильтрационные каналы, вызывая, как показывает опыт, образование на его поверхности искусственных прудков, которые, в свою очередь, приводят к возникновению каналов с чрезмерной приемистостью.

С началом отсыпки, за счет сегрегации рудной массы, фильтрационная способность массива штабеля начинает ухудшаться. Обычно тонкие частицы

скапливаются в центре и внизу штабеля, а крупные – на наклонных поверхностях (рис. 1.10). Укладка наверх новой горной массы, также сопровождается миграцией мелких фракций вниз штабеля, а механизмы, разравнивающие штабель и отсыпаящие наверх руду, за счет вибрации усиливают этот процесс. В итоге, по горизонтали и вертикали штабеля образуются зоны с различной проницаемостью: от участков практически непроницаемых до высокофильтрующих, т. е. в обоих случаях весьма неблагоприятных для КВ [97].



Рис. 1.10. Сегрегация частиц при формировании штабеля.

На практике это явление проявляется в виде образования на поверхности штабелей луж, снижении раствороприимистости, а также в образовании свищей и ручьев через боковые поверхности, что является следствием повышения высоты выщелачивания [16]. Эти факторы могут привести к развалу штабеля или его частичному разрушению.

Также работа механизмов может сопровождаться кольматацией порового пространства – процесса проникновения мелких (коллоидных, глинистых и пылеватых) частиц в поры и трещины горных пород) в нижней части штабеля и суффозией – выносом мелких и тонких частиц через боковую поверхность штабеля.

Кроме того, эти негативные факторы могут быть вызваны компрессией выщелачиваемой массы и консолидацией мелких частиц, неправильной укладкой штабеля, например слоями с наездом, химической кольматацией.

Помимо внешне выраженных признаков ухудшения фильтрационных свойств может происходить нарушение равномерности проработки раствором штабеля без видимого ухудшения раствороприимистости в результате

каналообразования. Одной из причин является неправильная технология формирования штабеля. Все указанные причины приводят к ухудшению технологических показателей процесса и, в первую очередь, к недоизвлечению полезного компонента.

Отсыпка штабеля обычно характеризуется неоднородностью гранулометрического состава слоев по высоте сооружения, что значительно влияет на равномерность проницаемости и раствороприемистости, которые заключаются в возможности образования негативных явлений во всем объеме штабеля, таких как образование интенсивных фильтрационных каналов, трещин, различных по форме и размерам, в некоторых случаях приводящим к вывалу породы.

Эти факторы существенно снижают физико-химические контакты раствора реагента с рудной массой, связанные с кинетикой выщелачивания и условиями растворения ценных компонентов и, соответственно препятствуют эффективности способа в целом [38].

Помимо вышеперечисленных факторов, по мере прохождения растворов через штабель под действием собственного веса и избыточной влажности происходит слёживание горной массы, что также постепенно снижает проницаемость, замедляет и ухудшает процесс выщелачивания. При переработке пород, содержащих глинистые минералы, слеживание приводит зачастую к полной потере проницаемости руды. Поэтому необходимы дополнительные затраты на проведение мероприятий по разрыхлению штабеля (бурение, взрывание, перевалка и т. д.) [37, 97, 3, 16].

Кроме того, для увеличения контактной поверхности частиц (кусков) с раствором реагента нередко применяют также способ дополнительного встряхивания (перемешивания) горной массы во время процесса кучного выщелачивания. Для этого устраивается специальное основание, которое представляет собой баллон с возможностью нагнетания в него сжатого воздуха. Данная технология может быть применена в случае необходимости

разрыхления слежавшегося массива при довыщелачивании. Схема технологического процесса представлена на рис. 1.11.

Однако, несмотря на преимущества данной системе, в процессе сдувания баллона возможно перемещение мелких частиц вниз штабеля, либо закупоривание фильтрационных каналов при миграции частиц. Помимо этого, способ требует затрат на дополнительные специальные устройства и механизмы, которые необходимо контролировать в процессе. Также из-за невозможности проведения операции в процессе выщелачивания, увеличивается количество циклов.

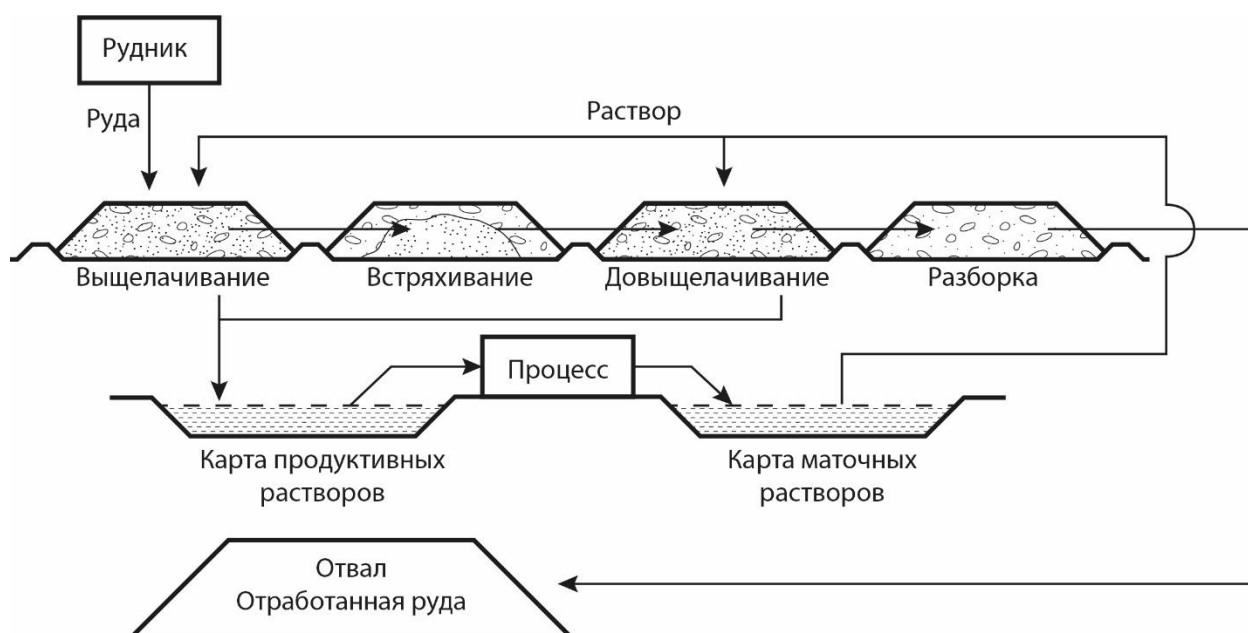


Рис. 1.11. Схема формирования штабеля со специальным основанием для разрыхления горной массы.

Данная технология позволяет разрыхлять слежавшуюся рудную массу, которая также дополнительно перемешивается не менее одного раза за цикл [37].

ГЛАВА 2. АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ РАБОТЫ ГИДРОТРАНСПОРТНОГО ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ И ПОДАЧИ ВЫСОКОНАСЫЩЕННЫХ ГИДРОСМЕСЕЙ ДЛЯ НАМЫВА ШТАБЕЛЯ

2.1. Основные факторы, определяющие особенности намывных сооружений гидротранспортными установками

Гидромеханизированный способ производства земляных работ широко применяется в промышленном, транспортном, гидротехническом и мелиоративном строительстве; при разработке осадочных месторождений, а также месторождений нерудных строительных материалов. Это обусловлено общепризнанными основными преимуществами гидромеханизации, основными из которых являются: поточность технологических процессов; возможность высокой степени механизации и автоматизации всех процессов; постоянное и равномерное потребление мощности; малочисленный обслуживающий персонал; экологичность, особенно в крупных городах или вблизи них и др. [71, 110, 60].

Данным методом возводят намывные сооружения, такие как плотины и дамбы, насыпи под шоссе и железные дороги, хвостохранилища и гидроотвалы, а также основания под аэродромы.

Средствами гидромеханизации в горнодобывающей промышленности сооружают следующие виды намывных сооружений [71]:

- гидроотвалы – для складирования вскрышных пород месторождений, разрабатываемых гидромеханизированным способом;
- шламоохранилища (хвостохранилища) – для укладки гидравлическим способом продуктов переработки твердых полезных ископаемых;
- золоотвалы – для гидравлической укладки золошлакового материала;
- шламонакопители и шламоотстойники специального типа – для длительного хранения или постоянного захоронения различных токсических шламов и других отходов.

Сам процесс намыва происходит за счет организованного осаждения твердых частиц из потока гидросмеси – сложного течения неоднородной жидкости по укладываемой поверхности с уклоном, формирующий намываемый массив.

При растекании гидросмеси по площади намываемого сооружения, ее скорость, расход и концентрация снижаются, а крупные частицы осаждаются ближе к месту выпуска из-за снижения транспортирующей способности, которая приблизительно равна кубу средней скорости потока [29].

Помимо вышеперечисленных (традиционных) намывных сооружений, нами предлагается формировать массив штабеля кучного выщелачивания гидромеханизированным способом, новизна которого подтверждена патентом РФ RU2095562C1 «Способ кучного выщелачивания» [32].

Необходимым условием для формирования массива штабеля является намыв его высоконасыщенной гидросмесью с объемной концентрацией не менее 20% (оптимально 30-35% и выше).

Однако, если для намыва гидроотвала или плотины по техническим условиям требуется уплотнение этих сооружений: в первом случае для увеличения его вместимости укладываемых пород, во втором – для надежности ограничивающих гидротехнических устройств, то для намыва штабеля необходима разрыхленная структура с приемлемой фильтрационной способностью для проницаемости жидкости (раствора реагента) в нижележащие слои.

Сравнение между основными факторами различных намываемых массивов нами представлены в табл. 2.1. [95, 92, 97, 29]

Таблица 2.1.

Сравнение основных факторов намывных сооружений.

Свойство	Гидроотвал	Плотина/дамба	Штабель
1	2	3	4
Размер частиц	В широком диапазоне грансостава	Для безъядерных плотин среднезернистые пески, с минимальным	Крупнокусковатые (~200 мм) и шламы (~270 меш), которые проходят агломерацию [97]

1	2	3	4
		коэффициентом неоднородности, для плотин с ядром - песчано-гравелистые, песчаные и супесчаные[95]	
Вещественный состав	Все частицы должны задерживаться в гидроотвале [29]	При возведении плотин с ядром сбрасываются частицы менее 0,005 мм, при возведении без ядра – частицы менее 0,01 мм [95, 92]	Все фракции горной массы [97]
Форма	Площадное простираие	Узкопрофильное сооружение	Широкопрофильные и узкопрофильные
Уклон поверхности	Присутствует во всех сооружениях		
Рельеф местности	Равнина, балка, косогор, котлован	Равнина, долина, косогор	Равнина, балка, косогор, котлован
Оборот воды (раствора)	Должен быть	Не типично [99]	Должен быть
Высота	Низкие до 10 м Средние 10-30м Высокие более 30 м [29]	Менее 5 5-10 10-15 15-50 Более 50	До 2 м 2-10 м До 30 м Более 30 (дамбовое)
Фильтрация	Желательно	Устройство противо-фильтрационных сооружений	Необходима фильтрация
Схема намыва	Стандартные для всех сооружений		
Однородность состава	Нет	С ядром или без ядра	Рекомендуется
Наличие пруда отстойника	Должен быть	Схемы бывают как с прудком, так и без [95], при намыве неоднородных	Возможно

1	2	3	4
		пород, прудок должен быть [29]	
Зоны намыва	Упорные призмы, ядро, Промежуточные зоны	Упорные призмы, ядро	Желателен однородный намытый массив
Породы	Вскрышные породы, хвосты обогащения и др. отходы производства	Песчаные породы. Гравийные частицы следует использовать для упорных призм, а суглинки и глины — для ядра.	Крупнокусковые (до 200 мм) и мелкозернистые, шламы
Плотность намытых пород	Высокая	Высокая	Разуплотненная

При проектировании гидромеханизированных работ, на стадии выбора грунтового насоса, обычно учитывают следующие факторы: расходно-напорные характеристики агрегата, параметры гидросмеси (объемная концентрация, а также гранулометрический состав горной массы), размеры рабочего колеса, число оборотов двигателя и др.

В настоящее время существует достаточно большое количество заводов, которые производят технику для гидромеханизированных работ, в том числе и грунтонасосных агрегатов различных модификаций. К ним относятся: Рыбинский ЗАО «Завод Гидромеханизации»; Завод «Промгидромеханизация»; Челябинский завод нестандартных машин; АО «Гидромеханизация» г. Миасс; НПК ИНТЭКО г. Челябинск; Бобруйский машиностроительный завод; ООО «ГидроТехника» Санкт-Петербург; ООО «Завод Металлоконструкций» (Приморско-Ахтарск); НПО «Земснаряд» Санкт-Петербург.

На рис. 2.1. и табл. 2.2 приведены основные технические и расходно-напорные характеристики некоторых выпускаемых грунтонасосов.

Однако, производственный опыт во многих случаях показывает, что в процессе эксплуатации грунтонасосных (землесосных) установок их режимы работы значительно отличаются от оптимальных (проектных) и прежде всего

повышенными скоростями движения гидросмеси и ее незначительной объемной концентрацией (плотностью). В первую очередь, это можно объяснить изменением расходно-напорных характеристик этих агрегатов при различных объемных концентрациях пульпы, зависящих от многообразия гранулометрического состава транспортируемых для намыва пород. Другим немаловажным фактором является то, что расходно-напорные характеристики многих грунтонасосов (землесосов) сняты в заводских условиях при испытаниях на воде, что не позволяет с достоверностью определять работу гидрокомплексов при их проектировании и эксплуатации, особенно для перемещения, насыщенных твердыми частицами гидросмесями. Поэтому, актуальной задачей является анализ существующих методов пересчета с воды на гидросмесь расходно-напорных характеристик и установить оптимальную с минимальной погрешностью для применяемого для намыва штабеля грунтонасоса (землесоса), которая решается в разделе 2.2.

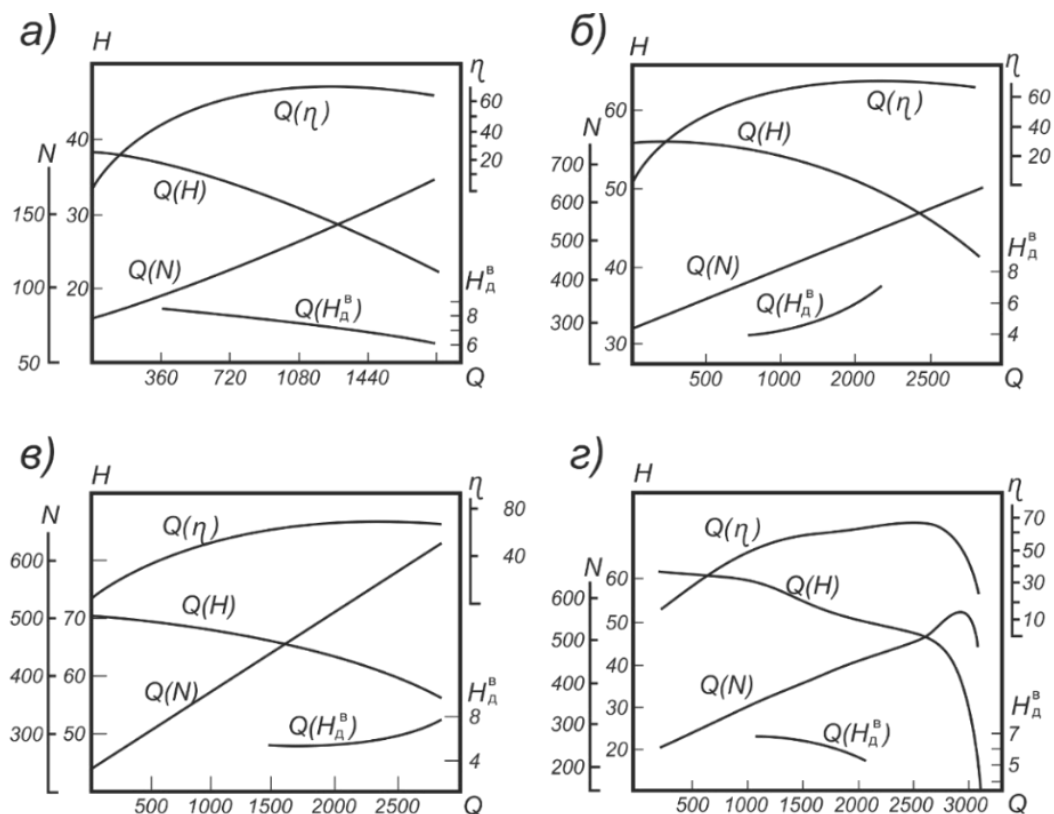


Рис. 2.1. Рабочие характеристики грунтовых насосов.

а – ГрТ 1600/25 ($D_{рк}=650$ мм); б – ГрТ 1600/50 ($n=725$ об/мин); в – ГрТ 2000/63 ($n=725$ об/мин); г – ЗГМ-2М ($D_{рк}=890$ мм). H – напор, м. вод. ст.; Q – производительность, м³/ч; N – мощность, кВт; η – кпд, %; $H_{д}^в$ – допустимый кавитационный запас.

Таблица 2.2.

Основные технические характеристики некоторых из выпускаемых грунтонасосов.

№ П/П	Марка	Подача, м ³ /ч	Напор, м	Диаметр рабочего колеса, мм	Мощность, кВт	Частота, об/мин	Допустимый кавитационный запас, м	Кпд, %
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	ГрАТ 85/40	85	40	345	30	1500	6,0	56
3	ГрАТ 225/67/2	225	67	430	110	1500	6,0	56
4	ГрАТ 350/40/2	350	400	510	90	1000	6,0	56
5	ГрАТ 450/67/3	450	67	630	250	1000	6,0	56
6	ГрАТ 700/40/3	700	40	630	200	1000	6,0	56
7	ГрАТ 900/67/4	900	67	685	132	750	6,0	56
9	ГрАТ 1400/40/4	1400	40	905	500	750	6,0	56
10	ГрАТ 1800/67	1800	67	905	500	485/580/725	6,0	56
11	ГрАТ 2500/40	2500	40	920	800	600	6,0	75
13	2ГрТ 400/40	400	40	515	132	1000	7,5	67
14	ГрТ 1600/50	1600	50	690	400	580/725	4,8	66
15	ГрТ 4000/71	4000	71	1250/1390	1600	500	4,8	64
16	ГрТ 1250/71	1250	71	710	630	1000	5,0	57
18	ГрАУ 2000/63	2000	63	1050	1000	470/530	4,3	56
19	ГрТ 1600/25	1600	25	570/650	100	750	4,5	56
20	ЗГМ-2М	1900	53	890	630	735	5,7	65

2.2. Анализ методов пересчета расходно-напорных характеристик грунтонасосов с воды на гидросмеси различных концентраций

Известно, что для трубопроводного транспорта с центробежными грунтонасосами (землесосами) режимы работы устанавливаются рабочими характеристиками этих агрегатов [35, 39, 20], которые представляют собой функциональные зависимости развиваемого напора $H=f(Q)$, расходуемой мощности $N=f(Q)$, допустимой высотой всасывания $H_{\text{вс}}^{\text{доп}} = f(Q)$, коэффициентом полезного действия $\eta=f(Q)$ от расхода гидросмеси (см. рис. 2.1). На основе расчета точки пересечения кривой $Q-H$ грунтонасоса и трубопровода устанавливается оптимальный режим работы гидротранспортирования с данной концентрацией.

Основное уравнение центробежного насоса в самом общем виде было получено Л. Эйлером в 1754 году. К рабочему колесу центробежного насоса со скоростью V_0 жидкость подводится аксиально, затем направления струй жидкости изменяется от осевого до радиального, а скорость, благодаря центробежной силе увеличивается от значения V_1 в пространстве между лопастями до значения V_2 на выходе из колеса [45].

При вращении рабочего колеса центробежного насоса жидкость, находящаяся между лопатками, благодаря развиваемой центробежной силе выбрасывается через спиральную камеру в напорный трубопровод. Уходящая жидкость освобождает занимаемое ею пространство в каналах на внутренней окружности рабочего колеса, поэтому у входа в рабочее колесо образуется вакуум, а на периферии — избыточное давление. Под действием разности атмосферного давления в приемном резервуаре и пониженного давления на входе в рабочее колесо жидкость по всасывающему водопроводу поступает в межлопаточные каналы рабочего колеса [46, 45, 114].

Заводские испытания с целью определения характеристик землесосов или центробежных грунтовых насосов обычно приводятся на воде, и методика их пересчета излагается во многих работах. Рабочие характеристики грунтонасосов

(землесосов), снятые на воде, обычно принимаются в качестве стандарта или эталона, которые затем рассчитываются для работы на гидросмеси различной объемной концентрации [79, 81, 39, 50].

Давление, развиваемое насосом, уменьшается главным образом из-за того, что при конечном числе лопастей рабочего колеса не все частицы отклоняются равномерно, вследствие чего уменьшается абсолютная скорость. Кроме того, часть энергии расходуется на преодоление гидравлических сопротивлений. [44]

При наличии в жидкости твердых частиц ее физико-механические свойства изменяются и она не считается однородной. Часть энергии также расходуется на преодоление гидравлических сопротивлений твердыми включениями [46].

При постоянном расходе напор землесоса при работе на гидросмеси, выраженный в метрах столба смеси, является меньше напора, развиваемого землесосом при работе на воде. Это можно объяснить из элементарной теории центробежного насоса [112].

Как известно, формула для определения теоретического напора землесоса имеет вид:

$$H = \frac{u_2 \cdot c_{2u}}{g} \quad (2.1.)$$

Где H – напор; u_2 – окружная скорость при выходе из рабочего колеса; c_{2u} – касательный компонент абсолютной скорости при выходе из рабочего колеса; g – ускорение свободного падения.

Рассматривая движение в рабочем колесе частицы воды и грунта, О’Брайен приходит к выводу, что наличие грунта в потоке обуславливает уменьшение касательной скорости c_{2u} на некоторую величину, а, следовательно, и напора, развиваемого землесосом.

Однако, как показывает опыт, они существенно отличаются между собой. Поэтому актуальной задачей при проектировании и эксплуатации трубопроводного транспорта твердого материала горной массы является оценка и выбор методики расчета расходно-напорной характеристики с учетом физико-технических параметров транспортируемой гидросмеси (средневзвешенного

диаметра d_{cp} , фракционного состава, объемной концентрации пульпы S , а также конструктивных особенностей установки).

Многие авторы предлагают различные расчетные уравнения, однако большинство из них не приводят не только опытных данных, но и соображений (доводов), послуживших основанием для их выводов [79, 81, 39].

В центробежных грунтовых насосах для гидросмеси вследствие разности числа лопастей и оборотов рабочего колеса, гранулометрического состава исходного сыпучего материала, а также объемных концентраций транспортируемой пульпы их эксплуатационные характеристики, такие как развиваемый напор, потребляемая мощность и к.п.д. насоса, существенно отличаются, чем для однородной жидкости [79, 81, 39].

Пересчет рабочих расходно-напорных ($Q-H$), мощностных ($Q-N$) и к.п.д. ($Q-\eta$) характеристик грунтонасоса с воды на пульпу осуществляется в связи с необходимостью прогнозирования изменения режимов гидротранспортирования в зависимости от концентрации и гранулометрического состава сыпучего материала.

В литературных источниках существует множество уравнений для пересчета значений паспортных характеристик грунтонасосов по воде на гидросмесь (табл. 2.3). Нами проведен анализ различных функциональных зависимостей $Q=f(H)$, учитывающих в той или иной степени наличие в потоке твердых частиц и их влияние на гидродинамику процесса. Они были систематизированы на группы по критерию использования гранулометрического состава [79, 81, 39].

В первой – представлены уравнения, в которых не учитывают гранулометрический состав твердого [Смолдырев А. Е. [88]; Животовский Л. С. [44]; Шкундин Б. М. [108]; Чернов А. И. [106]; Фридман Б. Э. [98]; Спиваковский А. О. [102]; Покровская В. Н. [70]; Романенко Б. Е. [76]; Бутов А. С. [11]; Горюнов [22]];

Во второй – уравнения, учитывающие гранулометрический состав минеральных частиц [ВНИИ им. Веденеева [48]; Животовский Л. С. [58]; Харин А. И. [100]; ВНИИ Гидромаш [49, 103]; Нурок Г. А. [59]]. Они разделены на две подгруппы:

В первой – уравнения, которые не включают конструктивные параметры грунтонасосов [ВНИИ им. Веденеева [48], ВНИИ Гидромаш [49], Нурок Г. А. [59]];

Во второй – учитывающие конструктивные параметры грунтовых насосов (диаметр рабочего колеса, количество оборотов двигателя и др.) [Животовский Л. С. [58, 107, 45]; Харин Л. С. [100]; ВНИИ Гидромаш [103]]

Таблица 2.3.

Уравнения пересчета для грунтонасосов с воды на гидросмесь различных авторов.

№	Авторы	Уравнение
1	2	3
1.	Смолдырев А. Е.[88]	$H_r = H_0 \cdot \left(1 + K_h \frac{\rho_r - \rho_0}{\rho_0}\right)^{0,85} \quad (2.2.)$
2.	Животовский Л. С. [44]	$H_r = H_0 \cdot \frac{\rho_r}{\rho_0} \cdot [1 + K_b \cdot (1 - \varphi)] \quad (2.3.)$
3.	Шкундин Б. М. [108]	$H_r = H_0 \cdot \frac{\rho_r}{\rho_0} \cdot \left(1 - 0,57 \cdot \frac{\rho_r - \rho_0}{\rho_0}\right) \quad (2.4.)$
4.	Чернов А. И. [106]	$H_r = 0,92 \cdot H_0 \cdot \rho_r \quad (2.5.)$
5.	Фридман Б. Э. [98]; С. И. Горюнов [22]	$H_r = H_0 \cdot \frac{\rho_0}{\rho_r} \quad (2.6.)$
6.	Холин Н. Д., Никонов Г. П., Славутский С. О.[102]	$H_r = H_0 \cdot \rho_r \cdot (1 - 0,25 \cdot k) \quad (2.7.)$
7.	Покровская В. Н. [70]	$H_r = 0,6 \cdot (\rho_r - 1)^{0,85} \cdot H_0 + H_0 \quad (2.8.)$
8.	Романенко Б. Е. [76]	$H_r = H_0 \cdot \rho_r \quad (2.9.)$
9.	Бутов А. С., Г. А. Кошлаков [11]	$H_r = H_0 \cdot \frac{\rho_r}{\rho_0} \cdot \frac{\eta_r}{\eta_0} \quad (2.10.)$

1	2	3
10.	ВНИИ им. Веденеева [48]	$H_{\Gamma} = H_0 \cdot k_0 \cdot \left[1 + \frac{S_0^{1,2}}{\sqrt{\psi_{\text{cp}}}} \right] \quad (2.11.)$
11.	Животовский Л. С. [58]	$H_{\Gamma} = \frac{H_0 \cdot \rho_{\Gamma}}{\rho_0} \cdot \left[1 - 0,05 \cdot \frac{\rho_{\Gamma} - \rho_0}{\rho_{\Gamma}} \cdot \left(\frac{n \cdot D_{\text{ПК}}^3}{Q_0 \cdot C_{\varphi}^{0,75}} \right) \right] \quad 2.12.)$
12.	Харин А. И. [100]	$H_{\Gamma} = H_0 \cdot (1 + k_p \cdot S_0) \quad (2.13.)$
13.	ВНИИ Гидромаш [49]	$H_{\Gamma} = H_0 \cdot \left[1 - \sum K_H^i \cdot \frac{\rho_{\Gamma}^i - \rho_0}{\rho_{\Gamma}} \right] \quad (2.14.)$
14.	ВНИИ Гидромаш [103]	$H_{\Gamma} = H_0 \cdot \left[1 - K_p \cdot K_z \cdot K_{2\beta_{\text{Л}}} \cdot \frac{\rho_{\Gamma} - \rho_0}{\rho_{\Gamma}} \cdot \sum K_H^i \cdot \frac{q_i}{100} \right] \quad (2.15.)$
15.	Животовский Л. С. [107]	$H_{\Gamma} = H_0 \cdot \left(1 - \frac{\rho_{\Gamma} - \rho_0}{\rho_{\Gamma}} \cdot \beta_0 \cdot \alpha \right) \quad (2.16.)$
16.	Животовский Л. С. [45]	$H_{\Gamma} = \frac{u_2 \cdot c_{2ut}}{g} \cdot \frac{Q_{\Gamma} \cdot \rho_{\Gamma}}{Q_{\Gamma} \cdot \rho_{\Gamma}} + \frac{u_2 \cdot c_{2u0}}{g} \cdot \frac{Q_0 \cdot \rho_0}{Q_{\Gamma} \cdot \rho_{\Gamma}} \quad (2.17.)$
17.	ВНИИ Гидромаш [112]	$H_{\Gamma} = H_0 \cdot \frac{\rho_{\Gamma}}{\rho_0} \cdot A_1 \quad (2.18.)$
18.	Нурок Г. А. [59]	$H_{\Gamma} = H_0 \cdot \left[1 + \frac{S_0^{1,2}}{\sqrt{\psi_{\text{cp}}}} \right] \quad (2.19.)$
19.	Нурок Г. А. [59]	$H_{\Gamma} = \frac{H_0 \cdot \rho_{\Gamma} \cdot k'}{\rho_0} \quad (2.20.)$
20.	Карасик В. М. [51]	$H_{\Gamma} = H_0 \cdot \left(0,5 \cdot \frac{\rho_{\Gamma}}{\rho_0} + 0,5 \right) \quad (2.21.)$
21.	Спиваковский А. О. [94]	$H_{\Gamma} = H_0 \cdot k_1 \quad (2.22.)$
22.	Борщевский Ю. Т. [8]	$H_{\Gamma} = H_0 \cdot 1 - 0,23 \cdot \left(10 \cdot \frac{\rho_{\Gamma} - \rho_0}{\rho_0} \right)^{1,5} \cdot \left(\frac{Q_{\Gamma}}{Q_0} \right)^4 \quad (2.23.)$
23.	Юфин А. П. [110]	$H_{\Gamma} = H_0 \cdot \left[1 - 0,087 \cdot \left(\frac{Q_{\Gamma}}{Q_0} \right)^{1,25} \cdot \left(10 \cdot \frac{\rho_{\Gamma} - \rho_0}{\rho_0} \right) \cdot \frac{d}{D} \right] \cdot e^{-0,27 \cdot \frac{d}{D}} \quad (2.24.)$

1	2	3
24.	Фаэрбэнк Л. А. [116]	$H_{\Gamma} = \frac{w}{g \cdot S_m} \cdot [S_0 \cdot C \cdot (R_2 \cdot C_{u,s} - R_1 \cdot C_{u1,0}) + (1 - C) \cdot (R_2 \cdot C_{u2,0} - R_1 \cdot C_{u1,0})] \quad (2.25.)$
25.	Вокалдо Дж., Сагоо М. С. [119]	$H_{\Gamma} = (0,8 \div 0,9)H_0 \quad (2.26.)$
26.	Буржес К. Е., Реизес А.[115]	$H_{\Gamma} = H_0 \cdot K_H \quad (2.27.)$
Для удобства расчетов все обозначения приведены к одному виду*.		

Условные обозначения к табл. 2.3.:

H_z – напор на воде, м. вод. ст. м., м. ст. смеси;

H_0 – напор на воде, м. вод. ст.;

ρ_z – плотность гидросмеси, кг/м³ (т/м³);

ρ_0 – плотность несущей среды кг/м³(т/м³);

ρ_m – плотность твердого компонента, кг/м³ (т/м³);

S_0 – концентрация;

Q_z – расход гидросмеси через систему, м³/ч ((2.23.); (2.24); (2.15));

Q_0 – расход землесоса на воде, м³/сек ((2.12); (2.23); (2.24); (2.15));

n – частота вращения двигателя, об/с (2.12);

D_k – наружный диаметр рабочего колеса, м ((2.12); (2.15));

d_{cp} – средневзвешенный диаметр частиц, м ((2.12); (2.15); (2.24));

q_i – содержание частиц итой фракции ((2.11); (2.15); (2.13); (2.14));

g – ускорения свободного падения, м/с² ((2.17); (2.13); (2.25));

η_z – к.п.д. на гидросмеси, % (2.10);

η_0 – к.п.д. на воде, % (2.10);

K_h – коэффициент, учитывающий работу насоса (2.2) $K_h=0,6$

φ – коэффициент, выражающий отношение $\frac{(C_{2u})_T}{(C_{2u})_B}$, (2.3)) $\varphi=0,75$;

K_e – весовая консистенция (2.3):

$$K_B = \frac{Q_T \cdot \rho_T}{(Q_B + Q_T)\rho_B}$$

k – коэффициент (2.7):

$$k = \frac{\rho_T - \frac{\rho_T}{\rho_{\Gamma}}}{\rho_T - 1}$$

K_H – коэффициент уменьшения напора (2.27):

$$K_H = (1 - S_0)^m$$

где m – величина, определяемая транспортируемым материалом: $m = 0,333$ – для морского песка; $m = 0,589$ – для речного песка; $m = 0,45$ – для ильменита; $m = 0,561$ для тяжелой руды.

k_1 – коэффициент увеличения напора землесоса при перекачке гидросмеси по сравнению с напором на воде (2.12):

$$k_1 = 1 + \frac{(\rho_r - \rho_0)^{1,2}}{\rho_r}$$

k_0 – безразмерный коэффициент, который принимается равным 1 (2.11);

ψ_{cp} – средневзвешенный коэффициент транспортабельности ((2.11); (2.13)):

Фракция грунта, мм	0,05- 0,1	0,1- 0,25	0,25- 0,5	0,5- 1,0	1,0- 2,0	2,0- 3,0	3,0- 5,0	5,0- 10,0	>10
ψ	0,02	0,2	0,4	0,8	1,2	1,5	1,8	1,9	2,0

$$\psi_{cp} = \frac{\sum \psi_i \cdot q_i}{100}$$

где ψ_i – коэффициент транспортабельности i -той фракции;

C_φ – коэффициент лобового сопротивления грунта (2.17):

$$C_\varphi = \frac{g \cdot d_{cp}}{u^2}$$

u – гидравлическая крупность частиц, м/с (2.17);

k_p – коэффициент давления (2.13):

$$k_p = \frac{0,2}{(0,2 + \psi_{cp} \cdot \alpha_k)}$$

α_k – коэффициент, отражающий конструктивные особенности насосов (2.13);

$$\alpha_k = \frac{Q_0}{\omega \cdot d_0^2 \cdot r_k}$$

d_0 – диаметр отводящего патрубка, см (2.13);

r_k – радиус рабочего колеса, см (2.13);

ω – угловая скорость рабочего колеса, рад/с (2.13):

$$\omega = \frac{2 \cdot \pi \cdot n}{60}$$

ρ_r^i – парциальная плотность гидросмеси, кг/м³ (2.14):

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

K_H^i – коэффициенты снижения напора для каждого диаметра (2.15):

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

d_{icp} – средний размер частиц каждой i -той фракции, м (2.14, 2.15):

k_p – коэффициент режима работы насоса (2.15):

$$k_p = 1,94 - 1,68 \cdot \frac{Q_1}{Q_0} + 0,74 \cdot \left(\frac{Q_1}{Q_0}\right)^2$$

k_z – коэффициент, учитывающий количество лопаток:

$$k_z = 0,546 + 0,159 \cdot z - 0,011 \cdot z^2$$

z – количество лопаток в насосе, шт.;

$k_{2\beta}$ – коэффициент угла выхода лопатки:

$$k_{2\beta} = 1,215 - 0,0077 \cdot \beta$$

β – угол выхода лопатки, при 28 градусах, коэффициент равен 1.

β_0 – коэффициент, учитывающий влияние размеров насоса на величину гидравлических потерь. При $Re > 1200000$ $\beta_0 = 0,6$, при $Re < 1200000$ $\beta_0 = 800/\sqrt{Re}$ (Животовский Л. С. (2.16)):

$$\alpha = 0,4 \cdot \frac{gH_0 r_2^2}{u_2^2 r D_r} \cdot \left[100 \left(\frac{r_3^3}{D_r r} \sqrt{0,5} \right)^{-1,4} - 1 \right]$$

где r_2 – радиус рабочего колеса; r – средний радиус отвода; D_r – гидравлический диаметр отвода в расчетном сечении; r_3 – внешний радиус отвода в расчетном сечении [46].

A_1 – коэффициент, учитывающий дополнительные гидравлические потери в грунтовом насосе (2.18):

$$A_1 = 1 - 0,05 \cdot \frac{\rho_r - \rho_0}{\rho_r} \cdot K_{гр} \cdot K_{зем}$$

Фракция грунта, мм	0,05- 0,1	0,1- 0,25	0,25- 0,5	0,5-1,0	1,0-2,0	3,0-5,0	5,0- 20,0	20,0- 80,0
$K_{гр}$	0,07	0,1	0,4	0,75	1,2	1,5	1,7	1,8

Марка земснаряда	НЗ	10ГРУ- 8Л	12Р- 7	ЗГМ- 1М	ЗГМ- 2	ЗГМ- 2М	12ГРУ- 8Л	16ГРУ- 8	20Р- 11
$K_{зем}$	12	16	22	14	15	14	13	19	11

k' – коэффициент для пересчета рабочих характеристик насоса, определяемый по таблице (2.20):

S \ $d_{ер}$, мм	0,3	0,5	1,0
25	0,85	0,8	0,7
30	0,82	0,74	0,62
35	0,78	0,67	0,56

На рис. 2.2. и в табл. 2.4. показаны результаты расчетов по уравнениям различных авторов для сгущенных гидросмесей.

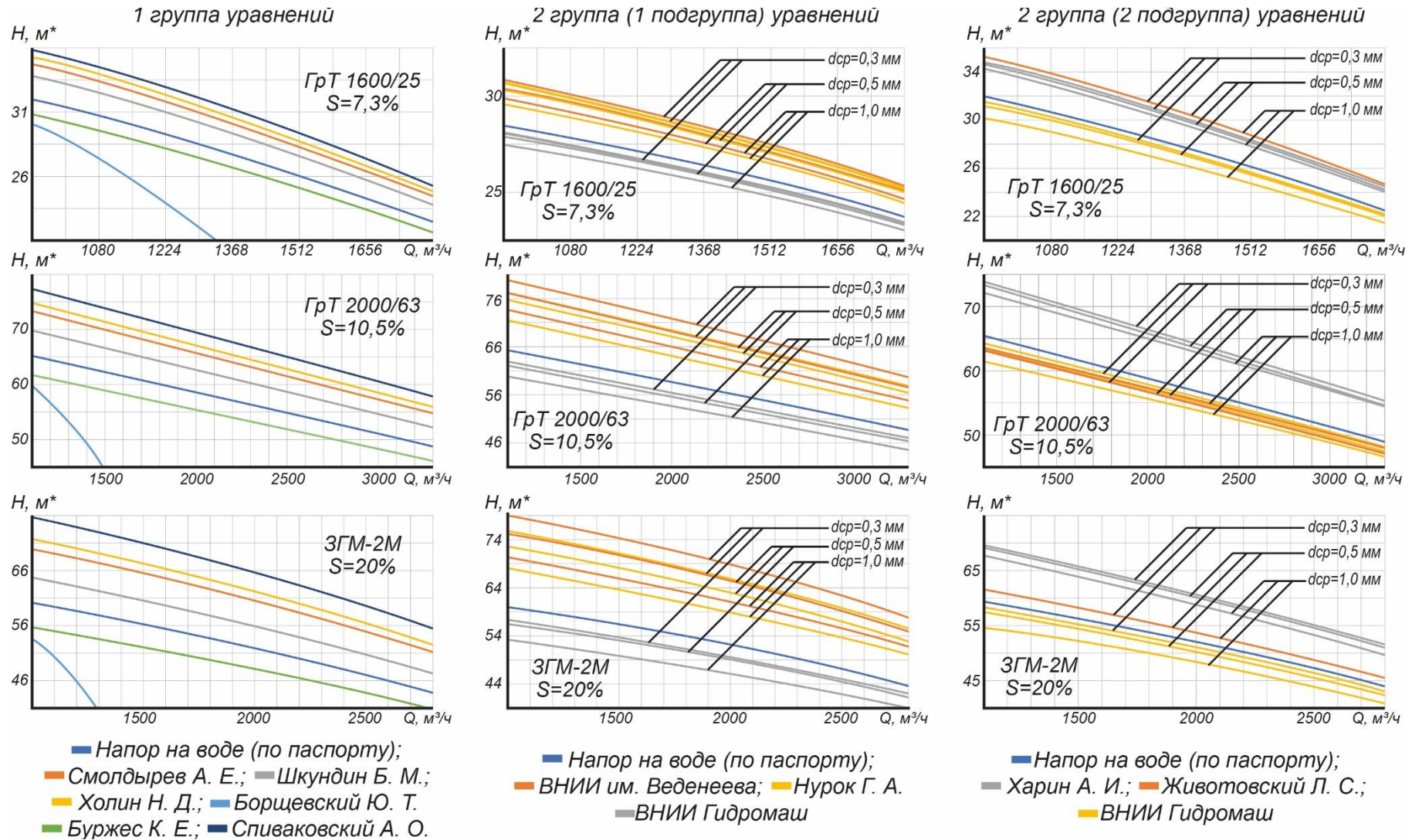


Рис. 2.2. Расчетные результаты расходно-напорной характеристики грунтонасосов, работающих на гидросмеси различной концентрации (см. табл. 2.3).

Таблица 2.4.

Сравнительные показатели расхождения (в %) расчетных расходно-напорных характеристик по гидросмеси с различными объемными концентрациями (S) относительно результатов заводских испытаний грунтонасосов по воде.

Группа	Автор, уравнение	Грунтонасос	d_{cp} , мм	Расхождения (в %) при концентрации (S, %) (в единицах измерений, предлагаемых авторами)		
				10,5	15	20
1	2	3	4	5	6	7
1 группа уравнений	Смолдырев А. Е. (2.2.)	Не учитывается	Не учитывается	9	12	17
	Животовский Л. С. (2.3.)			24	37	51
	Шкундин Б. М. (2.4.)			6	7	8
	Чернов А. И. (2.5.)			8	15	22
	Фридман Б. Э.; Горюнов С. И. (2.6.)			17	25	33
	Холин Н. Д. (2.7.)			10	15	20
	Покровская В. Н. (2.8.)			14	18	23
	Романенко Б. Е. (2.9.)			17	25	33
	Карасик А. О. (2.21.)			9	12	16
	Вокалдо Дж. (2.26.)			25	25	25
	Буржес К. Е. (2.27.)			4	6	8
	Спиваковский А. О. (2.22.)			12	19	26

1	2	3	4	5	6	7
2 группа 1 подгруппа	ВНИИ им. Веденеева (2.11.)	Не учитывается	0,3	15	22	32
			0,5	12	18	25
			1,0	8	13	18
	ВНИИ Гидромаш (2.15.)		0,3	3	4	5
			0,5	4	5	6
			1,0	7	9	12
	Нурок Г. А. (2.19.)		0,3	14	19	26
			0,5	11	16	21
			1,0	7	10	14
2 группа 2 подгруппа	Животовский Л. С. (2.16.)	ГрТ 1600/25	0,3	2	3	4
			0,5	2	3	4
			1,0	2	3	4
		ГрТ 2000/63	0,3	-2	-3	-4
			0,5	-2	-3	-3
			1,0	-2	-3	-3
		ЗГМ-2М	0,3	2	3	4
			0,5	2	3	4
			1,0	2	3	4
	Харин А. И. (2.13.)	ГрТ 1600/25	0,3	9	13	17
			0,5	8	12	16
			1,0	7	10	13
		ГрТ 2000/63	0,3	9	13	18
			0,5	9	12	17
			1,0	7	11	14
		ЗГМ-2М	0,3	9	13	17
			0,5	9	12	16
			1,0	7	10	14

Определенное распространение для пересчета напора с воды на гидросмесь получила зависимость (2.7.), приведенная в работе Н. Д. Холина, Г. П. Никонова и С. О. Славутского [98]. Она рекомендуется в работах многих авторов. Однако остается не совсем ясным, для каких конкретных условий можно применять это уравнение [48]. Авторами введен коэффициент k , который зависит от плотности гидросмеси.

Б. Е. Романенко (2.9.) [76], ссылаясь на опыты Л. С. Животовского, принимает, что напор насоса на гидросмеси увеличивается на значение плотности гидросмеси. При этом не дается сопоставление с опытными данными, а отмечается, что они довольно хорошо подтверждаются опытами и теоретическими соображениями [51].

Авторы (А. С. Бутов, Г. А. Кошляков (2.10.)) указывают, что с увеличением расхода воды и гидросмеси напор постепенно уменьшается и при определенном значении расхода резко падает. По их мнению, такое резкое падение напора происходит в результате возникновения в землесосе кавитации. Напор землесоса при постоянном расходе и увеличении плотности гидросмеси растет, если его выражать в метрах водяного столба, и уменьшается при выражении его в метрах столба гидросмеси. В части влияния крупности транспортируемого грунта на работу землесоса, авторы считают, что напор не зависит от крупности грунта [11].

По зависимости Шкундина Б. М. (2.4.) расчетные результаты снижаются с увеличением плотности гидросмеси. Это связано с тем, что значение относительной плотности гидросмеси уменьшается с увеличением ее концентрации, которая так же включена в уравнение.

В литературе [А. О. Спиваковский, А. Е. Смолдырев, Ю. С. Зубакин Автоматизация трубопроводного транспорта (2.22.) [94]] отмечается, что с увеличением удельного веса (концентрации) гидросмеси возрастает развиваемый насосом напор, повышается потребляемая мощность, и уменьшается его к.п.д. При этом рабочие точки смещаются влево, т.е. уменьшается расход, создаваемый агрегатом. При этом характерно, что рабочие точки могут попасть в зону кавитации, в которой агрегат работает неустойчиво и может прекратить подачу вследствие срыва вакуума (разрыва сплошности потока) во всасывающем трубопроводе [79].

В уравнении Борщевского Ю. Т. (2.23.) напор снижается достаточно резко с увеличением производительности насоса. Это можно назвать явлением кавитации. Другие авторы, также отмечают это явление, но по результатам расчетов этого уравнения, напор падает даже при невысокой производительности насоса. Хотя

автор пишет о том, что проводил эксперименты и свое уравнение подтвердил экспериментально.

Методика, предложенная ВНИИ им. Веденеева (2.11.), не учитывает плотности жидкости, твердого и соответственно гидросмеси, в отличие от всех других методик. С другой стороны, в уравнении учитывается фракционный состав твердого компонента, который выражается через коэффициент транспортабельности. Также было замечено, что при малых диаметрах твердого, напор насоса, выраженный в метрах столба гидросмеси, превышает напор насоса на воде. Как отмечает Харин А. И. [100] данное уравнение не удовлетворяет граничным условиям. Так, при малых значениях средней крупности транспортируемого грунта, когда значение транспортабельности стремиться к нулю, величина в скобках стремится к бесконечности, что противоречит реальным данным.

Нурок Г. А. (2.20.) [59] утверждает, что напор насоса при работе на гидросмеси всегда меньше напора насоса при работе на воде H_0 , вследствие дополнительных потерь напора, связанных с наличием твердого в жидкости, что, по нашему мнению, справедливо, т.е.:

$$H_{\Gamma} = H_0 - \Delta h_{\Gamma}$$

где Δh_{Γ} – дополнительные потери за счет наличия твердой фракции в гидросмеси.

Несмотря на то, что напор насоса, выраженный в метрах столба гидросмеси, как правило ниже, чем при работе на воде, давление, развиваемое насосом при работе на гидросмеси (измеряемое манометром), всегда выше, чем давление, развиваемое насосом при работе на воде [39].

По уравнению, предложенным Нуроком Г. А. расчетный напор снижается, как с увеличением концентрации твердого, так и с увеличением средневзвешенного диаметра. Также автором установлены гарантированные пределы использования формулы. Так, при средневзвешенных диаметрах твердого менее 1 мм, напор грунтонасоса на гидросмеси, превышает его напор на воде, а при диаметре 1 мм, напор ниже, чем на воде.

По методике ВНИИ Гидромаш (2.15.) [103] идет снижение напора. При этом большее значение при изменении напора играет средневзвешенный диаметр, а не концентрация гидросмеси. Этот фактор обычно нехарактерен для уравнений пересчета расходно-напорных характеристик грунтонасосов. Это достаточно логично, ведь гидросмесь — это не однородная жидкость, а включение твердых частиц создает дополнительные гидравлические сопротивления. В отличие от других методов гранулометрический состав выражается через парциальную плотность, которая рассчитывается для каждой итой фракции отдельно.

По всем уравнениям данной группы большее влияние на напор оказывает средневзвешенный диаметр твердого, нежели концентрация гидросмеси. То есть, напор снижается более интенсивно с увеличением $d_{\text{ср}}$, и менее - с увеличением концентрации.

Л. С. Животовский (2.12.) [58], в своей работе по установлению зависимости между напором землесоса на воде и гидросмеси основывается на том, что касательные скорости при выходе из рабочего колеса твердых частиц и жидкости, составляющих гидросмесь не одинаковы. По его мнению, принятое им допущение дает возможность теоретическим путем построить характеристики землесосов на гидросмеси, исходя из характеристик, составленных на воде. В результате чего можно избавиться от опытного определения таких характеристик. [51]. При изменении величины S от 25% до 35%, значения H увеличиваются от 65 до 94%. В сравнении с другими авторами, это самое высокое увеличение напора, полученное в расчетах. Также, при переводе полученных результатов в метры столба гидросмеси, напор грунтонасоса, работающего на гидросмеси, превышает напор по воде, полученный при заводских испытаниях.

По результатам расчетов по уравнению, предложенному Животовским Л. С. вне зависимости от гранулометрического состава напор не изменяется, т.е. он одинаков как для средневзвешенного диаметра 0,3 мм, так и для 1,0 мм, вероятно это связано с тем, что диаметр частиц достаточно мал и не значительно влияет на изменение напора. Который изменяется в достаточно больших пределах в зависимости от выбранного грунтонасоса (до 70%). Также, при расчетах

грунтонасоса ГрТ-1600/25 напор грунтонасоса, работающего на гидросмеси (выраженный в м. ст. гидросмеси), превышает напор грунтонасоса, работающего на воде, что по вышеописанным доводам не может считаться логичным. На некоторых грунтовых насосах, напор на гидросмеси получается ниже, чем работающего на однородной жидкости, той же плотности, что и гидросмесь. В уравнении учитывается не фракционный состав твердого, а средневзвешенный диаметр [39].

По уравнению ВНИИ Гидромаш (2.17.), напор грунтонасоса работающего на гидросмеси зависит от производительности, на которой работает грунтонасос и изменяется по квадратичной зависимости. В отличие от других уравнений, главный фактор, влияющий на изменение напора грунтонасоса – это не концентрация твердого в гидросмеси, а фракционный состав. При том, вводятся коэффициенты снижения напора для каждой конкретной фракции. Также на расходно-напорную характеристику влияют размер рабочего колеса и количество оборотов двигателя.

По методике Харина А. И. (2.13.) на напор влияют следующие параметры: плотности компонентов, фракционный состав твердого, концентрация, гидравлическая крупность, размер рабочего колеса и количество оборотов двигателя. При увеличении средневзвешенного диаметра частиц, напор снижается незначительно, на 1-2%; концентрация гидросмеси также не дает больших отклонений. Однако, в зависимости от выбранного типа грунтонасоса, напор может снижаться значительно.

По уравнению Юфина А. П. (2.24.), напор грунтонасоса, выраженный в метрах столба гидросмеси равен напору грунтонасоса, работающего на воде. Несмотря на то, что используется достаточно большое количество переменных (производительность грунтонасоса, на которой он работает в данный момент, средневзвешенный диаметр, диаметр рабочего колеса грунтонасоса), расчетные результаты получаются практически равными при любых условиях.

Процентная разница между результатами расчетов относительно паспортной характеристики работы грунтонасоса на воде показана на рис. 2.2.

Анализируя уравнения пересчета расходно-напорных характеристик грунтонасосов различных авторов (*табл. 2.4.*) и сравнительные результаты, полученные в результате их расчета, можно сделать вывод о неоднозначности результатов расчета по этим уравнениям, как в количественных расхождениях (погрешность до 94%), так и в принципиальном подходе к предложенным методам расчета в расчетных зависимостях $Q=f(H)$, развиваемый напор многими авторами (Холин Н. Д., Чернов А. И., Смолдырев А. Е., Шкундин Б. М., Покровская В. Н., Романенко Б. Е., Животовский Л. С., Спиваковский О. А., Карасик, Нурок Г. А., Харин А. И.) предлагается измерять в метрах водяного столба, а некоторые (Фридман Б. Э., Буржес Дж., Борщевский Ю. Т., ВНИИ Гидромаш, Юфин А. П.) в м. ст. гидросмеси, что неоднозначно влияет на конечные результаты. Кроме того, большинство авторов не приводят обоснование предлагаемых методик расчетов и условий их применения. Поэтому актуальностью является апробация этих расчетных данных в производственных условиях с целью выбора оптимальных методов в конкретных условиях.

2.3. Установление расходно-напорных характеристик землесоса ЗГМ-2М и грунтонасоса ГрТ-1600/25 при тестировании в производственных условиях

2.3.1. Проведение тестирования грунтонасоса ГрТ-1600/25 и землесоса ЗГМ-2М при разработке россыпного месторождения

Опытно-промышленные исследования проводились на одном из полигонов прииска «Экспериментальный» (Магаданская обл.) при разработке террасовой россыпи на р. Куранах, на котором вскрыша была проведена в зимнее время с рыхлением мерзлых торфов БВР, погрузкой взорванной породы экскаватором ЭКГ-4,6 в самосвалы БелАЗ-540 и вывоз ее во внешние отвалы (*рис. 2.3*).

Для разработки горной массы в летнее время применялись бульдозеры и экскаватор ЭКГ-4,6. Доставка песков к гидровашгерду землесоса осуществлялась по различным технологическим схемам. Первоначально, на площадях

непосредственно примыкающих к бункеру землесоса пески подавались бульдозерами различных марок (Д-494, Д-572, Д-9Н); расстояния при этом изменялись от 40 до 80 м. Затем горная масса от экскаватора ЭКГ-4,6 транспортировалась самосвалам «БелАЗ-540» к зумпфу землесоса и подавалась на решетку гидровашгерда бульдозерами. Применялся также вариант непосредственной подачи песков самосвалом на грохот гидровашгерда.

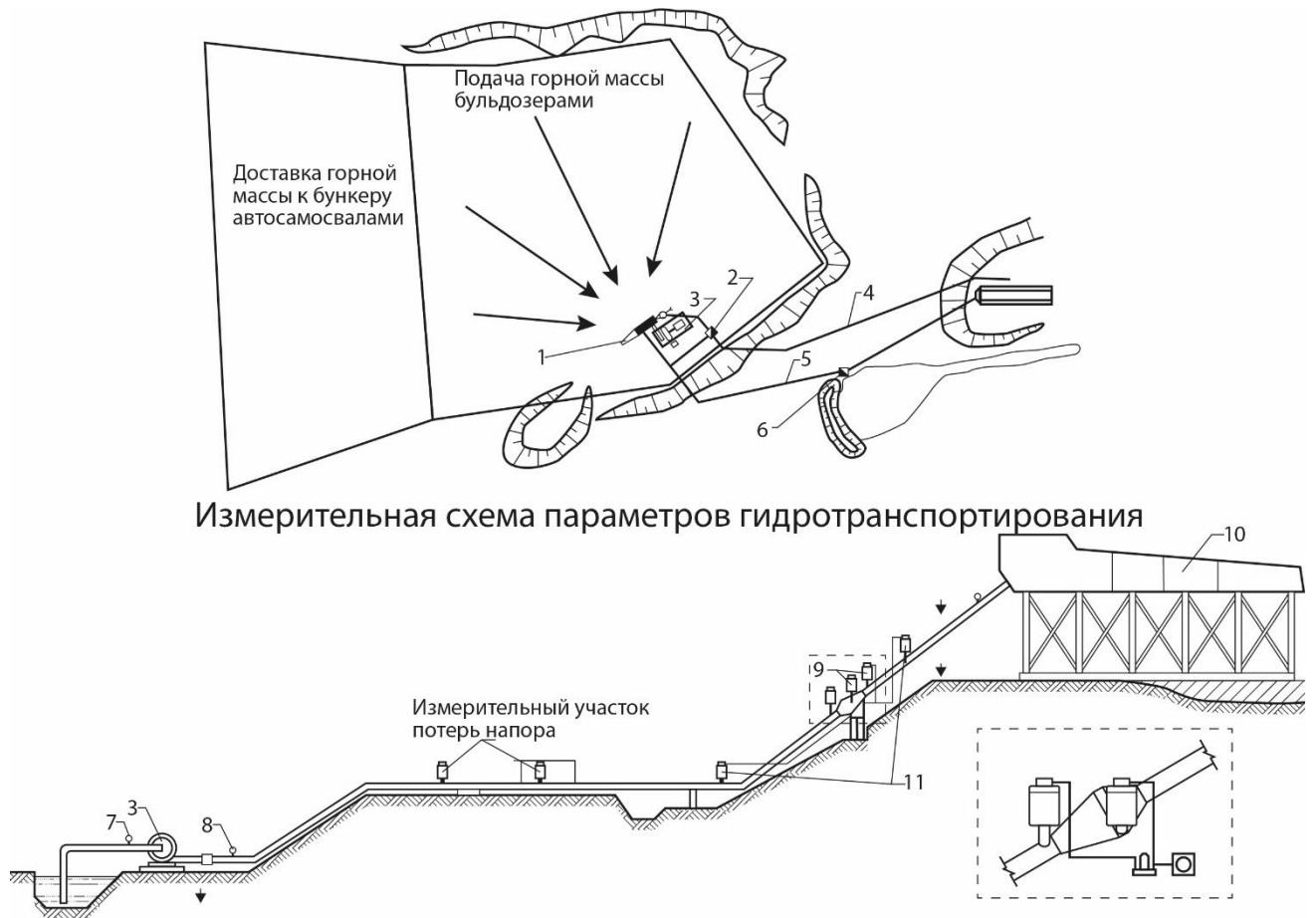


Рис. 2.3. Технологическая схема отработки полигона №124. 1 – гидровашгерд, 2 – насос 12 НДС, 3 – землесос ЗГМ-2М, 4 – пульповод $\varnothing 425$ мм, $L=125$ м, 5 – водовод $\varnothing 530$ мм, $L=130$ м, 6 – насос 16 НДС, 7 – вакуумметр, 8 – манометр, 9 – расходомер, 10 – промприбор, 11 – плотномер.

Размыв горной массы на грохоте и удаление надрешетного материала по наклонному лотку гидровашгерда в галечный отвал осуществлялся струей гидромонитора ГМН-250С. Уборка галечного отвала производилась бульдозером. Гидросмесь транспортировалась на обогатительную установку землесосом ЗГМ-

2М по пульповоду диаметром 426 мм на расстояние $L_{\text{тр}}=125$ м, высота подъема $H=5,5$ м.

Вода к землесосу подавалась насосом 16-НДН по трубопроводу диаметром 530 мм. При этом часть воды подавалась на гидромонитор, а остальная поступала непосредственно в зумпф. С целью создания у насадки гидромонитора давления, необходимого для размыва песков и выгонки валунов использовался дополнительный насос 12НДС.

Методическое сопровождение производственных исследования обеспечивалось контрольно-измерительной аппаратурой (расходомера, плотномера), работа которых основана на принципе переменного перепада давления [64, 66]. Испытания оперативной системы контроля режима и параметров работы землесосной установки ЗГМ-2М подтвердили ее надежность и достаточную точность показаний по учету объема переработанной горной массы, не выходящую за пределы маркшейдерского замера.

Гидродинамический расходомер гидросмеси (рис. 2.4) состоял из расширяющегося устройства (труба Антивентури), двух отборников давления с эластичными разделителями, системы импульсных трубок, мембранного дифманометра ДМ модели 23573, вторичного прибора – самописца, а также системы электросвязи дифманометра со вторичным прибором.

Принцип действия расходомера основан на зависимости расхода гидросмеси от перепада давления, образующегося в результате преобразования части кинетической энергии потока, протекающего по трубопроводу и расширяющему устройству в потенциальную.

Измерения расхода гидросмеси осуществляется по следующей схеме. При движении гидросмеси через трубу Антивентури в расширенной части расходомера создается избыточное давление по сравнению с напором в сечении пульповода с износостойкой вставкой. Избыточное давление из расширяющегося устройства передается через отборники давления с эластичными разделителями и систему импульсных трубок в рабочие камеры дифманометра. В последнем, полученная разность давления с помощью дифтрансформаторной системы преобразуется в

унифицированный электрический сигнал, который по кабелю передается на вторичный прибор – самописец КСД-2.

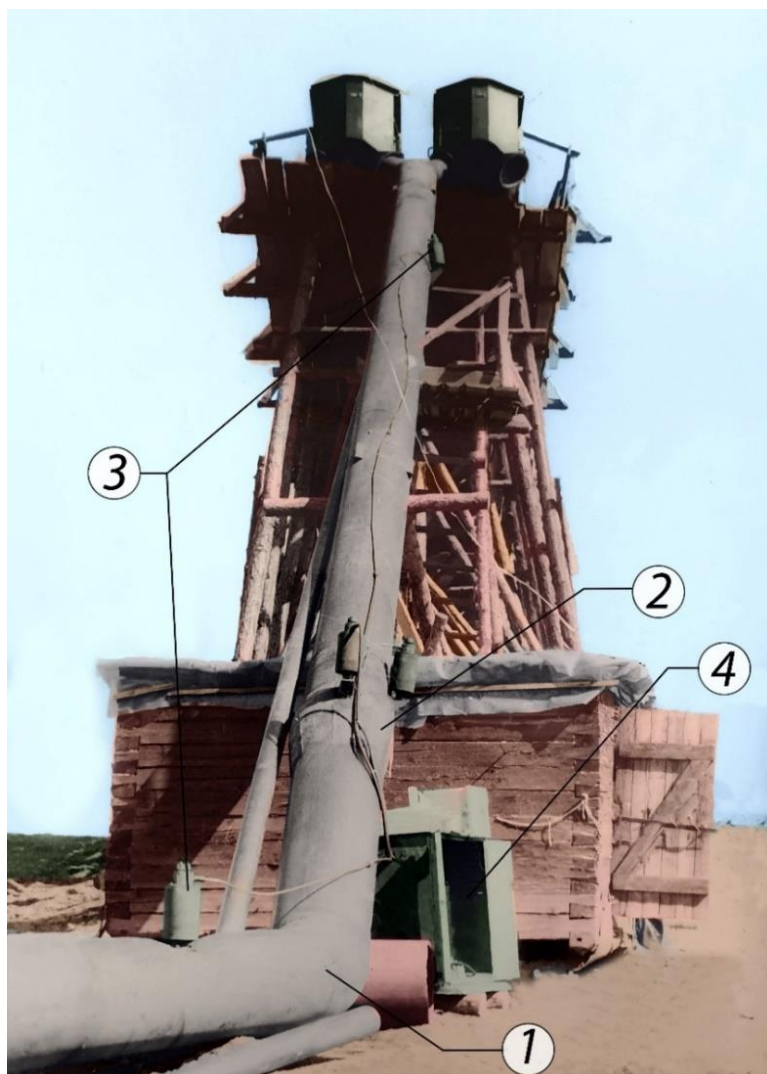


Рис. 2.4. Измерительный участок расхода и плотности гидросмеси при ее подаче на промывочный прибор ПГШ-II-75. 1 – пульповод; 2 – расходомер с расширяющим устройством типа Антивентури; 3 – отборники давления для измерения плотности гидросмеси; 4 – шкаф для дифманометра ДМ-23537.

Принцип действия гидростатического плотномера основан на измерении дифманометром перепада давления, вызванного весом столба гидросмеси, движущейся по наклонному трубопроводу. Он включал в себя шаровый датчик давления конструкции К. В. Диминского [88], двух отборников давления, системы импульсных трубок, дифманометра, вторичного прибора – самописца и устанавливался на подъеме пульповода к промывочному прибору.

Аналогичный контрольно-измерительный комплекс использовался при тестировании грунтового насоса ГрТ-1600/25 при его эксплуатации на полигоне 44. Технологическая схема разработки полигона была следующей. Пески разрабатывались бульдозерами и подавались на гидровашгерд гидроэлеваторной установки ГЭП, где осуществлялся процесс пульпоприготовления напорной струей

гидромонитора ГМН-250С. Затем ГЭПом гидросмесь по трубопроводу $D_y=400$ мм и длиной $L = 91$ м подавалась во всас 12ГРУЛ-12 (ГрТ-1600/25). Разница геодезических отметок при этом составила 9,5 м. Далее гидросмесь транспортировалась грунтовым насосом к обоганительному оборудованию на высоту равную 14 м.

Пульповод грунтового насоса был смонтирован из труб диаметром 426 мм; $L=110$ м; и труб диаметром 375 мм; $L=45$ м. общая высота подачи песков составила 23,5 м, а длина транспортирования $L_{mp}=135$ м.

2.3.2. Анализ результатов тестирования грунтонасосных агрегатов

Сопоставление расчетных значений по различным уравнениям для грунтонасосов ГрТ-1600/25 и ЗГМ-2М, представленных в табл. 2.5 и на рис. 2.5 и 2.6 с результатами тестирования при опытных исследованиях, показывает, что имеются значительные отклонения величин $H=f(Q)$ от экспериментальных – до 2-х раз. Таким образом, можно предположить, что большинство методик не имеют достаточного аналитического обоснования или экспериментального подтверждения, поскольку результаты расчетных уравнений не соответствуют данным тестирования.

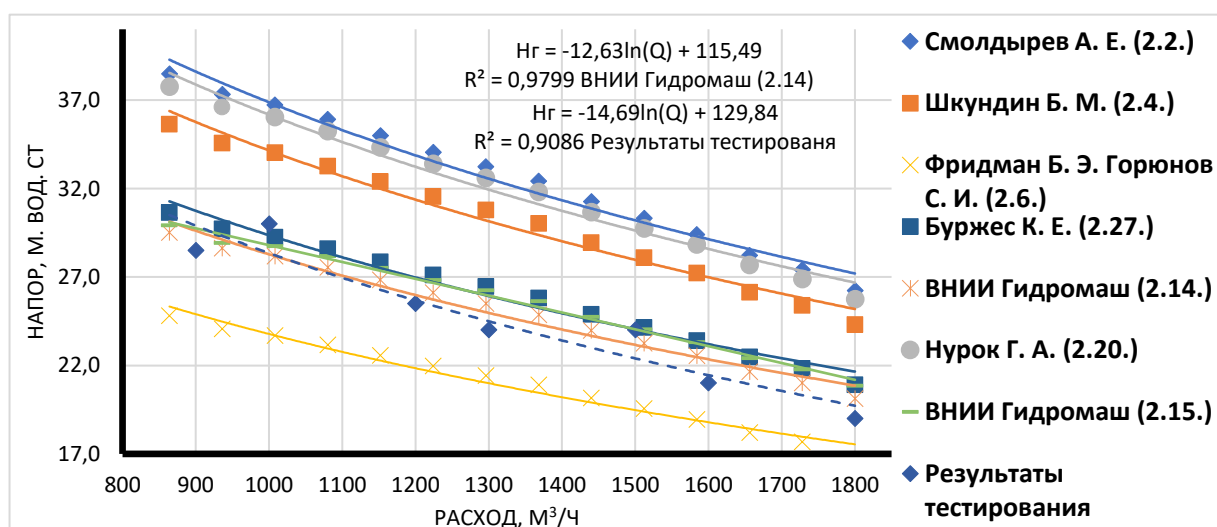


Рис. 2.5. Сравнение расчетных и тестируемых расходно-напорных характеристик землесоса ГрТ-1600/25 при средневзвешенном диаметре 1,0 мм и $S=20\%$

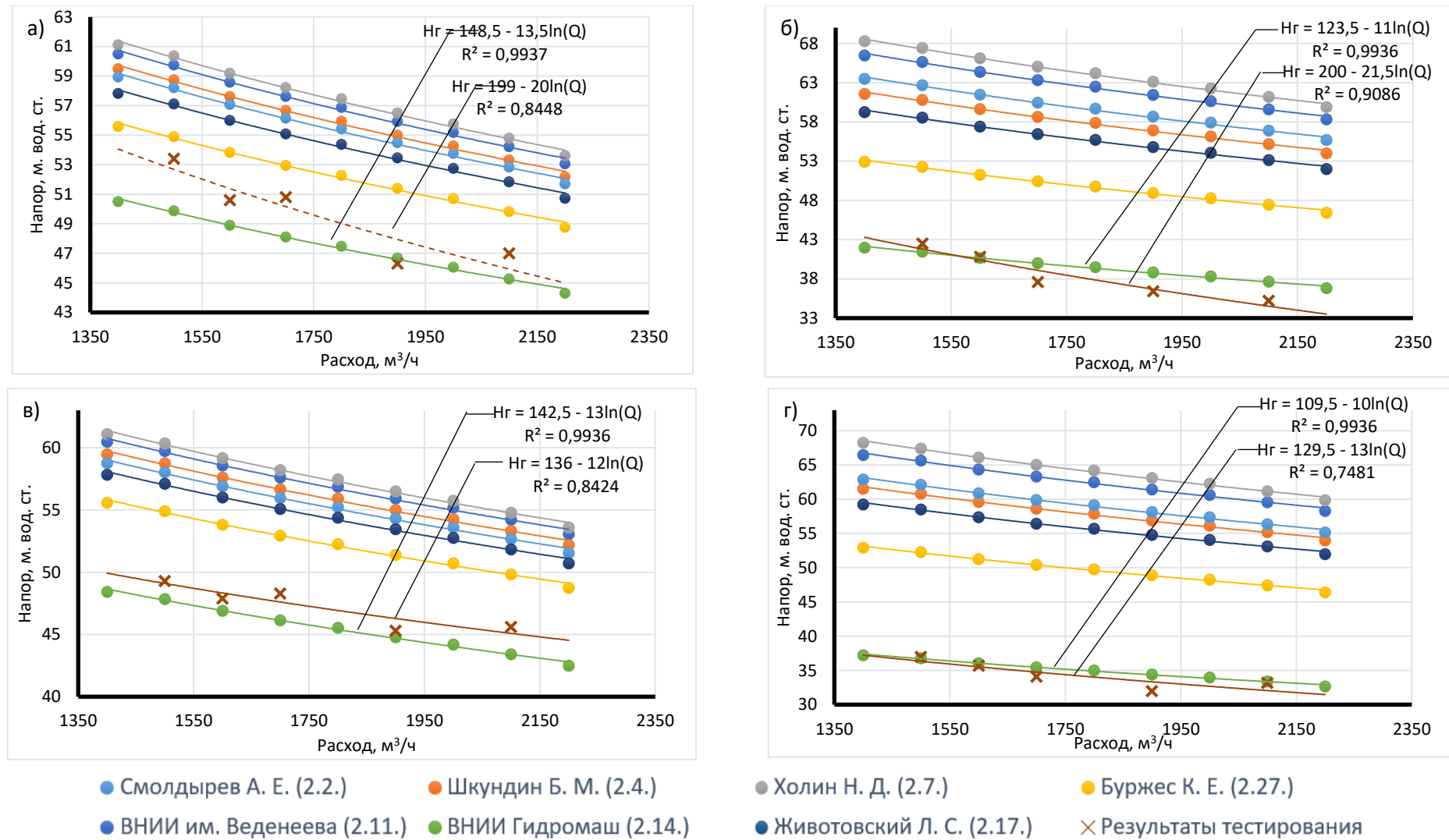


Рис. 2.6. Сравнение расчетных и тестируемых расходно-напорных характеристик землесоса 3ГМ-2М при средневзвешенном диаметре 9,3 мм и 24 мм. 1) – $S=7,3\%$, $d=3,9$ мм; 2) $S=20\%$, $d=9,3$ мм; 3) $S=7,3\%$, $d=24$ мм; 4) $S=20\%$, $d=24$ мм.

Таблица 2.5.

Результаты расчетов и тестирования землесоса ЗГМ-2М при средневзвешенном диаметре 9,3 и 24,0 мм и ГрТ-1600/25 с

$$d_{cp} = 1,0 \text{ мм}$$

Автор, № уравнения	ЗГМ-2М												ГрТ-1600/25		
	Разница между тестированием (%) и результатами расчетов при: расходах Q (м ³ /ч), S , $d_{cp}=9,3$ мм						Разница между тестированием (%) и результатами расчетов при: расходах Q (м ³ /ч), S , $d_{cp}=24,0$ мм						Разница между тестированием (%) и результатами расчетов при: расходах Q (м ³ /ч), S , $d_{cp}=1,0$ мм		
	$S=10\%$			$S=20\%$			$S=10\%$			$S=20\%$			$S=20\%$		
	1500	1900	2100	1500	1900	2100	1500	1900	2100	1500	1900	2100	1000	1500	1800
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Смолдырев А. Е. (2.2.)	<u>59,7</u> 13%	<u>55,9</u> 16%	<u>54,2</u> 18%	<u>65,6</u> 53%	<u>61,4</u> 63%	<u>59,6</u> 68%	<u>59,7</u> 22%	<u>55,9</u> 21%	<u>54,2</u> 20%	<u>65,6</u> 91%	<u>61,4</u> 96%	<u>59,6</u> 98%	<u>36,8</u> 30%	<u>30,3</u> 44%	<u>26,5</u> 49%
Шкундин Б. М. (2.4.)	<u>58,8</u> 11%	<u>55,0</u> 15%	<u>53,3</u> 16%	<u>60,8</u> 42%	<u>56,9</u> 51%	<u>55,2</u> 55%	<u>58,8</u> 20%	<u>55,0</u> 19%	<u>53,3</u> 18%	<u>60,8</u> 77%	<u>56,9</u> 81%	<u>55,2</u> 84%	<u>34,1</u> 20%	<u>28,1</u> 34%	<u>24,5</u> 38%
Чернов А. И. (2.5.)	<u>58,0</u> 10%	<u>54,3</u> 13%	<u>52,7</u> 14%	<u>68,9</u> 61%	<u>64,5</u> 71%	<u>62,5</u> 76%	<u>58,0</u> 18%	<u>54,3</u> 17%	<u>52,7</u> 17%	<u>68,9</u> 100%	<u>64,5</u> 106%	<u>62,5</u> 108%	<u>38,7</u> 36%	<u>31,8</u> 51%	<u>27,8</u> 57%
Фридман Б. Э. Горюнов С. И. (2.6.)	<u>50,2</u> 5%	<u>47,0</u> 2%	<u>45,6</u> 1%	<u>42,3</u> 1%	<u>39,6</u> 5%	<u>38,4</u> 8%	<u>50,2</u> 2%	<u>47,0</u> 2%	<u>45,6</u> 1%	<u>42,3</u> 23%	<u>39,6</u> 26%	<u>38,4</u> 28%	<u>23,8</u> 16%	<u>19,5</u> 7%	<u>17,1</u> 4%
Холин Н. Д. (2.7.)	<u>60,4</u> 14%	<u>56,5</u> 18%	<u>54,8</u> 19%	<u>67,4</u> 58%	<u>63,1</u> 67%	<u>61,2</u> 72%	<u>60,4</u> 23%	<u>56,5</u> 22%	<u>54,8</u> 22%	<u>67,4</u> 96%	<u>63,1</u> 101%	<u>61,2</u> 104%	<u>37,8</u> 33%	<u>31,1</u> 48%	<u>27,2</u> 53%
Покровская В. Н. (2.8.)	<u>61,9</u> 17%	<u>57,9</u> 21%	<u>56,2</u> 22%	<u>69,5</u> 62%	<u>65,0</u> 73%	<u>63,0</u> 77%	<u>61,9</u> 26%	<u>57,9</u> 25%	<u>56,2</u> 25%	<u>69,5</u> 102%	<u>65,0</u> 107%	<u>63,0</u> 110%	<u>39,0</u> 37%	<u>32,1</u> 53%	<u>28,0</u> 58%

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Карасик А. О. (2.20.)	<u>59,7</u> 13%	<u>55,9</u> 16%	<u>54,2</u> 18%	<u>65,6</u> 53%	<u>61,4</u> 63%	<u>59,5</u> 68%	<u>59,7</u> 22%	<u>55,9</u> 21%	<u>54,2</u> - 20%	<u>65,6</u> 91%	<u>61,4</u> 96%	<u>59,5</u> 98%	<u>36,8</u> 30%	<u>30,3</u> 44%	<u>26,4</u> 49%
Борщевский Ю. Т. (2.22.)	<u>49,7</u> 6%	<u>36,7</u> 24%	<u>27,9</u> 39%	<u>26,2</u> 39%	-	-	<u>49,7</u> 1%	<u>36,7</u> 21%	<u>27,9</u> 38%	<u>26,2</u> 24%	-	-	<u>25,1</u> 11%	-	-
Буржес К. Е. (2.27.)	<u>54,9</u> 4%	<u>51,4</u> 7%	<u>49,8</u> 8%	<u>52,3</u> 22%	<u>48,9</u> 30%	<u>47,4</u> 34%	<u>54,9</u> 12%	<u>51,4</u> 11%	<u>49,8</u> 11%	<u>52,3</u> 52%	<u>48,9</u> 56%	<u>47,4</u> 58%	<u>29,3</u> 3%	<u>24,1</u> 15%	<u>21,1</u> 19%
Спиваковский А. О. (2.22.)	<u>60,7</u> 15%	<u>56,9</u> 18%	<u>55,1</u> 20%	<u>71,2</u> 66%	<u>66,6</u> 77%	<u>64,6</u> 82%	<u>60,7</u> 24%	<u>56,9</u> 23%	<u>55,1</u> 22%	<u>71,2</u> 107%	<u>66,6</u> 113%	<u>64,6</u> 115%	<u>40,0</u> 41%	<u>32,9</u> 56%	<u>28,7</u> 62%
ВНИИ им. Веденеева (2.11.)	<u>58,2</u> 10%	<u>54,5</u> 13%	<u>52,8</u> 15%	<u>62,7</u> 47%	<u>58,7</u> 56%	<u>56,9</u> 60%	<u>58,0</u> 18%	<u>54,3</u> 17%	<u>52,7</u> 17%	<u>62,1</u> 80%	<u>58,1</u> 85%	<u>56,4</u> 88%	<u>37,3</u> 31%	<u>30,7</u> 46%	<u>26,8</u> 51%
ВНИИ Гидромаш (2.14.)	<u>49,8</u> 6%	<u>46,7</u> 3%	<u>45,3</u> 2%	<u>41,5</u> 3%	<u>38,8</u> 3%	<u>37,6</u> 6%	<u>47,8</u> 3%	<u>44,8</u> 3%	<u>43,4</u> 4%	<u>36,8</u> 7%	<u>34,4</u> 10%	<u>33,4</u> 11%	<u>28,3</u> 0%	<u>23,2</u> 11%	<u>20,3</u> 15%
Нурок Г. А. (2.20.)	<u>53,0</u> 0%	<u>49,6</u> -3%	<u>48,1</u> -5%	<u>47,9</u> 12%	<u>44,9</u> 19%	<u>43,5</u> 22%	-	-	-	-	-	-	<u>36,1</u> 27%	<u>29,7</u> 42%	<u>26,0</u> 47%
Животовский Л. С. (2.17.)	<u>57,1</u> 8%	<u>53,5</u> 11%	<u>51,8</u> 13%	<u>58,5</u> 37%	<u>54,8</u> 45%	<u>53,1</u> 49%	<u>57,1</u> 16%	<u>53,5</u> 16%	<u>51,8</u> 15%	<u>58,5</u> 70%	<u>54,8</u> 75%	<u>53,1</u> 77%	<u>37,7</u> 33%	<u>31,0</u> 48%	<u>27,1</u> 53%
Харин А. И. (2.13.)	<u>58,2</u> 10%	<u>54,5</u> 14%	<u>52,8</u> 15%	<u>61,5</u> 44%	<u>57,6</u> 53%	<u>55,9</u> 57%	<u>58,0</u> 18%	<u>54,3</u> 17%	<u>52,7</u> 17%	<u>61,0</u> 77%	<u>57,1</u> 82%	<u>55,4</u> 84%	<u>35,8</u> 26%	<u>29,4</u> 40%	<u>25,7</u> 45%
ВНИИ Гидромаш (2.15.)	<u>51,0</u> 3%	<u>48,1</u> 0%	<u>46,7</u> 1%	<u>44,1</u> 3%	<u>42,0</u> 12%	<u>40,9</u> 15%	<u>48,8</u> 1%	<u>46,2</u> 0%	<u>44,8</u> 1%	<u>39,1</u> 13%	<u>37,7</u> 20%	<u>36,7</u> 22%	<u>28,7</u> 1%	<u>24,0</u> 14%	<u>20,8</u> 18%

Как видно из приведенных таблицы и графиков, наиболее близкие результаты показывает уравнение, предложенное ВНИИ Гидромаш (2.15.), однако разница достигает 12%.

Таким образом, проведенный сравнительный анализ различных эмпирических зависимостей с результатами тестирования дают основание считать его базовым для определения расходно-напорной характеристики.

Однако, для более корректного вычисления величин H_z нами вводится в это уравнение поправочные коэффициенты K_k , установленные в результате аппроксимации расчетной и тестируемой функциональной зависимостей $H=f(Q)$ [39]:

$$\text{ЗГМ-2М, } d_{cp}=9,3 \text{ мм и } S=10\% \quad - K_{nonp}=(6,5 \cdot \ln(Q)-50,8);$$

$$\text{ЗГМ-2М, } d_{cp}=9,3 \text{ мм и } S=20\% \quad - K_{nonp}=(10,4 \cdot \ln(Q)-76,6);$$

$$\text{ЗГМ-2М, } d_{cp}=24,0 \text{ мм и } S=10\% \quad - K_{nonp}=(1,0 \cdot \ln(Q)-6,1);$$

$$\text{ЗГМ-2М, } d_{cp}=9,3 \text{ мм и } S=10\% \quad - K_{nonp}=(2,8 \cdot \ln(Q)-20);$$

$$\text{ГрТ-1600/25, } d_{cp}=1,0 \text{ мм и } S=20\% \quad - K_{nonp}=(2 \cdot \ln(Q)-14,4).$$

В итоге расходно-напорную характеристику можно определять по уравнению:

$$H_{\Gamma} = H_0 \cdot \left[1 - \sum K_H^i \cdot \frac{\rho_{\Gamma}^i - \rho_0}{\rho_{\Gamma}} \right] - K_{попр} \quad (2.28.)$$

Сравнительные результаты расчетов по предложенным аппроксимирующим уравнениям и тестирования представлены в табл. 2.6.

Таблица 2.6.

Сравнение результатов расчетов по предлагаемым уравнениям и данным, полученным при тестировании землесоса ЗГМ-2М и ГрТ-1600/25.

Расход, м ³ /ч	Напор, м. вод. ст.		Разница, %
	Тестирование	Расчет	
1	2	3	4
<i>ЗГМ-2М, $d_{cp}=9,3$ мм и $S=7,3\%$</i>			
1500	53,4	52,8	1,1
1600	50,6	51,4	1,7
1	2	3	4

1	2	3	4
1700	50,8	50,2	1,1
1900	46,3	48,1	3,9
2100	47,0	46,0	2,0
<i>ЗГМ-2М, $d_{cp}=9,3$ мм и $S=20\%$</i>			
1500	42,5	41,2	3,1
1600	40,8	39,7	2,7
1700	37,6	38,4	2,1
1900	36,4	36,0	1,0
2100	35,2	33,8	4,0
<i>ЗГМ-2М, $d_{cp}=24,0$ мм и $S=7,3\%$</i>			
1500	49,3	48,7	1,3
1600	47,9	47,8	0,2
1700	48,3	47,1	2,5
1900	45,3	45,8	1,2
2100	45,6	44,6	2,3
<i>ЗГМ-2М, $d_{cp}=24,0$ мм и $S=20\%$</i>			
1500	37,0	35,7	3,5
1600	35,7	35,2	1,4
1700	34,1	34,8	2,0
1900	32,0	34,1	6,5
2100	33,2	33,3	0,4
<i>ГрТ-1600/25, $d_{cp}=1,0$ мм и $S=20\%$</i>			
900	28,5	29,1	2,0
1000	30,0	27,9	2,1
1200	25,5	25,6	0,3
1300	24,0	24,6	2,3
1500	23,0	22,0	4,5
1600	21,0	21,1	0,5
1800	19,0	18,4	3,2

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

2.4. Гидротранспортные установки, работающие с подпором жидкости

Известно, что на оптимальный режим работы грунтонасосной установки значительно влияет вакуумметрическая высота всасывания, характеризующая максимальное разрежение у входа в грунтонасос, т. е. высоту всасывания с учетом потерь напора, определяющая его эксплуатацию с повышенной объемной концентрацией смеси, которая определяется по уравнению [24]:

$$H_B = H_{BC} + h_{BC} = \frac{P_A}{\rho \cdot g} - \frac{P_{BX}}{\rho \cdot g} - \frac{v_{BX}^2}{2g} \quad (2.29.)$$

где:

H_{BC} – геометрическая высота всасывания, м. вод. ст.;

h_{BC} – гидравлические потери во всасывающей линии, м. вод. ст.;

P_A – атмосферное давление, Па;

P_{BX} – абсолютное давление на входе в насос, Па;

v_{BX} – скорость на входе в насос, м/с;

ρ – плотность жидкости, кг/м³.

Поэтому в зависимости от расположения всасывающего патрубка установки H_{BC} может иметь как положительное, так и отрицательное значение ($H_B = h_{BC} - H_{BC}$). Последнее имеет место при работе грунтонасоса с подпором, что способствует режиму их работы с повышенной объемной концентрацией. Поэтому при расположении грунтонасоса ниже уровня гидросмеси, его работа осуществляется под действием напора столба жидкости. Такой способ имеет определенные преимущества: агрегат всегда находится под самозаливом и процесс всасывания не ограничивает возможности гидротранспортирования.

Конструктивная реализация такого режима с подпором гидросмеси нашла применение в пульпоприготовительных установках (ППУ), в которых создаются более благоприятные условия для обеспечения минимальных расходов жидкости на пульпоприготовление и гидротранспортирование. Так, при промышленных испытаниях передвижной ППУ на Иршинском ГОКе,

объемная концентрация гидросмеси, подаваемой на обогатительную фабрику на расстояние ~1 км составляла 50-58%.

Для повышения пропускной способности узла пульпоприготовления грунтонасосной установки при негабаритных включениях (крупностью, превышающей проходное сечение землесоса), рациональным средством их дезинтеграции является применение роторных дробилок, устанавливаемых на всасывающей линии грунтонасоса.

Они успешно применялись в течение нескольких лет на землесосных установках 20Р-11 Южно-Лебединского карьера КМА, что существенно повысило часовую производительность агрегата [101].

Другим техническим средством для загрузки горной массы в гидротранспортную систему с возможностью регулирования процесса пульпоприготовления и гидротранспортирования можно считать использование безвакуумного струйного гидротранспортного устройства непрерывного действия типа ГУБС, которое применялось на некоторых предприятиях по добыче и переработке нерудных материалов [47].

Перспективным техническим средством для намыва штабеля кучного выщелачивания является гидротранспортирование высоконасыщенных гидросмесей (до 55% по объему) загрузочными аппаратами (питателями), использующими кинетическую энергию коаксиально закрученных потоков жидкости (эффекта искусственного смерча), ускоряющие массообмен в камере (емкости) аппарата.

2.4.1. Пульпоприготовительные установки

Для создания более благоприятных условий работы гидротранспорта, используются пульпоприготовительные установки, которые обеспечивают минимальные расходы воды на пульпообразование. Различными организациями было спроектировано свыше 50 бункерных смесительно-

транспортных установок. Из них около 35 конструкций были опробованы в производственных условиях.

Передвижные установки создавались с целью добиться такой же организации работ, как и при обычной экскаваторной разработке, когда сухопутные транспортные средства передвигаются непосредственно за добычной машиной.

В отдельных случаях применялись полустационарные и стационарные гидротранспортные установки с доставкой пород до смесительного узла средствами колесного транспорта. Это позволяло создать большую аккумулирующую емкость бункера и максимально использовать гидротранспортный агрегат.

Существенным недостатком большинства опробованных передвижных установок являлось отсутствие механизма для обеспечения интенсивной переработки плотных пород и равномерности пульпообразования. Так, например, в ППУ конструкции Иргиридмета для уборки материала крупнее 150 мм применялся ленточный отвалообразователь СПЗ-800. Однако, использование его на практике оказалось нецелесообразным.

Решением этих проблем было применение роторной дробилки, принципиальное устройство которой было предложено проф. Н. Д. Холиным. Результаты испытаний пульпоприготовительных установок с применением роторных дробилок показали целесообразность дополнительного механического измельчения глинистых пород роторной дробилкой, работающей в сочетании с напорной струей воды.

Также была создана пульпоприготовительная установка конструкции ВНИИЖелезобетона, которая проходила промышленные испытания в условиях Лемненского месторождения (*рис. 2.7*).

В этом направлении необходимо отметить роторную дробилку конструкции НИИКМА, которая успешно применялась на карьерах КМА. Она устанавливалась во всасывающем пульповоде землесоса с целью уменьшения попадания в рабочее колеса землесоса негабаритных включений.

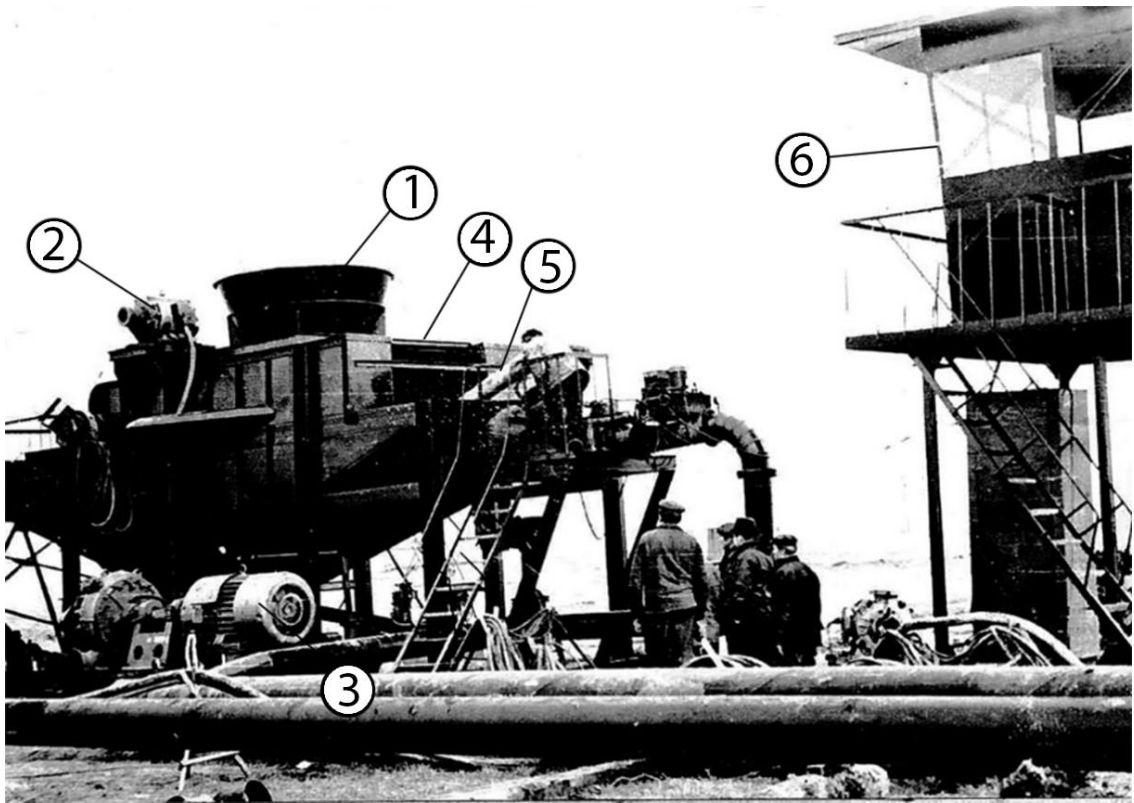


Рис. 2.7. Монтаж пульпоприготовительной установки конструкции ВНИИЖелезобетона (ИГОК). 1 – загрузочный бункер; 2 – двигатель роторной дробилки; 3 – грунтонасос; 4 – решетка для грохота; 5 – гидромонитор с дистанционным управлением; 6 – кабина управления.

Кроме того, имеется положительный опыт применения при разработке нерудных строительных материалов земснарядами, щековой дробилки конструкции ВНИИНЕРУДА типа ДУЗ-2. Она устанавливалась на земснаряде во всасывающем пульпопроводе.

Другим направлением для улучшения дезинтеграции глинистых пород при подготовке их к гидротранспортированию была разработка и изготовления бутары-мельницы, конструкции НИИКМА им. Л. Д. Шевякова. Кроме того, здесь же было предложено центробежное загрузочное устройство (ЦЗУ), которое было испытано для гидротранспорта пород от экскаваторов. Принципиальная схема центробежно загрузочного устройства представлена на рис. 2.8.

Опытно-промышленные испытания ЦЗУ с загрузкой породы в бутару экскаваторами ЭШ-4/40 и ЭКГ-4 проводились на Лебединском карьере КМА.

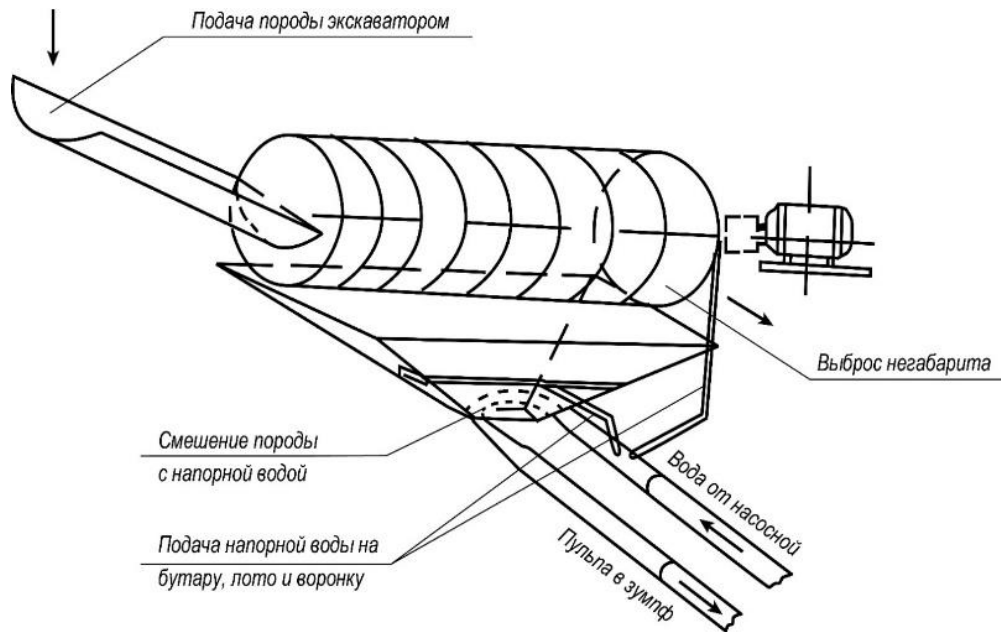


Рис. 2.8. Принципиальная схема центробежного загрузочного устройства

Анализируя работу выше приведенных установок необходимо отметить, что ввиду ограниченной приемной способности размывочного бункера производительная работа смесительно-транспортной установки находилась в жесткой зависимости от поступления породы, доставляемой из забоя. Эти трудности проявлялись в значительных простоях установки, связанные с отсутствием породы из-за неисправности экскаваторов.

2.4.2. Дробилка, установленная во всасе землесоса

Для повышения пропускной способности узла пульпоприготовления землесосной установки при негабаритных включениях перспективным является их дробление. Рациональным средством дробления негабаритных включений (крупностью превышающей проходное сечение землесоса) является применение роторных дробилок, устанавливаемых на всасывающей линии землесоса (рис. 2.9) [101].

Роторные дробилки для напорного гидротранспорта конструкции НИИКМА успешно применялись в течение нескольких лет на землесосных установках 20Р-11 Южно-Лебединского карьера КМА. Они позволили

существенно повысить производительность землесоса, показали себя надежными в эксплуатации.

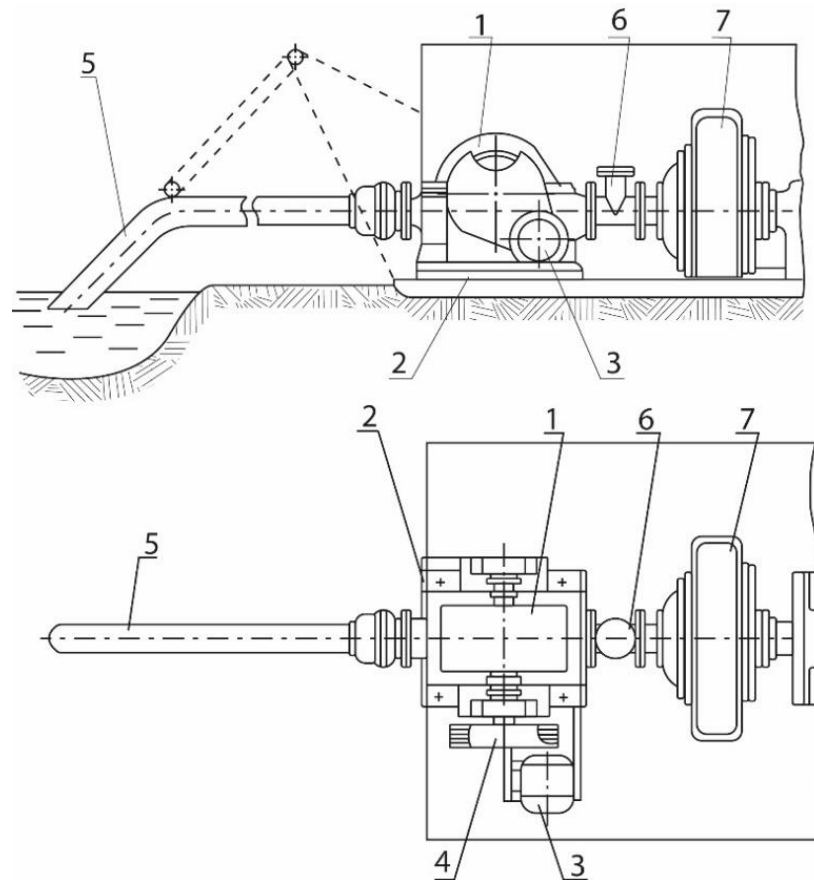


Рис. 2.9. Схема установки роторной дробилки во всасывающей линии землесоса. 1 – дробилка; 2 – рама; 3 – электродвигатель; 4 – клиноременная передача; 5 – всас; 6 – люк ревизии землесоса; 7 – землесос

Сотрудниками МГРИ были разработаны рабочие чертежи роторной дробилки ДРГ-400 для землесоса ЗГМ-2М (рис. 2.9) применительно к условиям разработки россыпей Северо-Востока [96, 66].

Конструкция дробилки исключает нарушение режимы работы землесоса, обеспечивает требуемый расход пульпы через дробилки, повышает ее КПД и увеличивает производительность комплекса в целом.

Дробилка ДРГ-400 имела следующие характеристики:

Производительность (для землесоса ЗГМ-2М):

- по гидросмеси, $\text{м}^3/\text{ч}$ – 2000
- по негабаритам, $\text{м}^3/\text{ч}$ – 45

2. Максимальный размер куска: на входе, мм 400; на выходе, мм 130; степень дробления – 3; крепость дробимого материала (по Протодяконову) – до 20

5. Подпор, создаваемый дробилкой, м. вод. ст. 1,0-1,2

6. Мощность электродвигателя, кВт 50

7. Масса дробилки без привода, кг 3800

2.4.3. Безвакуумное струйное гидротранспортное устройство непрерывного действия

Использование безвакуумного струйного гидротранспортного устройства непрерывного действия типа ГУБС [47], которое применялось на некоторых предприятиях по добыче и переработке нерудных материалов, дает возможность регулировать процесс пульпоприготовления и загрузки горной массы в гидротранспортную систему.

В отличие от гидроэлеватора в ГУБСе в зоне загрузки всюду сохраняется избыточное давление. Это достигается с помощью открытого стояка в котором поддерживается постоянный уровень воды, а загружаемый в него твердый материал поступает в рабочую камеру под собственным весом. На рис. 2.10 представлена принципиальная схема аппарата ГУБС.

Рабочая камера аппарата представляет собой горловину квадратного сечения 1, переходящую с одного конца в конфузор 2, а с другой в диффузор 3. Сторона квадратного сечения горловины принимается из расчета обеспечения скорости гидросмеси в горловине 10 м/с.

Гидротранспортное устройство типа ГУБС работает следующим образом. Насыпной материал подается на решетку грохота 3, где отделяются негабаритные включения, а весь остальной материал падая накапливается в загрузочном бункере 5, заполненном водой. Далее твердый материал через загрузочный патрубок 6 под действием собственного веса поступает в рабочую камеру.

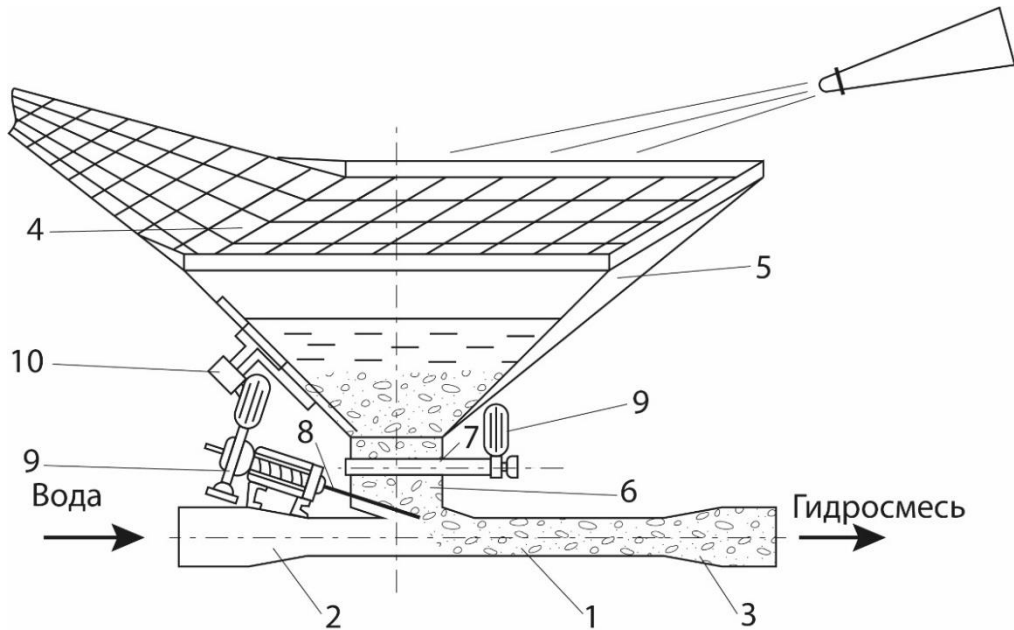


Рис. 2.10. Схема гидротранспортного устройства типа ГУБС. 1 – горловина; 2 – конфузор; 3 – диффузор; 4 – грохот; 5 – бункер; 6 – загрузочный патрубок; 7 – шиберная задвижка; 8 – струенаправляющий шибер; 9 – электромеханический привод; 10 – блок управления.

По мере поступления в рабочую камеру твердый материал подхватывается потоком воды и подается в пульповод.

Вода подается в рабочую камеру ГУБСа под определенным напором от насосной станции.

Количество твердого материала, поступающего в рабочую камеру регулируется шиберной задвижкой 7, которая служит также для перекрытия загрузочного стояка при промывке пульповода. Заданный уровень воды в загрузочном бункере поддерживается струенаправляющим шибером 8, который регулируется с помощью электромеханического или гидравлического привода 9. Контроль за уровнем воды в стоянке осуществляется визуально или с помощью блока автоматического управления 10.

2.4.4. Загрузочный аппарат вихревого пульпоприготовления

Способ гидротранспортирования сыпучих материалов с использованием загрузочных аппаратов, жидкость в которые подается высоконапорными

водяными насосами, является высокоэффективным и безопасным для окружающей среды, что особенно важно при использовании в качестве несущей среды (жидкости) раствора реагента, при кучном выщелачивании.

Опыт применения данных установок [66, 40, 14] показывает, что они повышают надежность и эффективность гидротранспортной системы за счет:

- транспортирования высококонцентрированных (сгущённых) гидросмесей без предварительного дробления;
- отсутствия необходимости предварительного дробления крупнокусковых материалов;
- исключения абразивного износа проточных каналов насоса и его рабочего колеса;
- транспортирования твердого материала на большие расстояния при использовании высоконапорных насосов;
- устранения необходимости установки дополнительных перекачных станций и др.

Горная масса в сухом виде или в виде гидросмеси подается в камеру, и далее в магистральный трубопровод, минуя насос. При этом, главным фактором, который влияет на формирование высококонцентрированной гидросмеси и стабильность ее подачи, является способ гидродинамической разгрузки твердого материала, которые могут быть гравитационным, струйным с восходящей и нисходящей разгрузкой, фильтрационным, закрученными потоками у дна камеры и коаксиально-закрученными струями жидкостями (эффект искусственного смерча) [14].

Загрузочный аппарат, основанный на использовании кинетической энергии коаксиально-закрученных струй жидкости был разработан и успешно апробирован в различных производственных условиях (на континенте и морском дне) сотрудниками МГРИ. Новизна его подтверждена многочисленными отечественными и зарубежными патентами [28, 31, 32].

В табл. 2.7 представлены результаты опытных и опытно-промышленных испытаний, проведенных сотрудниками МГРИ, на различных

горнодобывающих предприятиях России и Украины при гидротранспортировании разного по грансоставу минерального сырья, хвостов обогащения и чернового ильменитового концентрата (*рис. 2.12*) [14, 15].

Принцип действия загрузочного аппарата (*рис. 2.11*) заключается в тангенциальной подаче напорной жидкости от насоса (1) к коаксиальным патрубкам (2) разгрузочного устройства. При этом в образованном кольцевом зазоре генерируются коаксиально-закрученные струи, которые при выходе из него взаимодействуют с загруженным в загрузочно-обменную емкость твердым материалом, образуют локальную зону псевдооживления высоконасыщенной (объемной концентрацией $>30\%$) гидросмеси, которая вытесняется во внутренний патрубок (3) и далее в гидротранспортную систему (4).

Загрузочные аппараты с вихревым пульпоприготовлением работают с последовательной загрузкой и разгрузкой твердым материалом загрузочно-обменных емкостей (камер) (5). Однако, процесс гидротранспортирования осуществляется в непрерывном режиме за счет работы двух или более емкостей, (в зависимости от производительности) работающих попеременно в этих технологических циклах.

При разгрузке загрузочно-обменной емкости, в камеру завихрения от насоса подается напорная жидкость, где за счет тангенциального подвода и кольцевого зазора между соосными патрубками, на выходе из которого подается коаксиально-закрученный поток жидкости. За счет его взаимодействия с твердыми частицами образуется локальное псевдооживленное состояние, а возле узла разгрузки - высокотурбулентные вихри с определенным градиентом давления.

Таблица 2.7.

Технические данные загрузочных аппаратов вихревого пульпоприготовления, прошедших испытания на предприятиях [14]

Наименование	Предприятие						
	Иршинский ГОК		Верхне-Днепровский ГМК			Южморгеология	прииск «Отрожный»
	№1	№2	№3	№4	№5	№6	№7
1	2	3	4	5	6	7	8
Назначение, транспортируемый материал	Гидро-транспорт концентрата	Гидро-транспорт концентрата	Гидро-транспорт хвостов обогащения	Гидро-транспорт редко-металлических песков	Гидро-транспорт редко-металлических песков	Гидроподъем железомарганцевых конкреций	Эфелеуборка промприбора ПГБ
Тип насоса	ПГР (поршневой)	ЦНС-180/340	ЦНС-104/490	ЦНС-380-420	ЦНС-380-420	НБ-32 (2 шт.)	12 НДС
Расход воды, м ³ /ч	25,0	180	105	380	380	25	
Форма рабочих емкостей	Торообразная	Торообразная	Торообразная	Торообразная	Цилиндрическая	Торообразная	Цилиндрическая
Количество и диаметра емкости, мм	2 x 1020	2 x 1420	2 x 1420	2 x 1420	1 x 1546	600	1 x 2200
Высота емкости, м	3,9; 4,4	5,6	6,1	6,1	2,3	2,0	3,0
Объем, м ³	7,0; 7,5	17,5	19,5	19,5	2,4	1,4	10,0
Диаметр трубопровода, мм	80	102, 133, 159	133	159, 219	133	76	100
Длина трубопровода, м	37	70, 30, 45 (кольцо)	400 (кольцо)	2500	400 (кольцо)	30	45
Максимальная концентрация Т:Ж	1:1,4 (весовая)	1:1,5 (весовая)	1:2 (объемная)	1:1,25 (объемная)	1:2,8 (объемная)	1:1,18	1:3 (объемная)

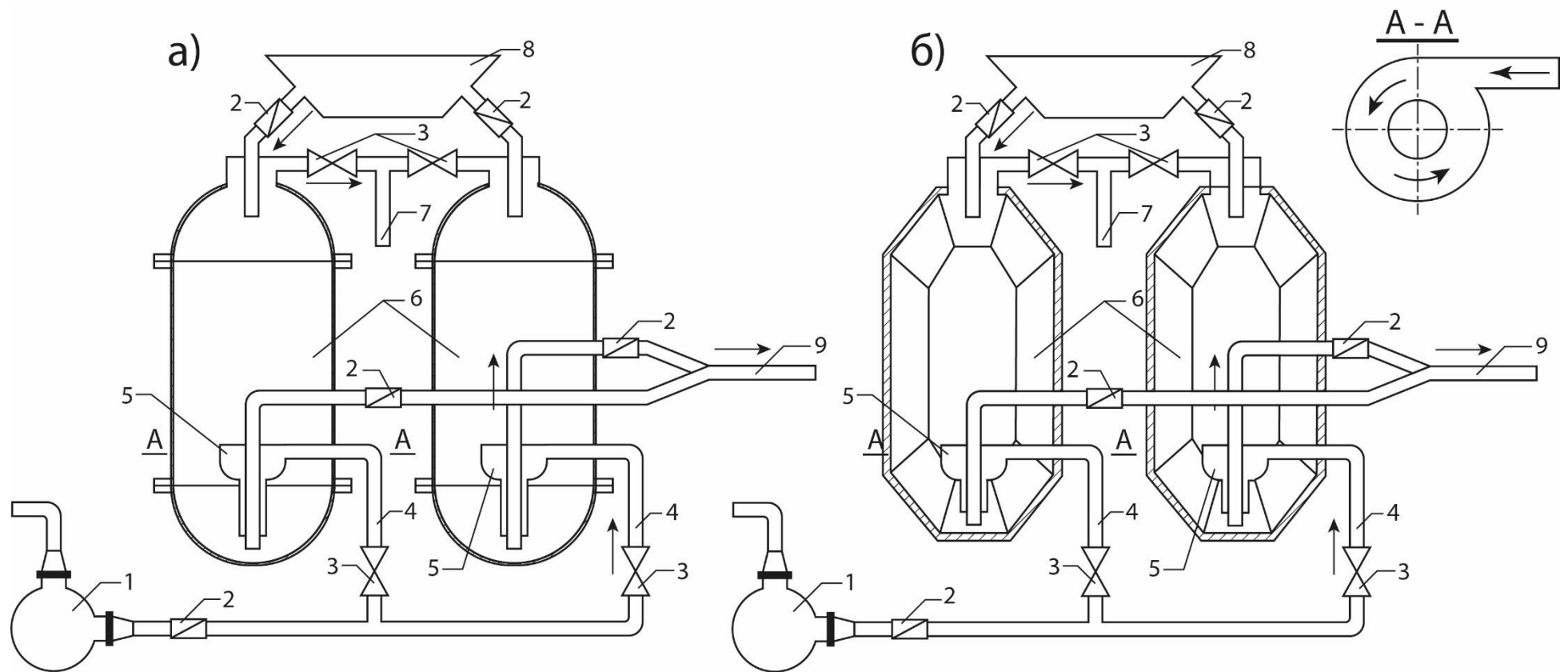


Рис. 2.11. Принципиальная схема загрузочного аппарата с вихревым пульпоприготовлением. а) цилиндрическое исполнение; б) тороидальное 1 – водяной насос; 2 – обратные клапаны; 3- задвижки; 4 – напорные водоводы; 5 – камеры закручивания; 6 – загрузочно-обменные емкости; 7 – сливной трубопровод; 8 – загрузочный бункер; 9 – пульповод.

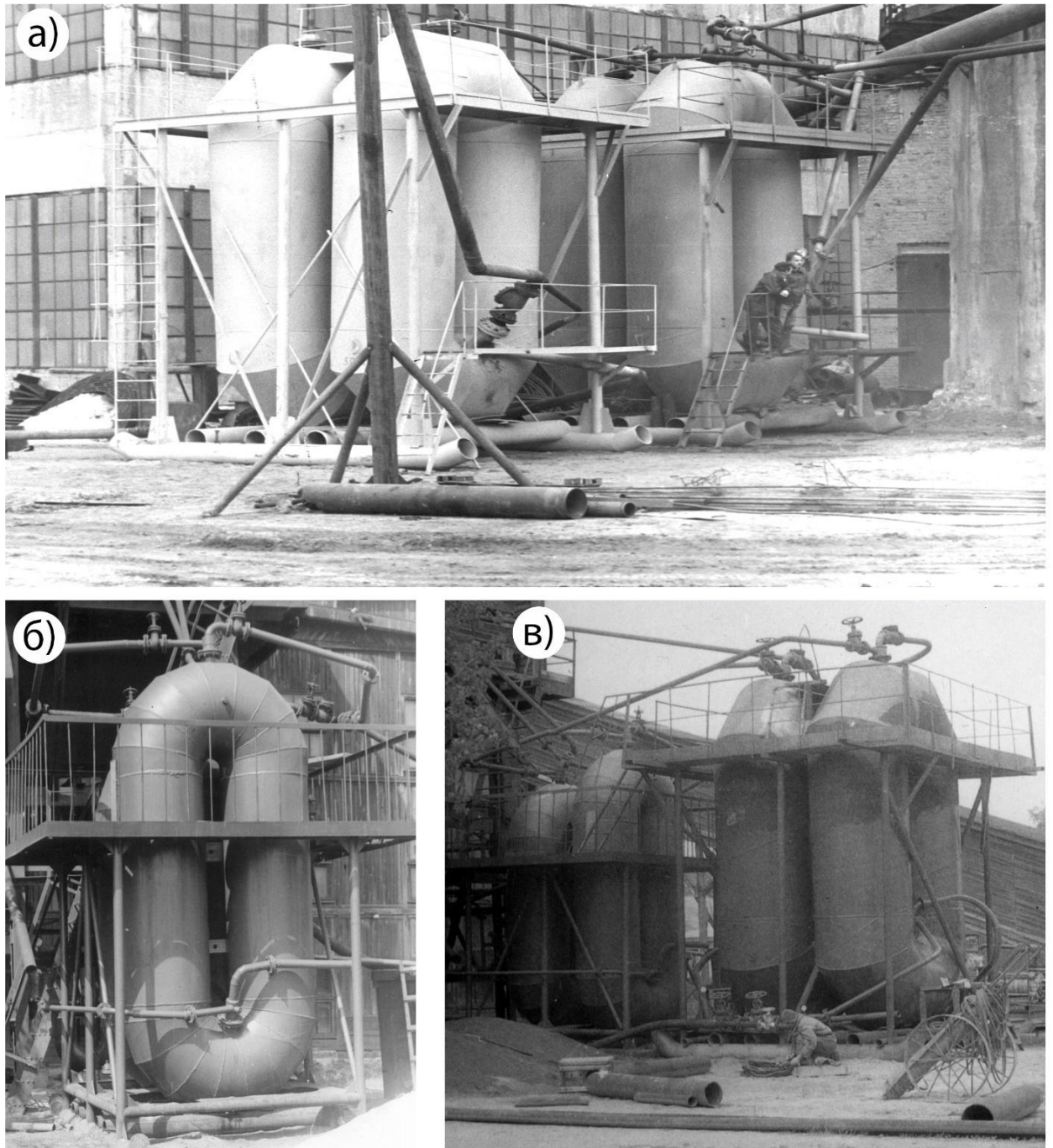


Рис. 2.12. *Опытно-промышленные испытания загрузочных аппаратов вихревого пульпоприготовления: а) при гидротранспорте хвостов обогащения на Верхнеднепровском ГМК; б, в) - Иршинский ГОК при гидротранспорте ильменитосодержащего черного концентрата*

Турбулентный обмен в зоне псевдоожижения интенсифицирует процесс перемешивания с твердым и, как следствие, образует высоконасыщенную (более 30% по объему) двухфазную смесь и ее подачу в разгрузочный патрубок и далее в пульповод.

Стабильность подачи гидросмеси (без пульсаций и резкий колебаний ее по концентрации) осуществляется за счет образования локальной зоны псевдоожижения, этому также способствует полусферическое дно камеры, исключаящее обрушение сводов над ней.

Исходный материал подается в загрузочно-обменную емкость в виде гидросмеси гидроэлеватором или грунтонасосом, либо в сухом виде (для этого используется специальный бункер-дозатор) (6), через соосные патрубки (7, 8) (внутренний (7) для загрузки), расположенные в верхней части аппарата. При гравитационном осаждении твердых частиц под собственным весом по сечению емкости излишняя жидкость вытесняется через кольцевое пространство, т. е. осуществляется сгущение смеси в объеме емкости.

Конструкция загрузочно-обменных емкостей может выполняться в двух вариантах – цилиндрическом и торообразном (*рис. 2.11 а, б*).

Транспортирующей жидкостью, по нашему мнению, может быть не только вода, но и раствор реагента. В этом случае процесс выщелачивания начинается уже на начальной стадии (этапе загрузки), при этом каждая твердая частица находится в полном контакте с реагентом не только при массообменных процессах в загрузочно-обменных емкостях, но и при движении в транспортном пульповоде, что значительно повышает массообменные процессы и тем самым значительно интенсифицирует процесс извлечения ценных компонентов (раздел 5.3).

Выводы по главе 2.

1. Предложена систематизация основных сопоставительных факторов сооружения намывных массивов (гидроотвалов, плотин, штабелей для кучного выщелачивания), представленная в табл. 2.1.
2. Проведена систематизация и аналитические исследования различных методов пересчета расходно-напорных характеристик грунтонасосов (ЗГМ-2М, ГрТ-1600/25, ГрТ-2000/63) с воды на гидросмесь с учетом объемной концентрации, гранулометрического состава, а также технических параметров агрегатов: диаметра рабочего колеса, числа оборотов двигателя и др.

3. Проведен анализ результатов тестирования грунтонасосов (ЗГМ-2М и ГрТ-1600/25) при гидромеханизированной разработке россыпного месторождения и установлены их фактические расходно-напорные характеристики.
4. Анализ результатов тестирования этих агрегатов при транспортировании гидросмеси с объемной концентрацией 7,3-20% и сопоставление их расходно-напорных характеристик с расчетными значениями известных методов показал их значительные расхождения (до 94%).
5. Установлено, что расходно-напорные характеристики с высококонцентрированными гидросмесями наиболее корректно определяются (со средними отклонениями 1-3%) по методике ВНИИ Гидромаш (2.13) с учетом полученных нами корректировочных коэффициентов (K_k).
6. Проанализированы и выявлены оптимальные условия эксплуатации гидротранспортных установок (ППУ – пульпоприготовительные установки; дробилка, установленная во всасе землесоса; ГУБС – безвакуумное струйное гидротранспортное устройство непрерывного действия; загрузочный аппарат вихревого пульпоприготовления) для формирования и подачи сгущенной гидросмеси (>30% по объему) для намыва массива штабеля.

ГЛАВА 3. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ОПЫТНО-ПРОМЫШЛЕННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО ФОРМИРОВАНИЮ МАССИВОВ ТОРЦЕВЫМ СПОСОБОМ НАМЫВА

3.1. Особенности гидроотвалообразования вскрышных пород на опытно-промышленном участке

В процессе проведения гидромеханизированных работ в карьере вскрышные породы были представлены четвертичными отложениями, сложенными с прослоями супесей, суглинков, глин и гравийно-галечного материала с коэффициентом неоднородности $K_{10}^{60} \approx 49$. Они на 50% состояли из мелко- и тонкозернистой фракции $<0,25$ мм, содержание которых в отдельных случаях достигало 75%. Кривая гранулометрического состава пород вскрыши в забоях (1, 2) показана на рис. 3.1.

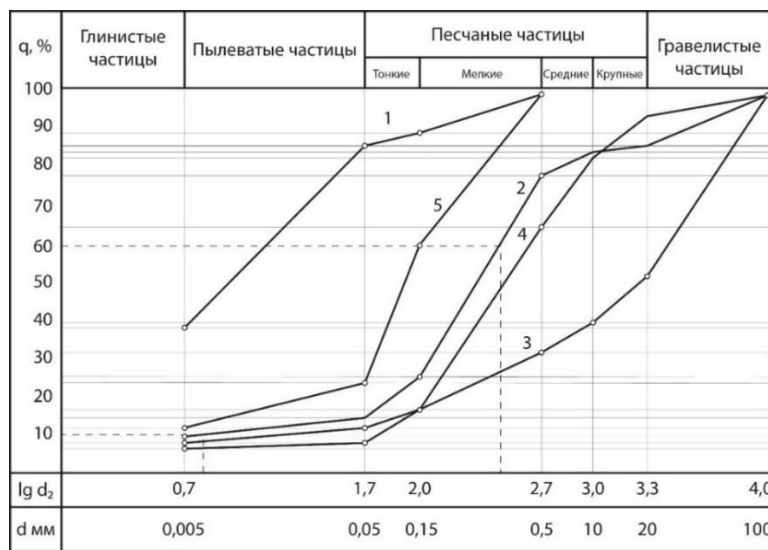


Рис. 3.1. Кривые гранулометрического состава в забоях и в различных точках гидроотвала. 1, 2 – в забоях; 3 – на расстоянии 20 м от места выпуска; 4 – 180 м от места выпуска; 5 – 380 м от места выпуска

Плотность пород при естественной влажности составляла 2410–2540 кг/м³, водоотдача изменялась в пределах 17,5–28,5%, угол естественного откоса в сухом состоянии $\sim 34^\circ$, коэффициент фильтрации измерялся сотыми долями метров в сутки. Прослой глины характеризовались следующими значениями: объемная масса 1970 кг/м³, естественная влажность – 24,2–26,8%, пористость 43%, коэффициент фильтрации 0,97 м/сут. Геологический разрез вскрышного уступа показан на рис. 3.2.

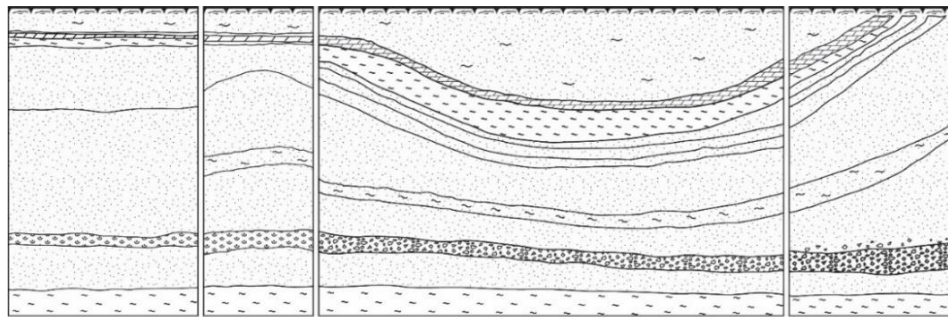


Рис. 3.2.
Геологический
разрез
вскрышного
уступа.

НАИМЕНОВАНИЕ СВОЙСТВ	СУГЛИНКИ	СУПЕСИ	ПЕСКИ	ТРЕТИЧНЫЕ ГЛИНЫ
ЕСТЕСТВЕННАЯ ВЛАЖНОСТЬ %	8,8-18,9	3,2-204	8,9-271	24,0-42,0
ОБЪЕМНЫЙ ВЕС $\gamma_{\text{об}}$	1,85-1,97	1,56-1,93	1,61-2,71	1,85-2,08
УДЕЛЬНЫЙ ВЕС	2,67-2,74	—	2,66-2,81	
ПОРИСТОСТЬ %	35,9-35,9	35,3-49,7	45,6-50,5	43,1-52,3
СЦЕПЛЕНИЕ $\sigma'_{\text{сц}}$	0,21-0,39	0,10-0,32	0,01-0,21	0,19-0,99

УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

- ПЕСКИ
- ЧЕТВЕРТИЧНЫЕ ГЛИНЫ
- ТРЕТИЧНЫЕ ГЛИНЫ
- ПРОПЛАСТКИ ГИПСА
- СУГЛИНКИ
- ГРАВЕЛИТ
- МЕРГЕЛЬ

Организация проведения опытно-промышленных работ предусматривалась с целью освоения на месторождении гидровскрышных работ в промышленном масштабе на основе полученных технико-экономических показателей этой технологии. Поэтому опытный участок располагался в промышленном контуре карьера, чтобы выполняемые на нем работы были необходимы и полезны предприятию (рис. 3.3).

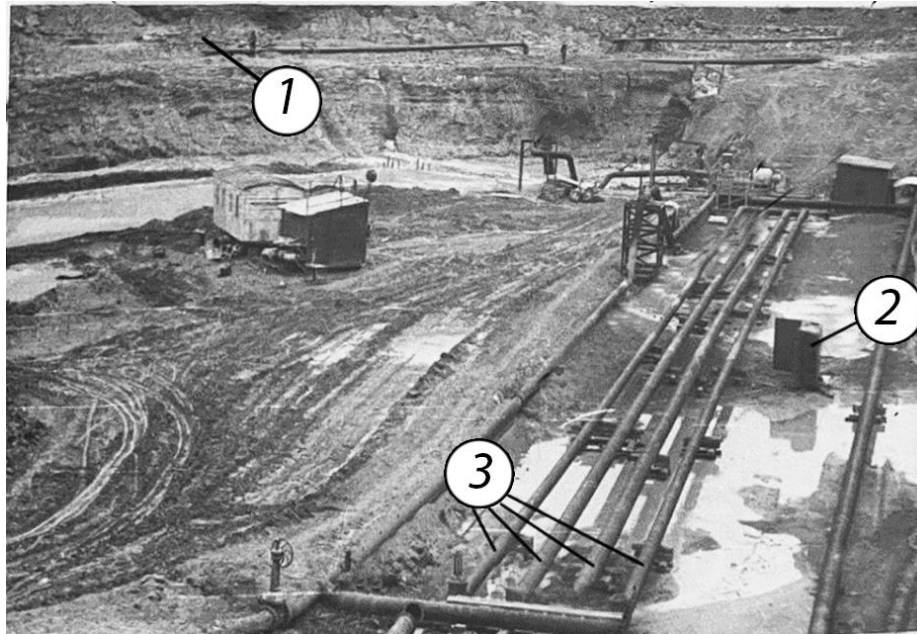


Рис. 3.3.
Опытный
участок
гидромеханизации
и (вскрышного
уступ). 1 –
верхний
вскрышной
уступ; 2 –
измерение
параметров; 3 –
измерительные
пульповоды
различных
диаметров.

Гидровскрышные работы производились по следующей технологической схеме:

- 1) размыв вскрышных пород в забое, самотечное транспортирование размывших пород в приямки землесоса;
- 2) напорный транспорт размывших пород по трубам, осуществляемый землесосом;
- 3) отвалообразование размывших пород с использованием торцевого намыва;
- 4) сбор сбрасываемой воды, ее осветление и подача под напором в забой.

Размыв горной массы в забое проводили двумя гидромониторами ГМН-250С с различными напорами у насадок.

Гидротранспортирование пород на гидроотвал осуществлялось по напорному пульповоду с наружным диаметром 426 мм с толщиной стенки 9 мм на расстояние 700 м землесосом ЗГМ-1-350А с двигателем мощностью 630 кВт и числом оборотов 730 в минуту. Производительность его по гидросмеси изменялась от 1000 м³/ч до 1900 м³/ч, а напор 45–60 м. вод. ст.

Водоснабжение осуществлялось по оборотной схеме. Основным водохранилищем являлся пруд-отстойник гидроотвалов. Подача воды производилась насосной станцией 14Д-6М.

В процессе исследования использовались два гидроотвала (объемом 800 и 700 тыс. м³), которые располагались в долине. Для их функционирования, в низовьях были сооружены плотины высотой 15 и 10 м соответственно. Объем земляных работ при их строительстве составил 90 тыс. м³ для первой плотины и 50 тыс. м³ для второй [66].

В наиболее низкой части гидроотвала №1 смонтирован металлический водосбросной колодец высотой 12 м сечением 1х1 м², с водосбросной трубой диаметром 529 мм, проходящей под плотиной и служащей для отвода осветленной воды из пруда-отстойника гидроотвала к насосу.

При опытно-промышленных исследованиях в гидроотвалы было подано ~360 тыс. м³ твердого материала, среди которых 330 тыс. м³ четвертичных пород и 30 тыс. м³ третичных глин.

3.2. Основные методические аспекты экспериментальных исследований

В процессе опытно-промышленных исследований применялся комплекс измерительных средств для определения технологических параметров гидротранспортирования пород в гидроотвалы, а также – уже намывных отложений на различных расстояниях и площадях намыва от места торцевого выпуска гидросмеси.

Для учета воды, расходуемой на размыв пород, на магистральном водоводе смонтирована диафрагма ДДН-15 с диаметром отверстия, равным 283 мм, в комплексе с дифманометром ДМ-3564, используемым в качестве датчика, и вторичным автоматическим прибором ДС-1-0,5.

Диафрагма установлена на прямолинейном участке трубопровода, чтобы различные искажения потока могли сгладиться. Длины прямых участков перед диафрагмой и за ней выбирается в соответствии с правилами №27-54 Комитета стандартов, мер и измерительных приборов [72] и составляет соответственно 30 и 35 м.

Средний удельный расход воды за период между замерами объемов размывных пород определяется по уравнению:

$$q_p = \frac{Q_r}{V}, \text{ м}^3/\text{м}^3 \quad (3.1)$$

где:

Q_r – общий расход воды на размыв, м^3 ;

V – объем размывных пород в массиве, м^3 .

Для измерения расхода гидросмеси была принята коническая труба Вентури, которая обеспечивает измерение расхода с достаточной для практических целей с точностью $\pm 2\%$. Она была изготовлена из обычных труб с помощью электросварки. Для измерения перепада давления в трубе Вентури был принят дифманометр типа ДМ-3564 в качестве датчика в комплексе с автоматическим показывающим самопишущим прибором ДС-1-0,5.

Для обеспечения надежной работы дифманометр и соединительные (импульсные) трубки заполнялись трансформаторным маслом. Гидросмесь и трансформаторное масло разделялись в отстойнике специальной конструкции (рис. 3.4).

Измерение плотности гидросмеси производилось для получения технологического режима работы землесоса в различных условиях, а также данных об изменении производительности землесоса по твердому.

В начальный период работы опытно-промышленного участка объемная концентрация (плотность) гидросмеси определялась консистометром, разработанным институтом гидрологии и гидротехники АН СССР [50].

Принцип действия его основан на непрерывном измерении перепада давления, обусловленного наличием в воде твердых частиц, которые транспортируются потоком по наклонному трубопроводу.



Рис. 3.4. Труба Вентури с разделителями.

Перепад давления, вызванный потерями на трение при движении чистой воды H_6 , компенсируется равным по величине, но противоположным по знаку перепадом давления. Это осуществляется с помощью шарового датчика, установленного для отбора давления.

Действительная плотность гидросмеси нисходящего потока определялась в этом случае формулой:

$$\rho_{\Gamma} = \frac{\Delta h_{\Gamma}}{H} + \rho_{\text{в}}, \text{ кг/м}^3 \quad (3.2)$$

где:

Δh_{Γ} – разность уровней рабочей жидкости в дифманометре, м вод. ст.;

$\rho_{\text{в}}$ – плотность жидкости (воды), залитой в систему прибора кг/м³;

H – превышение между точками отбора давления, м.

Для измерения перепада давления был также принят мембранный дифманометр ДМ-3564 с вторичным самопишущим прибором ДС-1-0,1.

Объемная концентрация гидросмеси определялась по формуле:

$$C = \frac{\rho_{\Gamma} - \rho_{\text{в}}}{\rho_{\text{т}} - \rho_{\text{в}}}, \text{ кг/м}^3 \quad (3.3)$$

где:

ρ_{Γ} , $\rho_{\text{в}}$, $\rho_{\text{т}}$ – соответственно плотности гидросмеси, воды и твердого материала.

В дальнейшем концентрация гидросмеси определялась объемно-весовым методом. Для этой цели был сконструирован секционный делитель, делящий поток на несколько частей, а под ним, на платформенных весах был установлен мерный бак. В процессе проведения опытов гидросмесь из секций делителя через гибкие резиновые шланги направлялась для отбора проб в мерную емкость объемом 200 л (рис. 3.5).

Определение влажности и плотности намытых пород производилось полевым методом с использованием лаборатории И. М. Литвинова типа ПЛЛ-9. Кроме того, для измерения объемной массы влажных пород и объемного веса породы применялся метод режущих колец (по ГОСТ 5184-64).

Сопротивление намытых пород сдвигу водонасыщенных пород определялось непосредственно на отвале лопастным прибором «Крыльчаткой» УИГСЦНИИС (рис. 3.6).

Взятие проб на гранулометрический состав гидроотвала производилось по предварительно разбиваемой пикетажной сетке в двух

створах через каждые 15 м. Отбор и обработка проб, удельный расход и концентрация на гидроотвалах выполнялись стандартными методами.

Гранулометрический состав пород определялся ситовым методом для выделения частиц крупнее 0,25 мм и ареометрическим методом – для частиц менее 0,25 мм [105].

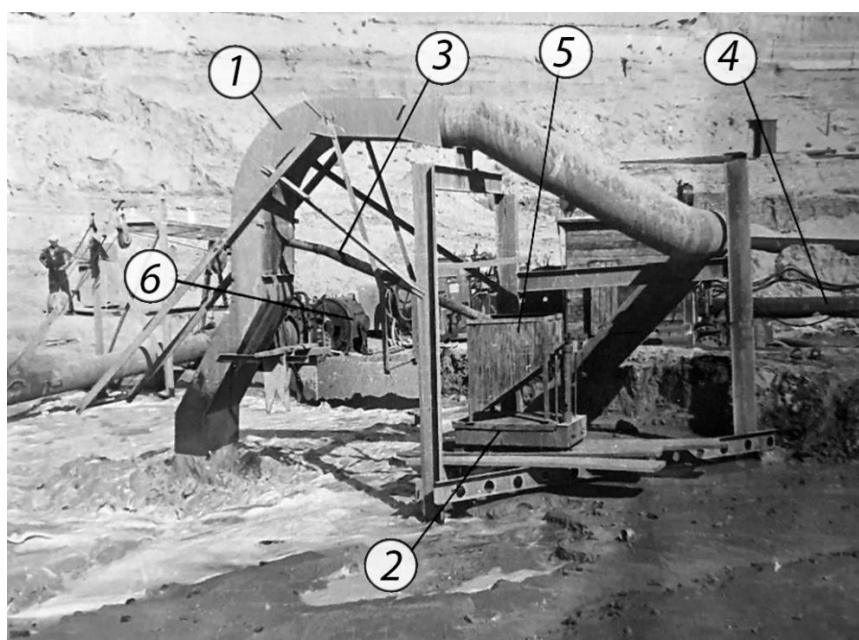


Рис. 3.5. *Определение плотности гидросмеси объемно-весовым способом. 1 – секционный делитель; 2 – весы платформенные; 3 – шланг 90 мм, подающий гидросмесь в мерный бак; 4 – пульповод; 5 – бак мерный; 6 – землесос.*



Рис. 3.6. *Определение сопротивления сдвигу намытых пород на отвале №1 лопастным прибором «Крыльчатка»*

Коэффициент фильтрации песчаных пород в полевых условиях определялся трубкой Каменского, прибором СПЕЦГЕО, а глинистых – компрессионным прибором из лаборатории ПЛЛ-9.

Плотность пород определялась пикнометрическим способом.

Геометрические параметры гидроотвала, намываемого торцевым способом объемом ~360 тыс. м³ определялись путем маркшейдерских замеров. Определение геометрических размеров намытых слоев породы на пляже и усадка их производилась по створам (два створа на гидроотвале №1 и два на гидроотвале №2), которые намечались пикетами – металлическими трубами диаметром 80 мм, высотой 5 м, с делениями через 5 см, забетонированным в основании гидроотвалов. Они располагались друг от друга на расстоянии 20 м в гидроотвале №1 и 30 м – в гидроотвале №2.

Скорость движения гидросмеси на пляже определялась с помощью поплавков, а скорость течения воды в пруде – прибором вертушкой ВЖМ-3.

3.3. Анализ результатов исследований формирования намытых отложений при торцевом способе укладки пород в гидроотвал

Как известно, в процессе механического воздействия воды при размыве и гидротранспортировании нарушается естественная структура горного массива [33]. В процессе опытно-промышленных исследований (рис. 3.7), при торцевом намыве в результате образования транзитных потоков происходила раскладка частиц по крупности – фракционирование пород по длине намываемого массива. При этом крупнозернистые частицы откладывались вблизи места выпуска, а мелкие выносились к пруду-отстойнику.

Вследствие этого массив характеризовался неоднородностью по грансоставу (*табл. 3.3., рис. 3.8*) и различными физико-механическими, плотностными и фильтрационными свойствами, изменяющихся по длине гидроотвала [85]. Это указывает, что торцевой выпуск гидросмеси не способствует равномерному распределению намытых отложений.

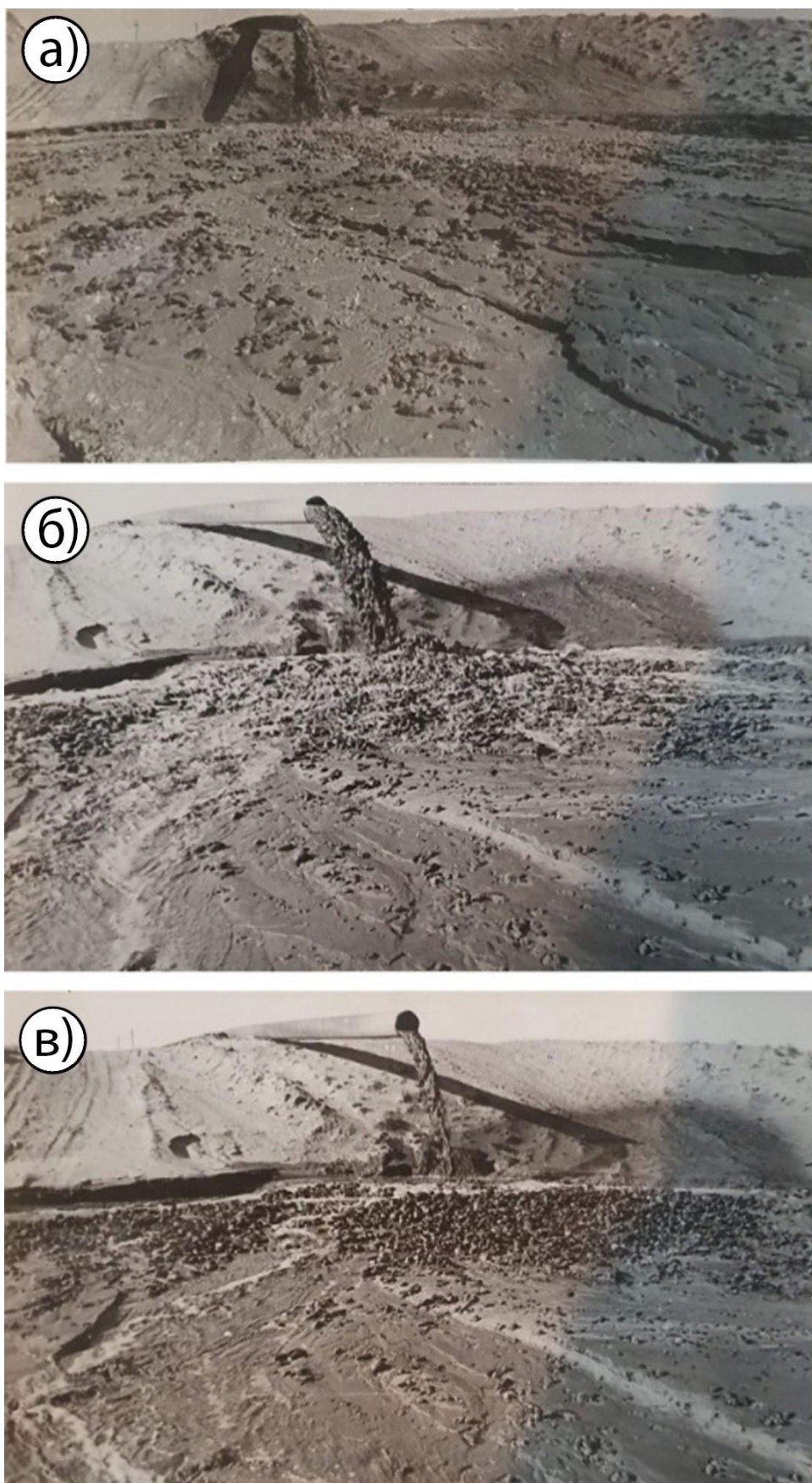


Рис. 3.7. Торцевой намыв пород при различных скоростях (расходах) гидросмеси. а) 4 м/с ($1900 \text{ м}^3/\text{ч}$); б) 3,2 м/с ($1500 \text{ м}^3/\text{ч}$); в) 2,1 м/с ($1000 \text{ м}^3/\text{ч}$)

Таблица 3.3.

Распределение частиц по длине гидроотвала.

Размер частиц, мм	Характеристика фракций	Процентное содержание частиц в различных частях гидроотвала				
		забой 1	забой 2	20 м	180 м	380 м
1	2	3	4	5	6	7
<0,005	Глинистые	38	10	8	7	12
0,005-0,05	Пылеватые	48	5	4	1	11
0,05-0,15	Тонкие	4	11	4	8	36
0,15-0,5	Мелкие и средние	10	52	15	48	41
0,5-1	Крупные		6	8	18	
1-2			2	13	12	
2-10	Гравелистые		14	48	6	
Средневзвешенный диаметр, мм		0,085	1,779	5,223	1,273	0,265
Коэффициент неоднородности			67	100	5	30

Анализ результатов исследований намыва гидросмеси торцевым способом показал, что такой выпуск гидросмеси не совсем способствует равномерному распределению гранулометрического состава намывных отложений.

Как видно из табл. 3.3. и графика (рис. 3.8), кривые распределения частиц по крупности по длине гидроотвала характеризуются неоднородностью в различных частях намывного массива [66]: ближайшая к выпуску гидросмеси из торца пульповода длиной 100-120 м и средним уклоном намывной поверхности, равным 0,018 сложена крупнозернистым материалом (до 10 мм) с повышенными фильтрационными свойствами пород (до 36 м/сут по Плотникову Н. А. [69]).

Вторая зона намывных пород представлена средне- и мелкозернистыми песками, которых по содержанию 48% со средневзвешенным диаметром $d_{ср} \sim 1,3$ мм. Она имела длину 80-100 м и средний уклон до 0,005. Фильтрационная способность их имеет меньшие значения и, исходя из грансостава, составляет 6-10 м/сут [69].

Пылевато-глинистые и мелкие частицы осаждаются в припрудковой зоне, длиной 30-90 м и уклоном $<0,005$. Так, содержание фракций $<0,15$ мм достигает 59%, а средневзвешенный диаметр $\sim 0,27$ мм. Соответственно, фильтрация в этой зоне снижается до 1 м/сут [69].

В результате исследований было отмечено, что снижение скорости выпуска гидросмеси от 4 до 2,1 м/с приводит к замедлению фракционирования по длине гидроотвала.

Таким образом, был сделан вывод о применении рассредоточенного намыва, при котором выпуск гидросмеси осуществлялся из нескольких отверстий в пульповоде с пониженными скоростями.

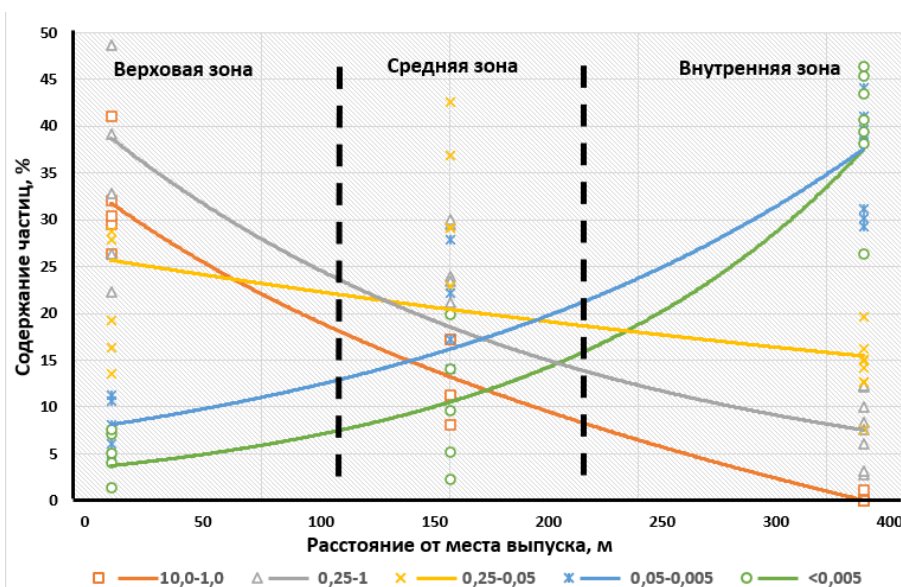


Рис. 3.8. Аппроксимирующие кривые распределения частиц по крупности (фракционирование) на гидроотвалах при торцевом выпуске пульпы.

3.4. Анализ влияния параметров гидротранспортирования на процесс намыва пород

3.4.1. Влияние параметров удельного расхода гидросмеси на процесс намыва пород

Для изучения влияния скорости (расхода) гидросмеси на свойства намываемого массива, гидротранспортирование производилось при расходе от 2,1 до 4 м/с (от 1000 до 1900 м³/ч). Характеристика распределения частиц по крупности представлена в табл. 3.4.

Как видно из табл. 3.4, при $V = 4$ м/с ($Q = 1900$ м³/ч), первая – верховая зона характеризуется крупными частицами с включениями мелких и средних; средняя – фракциями средних размеров с включениями мелких и крупных; припрудковая – мелкими частицами с дальнейшим переходом к глинистым; при $V = 3,2$ м/с ($Q = 1500$ м³/ч) в зоне выпуска гидросмеси возрастает количество как средних, так и мелких фракций с уменьшением их размеров по длине, а также снижением расстояния миграции частиц; при $V = 2,1$ м/с ($Q = 1000$ м³/ч) – количество мелкодисперсных фракций продолжает увеличиваться по всей длине намываемого массива, с уменьшением расстояния самотечного транспортирования.

Таким образом, при скорости гидросмеси 4 м/с (расходе 1900 м³/ч) происходит интенсивное осаждение частиц по крупности. Вблизи выпуска откладываются крупные куски, размер которых снижается по мере удаления от него. Однако, при этом, мелкие частицы также задерживаются в их поровом пространстве, увеличивая таким образом коэффициент неоднородности намывных пород.

Результирующим фактором распределения твердых частиц по длине намываемого сооружения при различных скоростях (удельных расходах) гидросмеси является построение аппроксимирующих кривых в зависимости от средневзвешенного диаметра, представлены на рис. 3.9 и табл. 3.5.

Таблица 3.4.

Распределение средневзвешенных диаметров частиц по длине намыва

Скорость, м/с (расход, м ³ /ч)	d_{cp} (мм) в зависимости от расстояния от места торцевого выпуска гидросмеси, м				
	10	50	100	150	200
1	2	3	4	5	6
4,03 (1900)	2,5	1,5	1,0	0,7	0,5
3,1 (1500)	1,2	0,72	0,5	0,35	0,26
2,1 (1000)	0,6	0,32	0,22	0,17	-

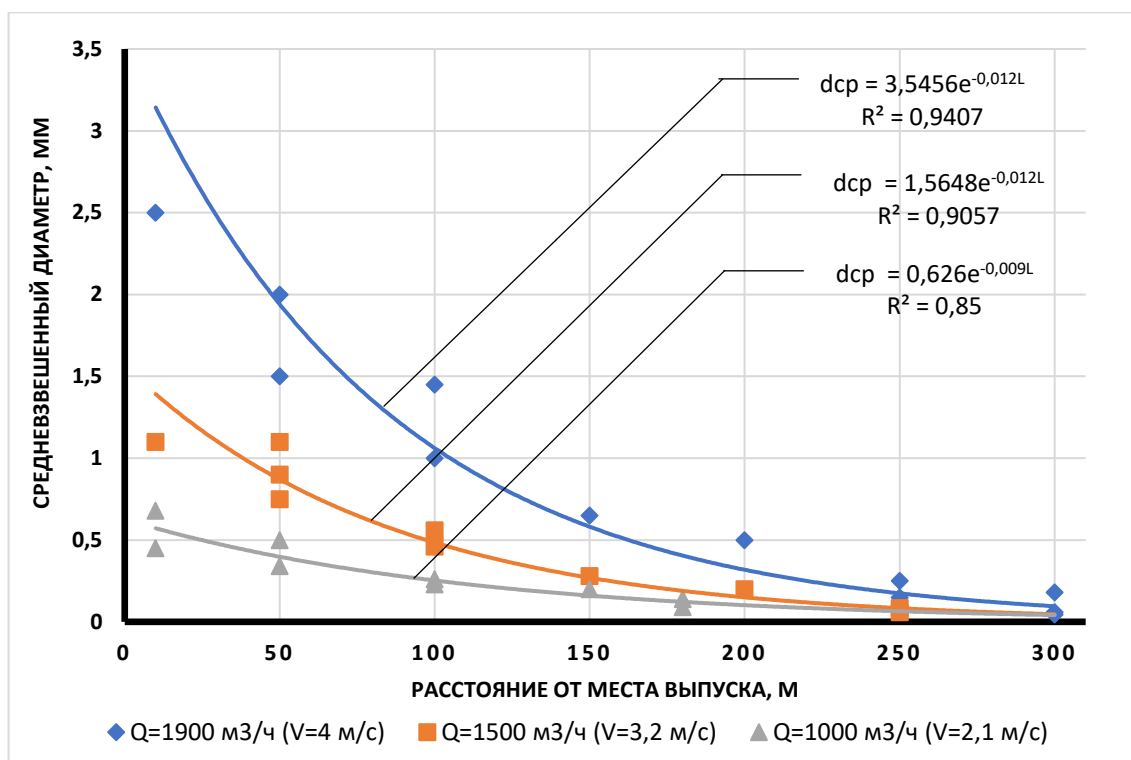


Рис. 3.9. Аппроксимирующие кривые распределения средневзвешенного диаметра по длине намываемого массива при различных скоростях (расходах) гидросмеси.

Как видно из рис. 3.9, при высоких скоростях (расходах) выпуска гидросмеси, кривая грансостава изменяется достаточно резко, а с уменьшением скорости (расхода) становится более пологой, что также свидетельствует о более равномерной укладке частиц по всей длине намываемого сооружения.

Из представленных результатов в табл. 3.5 и рис. 3.9, при снижении скорости (удельного расхода) гидросмеси, средневзвешенный диаметр намытых пород d_{cp} уменьшается, а продольное фракционирование замедляется. При этом представляется возможность прогнозировать раскладку частиц породы по длине намываемого сооружения (по зависимостям 2.1 – 2.3), регулируя удельный расход (скорость) гидросмеси при транспортировании, в частности для штабелей кучного выщелачивания, улучшая его структуру за счет равномерного гранулометрического состава для обработки реагентом:

$$d_{\text{ср}} = 3,5e^{-0,012L}, \text{ мм (для расхода } 1900 \text{ м}^3/\text{ч}) \quad (3.4)$$

$$d_{\text{ср}} = 1,6e^{-0,012L}, \text{ мм (для расхода } 1500 \text{ м}^3/\text{ч}) \quad (3.5)$$

$$d_{\text{ср}} = 0,6e^{-0,09L}, \text{ мм (для расхода } 1000 \text{ м}^3/\text{ч}) \quad (3.6)$$

где L – длина намываемого массива, м.

Важным фактором для намыва штабеля КВ является возможность управлением этим процессом за счет регулирования удельного расхода (скорости) гидросмеси и применение рассредоточенного способа намыва с пониженными скоростями выпуска гидросмеси при ее подаче в процессе штабелирования, что сопровождается более однородной и равномерной укладкой.

3.4.2. Исследования плотности и оценка фильтрационной способности формируемого намываемого массива

На рис. 3.10 представлены и обработаны результаты проведенных экспериментов на опытно-промышленном участке, из которого видно, что плотность намыва пород снижается по мере удаления от места выпуска. Исследования были выполнены для скоростей 2,1; 3,2; 4 м/с (соответственно удельных расходов 1000 м³/ч, 1500 м³/ч, 1900 м³/ч), и при объемной концентрации гидросмеси 5-7% (плотности 1090–1120 кг/м³) (отклонения при измерениях плотности) для четвертичных пород.

Влияние расхода гидросмеси на плотность укладываемых пород подтверждается тем, что кривая плотности намывных пород на рис. 3.8, соответствующая скорости 4,1 м/с (удельному расходу 1900 м³/час), лежит выше кривых, соответствующих меньшим скоростям гидросмеси.

График изменения плотности намывных пород по длине отвала показывает, что в верховой части отвала плотность намывных пород несколько возрастает, что соответствует характеру распределения частиц по крупности.

В промежуточной зоне плотность снижается с уменьшением удельного расхода гидросмеси и раскладкой частиц по крупности. В припрудковой зоне плотность укладываемых пород значительно уменьшается. Это объясняется не только вышеуказанными причинами, но и влиянием подпора со стороны прудка, который при подъеме шандор на водосбросном колодце распространяется на значительную длину.

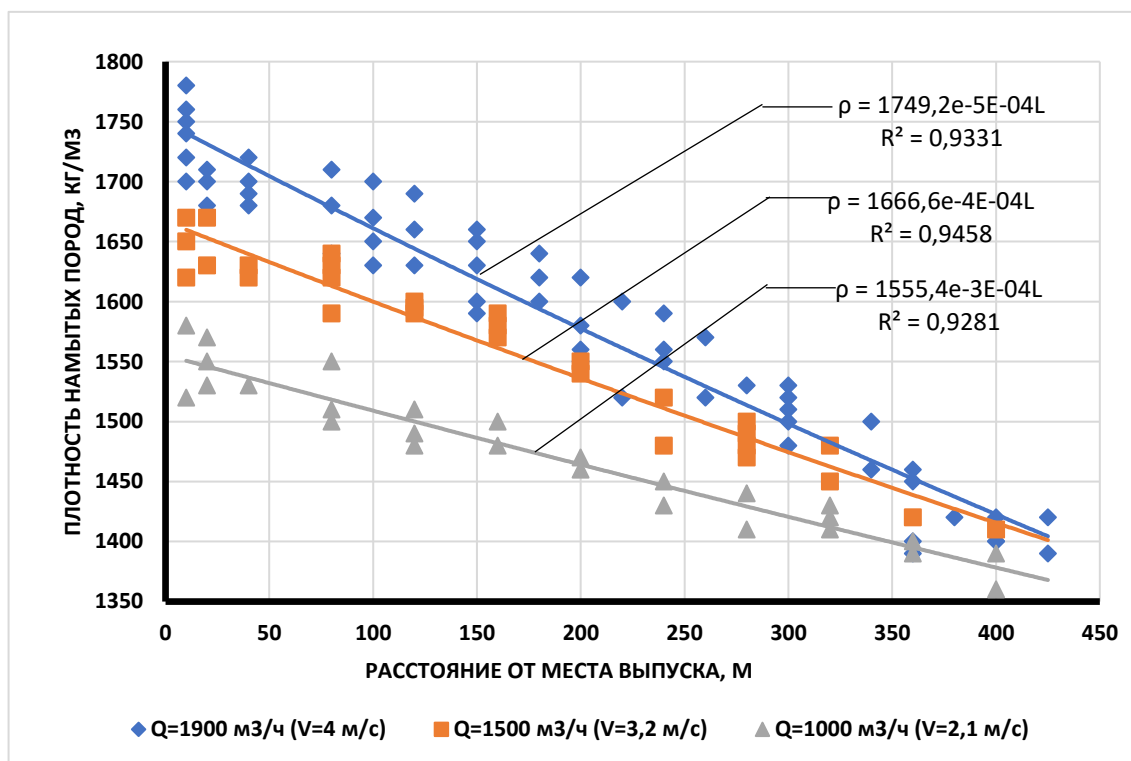


Рис. 3.10. Аппроксимирующие кривые изменения плотности намытых пород при различных скоростях (удельных расходах) гидросмеси по длине гидроотвала.

Таким образом, с уменьшением скорости (расхода) гидросмеси, за счет менее явной раскладки пород по длине намываемого участка, происходит снижение плотностных характеристик.

О более равномерной укладке пород также свидетельствует и замедление снижения плотности по длине массива: при $Q=1900 \text{ м}^3/\text{ч}$ ($V = 4 \text{ м/с}$) разница между плотностью породу в месте выпуска и в конце гидроотвала составляет 20%, при $Q=1500 \text{ м}^3/\text{ч}$ ($V = 3,2 \text{ м/с}$) – 15% и при $Q=1000 \text{ м}^3/\text{ч}$ ($V = 2,1 \text{ м/с}$) – 10%.

Намыв четвертичных пород вскрышного уступа, показал, что плотность гидросмеси оказывает существенное влияние на плотность намываемого массива (рис. 3.11).

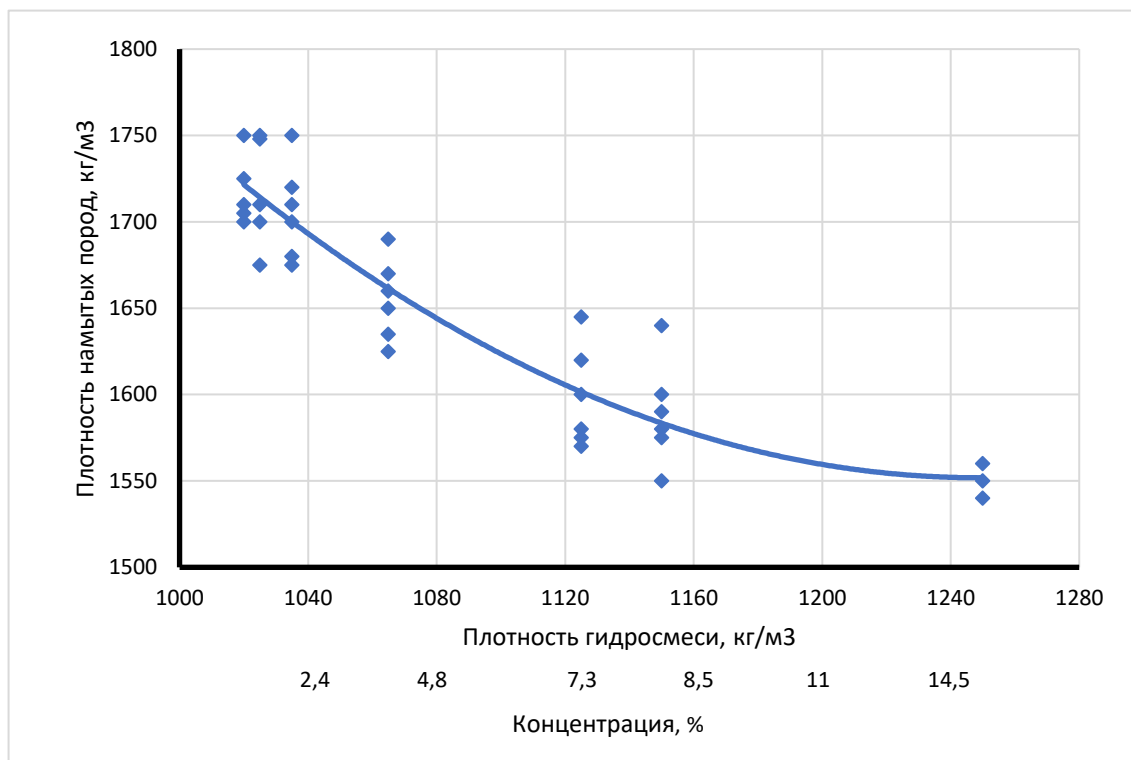


Рис. 3.11. Зависимость плотности намытых пород от плотности гидросмеси.

Как видно из рис. 3.11, наименьшая плотность намываемых пород достигается увеличением объемной концентрации гидросмеси $S \sim 15\%$ (плотностью 1200-1250 кг/м³). Однако, в условиях натурных испытаний не было технологической возможности увеличивать концентрацию при грунтонасосной подаче в гидроотвал.

Поэтому, аналогичные исследования были проведены при гидравлической укладке хвостов обогащения редкометальных песков загрузочным аппаратом (с объемной концентрацией $\sim 26\%$) при его опытно-промышленных испытаниях на Верхне-Днепровском ГМК [27]. Результаты их также показали снижение плотности намытых отложений (после 10 дневного перерыва выпуска) с 1632 кг/м³ до 1436 кг/м³ (на 12%).

Как показывают исследования, с повышением крупности и коэффициента неоднородности намытых пород возрастает и их плотность, что в конечном счете влияет на фильтрацию массива [42, 62].

Как известно, плотность укладки пород и их пористость – взаимосвязанные параметры, которые влияют на фильтрационную способность массива. Пористость массива зависит от размеров и формы слагающих частиц, их минерального состава и определяет физические и гидравлические свойства горных пород.

По форме они могут быть от близких к шарообразным до имеющих острые грани, и, в соответствии с этим подразделяются на окатанные, полуокатанные, полуугловатые и угловатые [62].

Поверхность частиц часто покрыта тонкой пленкой (чехлом) – веществом, отличным от песчинок. Наличие таких пленок влияет на фильтрационные свойства и способность к разжижению [62].

Пористость, в зависимости от типов пород и формы частиц может существенно различаться. В зависимости от их характера распределения в структуре по Охотину В. В. [67] они располагаются неравномерно по отношению друг к другу – плотно или рыхло, также возможно промежуточное состояние (рис. 3.12).

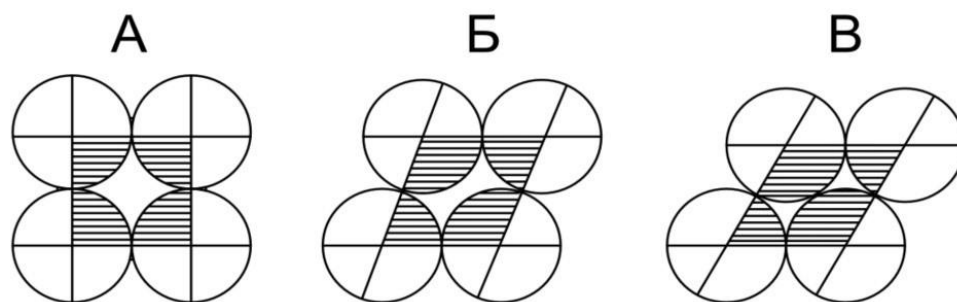


Рис. 3.12. Изменение пористости породы, состоящей из равновеликих частиц шарообразной формы, в зависимости от плотности их сложения. А - наиболее рыхлое сложение ($K_n = 48\%$); Б - средней пористости ($K_n = 40\%$); В - наиболее плотное ($K_n = 26\%$) [29].

Поэтому рассредоточенный намыв с пониженными скоростями изменяет взаимное расположение зерен в структуре массива, т. е. они размещаются неодинаково по отношению друг к другу и в данном случае

имеют разрыхленное строение, что подтверждается экспериментальными данными (рис. 3.13). Таким образом, фильтрационная способность в результате этого имеет повышенные значения.



Рис. 3.13. Рыхлая структура намытого массива при опытных исследованиях рассредоточенным выпуском.

С уменьшением скорости (расхода) гидросмеси продольное фракционирование пород замедляется, т. е. снижается расстояние транспортирования частиц и мелкие и средние фракции уже осаждаются в подавляющих количествах относительно всей длины намываемого массива, и, тем самым, снижается коэффициент неоднородности. Вследствие этого массив становится более равномерным по всей его длине, а также усредняется коэффициент пористости.

Таким образом, оптимальные значения K_f имеют при низких скоростях, что можно связать с тем, что мелкие частицы остаются в поровом пространстве между крупными более равномерно, не закупоривая его, и, тем самым позволяют не создавать отдельные фильтрационные каналы, что в конечном итоге приводит к равномерности распределения растворов по всему объему штабеля.

Это подтверждается данными из табл. 3.5., в которой представлены расчетные величины коэффициента фильтрации (по Плотникову Н. А. [69]) по усредненным значениям средневзвешенного диаметра $d_{ср}$, полученных по результатам данных опытно-промышленных исследований.

Таблица 3.4.

Усредненные значения средневзвешенного диаметра (d_{cp}) по длине гидроотвала (фильтрация по Плотникову Н. А. [69]).

Расстояние от места выпуска, м	V = 4 м/с (Q = 1900 м³/ч)			V = 3,2 м/с (Q = 1500 м³/ч)			V = 2,1 м/с (Q = 1000 м³/ч)		
	Характеристика фракционного состава	d_{cp} , мм	Кф, м/сут	Характеристика фракционного состава	d_{cp} , мм	Кф, м/сут	Характеристика фракционного состава	d_{cp} , мм	Кф, м/сут
10	Крупно- и среднезернистый с незначительным преобладанием первого. Есть гравелистые включения	3,69	23	Крупнозернистый песок, встречается мелкозернистый. Есть гравелистые включения	1,388	28	Крупнозернистый песок с редкими включениями среднезернистого. Есть гравелистые включения	0,572	36
20		3,24			1,231			0,523	
40		2,499			0,968			0,437	
50		2,194			0,859			0,399	
80	Преобладание среднезернистого песка, с большими включениями крупно- и мелкозернистого	1,485		Крупно- и среднезернистый песок с преобладанием первого	0,599		Крупно- и среднезернистый песок	0,305	
100		1,145			0,471			0,255	
120	Средне- и мелкозернистый песок	0,883	10	Средне- и мелкозернистый песок	0,371	6	Среднезернистый песок	0,213	6
160		0,525			0,229			0,148	
180		0,405			0,18			0,124	
200		0,312			0,142		Средне- и мелкозернистый песок	0,103	
220	Мелкозернистый песок, с редкими включениями прослойки глины	0,241	4	Мелкозернистый	0,112	1,5	Мелкозернистый песок	0,086	1,1
240		0,186			0,088			0,072	
280		0,11			0,054		Мелкозернистый с глиной	0,042	
300	Мелкозернистый и пылеватый песок с глиной	0,085		Мелкозернистый с глиной	0,043			0,035	
320		0,066			0,034				

Так, при скоростях выпуска гидросмеси $V=4$ м/с ($Q=1900$ м³/ч), $V=3,2$ м/с ($Q=1500$ м³/ч), $V=2,1$ м/с ($Q=1000$ м³/ч) по длине гидроотвала от 10 до 320 м значения d_{cp} соответственно уменьшаются: с 3,69 мм до 0,066; с 1,38 до 0,034 мм; с 0,572 до 0,035 мм, а коэффициенты фильтрации при этом соответственно: с 23 до 4 м/сут; с 28 до 1,5 м/сут; с 36 до 1,1 м/сут.

Таким образом количественные показатели экспериментально-аналитические взаимосвязи фильтрационного и скоростного режима с распределением средневзвешенного диаметра намытых пород согласуются с рекомендациями об оптимальных значениях коэффициентов фильтрации, равных 0,5-10 м/сут для кучного выщелачивания, изложенных в работе [97].

В работе [97] отмечается, что с учетом практики кучного выщелачивания и результатов исследований Л. И. Лунева, для КВ рекомендуется приметь значения коэффициентов фильтрации в пределах 0,5 – 10 м/сут.

Выводы по главе 3.

В результате анализа результатов опытно-промышленных исследований по формированию намытого массива объемом ~360 тыс. м³ посредством гидротранспортирования четвертичных отложений с коэффициентом неоднородности $K_{10}^{60}=49$, с применением комплекса контрольно-измерительных средств *установлено*:

1. При торцевом выпуске формирование намытого массива характеризуется фракционированием по длине гидроотвала, с гранулометрическим составом, отличающимся от исходных пород и имеет три зоны: первая (верховая) состоящая из преимущественно крупнозернистых частиц со средневзвешенным диаметром $d_{cp}=2,5$ мм, вторая (промежуточная) – среднезернистые частицы, с $d_{cp}=1,0$ мм и третья (припрудковая) – это мелкие и глинистые частицы с $d_{cp}=0,5$ мм при скорости $V = 4$ м/с (расходе гидросмеси $Q_r=1900$ м³/ч). При снижении V (Q_r) средневзвешенный диаметр частиц намытых отложений уменьшается.

2. Выявлено, что за счёт транзитных потоков и образования фракционирования по длине гидроотвала, намывной массив не обладает однородностью гранулометрического состава и фильтрационных свойств по всей его площади и объему, что при намыве штабеля кучного выщелачивания может привести к неравномерной раствороприемистости и создавать условия для образования отдельных фильтрационных каналов и других негативных последствий.

4. Объемная концентрация (плотность) гидросмеси существенно влияет на физико-механические свойства намывного массива. Так, при ее значениях равных $\sim 2\%$ ($\sim 1020 \text{ кг/м}^3$), плотность намывных пород составила 1750 кг/м^3 , а при $\sim 15\%$ ($\sim 1250 \text{ кг/м}^3$) плотность намывных пород была равной 1550 кг/м^3 , то есть снизилась на 12% .

5. Анализ фильтрационной способности показал, что оптимальные ее значения в пределах $0,5\text{-}10 \text{ м/сут}$ возможны при повышенной концентрации гидросмеси и снижения скоростного режима, способствующему усреднению однородности (средневзвешенного диаметра частиц) намываемого массива.

6. При скоростях выпуска гидросмеси $V=4 \text{ м/с}$ ($Q=1900 \text{ м}^3/\text{ч}$), $V=3,2 \text{ м/с}$ ($Q=1500 \text{ м}^3/\text{ч}$), $V=2,1 \text{ м/с}$ ($Q=1000 \text{ м}^3/\text{ч}$) по длине гидроотвала от 10 до 320 м значения $d_{\text{ср}}$ соответственно уменьшаются: с $3,69 \text{ мм}$ до $0,066$; с $1,38$ до $0,034 \text{ мм}$; с $0,572$ до $0,035 \text{ мм}$, а коэффициенты фильтрации при этом соответственно: с 23 до 4 м/сут ; с 28 до $1,5 \text{ м/сут}$; с 36 до $1,1 \text{ м/сут}$.

ГЛАВА 4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НАМЫВА МАССИВА ШТАБЕЛЯ В ЛАБОРАТОРНЫХ УСЛОВИЯХ РАССРЕДОТОЧЕННЫМ СПОСОБОМ

4.1. Разработка экспериментального гидротехнологического комплекса на основе загрузочного аппарата вихревого пульпоприготовления

Основной методической задачей проведения экспериментов являлось исследование формирования структуры намывного штабеля рассредоточенным способом выпуска гидросмеси при различных режимах гидротранспортирования, в т. ч. определения плотности намытого массива в зависимости от изменения объемной концентрации (плотности) и скорости (удельного расхода) гидросмеси.

В отличие от опытно-промышленных работ с применением землесосной установки и торцевым способом выпуска гидросмеси с различными расходами гидросмеси (*рис. 3.7*), намыв штабеля загрузочным аппаратом вихревого пульпоприготовления осуществлялся рассредоточенным способом.

Экспериментальные исследования по намыву штабелей для кучного выщелачивания проводились в лаборатории «Новые гидротехнологии» МГРИ по разработанной технологической схеме многофункционального комплекса, включающего загрузочный аппарат с использованием спутно-закрученных жидкостей и газожидкостных струй для формирования и подачи сгущенной гидросмеси, представленной на *рис. 4.1., 4.2.*

Основными технологическими узлами экспериментального гидрокомплекса являлись (*рис. 4.1., 4.2*): загрузочный аппарат вихревого пульпоприготовления (4), измерительный участок контроля плотности гидросмеси (14), карта намыва (8) с рассредоточенными (от двух до четырех) выпусками гидросмеси (6), а также зумпф с песчаным материалом, из которого гидроэлеватором (2) с водяным насосом (10) загрузочно-обменная емкость заполнялись твердыми частицами.

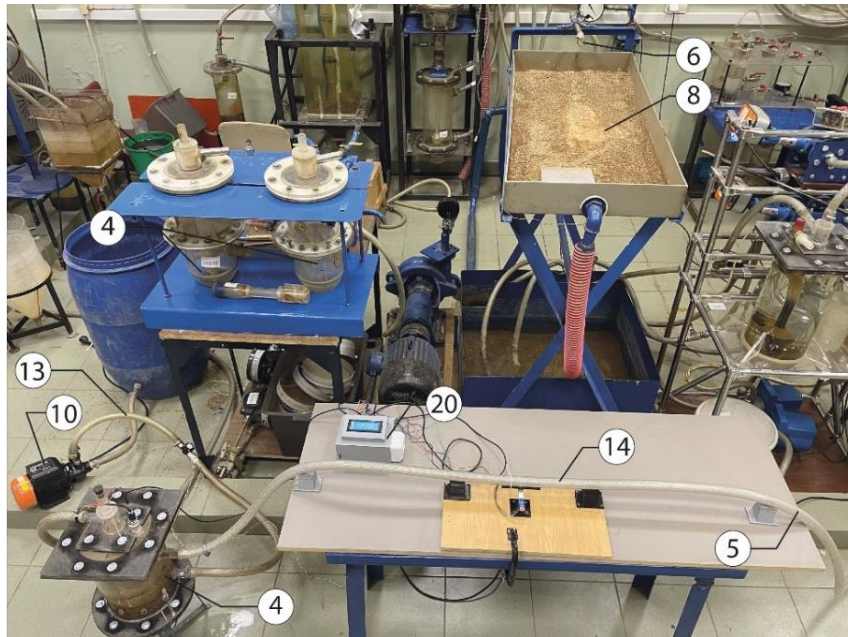


Рис. 4.1.
Лабораторный комплекс с измерительными устройствами.

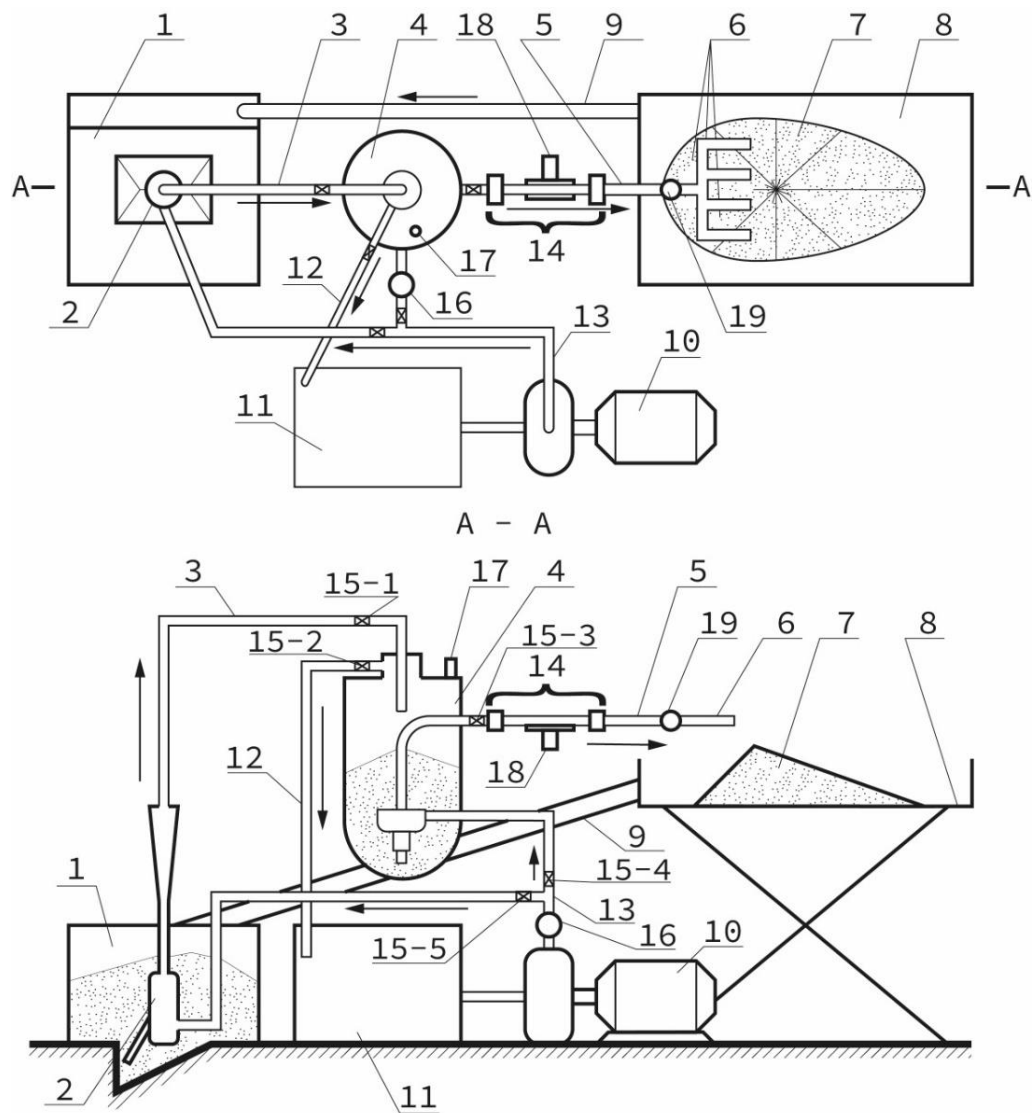


Рис. 4.2. Схема экспериментального технологического гидрокомплекса для намыва гидроизоляционного основания и штабеля [38].

Условные обозначения к рис. 4.1, 4.2:

1 – емкость с твердым материалом для загрузки (металлический короб) объемом $0,365 \text{ м}^3$;

2 – водоструйный насос (гидроэлеватор);

3 – пульпопровод для загрузки обменной емкости, $\varnothing 0,02 \text{ м}$;

4 – загрузочно-обменные емкости;

5 – магистральный пульпопровод, $\varnothing 0,02 \text{ м}$;

6 – рассредоточенный выпуск гидросмеси (2 – 4 выпуска);

7 – намытые породы;

8 – карта намыва, $1,2 \times 0,5 \text{ м}$;

9 – трубопровод для отвода избыточной жидкости с карты намыва;

10 – водяной насос «Patriot QB-60»: производительность по воде $Q_6 = 1,5 \text{ м}^3/\text{ч}$; напор $H_0 = 25 \text{ м. вод. ст.}$, потребляемая мощность $W = 370 \text{ Вт}$; глубина всасывания $H_{вс} = 6 \text{ м}$;

11 – емкость с рабочей жидкостью;

12 – водовод слива избыточной жидкости;

13 – напорный водовод от насоса;

14 – измерительный участок контроля объемной плотности гидросмеси:

$D_{тр} = 0,018 \text{ м}$; длина $L = 0,38 \text{ м}$, объем соответственно $V = 2,54 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3$;

15-1 – 15-5 – задвижки;

16 – датчик расхода воды YF-S201, рассчитанный на расход до 30 л/м ;

17 – датчик давления НК-1100Е, с максимальным давлением $1,4 \text{ Мпа}$;

18 – весы на основе тензодатчика с платой усиления НХ-711;

19 – ультразвуковой расходомер EESIFLO EASZ-10P;

20 – логгер (регистратор данных) на базе Arduino;

Комплекс гидравлического оборудования, кроме конструктивных технических устройств, был оснащен различными современными датчиками, подключенными к микроконтроллерной плате (Arduino Mega на базе процессора AtMega 2560), собирающей и записывающей данные в автоматическом режиме. При этом, он мог работать как автономном режиме

(с подключением SD-карты, для регистрации данных и выводом их на дисплей для оперативного контроля параметров намыва), так и с подключением к ЭВМ. Для установления режимов движения жидкости, объемной плотности и расхода гидросмеси, избыточного давления в системе, использовались соответствующие датчики, представленные в перечне условных обозначений к рис. 4.1., 4.2.

Эксперименты проводились следующим образом.

Подача гидросмеси в загрузочно-обменную емкость (4) осуществлялась по трубопроводу (3) гидроэлеватором (2). Для воды использовался насос (10) Patriot QB-60. Забор твердого материала производился из металлического короба (1). Избыточное количество жидкости отводилось по трубопроводу (12) в емкость для рабочей жидкости (11).

Вода от насоса подавалась к загрузочному аппарату по водоводу (13) через расходомер жидкости YF-S201 (16), и после загрузки, аппарат переходил в режим гидротранспортирования.

В самой емкости установлен датчик НК-1100Е (16), необходимый для определения избыточного давления.

Гидросмесь, поступая в напорный трубопровод (5), проходила измерительный участок для определения действительной плотности гидросмеси (14), размещенный на весах (18), представляющий трубу, объемом $V = 2,54 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3$, жестко закрепленную с двух сторон (рис. 4.3.).

Замеры действительной плотности гидросмеси производились непосредственно во время ее движения на протяжении всего цикла намыва с использованием высокоточного мостового тензодатчика. Он представлял собой алюминиевый брусок, на который с двух сторон (сверху и снизу) прикреплены тонкопленочные резисторы, изменяющие свое сопротивление при деформации. Длина участка $L = 0,38 \text{ м}$, диаметр трубопровода $0,018 \text{ м}$, объем соответственно $2,54 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3$. Кроме этого, для контроля систематически проводился отбор проб, для определения среднего значения плотности

гидросмеси с использованием весов SK 5001 WP с пределом веса 5 кг и шагом 1 г.

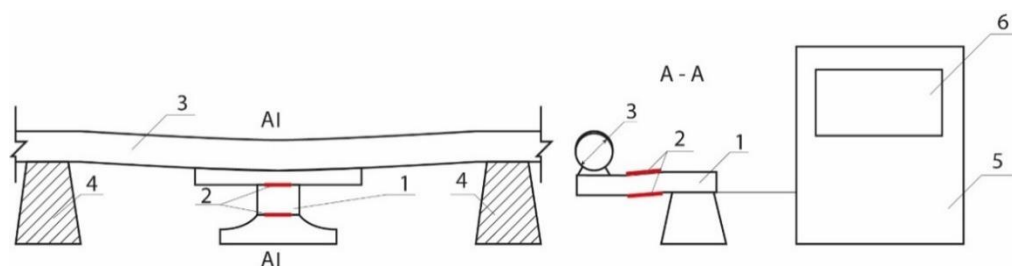


Рис. 4.3. Схема участка измерения плотности гидросмеси. 1 – алюминиевый брусок; 2 – тонкопленочные резисторы; 3 – измерительный участок (труба $\varnothing 0,018$ м); 4 – опоры для жесткого крепления пульповода на измерительном участке; 5 – блок регистрации данных (логгер); 6 – дисплей.

Для оперативного контроля и изменения объема потока жидкости использовалась вертушка (расходомер) YF-S201 с выводом значений расхода на дисплей в режиме реального времени. Он работал в диапазоне 1-30 л/м с погрешностью измерений $<3\%$. Регулировка до необходимых значений производилась шаровым краном (16-4).

Определение избыточного давления в емкости определялось датчиком НК-1100Е на базе тензорезисторов с погрешностью до 1,5%.

Намыв гидросмеси осуществлялся рассредоточенным способом (7) (рис. 4.4). При этом расход гидросмеси фиксировался ультразвуковым расходомером EESIFLO EASZ-10P (20).

4.2. Анализ результатов экспериментальных исследований

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

При рассредоточенном намыве с различными скоростями были отобраны пробы для определения плотностных характеристик в разных частях массива. При этом отмечалось, что при повышенных скоростях выпуска гидросмеси, плотность по длине массива имела различные параметры, однако

при снижении скоростного режима массив характеризовался 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. 4.4)

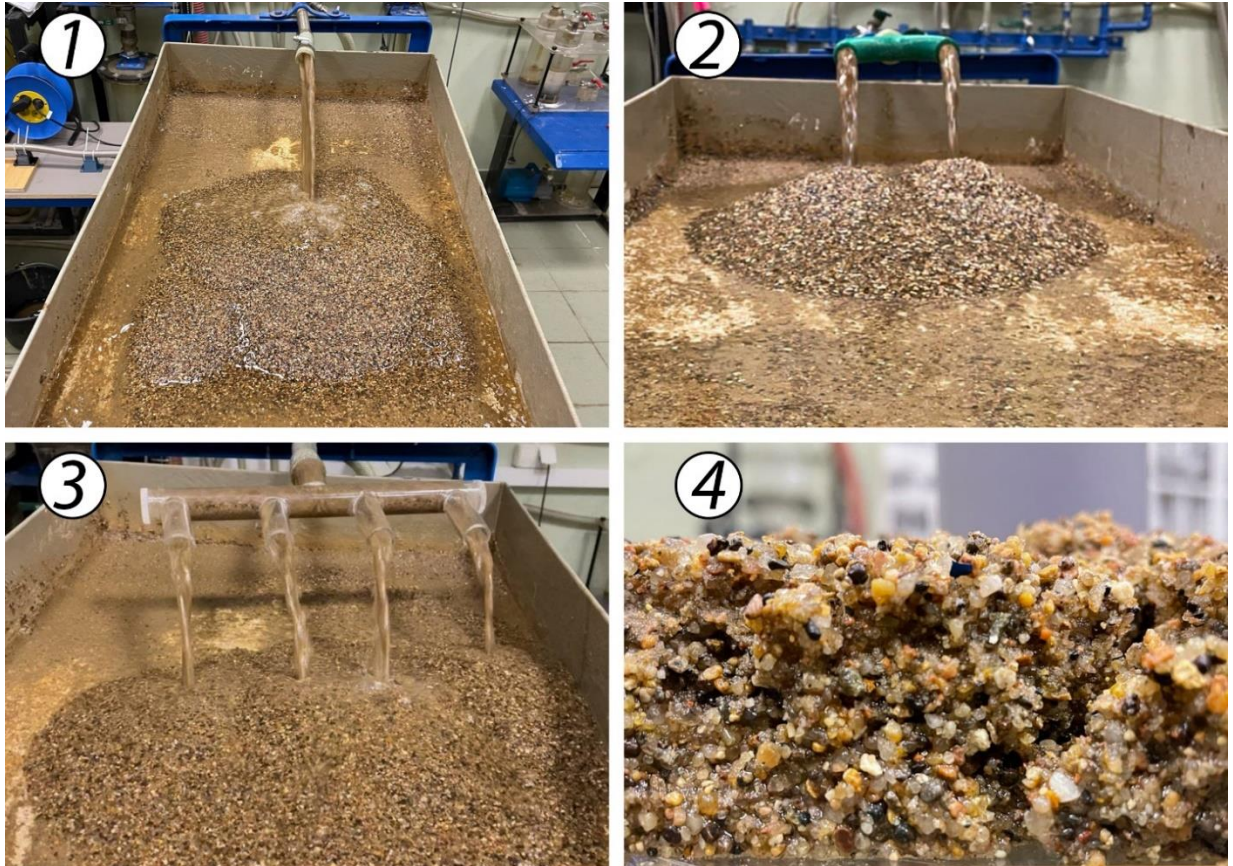


Рис. 4.4. Намыв массива загрузочным аппаратом торцевым и рассредоточенным выпуском гидросмеси. 1 – торцевой выпуск, $S=15\%$; 2 – два патрубка $S=35\%$; 3 – четыре патрубка $S=15\%$; 4 – структура разрыхленного массива при формировании штабеля рассредоточенным выпуском.

Рассредоточенным выпуском возможно контролировать процессы гидротранспортирования с поддержанием оптимальных скоростей движения гидросмеси, при которых достигается максимальная ее плотность (рис. 4.5). Выпуск пульпы при этом производится на пониженных скоростях, что

приводит к отсутствию фракционирования пород по длине намывного массива.

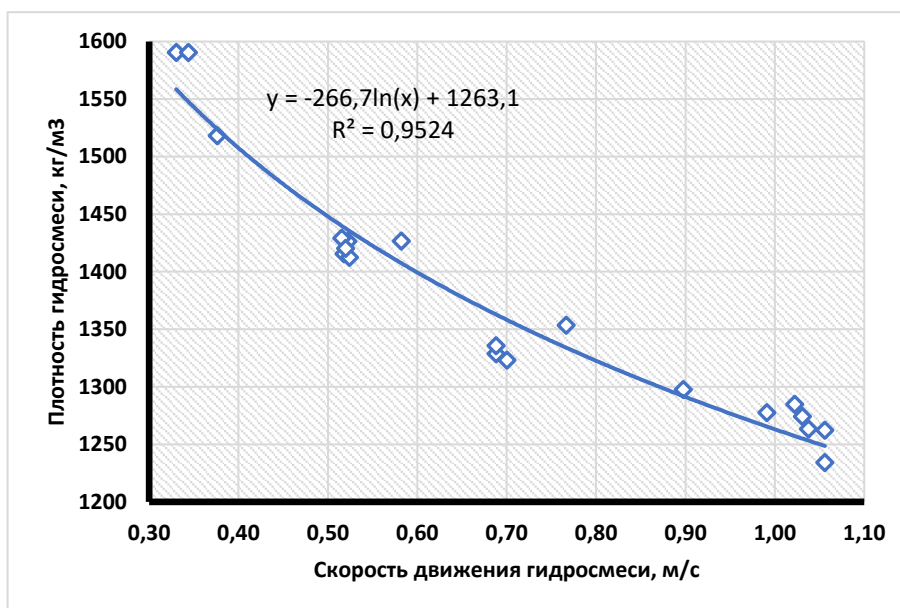


Рис. 4.5. Зависимость плотности гидросмеси от скорости ее движения в трубопроводе.

За счет такого режима также снижается и плотность намываемого массива, что приводит к разрыхленной структуре штабеля, которая сохраняется по всей его длине (рис. 4.6).

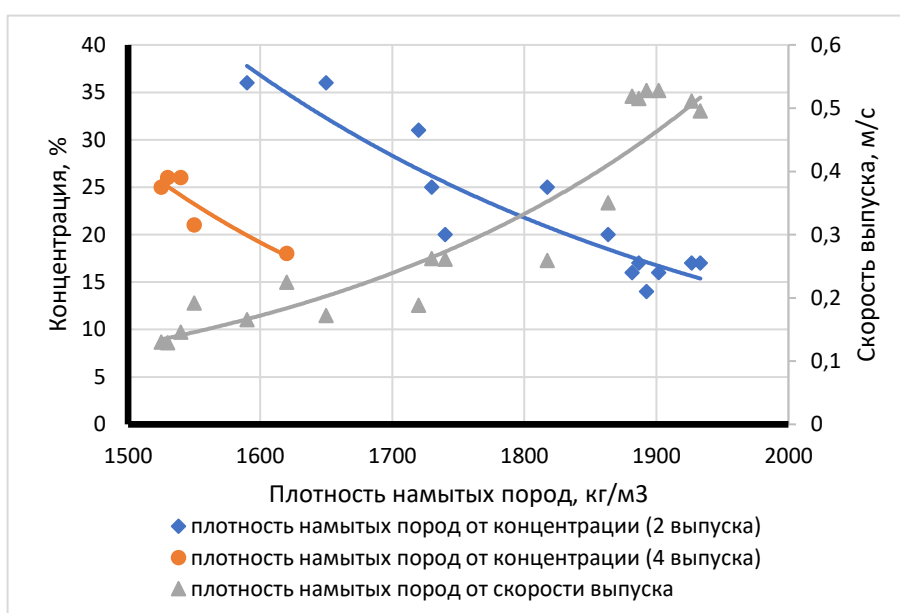


Рис. 4.6. Зависимость плотности намывных пород от объемной концентрации и удельного расхода гидросмеси.

Как видно из рис. 4.5, 4.6. наименьшая плотность, и, соответственно, рыхлая структура намываемых пород достигается повышением концентрации гидросмеси и снижением скорости ее выпуска. Так, при ее увеличении с 15 до 34% (плотности от 1275 кг/м^3 до 1566 кг/м^3) плотность массива снижается с ~ 1930 до $\sim 1525 \text{ кг/м}^3$, что составляет 20%.

На рис. 4.7. и табл. 4.1. показаны различные контуры и геометрические параметры штабелей, намытых рассредоточенным способом в зависимости от скорости движения и объемной плотности гидросмеси.

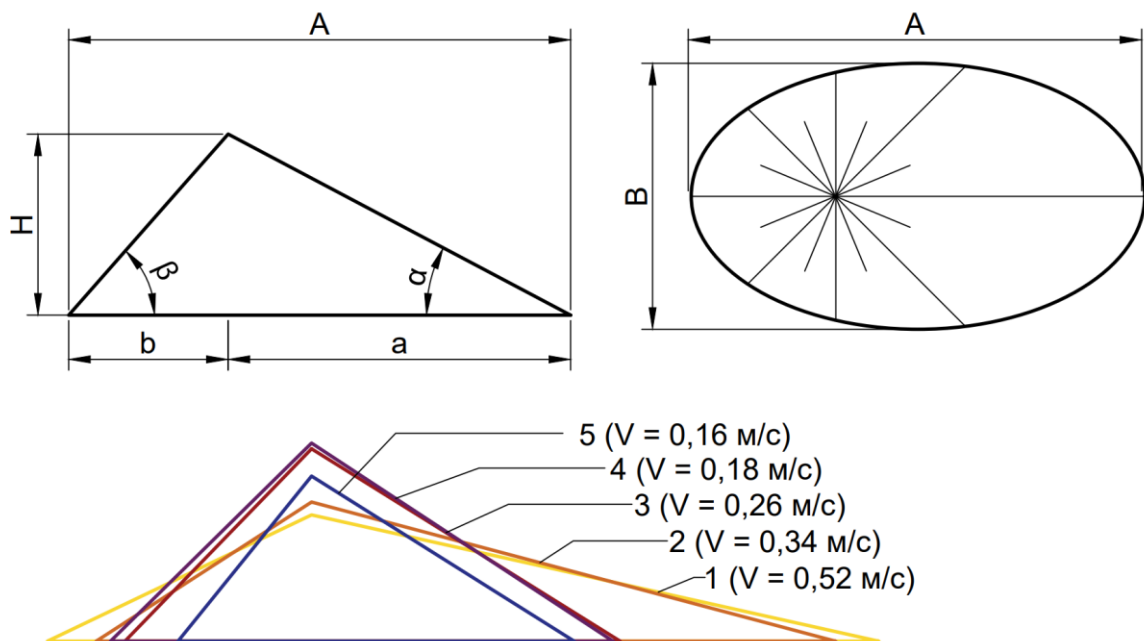


Рис. 4.7. Геометрические параметры намытого штабеля в зависимости от скорости (удельного расхода) и концентрации гидросмеси с рассредоточенным выпуском из 2-4 патрубков. 1 – 4 – выпуск из 2 патрубков; 5 – выпуск из 4 патрубков; (значения приведены в табл. 4.1.).

Таблица 4.1.

Усредненные параметры штабеля по результатам 3-6 намывов.

№	Кол-во патрубков	V, м/с	S, %	ρ_r , кг/м ³	A, см	B, см	a, см	b, см	H, см	Уклон α	Уклон β
1	Два	0,52	16	1266	58	49,5	39,5	18,5	8,8	13	26
2	два	0,34	20	1329	51,5	47	36,5	15	9,5	15	34
3	два	0,26	25	1418	34,5	44	21,5	13	13	32	46
4	два	0,18	34	1566	35	46	21	14	14	33	45
5	четыре	0,16	23	1385	27,5	48,5	15	9,5	11,5	32,2	51

V – скорость выпуска гидросмеси; ρ_r – плотность гидросмеси; S – концентрация гидросмеси; A – длина намытого массива; B – ширина намытого массива; a, b – длина; H – высота массива

При намыве с различными скоростями были отобраны пробы с намытого массива для установления плотностных характеристик в различных его частях. Для этого использовался метод режущих колец, объем которых составлял 50 см³. В зависимости от его длины, пробы отбирались в 2-6 точках (2 по ширине, от 1 до 3 по длине) через каждые 15 см, начиная от «вершины» массива.

Усредненные значения плотности по длине намыва по результатам 3-6 намывов, а так же его геометрические параметры представлены в табл. 4.2.

Таблица 4.2.

Усредненные параметры плотности в различных частях массива.

Условия выпуска	Концентрация, %	Плотность гидросмеси, кг/м ³	Скорость выпуска, м/с	Плотность намытых пород в точках отбора по длине, кг/м ³		
				1	2	3
2 патрубка	16	1266	0,52	1918	1898	1895
2 патрубка	20	1329	0,34	1806	1780	1763
2 патрубка	25	1418	0,26	1772	1753	-
2 патрубка	34	1566	0,18	1663	1676	-
4 патрубка	23	1385	0,16	1551	-	-

Как показывает анализ исследования (табл. 4.2), при повышенных скоростях выпуска гидросмеси, плотность по длине массива различается, а при ее снижении соответственно становится более однородной. Это можно объяснить тем, что при низких скоростях, а также высокой концентрации гидросмеси частицы не выносятся потоком жидкости, что соответственно формирует штабель равномерным по гранулометрическому составу и плотностным и фильтрационным свойствам относительно постоянным по всей намываемой площади и объему.

Гидравлическая укладка средне- и крупнозернистых частиц позволяет формировать устойчивый и компактный штабель со средними углами откосов ~30-35° [85]. Оптимальными объемными концентрациями можно считать 25-35% и более при скоростях движения гидросмеси близких к критическим. При

этом формирование штабеля с рыхлой структурой и приемлемыми фильтрационными свойствами достигается повышенных концентрациях и малых скоростях гидросмеси.

Таким образом, при регулировании и контроле оптимальных параметров (режимов) гидротранспортирования частиц с $d_{cp} > 1$ мм возможно формировать качественный штабель (массив) рассредоточенным выпуском из нескольких отверстий в пульпопроводе. За счет переключения одновременно работающих выпусков гидросмесь равномерно распределяется вдоль фронта намыва за счет снижения скорости ее движения по карте намыва (поверхности) [38].

Коэффициент фильтрации при этом, по данным Бессонова А. Е. [6] будет составлять до 25 м/сут.

Укладка тонкодисперсных пород и хвостов обогащения при торцевом способе формируется с весьма пологими уклонами ($10-16^\circ$) [97]. Это приводит к увеличению площади намывного массива и усложнению дренажа жидкости, т. е. такой способ намыва не позволяет конструировать качественный штабель и не формирует компактный массив вследствие образования сосредоточенных транзитных потоков пульпы, которые выносят мелкие и тонкие частицы в пруд-отстойник [38, 85].

Более эффективно мелкодисперсные породы укладывались двухсторонним (кольцевым) намывом. Такая технология при гидронамыве формирует обжатый профиль намывного массива, но требует обвалования для ограждения пруда-отстойника. Сооружение водосбросных колодцев позволяет относительно просто сбросить жидкость за пределы намывного сооружения. При намыве раствором реагента пробы с крупностью $+0,5$ мм штабель формируют с довольно крутыми склонами при объемной концентрации гидросмеси, не менее 17-20% [85, 97].

Как показывают результаты исследования, проведенные Семеновой К. М. [85], гидравлическая укладка крупнозернистых песчаных пород ($d_{cp} = 2-4$ мм) характеризуется надежным формированием компактного массива

намытых пород, со средними уклонами откосов 30-40°. Также в данной работе было установлено, что на процесс формирования массива влияют удельный расход и плотность транспортируемой гидросмеси.

Выводы по главе 4.

1. Разработан новый экспериментальный гидротехнологический комплекс, оснащенный современной контрольно-измерительной аппаратурой с возможностью подключения к ЭВМ или работы в автономном режиме для измерения параметров гидротранспортирования, в том числе скорости (удельного расхода) и объемной плотности в процессе намыва.
2. Установлено, что при рассредоточенном выпуске гидросмеси возможно регулирование параметров гидротранспортирования за счет поддержания оптимального скоростного режима движения гидросмеси в пульповоде с выпуском их на пониженных скоростях, что в отличие от торцевого намыва, приводит к отсутствию фракционирования пород по длине намываемого массива и формированию рыхлой структуры, относительно однородной по всему объему.
3. Определена функциональная зависимость изменения плотности намываемых пород от удельного расхода и объемной концентрации гидросмеси. Наименьшие значения плотности, и, соответственно, разуплотненная структура намываемого массива достигается повышением концентрации гидросмеси и снижением скорости ее выпуска. Так, при ее увеличении с 15 до 34% (плотности от 1275 кг/м³ до 1566 кг/м³) плотность массива снижается с ~1930 до ~1525 кг/м³, что составляет 20%.

ГЛАВА 5. ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ НАМЫВНОГО МАССИВА ШТАБЕЛЯ

5.1. Технологические особенности подготовки основания под рудный штабель

Гидротранспортные аппараты, формирующие сгущенную пульпу, можно применять для решения многих задач, связанных с процессом кучного выщелачивания.

Прежде всего, при подаче смеси рудной массы со специальными кольматирующими добавками или реагентами обеспечивается быстрое твердение уложенного материала, поэтому для подготовки площадки и создания непроницаемого основания под рудный штабель нет необходимости устраивать многослойные основания из специальных покрытий, что обосновано в разделе 5.3. Это позволяет исключить дополнительные операции, так как подача минерального материала в смеси с кольматирующими добавками обеспечивает прочную и надежную гидроизоляцию, не уступающую пленочным мембранам и отвердителям. Они обеспечивают полную защиту основания от протечек и, за счет заполнения порового пространства укрепляют структурные связи между частицами при взаимодействии с раствором реагента.

На кафедре геотехнологических способов и физических процессов горного производства Российского государственного геологоразведочного университета им. Серго Орджоникидзе (МГРИ) разработана технологическая схема устройства гидроизоляционного основания на основе работы загрузочного аппарата вихревого пульпоприготовления [31], которая затем была апробирована сотрудниками лаборатории «Теоретическая и прикладная геомеханика в строительстве» Московского государственного строительного университета (МГСУ). Результаты экспериментов приведенных в работе показали, что предложенная нами технология обеспечивает возможность

создания надежных противofильтрационных оснований, посредством намыва, которые можно использовать в т. ч. для проведения кучного выщелачивания золота цианидными растворами. [97]

Составы, которые рекомендуется применять для надежной гидроизоляции, включают композиции на основе жидкого стекла, модифицированные с помощью отходов или полупродуктов оргсинтеза, а также композиции на основе отходов нефтепереработки.

Прототипом предлагаемого состава является известный водонабухающий композит «Полиамин» на основе смеси бентонита и полиакриламида. При этом подготавливается порошок бентонита, компоненты смешиваются, обезвоживаются, сушатся и полученная сухая масса измельчается.

Предлагаемые композитные составы, как полагают авторы, отличаются технологичностью, меньшими расходами полиакриламида, более низкими коэффициентами фильтрации, улучшенными прочностными и пластическими характеристиками. Поэтому в работе [97] рассмотрена технология приготовления полимерно-минеральной композиции на месте потребления с получением в качестве основного технологического продукта жидкой композиционной массы, пригодной для намыва на основание.

При взаимодействии полиакриламида с бентонитом и другими глинами усиливается способность глин к набуханию, при этом образуются мостиковые связи с образованием нерастворимых комплексов, многократно набухающих в воде с получением сетчатых структур. Композиционная смесь после схватывания образует гидрофобный слой, полностью предотвращающий просачивание воды. Посредством дополнительных лабораторных испытаний (более 40 экспериментов) были предварительно подобраны необходимые соотношения компонентов, обеспечивающие проникновение композиционной смеси в поровое пространство слоя, состоящего из песка различной крупности или грунта. Опыты показали, что найденные полимерно-бентонитовые композиции обволакивают частицы различной крупности, поэтому, для

намыва оснований с использованием песка не требуется его предварительная классификация.

При этом нет необходимости уплотнения материалов и покрытия различными пленками, так как минеральные компоненты (примеси) при взаимодействии с реагентом равномерно и прочно скрепляют основание, снижая уровень водопроницаемости и увеличивая его прочность.

Полученные результаты показывают, что образующиеся после шестичасовой полимеризации влажные пленки не пропускают воды и отличаются большой гибкостью. Срок сохранности пленок во влажном состоянии – пять лет.

Таким образом, использование кольматирующих добавок и реагентов при намыве позволяет за счет несложных технологических решений ускорить процесс подготовки основания, при котором не требуется дополнительных операций и техники. Специальные компоненты, взаимодействующие с реагентом обеспечивают быстрое затвердевание материалов, а во многих случаях дополнительная обработка не требуется, так как кольматация равномерно скрепляет материал основания.

Технологически обустройство предлагаемого нами способа пульпоприготовления и подачи смеси для намыва площадки под штабель осуществляется загрузочным аппаратом. Для этого, перед началом работ устанавливают распределительный пульповод с выпускными патрубками, соединенный с магистральным трубопроводом. Регулирование технологического процесса и переключение режимов намыва осуществляется задвижками, которые монтируют в местах соединения трубопроводов и на выпускных патрубках, что позволяет оперативно реагировать и контролировать параметры гидротранспортирования. Преимуществом данной системы также является использование трубопроводов при дальнейшем намыве тела штабеля и других технологических операциях, например при довыщелачивании.

5.2. Сооружение дамб обвалования

Дамбы обвалования при обустройстве основания и формировании штабеля КВ гидромеханизированным способом необходимы для предотвращения растекания гидросмеси за пределы контура карты намыва, а также для последующего отведения насыщенных растворов.

При этом в первые периоды функционирования намываемого сооружения дамбы начального обвалования выполняют функцию напорного сооружения, однако после намыва пляжа и оттеснения прудка от дамбы она становится периферийной частью намывной упорной призмы и функции прочности и устойчивости выполняет намывной массив. Обычно дамбы начального обвалования сооружают из водопроницаемых пород, так, чтобы она в течение всего срока эксплуатации, кроме выполнения основных требований, служила еще и дренажным устройством для намывных пород.

При превышении допустимой фильтрации с внешней стороны дамбы делают простейшую временную пригрузку из водонепроницаемого материала на высоту просачивания, которую затем убирают бульдозером при намыве первого яруса [55].

Необходимо отметить, что объем земляных работ на сооружение дамб обвалования влияют на выбор технологической схемы намыва площади основания и штабеля, которое в свою очередь, в значительной степени зависят от их месторасположения. Так, при равнинном рельефе дамбы первичного обвалования сооружают из пород с высокими фильтрационными свойствами с целью дренирования продуктивных растворов. Они отсыпаются землеройной техникой по всему контуру, образуя первый ярус (*рис. 5.1*). Затем пространство, заключенное внутри обвалованной дамбы, заполняют (намывают) рудным материалом, создавая непроницаемое основание и штабель для выщелачивания. Необходимо отметить, что дамбы последующего обвалования сооружают для каждого яруса в течение всего срока эксплуатации. Для намыва 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.

На рис. 5.1 представлена схема сооружения дамб обвалования из привозного грунта при прямолинейном профиле откосов намытых пород.

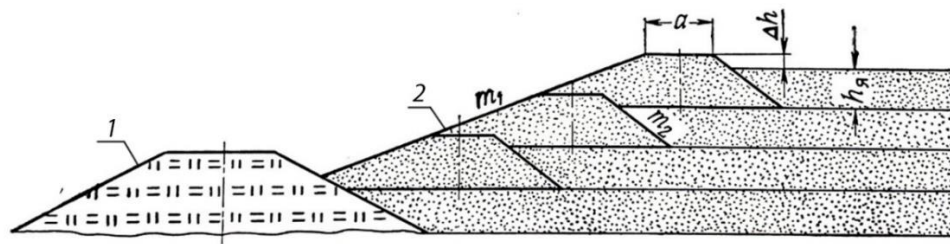


Рис. 5.1. Схема сооружения дамб обвалования из привозного грунта.

1 – дамба первичного обвалования; 2 – дамбы последующего обвалования; m_1 – коэффициент заложения внешнего откоса намывного сооружения; m_2 – коэффициент заложения откосов дамб обвалования; a – ширина гребня; $h_{я}$ – высота намываемого яруса.

Объем земляных работ на 1 м по высоте дамбы обвалования можно определить по уравнению [62]:

$$W_{об} = \frac{a \cdot (H - \Delta h)}{h_{я}} \left[h_{я} + \frac{(m_1 + m_2) \cdot (h_{я} + 2\Delta h) \cdot h_{я}}{2a} \right], \text{ м}^3 \quad (4.5)$$

где:

H – расчетная высота сооружения, м;

Δh – высота превышения дамбы относительно намывного массива, м;

m_1 – коэффициент заложения внешнего откоса гидроотвала;

m_2 – коэффициент заложения откосов дамб обвалования;

a – ширина гребня, м;

$h_{я}$ – высота намываемого яруса, м.

Одним из важных параметров дамб обвалования является их высота. Обычно она составляет 3-4 м, остальные расчетные параметры приведены в табл. 5.1.

Таблица 5.1.

Расчетные параметры дамбы обвалования[62]

Коэффициент усадки (коэффициент увеличения высоты дамбы)			Ширина дамбы, м	
Глины	Супеси	Пески	При укладке трубопроводов	Без укладки
1,15 – 1,2	1,1 – 1,15	1,05 – 1,1	3 – 3,5	1 – 1,5

Величина откосов дамбы m рассчитывается или выбирается из условий устойчивости сооружения, которую рекомендуется принимать равной коэффициенту заложения при угле естественного откоса материала. При завышенных значениях m образуются застойные зоны между откосом и эстакадами, где осаждаются мельчайшие частицы [78].

Величина коэффициента заложения откосов подсчитывается или выбирается исходя из условий устойчивости намывного сооружения. Рекомендованные значения заложения откосов представлены в табл. 5.2. [33, 62]

Таблица 5.2.

Рекомендованные значения заложения откосов. [33, 62]

Наименование откоса сооружения	Значения коэффициентов откоса* в зависимости от высоты сооружения и грунтов, м		
	5	5 – 10	10 – 15
Верховой	2/2-2,5	2,5/2,5-3	3/3
Низовой	1,75/2	2/2,25	2,25/2,25
Низовой (с дренажем)	1,5/2	1,75/2	1,75/2
* Отношение размеров основания откоса к его высоте;			
** В числителе – при глинистых грунтах, в знаменателе – при песчаных			

5.3. Анализ технологических факторов, обеспечивающих интенсивность процесса выщелачивания при формировании массива штабеля

Интенсивность процесса выщелачивания обосновывается предлагаемыми вариантами гидротранспортирования (подачи) смеси к месторасположению массива штабеля. Загрузочные аппараты вихревого

пульпоприготовления могут работать в двух технологических режимах гидротранспортирования.

Первый – предусматривает проведение процесса выщелачивания на стадии подачи горной массы в транспортную систему при загрузке рудного материала в загрузочно-обменные емкости гидротранспортной установки в т.ч. с использованием закрученных кольцевых струй жидкости при пульпоприготовлении (рис. 5.2а) [37]. 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.

Таким образом, в системе загрузочный аппарат – транспортный трубопровод возникает высокотурбулентный режим перемешивания раствора с рудной массой, которая 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 раствора реагента, при которых он растекается сплошным потоком по порам, трещинам и пустотам в

отличии от инфильтрационного, когда раствор только смачивает или покрывает тонкой пленкой поверхности, по которой они перемещаются.

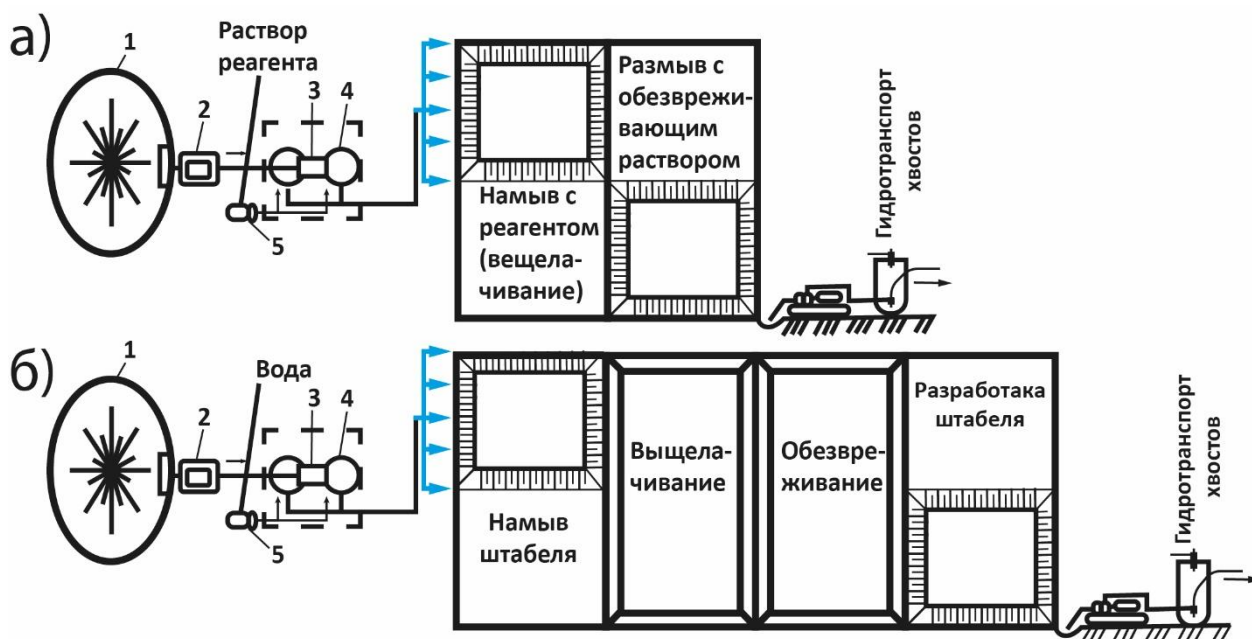


Рис. 5.2. Варианты формирования штабеля методом намыва: а – намыв штабеля с раствором реагента и размыв его с обезвреживающим раствором; б – гидронамыв штабеля с последующим выщелачиванием; 1 – навал горной массы; 2 – погрузчик с перегружателем для загрузки; 3 – загрузочный бункер; 4 – гидротранспортный аппарат вихревого пульпоприготовления; 5 – насос для воды или раствора реагента [37].

В итоге процесс выщелачивания осуществляется при полном контакте и взаимодействии каждой частицы (куска) с раствором реагента, что значительно интенсифицирует массообменные реакции, способствующие повышению извлечения ценных компонентов.

Аналогичный режим по ожидаемой эффективности можно назвать термином «скоростное выщелачивание», введенный впервые Плаксиным И. Н. в работе [68] и в дальнейшем разработанным в ЗабГУ [77]. Однако, принципиально технологические структуры значительно отличаются между собой.

Второй вариант (рис. 5.2б) формирования штабеля КВ гидротранспортными средствами – аналогичный процессу гидроотвалообразования [37], когда несущей средой твердого материала

является напорный поток воды, образующий при выпуске намывной массив с последующей укладкой на его поверхности оросительной системы, которые могут быть точечными, капельными, равномерным разбрызгиванием и прудковым смачиванием. Укладка оросителей может быть как открытой, так и закрытой [3].

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

Этот способ может быть также применен при использовании для выщелачивания агрессивными реагентами, при значительном их разбавлении в процессе обесшламливания перед созданием высоконасыщенной пульпы, транспортирования и формирования штабеля [37, 38].

При рассредоточенном гидронамыве штабеля он имеет все преимущества рыхлой структуры, но перед началом кучного выщелачивания, необходимо, чтобы штабель дренировался в течение двух-пяти суток [37].

Общим для этих вариантов являются способы намыва, которые осуществляются по распределительному трубопроводу, устанавливаемого заранее на эстакадах, определяющих ярус намыва, или на гребне дамбы обвалования. При этом высоконасыщенная гидросмесь поступает рассредоточено из ряда выпусков, расположенных по длине пульповода. Для предотвращения поступления из первых выпусков трубопровода наиболее насыщенных фракций намываемых пород, а из последних более мелких частиц, т.е. образования продольного фракционирования, что может привести к неравномерной по грансоставу укладке и раствороприемистости, намыв ведут с попеременным открытием выпусков, т. е. их чередованием на отдельные карты намыва. Равномерный отвод продуктивных растворов предотвращает образование вывалов, свищей и отдельных фильтрационных каналов.

5.4. Технологические схемы намыва массива штабеля

От выбора технологической схемы намыва штабеля во многом зависит качественное распределение горной массы по его объему, что в свою очередь влияет на основные технологические показатели, такие как уровень извлечения ценных компонентов и их содержание в растворах [3, 16].

Основной задачей при этом является равномерное распределение выщелачивающего раствора по всей намываемой поверхности штабеля для обустройства системы сбора и хранения оборотных (маточных) растворов [97].

На рис. 5.3 показан один из вариантов технологической схемы формирования (намыва) штабеля кольцевым способом при использовании в качестве несущей среды раствора реагента и размещения основных элементов КВ. При этом распределительный трубопровод с рассредоточенными выпусками, расстояние между которыми составляет 8-10 м, располагается на дамбах обвалования или эстакадах малой высоты.

Для уменьшения и предотвращения продольного фракционирования по длине намывных отложений количество одновременно открытых выпусков, как показывает опыт, определяют из расчета, чтобы средний расход каждого составлял 30-40 л/с (108-144 м³/ч) при скорости движения пульпы по пляжу 0,7-1,2 м/с [62]. Причем намыв рекомендуется вести сплошным фронтом и перемещать равномерно по всему контуру обвалования путем поочередного закрытия работающих выпусков и открытия соседних.

Технологически производят тонкослоевую укладку (0,2-1 м) в зависимости от гранулометрического состава исходных пород на отдельные карты намыва. Так интенсивность намыва изменяется от 0,2-0,4 м/сут для тонко- и мелкозернистых и 0,6-1,0 м/сут для крупнозернистых песков [59].

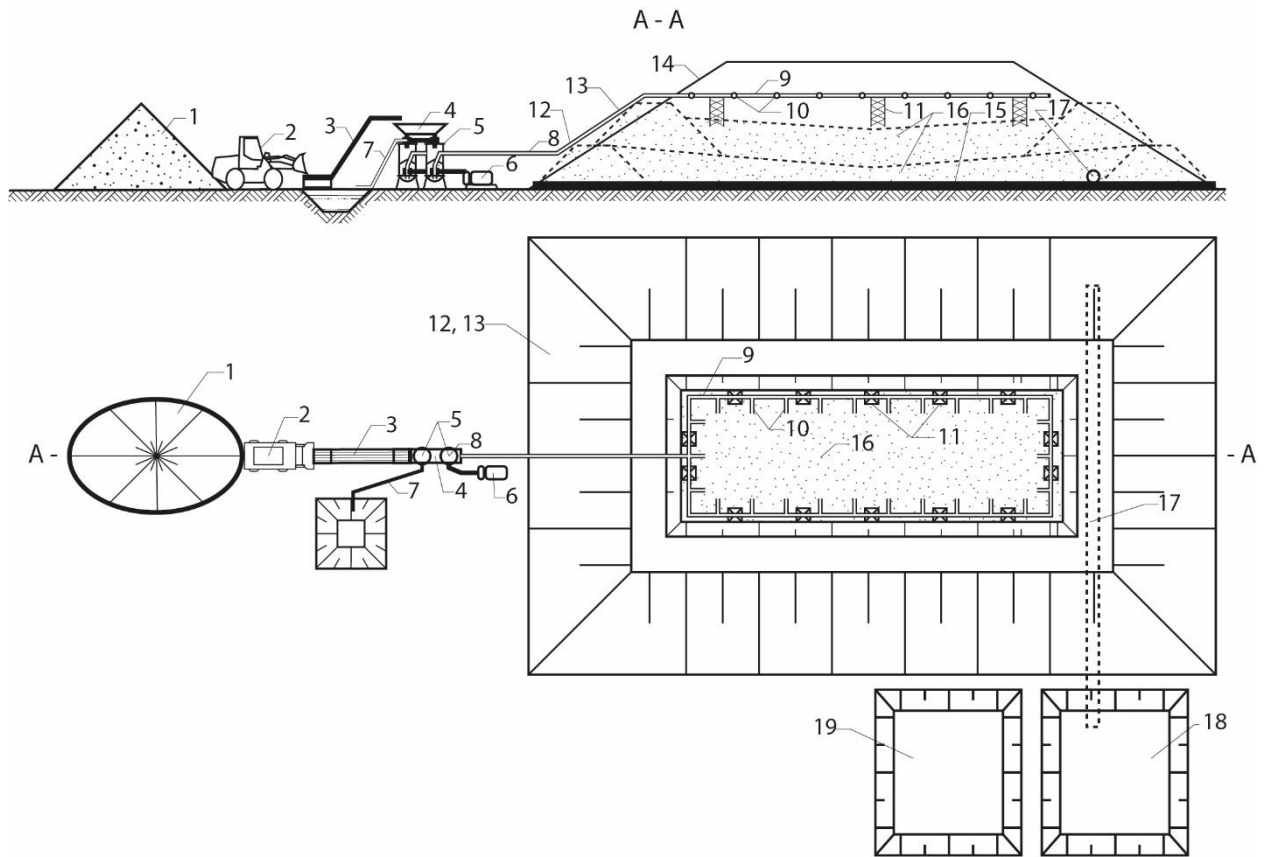


Рис. 5.3. Схема растворонамыва штабеля кольцевым способом: 1 – рудная масса; 2, 3 – погрузчик с перегружателем для загрузки; 4 – бункер для загрузки; 5 – загрузочно-обменные емкости; 6 – насос; 7 – слив глинистой суспензии и самотечный гидротранспорт к месту складирования; 8 – магистральный пульповод; 9 – распределительный трубопровод; 10 – выпуски; 11 – эстакады; 12 – дамба первичного обвалования; 13 – дамбы последующего обвалования; 14 – проектный контур штабеля; 15 – гидронепроницаемое основание; 16 – намытая рудная масса; 17 – перфорированная труба для отвода продуктивных растворов; 18 – карта продуктивных растворов; 19 – карта маточных растворов [37].

Кольцевой способ характеризуется значительными длиной укладываемого трубопровода и объемом дамб.

Двухсторонняя схема (рис. 5.4) может применяться для способа гидронамыва. Прудок-отстойник при этом может устраиваться в центре сооружения, а распределительные трубопроводы вдоль откосов дамбы параллельно друг-другу [60].

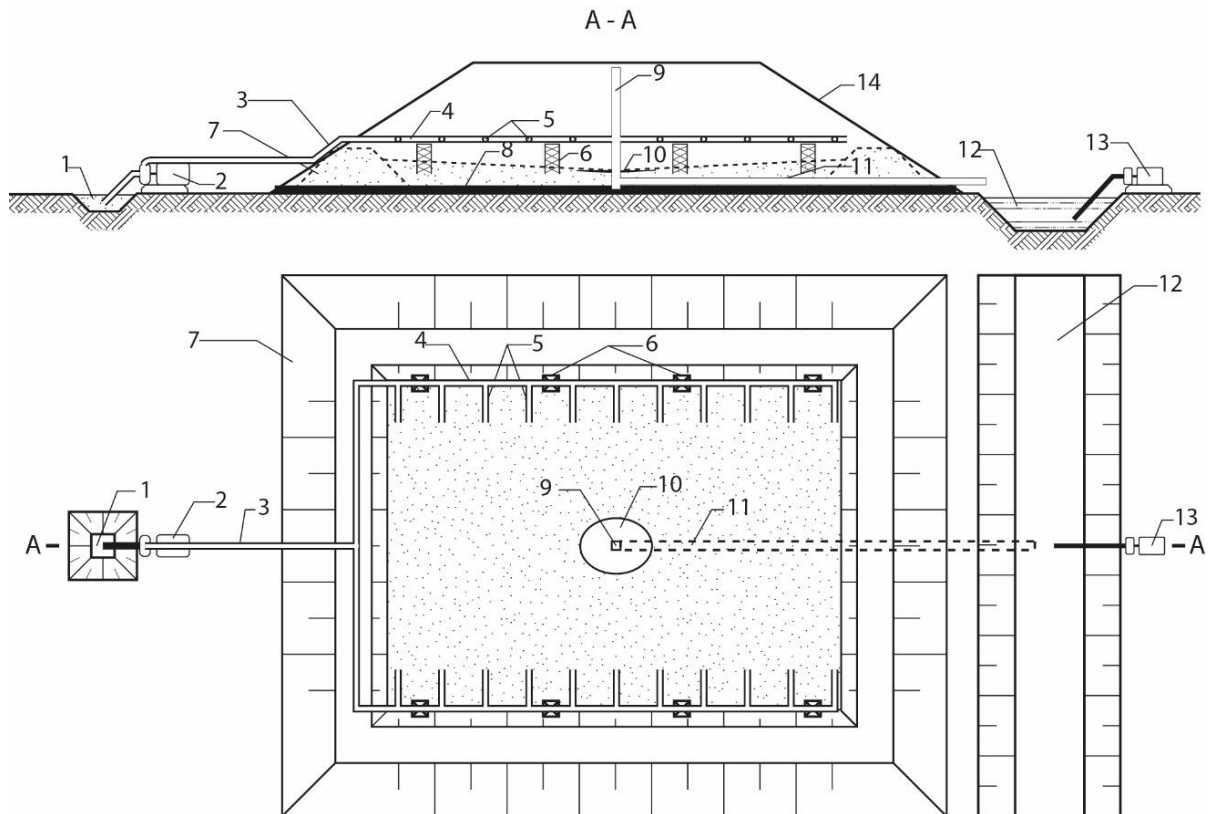


Рис. 5.4. Схема двухстороннего гидронамыва: 1 – зумпф; 2 – грунтонасос; 3 – магистральный пульповод; 4 – распределительный трубопровод; 5 – выпуски; 6 – эстакады; 7 – дамба первичного обвалования; 8 – дамбы последующего обвалования; 9 – гидронепроницаемое основание; 10 – водосбросной колодец; 11 – прудок-отстойник; 12 – водоотводящая труба; 13 – дренажная канава; 14 – насос для откачки продуктивных растворов; 15 – проектный контур штабеля.

При последовательном намыве с каждой стороны урез воды прудка у противоположной от намыва стороны не должен переходить за середину пляжа, а ширина карты намыва выходить за расчетные границы [62]. В случае пылевато-глинистых частиц отстойный пруд не может распространяться на боковые зоны сооружения.

Для намыва штабеля в условиях 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. 5.5) позволяет осуществлять дамбовое выщелачивание, особенностью которого является подготовка к размещению рудной массы за водоудерживающей плотиной, а выщелачивание производится с последовательным подъемом площадки под основание штабеля вверх по склону [38].

Таким образом, 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, часто с использованием перфорированных труб, ведущих к прудкам продуктивных растворов, в которых аккумулируются металлосодержащие растворы, вытекающие (просачивающиеся) из штабеля [38, 62].

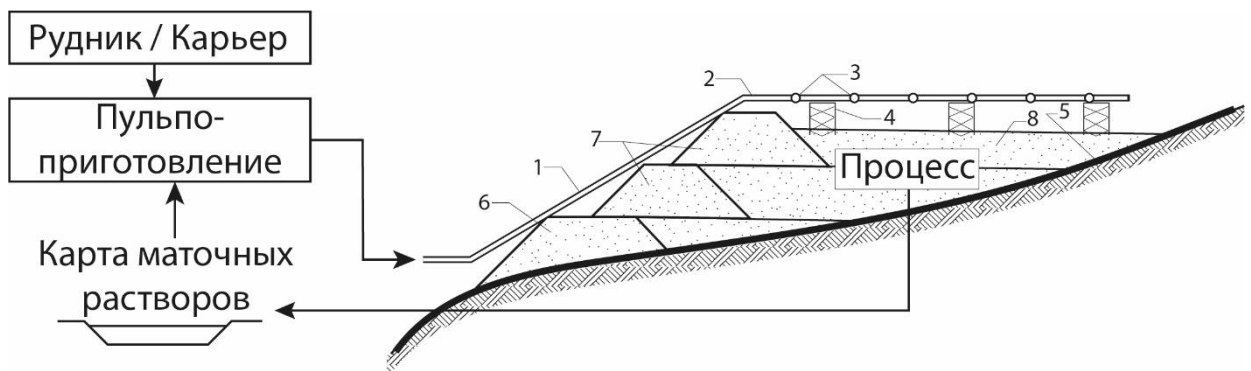


Рис. 5.5. Схема дамбового выщелачивания: 1 – магистральный пульповод; 2 – распределительный трубопровод; 3 – выпуски; 4 – эстакады; 5 – гидронепроницаемое основание; 6 – дамба первичного обвалования; 7 – дамбы последующего обвалования; 8 – намытая рудная масса.

После окончания технологического процесса рудная масса обезвреживается и затем рекультивируется аналогично отвалам вскрышных пород.

Для дамбового выщелачивания, в первую очередь, необходимо дополнительное усиленное основание и сооружение ограждающей плотины, которая подвергается гидростатическому давлению намытых пород в

растворонасыщенном состоянии, а также воздействию фильтрационного потока. Поэтому плотина является ответственным гидротехническим сооружением и к ней предъявляются все требования, которым должна отвечать водоудерживающая плотина [29]:

- устойчивость всего сооружения на сдвиг;
- устойчивость откосов на оползание;
- фильтрационная прочность тела гидротехнического сооружения;
- надежность защиты откосов от волнового воздействия воды (в пределах отстойного пруда);
- достаточное превышение гребня плотины над уровнем воды пруда отстойника.

При расположении сооружения в таких морфологических условиях, особенно с крутыми уклонами, необходимо дополнительное устройство водоотводящих траншей и водосбросных сооружений, в связи с возможностью большого количества паводковых вод и сложностью их аккумуляирования. [42]

В работе [97] отмечается, что надежность дамбового выщелачивания зависит также от прочности горной массы и ее способности сохранить проницаемость под нагрузками. Этот способ отличается значительными общими высотами сооружения, достигающие в США до 120 м при высоте одного этажа 13 м [16].

На рис. 5.6. показан вариант намывного массива из мелкозернистых частиц. Для его формирования производят распределительного пульповода на гребне дамб обвалования или на их выступах, специально сооружаемых для этого (рис. 5.6 а, б) длиной ~1 м через каждые ~10 м по оси друг от друга [62].

Рассредоточенные выпуски пульпы осуществляют через 5-6 м один от другого посредством шибберных 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.

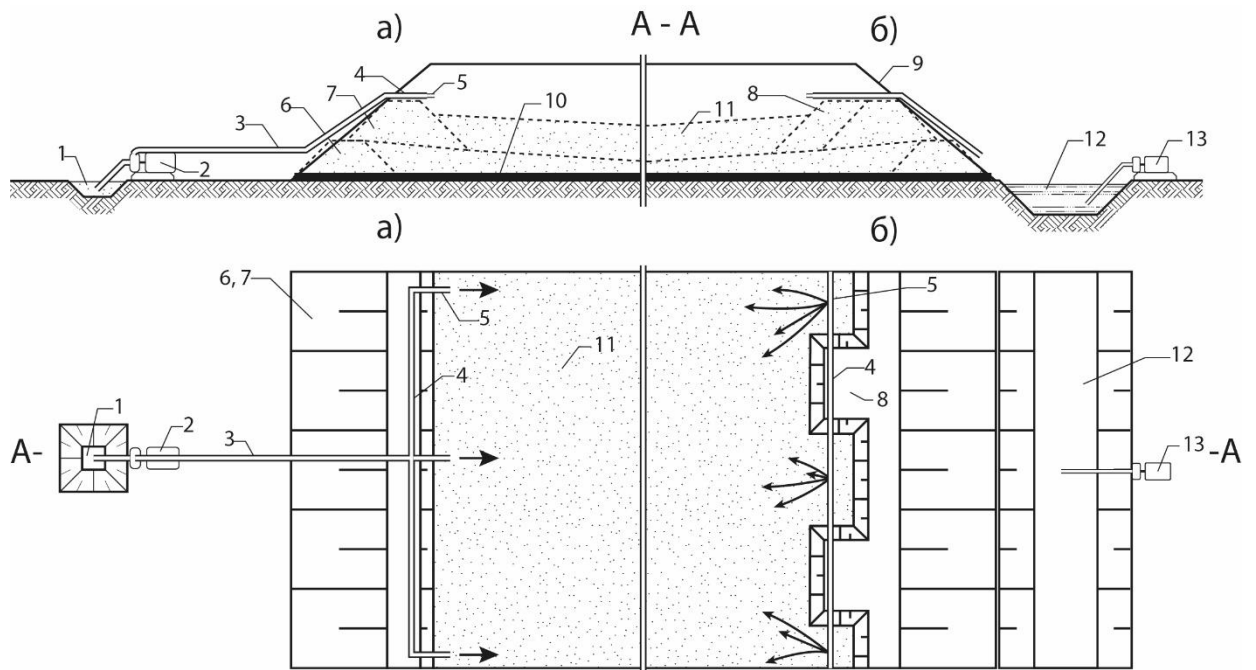


Рис. 5.6. Намыв штабеля с дамб обвалования: а) с гребня дамб; б) с выступов дамб; 1 – зумпф; 2 – грунтонасос; 3 – магистральный пульповод; 4 – распределительный трубопровод; 5 – выпуски; 6 – дамба первичного обвалования; 7 – дамбы последующего обвалования; 8 – выступы; 9 – проектный контур штабеля; 10 – основание; 11 – намытая рудная масса; 12 – дренажная канава; 13 – насос для откачки продуктивных растворов.

На рис. 5.7. показана схема гидроотвалообразования, которую можно использовать для намыва штабеля кучного выщелачивания. При этом распределительные трубопроводы, замкнутые на кольцо, располагаются на эстакадах, выпуск гидросмеси ведется рассредоточенным способом на карты намыва. При укладке и заполнении намытых пород на первой карте – она «отдыхает» (при гидронамыве) или в ней осуществляется процесс довыщелачивания при растворонамыве, в то время как намывается ярус следующей карты.

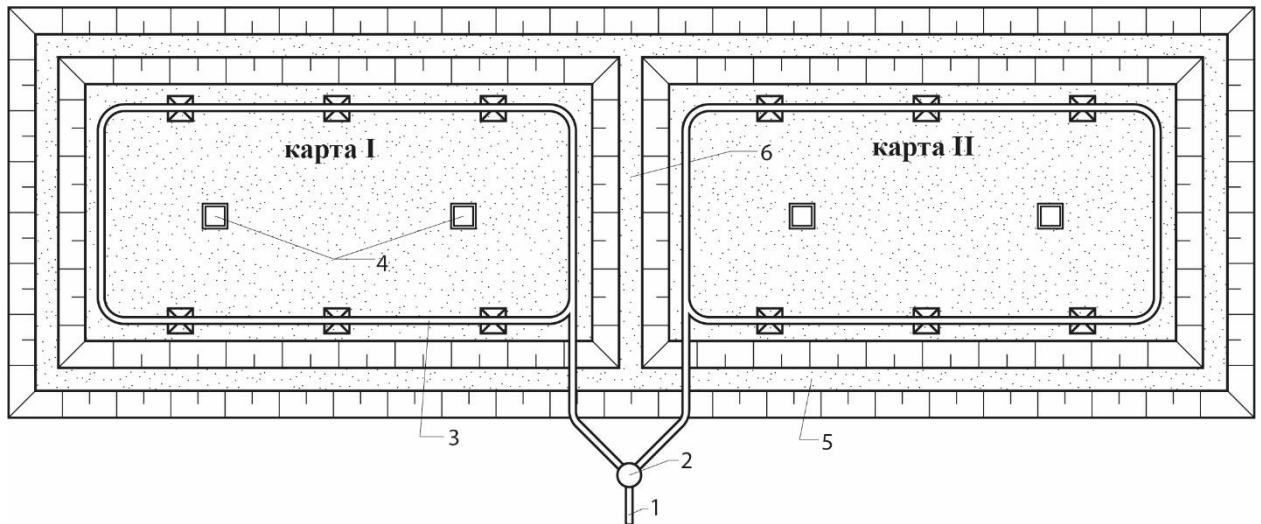


Рис. 5.7. Схема намыва с замкнутым на кольцо трубопроводом: 1 – магистральный пульповод; 2 – переключатель; 3 – распределительный пульповод; 4 – водосбросной колодец; 5 – дамбы обвалования; 6 – дамбы поперечного обвалования.

Технологическая схема завершающей операции – разборки и обезвреживания штабеля может осуществляться гидромониторно-грунтонасосным (рис. 5.8) либо экскаваторно-гидравлическим способами с последующим гидротранспортом выщелоченной породы к месту постоянного складирования. Это позволяет прежде всего организовать высокоэффективный поточный процесс с минимальными затратами и сокращением землеройно-транспортной техники. Гидротранспорт выщелоченной породы с помощью загрузочно-обменного аппарата вихревого пульпоприготовления значительно увеличивает производительность организуемого таким образом грузопотока путем подачи на большие расстояния гидросмеси высокой плотности. Кроме того, намыв хвостовых отвалов на местах постоянного складирования значительно ускоряется при подаче на карты намыва высоконасыщенных гидросмесей [37, 20].

Гидромеханизированная технология переработки выщелоченного штабеля позволяет также повысить эффективность способа в целом посредством совмещения разработки штабеля с помощью гидромониторов с отмывкой при подаче на гидромониторы технологической воды. Гидротранспортирование выщелоченной породы к месту постоянного

складирования можно совместить с обезвреживанием путем транспортирования пустой породы в потоке нейтрализующего либо обезвреживающего реагента, что значительно ускоряет процесс отработки штабеля [97].

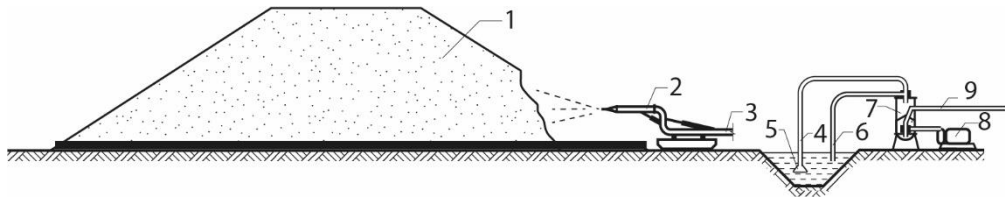


Рис. 5.8. Схема гидромониторной разборки выщелоченного штабеля: 1 – штабель; 2 – гидромонитор; 3 – водовод; 4 – пульповод для загрузки; 5 – гидроэлеватор; 6 – трубопровод слива избыточной жидкости; 7 – загрузочно-обменный аппарат вихревого пульпоприготовления; 8 – насос; 9 – магистральный пульповод.

Выводы по главе 5.

1. Разработана и апробирована в лабораторных условиях технология подготовки и создания непроницаемого основания под штабель при подаче гидросмеси со специальными колюматизирующими добавками или реагентами, обеспечивающими быстрое твердение уложенного материала и предохранение его от протечек.
2. Даны рекомендации сооружения дамб первичного и последующего обвалования с их технологическими параметрами (объем земляных работ на 1 м по высоте, ширина, высота и углы заложения откосов) в зависимости от типа пород.
3. Обоснована технология сооружения штабеля растворомывом гидротранспортными аппаратами, позволяющая интенсифицировать процесс кучного выщелачивания, за счет увеличения турбулизации и массообмена в замкнутой технологической цепи: установка – транспортный трубопровод с рассредоточенным выпуском растворосмеси в фильтрационном режиме на карты (ярусы) намыва.
4. Рекомендован гидронамыв штабеля также формирующий рыхлую структуру массива с последующей укладкой на его поверхности оросительных

систем с возможным применением раствора при его значительном разбавлении в процессе обесшламливания.

5. Установлены способы и режимы рассредоточенной подачи гидросмеси на карты (ярусы) намыва для предотвращения продольного фракционирования.

6. Предложены технологические схемы намыва штабеля кучного выщелачивания (кольцевая, двухсторонняя, дамбовая) с учетом морфологических особенностей рельефа.

7. Предложена технологическая схема разборки, обезвреживания и транспортирования выщелоченной горной массы средствами гидромеханизации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ способов сооружения штабелей кучного выщелачивания цикличной землеройной и транспортной техникой выявил негативные факторы процесса выщелачивания: уплотнение его структуры и слеживаемость отсыпаемых слоев горной массы, сегрегация частиц, образование отдельных фильтрационных каналов, вывалов, свищей. Предложен альтернативный способ сооружения штабеля методом намыва гидротранспортными установками.

1. Определено, что необходимым условием формирования штабеля кучного выщелачивания является намыв сгущенной пульпы с объемной концентрацией $>30\%$ загрузочными аппаратами вихревого пульпоприготовления, либо грунтонасосами с определенными расходно-напорными характеристиками, рассчитанными по методике ВНИИ Гидромаш с корректирующими коэффициентами, а также пульпоприготовительными установками, безвакуумным струйным гидротранспортным устройством и др.
2. Результаты опытно-промышленных и экспериментальных исследований в лабораторных условиях выявлены оптимальные режимы гидротранспортирования пород для формирования разрыхленной структуры штабеля: повышенная концентрация и пониженный удельный расход, при которых плотность массива снижается на 12-20% в зависимости от гранулометрического состава.
3. Формирование неуплотненного массива штабеля производится рассредоточенным способом намыва через распределительный пульповод, расположенный на невысоких эстакадах или гребнях дамб обвалования с чередованием выпуска гидросмеси для предотвращения продольного фракционирования по длине намывных отложений.
4. Разработана и апробирована в лабораторных условиях технология подготовки и создания непроницаемого основания под штабель при подаче гидросмеси со специальными кольматирующими добавками или реагентами,

обеспечивающими быстрое твердение уложенного материала и предохранение его от протечек.

5. Разработана новая технология сооружения штабеля растворонамывом гидротранспортными аппаратами, позволяющая интенсифицировать процесс кучного выщелачивания за счёт увеличения турбулизации и массообмена в замкнутой технологической системе: транспортная установка - трубопровод с выпуском смеси в фильтрационном режиме на карты намыва.

6. Рекомендован гидронамыв штабеля, также формирующий рыхлую структуру массива с последующей укладкой на его поверхности оросительных систем (вращающихся импульсных разбрызгивателей, распылителей Вобблера, виглеров, погружных эмиттеры, напорных шланговых распределителей).

7. Установлены способы и режимы подачи гидросмеси на карты (ярусы) намыва и обоснованы технологические схемы формирования штабеля (кольцевая, двухсторонняя, дамбовая) с учетом морфологических особенностей рельефа.

8. Предложена технологическая схема разборки, обезвреживания и транспортирования выщелоченной горной массы к месту складирования средствами гидромеханизации.

9. В совокупности всех результатов научных исследований, обосновано, что намывной массив штабеля кучного выщелачивания – это специальное гидротехническое сооружение с гидроизолирующим основанием, обеспечивающими полную сохранность растворов, а также прием раствора реагента с физико-химическим растворением ценных компонентов, получение продуктивных растворов, сбор через систему дренажных труб или траншей и их отвод на переработку или рекультивацию.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Александров В. И., Собота Иржи Вибродиагностика технического состояния грунтовых насосов // Записки горного института. 2016. Т.218 с. 242-250.
2. Альтшуль А.Д., Киселев Н.П. Гидравлика и аэродинамика. Основы механики жидкости // -М.: Стройиздат, 1975. -323 с.
3. Аренс В. Ж., Артушкевич В. А., Фазлуллин М. И., Хчеян Г. Х., Шумилова Л. В. Технологии скважинного и кучного выщелачивания металлов // -М.: Дом НИТУ "МИСиС", 2018. -280 с.
4. Бабичев Н. И. Исследования по применению и внедрению гидромеханизации в условиях заказа 2145 // -М.: Канд. дисс., 1968.
5. Бенретем А., Хаддуш А., Хафсауи А., Хаджаж Влияние твердых частиц на характеристики центробежных насосов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал), 2003. №6 с. 45-47.
6. Бессонов Е. А. Методы повышения производительности земснарядов для условий Крайнего Севера // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал), 2011. №1 с. 116-124.
7. Бессонов Е. А. Энциклопедия гидромеханизированных работ: словарь-справочник //- М.; Центр, 2005. -520 с.
8. Борщевский Ю. Т., Федоткин И. М., Погодаев Л. И. Повышение эффективности землесосных снарядов // -Киев: Издательство "Будевельник", 1974. - 247 с.
9. Брюховецкий О.С., Антипова О.В. К расчету параметров гидротранспортирования пород вскрыши лебединского месторождения КМА // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. 2010. № 1. С. 76-78.
10. Бубнов В. К., Воробьев А. Е., Голик Ви. И. и др. Теория и практика добычи полезных ископаемых для комбинированных способов выщелачивания // –Целиноград: Жана-Арка, 1992. -546 с.

11. Бутов А. С., Кошлаков Г. А., Рощупкин Д. В. Передовые методы работы машинистов землесосных снарядов // -М.: Трансжелдориздат, 1957. -24 с.
12. Валиев Н. Г., Хайдаршин А. Н. Обеспечение водонепроницаемости основания штабеля при кучном выщелачивании // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал), 2005. №2 с. 231-235.
13. Вильмис А. Л. Обоснование технологии глубоководного гидроподъема железомарганцевых конкреций грузочными аппаратами с минимальным негативным воздействием на окружающую среду // -М.: докт. дисс. 2021. -196 с.
14. Вильмис А.Л. Аналитическая оценка и систематизация грузочных аппаратов камерного типа // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал), 2015. № S11 с. 168-177.
15. Вильмис А.Л., Дробаденко В.П., Луконина О.А. Проблемы и перспектива освоения минеральных ресурсов. Тезисы докладов 14 международной научно-практической конференции «Новые идеи в науках о Земле» – М.: МГРИ-РГГРУ, 2019. Т. 2., с. 53-56.
16. Водолазов Л. И., Дробаденко В. П., Лобанов Д. П., Малухин Н. Г. Геотехнология. Кучное выщелачивание бедного минерального сырья // -М.: Изд. Московской геологоразведочной академии. -1999. -300 с.
17. Воробьев А. Е. Основные проблемы кучного выщелачивания золота из техногенного минерального сырья // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал), 2000. №9. с. 34-34.
18. Воробьев А.Е., Каргинов К.Г., Одинцова К.В., Чекушина Т. В. Типизация систем орошения выщелачиваемой руды и сбора продуктивных растворов // Горный информационно-аналитический бюллетень 2001. №9, сс. 54-60.
19. Голик В. И., Страданченко С. Г., Масленников С. А. Концепция добычи металлов выщелачиванием // Вестник Кемеровского государственного университета. Серия: Биологические, технические науки и науки о Земле, 2018. №1 с. 49-60.

20. Голик В.И., Сарычев В.И., Абрамкин Н.И., Сафронов В.П. Оптимизация параметров гидротранспорта хвостов выщелачивания руд цветных металлов // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. 2018. № 3. С. 150-158.
21. Головин А. В. Совершенствование технологии освоения редкометальных россыпных месторождений при рациональном использовании гидротранспорта высоконасыщенных смесей // канд. дисс., Москва, 2002. 139 с.
22. Горюнов С. И. Способ приближенного расчета напорного гидротранспорта несвязных грунтов // -Л.: Госэнергоиздат, 1955. -44 с.
23. Диминский К. В. Гидростатические способы измерения консистенции гидросмеси в трубопроводах гидротранспортных установок // -Киев: Автореферат дисс. на соискание ученой степени кандидата технических наук, 1967. - 16 с.
24. Дмитриев Г. П., Смолдырев А. Е. Гидротранспорт руд и концентратов // - М.: б. и., 1966. - 60 с.
25. Дорбрецов В. Б., Лигоцкий Д.Н. Гидромеханизация и эксплуатация подводных месторождений // -Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский горный ин-т, 2002. -104 с.
26. 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.
27. Дробаденко В. П., Гриневич В. В., Антонов Ю. Г. Опыт работы комплекса "Гидроэлеватор-грунтовый насос" при подаче песков на обогащение// -М.: Экспресс-информация, 1988 №7 20 с.

28. Дробаденко В. П., Диминский К. В., Александров И. Л., Чепов С. Ю. Установка для гидротранспорта сыпучих материалов // Патент SU 1168496, опубл. 23.07.1985.
29. Дробаденко В. П., Кисляков В.Е., Луконина О.А. Гидротехнические сооружения при открытой геотехнологии // — Санкт-Петербург : Лань, 2019. -304 с.
30. Дробаденко В. П., Лобанов Д. П., Малухин Н. Г. Новая технология кучного выщелачивания способом намыва // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2000. №5 с. 28-32
31. Дробаденко В. П., Луконина О. А. Установка для гидротранспорта твердых материалов // Патент SU 1699879, опубл. 23.12.1991.
32. Дробаденко В. П., Луконина О.А., Малухин Н.Г. Загрузочно-обменная емкость установки для гидротранспортирования сыпучих материалов // Патент RU 2 077 465 C1, опубл. 10.01.1993.
33. 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.
34. 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.
35. 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.
36. Дробаденко В. П., Малухин Н. Г., Луконина О. А. Расширение сырьевой базы благородных металлов на основе новых гидротехнологий // Горный

информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал), 2002. №1 с. 146-148.

37. Дробаденко В. П., Малухин Н. Г., Скрипченко В. В., Луконина О. А., Мальцев Г. Б., Остроумова И. Д. Способ кучного выщелачивания // Патент RU 2 095 562 C1, опубл. 10.11.1997.

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

39. Дробаденко В. П., Салахов И. Н. Особенности определения расходно-напорных характеристик грунтонасосов при работе на гидросмесях различных плотности и грансостава // Недропользование XXI век. 2020. № 6 (89). С. 122-131.

40. Дробаденко В.П., Малухин Н.Г., Луконина О.А., Лев А.М. Расширение области применения новых конструкций гидротранспортных аппаратов // Избранные научные труды. К 100-летию со дня рождения профессора С.М. Шорохова. – М.: РГГРУ. – 2006.

41. Дятлов В.М., Леванов Н.И., Тухель А.Э., Ялтанец И.М. Переработка горных пород с использованием средств гидромеханизации // -М.: Горная книга. 2008. -318 с.

42. Евдокимов П. Д., Сазонов Г. Т. Проектирование и эксплуатация хвостовых хозяйств обогатительных фабрик // -М.: Недра, 1978. -439 с.

43. Железняков Г. В., Ибад-заде Ю. А., Иванов П. Л. И др. (под общей редакцией Недриги В. П.) Гидротехнические сооружения (Справочник проектировщика) // -М.: Стройиздат, 1983. -543 с.

44. Животовский Л. С. Приближенный метод построения характеристик землесосов // Механизация строительства, 1949. №9 П. 13.

45. Животовский Л. С., Смойловская Л.А. Лопастные насосы для абразивных гидросмесей // -М.: Машиностроение, 1978. -223 с.

46. Журин В. Д., Юфин А. П. Оборудование гидромеханизации // -М.: Горстройиздат, 1961. -299 с.

47. Жученко В.А. Иванников В.В. Устройство для загрузки твердых материалов в напорный трубопровод гидротранспортной установки // Патент на изобретение SU 195368 A1, опубл. 12.04.1967.
48. Инструкция по гидравлическому расчету систем напорного гидротранспорта грунтов, под редакцией И. А. Гиршкана // -Л.: Энергия, 1972. -32 с.
49. Исследование, расчет и конструирование гидромашин // сборник науч. тр. ВНИИгидромаша, - М. : ВНИИгидромаш, 1979. - 136 с.
50. Казаков В.А. Продление сезона гидромеханизированных работ в районах Крайнего Севера // Гидротехническое строительство. 2020. № 12. С. 48-52.
51. Карасик В. М., Асауленко И. А. Напорный гидротранспорт песчаных материалов // -Киев: Наукова думка, 1966. - 107 с.
52. 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.
53. 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.
54. Машковцев Г. А., Тигунов Л. П., Быховский Л. З. Перспективы применения в России геотехнологических способов добычи твердых полезных ископаемых // Вестник РАЕН, 2013. Т. 13, № 5 с. 26-31.
55. Меламут Д. Л. Гидромеханизация в мелиоративном и водохозяйственном строительстве // - М.: Стройиздат, 1981. - 303 с.
56. Меньшиков С. С. Повышение эффективности эксплуатации грунтовых насосов в условиях гидроабразивного износа // -Санкт-Петербург: канд. дисс., 2014. -148 с.

57. Насосы для перекачивания абразивных гидросмесей. Бобруйский машиностроительный завод // Каталог, 2016. -23 с.
58. Нормы технологического проектирования предприятий промышленности нерудных строительных материалов // -Л.: Стройиздат, 1968. -358с.
59. Нурок Г. А. // Процессы и технология гидромеханизации открытых горных работ // М.: Недра, 1985. -471 с.
60. Нурок Г. А., Лутовинов А. Г., Шерстюков А. Д. Гидроотвалы на карьерах // -М.: Недра, 1977. -311 с.
61. Оборудование для гидромеханизации (Альбом-справочник) // -М.: ЦБТИ, 1965. Т.1, -105 с.
62. Огурцов А. И. Намыв земляных сооружений // -М.: Стройиздат 1974. - 366 с.
63. Отчет о НИР «Изыскание эффективной технологии вскрышных работ мощной землеройной техникой в комплексе с гидротранспортом для Северо-Востока СССР» Н. И. Демин, С. В. Потемкин, В. Ф. Хныкин, В. П. Дробаденко, В. В. Гриневич. -М.: 1981. -120 с.
64. Отчет о НИР «Опытно-промышленные работы по размыв песков в навале с максимальной дезинтеграцией и последующим гидротранспортом в условиях Леменского месторождения» И. Ф. Григорьев, Ю. М. Найденко, А. М. Лимитовский, Г. Н. Попов, С. М. Шорохов, В. П. Дробаденко, Е. К. Клубничин, В. И. Соколов. -М.: 1973. -108 с.
65. Отчет о НИР «Создание новых и совершенствование существующих схем и средств разработки горных пород способом гидромеханизации на месторождении КМА» // -Губкин: НИИКМА им. А. Д. Шевякова, 1970.
66. Отчет о НИР. Изыскание технологии добычных работ и транспорта с использованием гидромеханизации в условиях ВДГМК Дробаденко В.П., Селезнев В.М., Луконина О.А.// М., 1984 г.
67. Охотин В. В. Грунтоведение // -Л. : Воен.-трансп. акад. Кр. Армии им. Л. М. Кагановича, 1940. - 204 с.

68. Плаксин И. Н. Гидрометаллургия //-М.: Наука, 1972. -278 с.
69. Плотников Н. А., Алексеев В. С. Проектирование и эксплуатация водозаборов подземных вод // М.: Стройиздат, 1990. -256с.
70. Покровская В. Н. Трубопроводный транспорт в горной промышленности // -М. : Недра, 1985. - 192 с.
71. Попов Ю. А., Лаптев В. С., Лизунов Е. В., Седов В. А. Системный подход к обоснованию проектной грунтопроизводительности земснарядов при гидромеханизированном способе производства земляных работ // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал), 2009. №11 с. 206-214.
72. Правила 28-64 измерения расхода жидкости, газов и паров стандартными диафрагмами и соплами // -М.: Изд-во стандартов, 1965. - 148 с.
73. Прохоренко Г. А. Применение кучного выщелачивания золота из руд техногенных месторождений // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал), 2000. №3 с. 86-89.
74. Рекомендации по намыву шламов в плотины и дамбы шламохранилищ железорудных горнообогатительных комбинатов // -Киев: Госстрой УССР, 1967. -119 с.
75. Рекомендации по проектированию и строительству шламонакопителей и хвостохранилищ металлургической промышленности // Союзный научно-исследовательский институт водоснабжения, канализации, гидротехнических сооружений и инженерной гидрогеологии (ВНИИ ВОДГЕО) ГОССТРОЯ СССР. -М.: Стройиздат 1986. -130 с.
76. Романенко Б. Е. Эффективные режимы и способы работы землесоса // -Л.: Речной транспорт, 1954. - 184 с.
77. Рубцов Ю. И., Авдеев П. Б., Черкасов В. Г., Лавров А. Ю. Основные принципы скоростного активированного кучного выщелачивания золота // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2021. №3 с. 88-98.

78. Савичев О. Г., Крамаренко В. В. Расчет водохранилища: водохозяйственное обоснование и определение параметров // -Томск: издательство Томского политехнического университета, 2009. 40 с.
79. 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.
80. 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.
81. 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.
82. 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.
83. 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.
84. Семенов Д.А., Вахрушев С.И. Методика выбора земснаряда для выемки песчано-гравийной смеси со дна реки Кама // Известия КазГАСУ. 2016. №4 (38) с. 451-458.
85. Семенова К. М. Влияние рельефа местности и технологии намыва на эффективность гидроотвалообразования // Маркшейдерский вестник. 2013. №3(95) с. 37-40.

86. Семенова К. М. Совершенствование технологии гидроотвалообразования на основе подачи высоконасыщенных гидросмесей с учетом геоморфологических факторов // -М.: Канд. дисс., 2013. -171 с.
87. Силин Н. А. и Аищенко И. А., Диминский К. В., Кондаков В. Н., Стовбун И. И. Приборы для измерения параметров гидротранспортирования твердых материалов // -Киев: Изд-во Акад. наук УССР, 1963. -200 с.
88. Смолдырев А. Е. Гидравлический и пневматический транспорт в металлургии и горном деле, Металлургия, М. 1967. -367 с.
89. СН 551-82 Инструкция по проектированию и строительству противофильтрационных устройств из полиэтиленовой пленки для искусственных водоемов (Утверждена постановлением Государственного комитета СССР по делам строительства от 31 мая 1982 г. № 148).
90. СНиП 2.01.28.-85 "Полигоны по обезвреживанию и захоронению токсичных промышленных отходов. Основные положения по проектированию" (утв. постановлением Госстроя СССР от 26 июня 1985 г. N 98).
91. СНиП II-53-73 Плотины из грунтовых материалов (утв. Государственным комитетом Совета Министров СССР по делам строительства 04.1973).
92. СНиП И-И.5-62 Плотины земляные. Намывные нормы проектирования (Утверждены Государственным комитетом Совета Министров СССР по делам, строительства 17 ноября 1962 г.).
93. Сорочан Е.А., Трофименков Ю.Г. Основания, фундаменты и подземные сооружения // -М.: Стройиздат, 1985. -480 с.
94. Спиваковский А. О., Смолдырев А. Е., Зубакин Ю. С. Автоматизация трубопроводного транспорта // -М.: Недра, 1972. - 342 с.
95. Технические условия и нормы на проектирование и возведение земляных намывных плотин // -М.: Государственное издательство литературы по строительству, архитектуре и строительным материалам, 1959, 228 с.

96. Тимошкин А. В. Повышение эффективности гидромеханизированной разработки каолинизированных россыпей на основе совершенствования работы забойных грунтонасосных установок // -М.: Канд. дисс. 1987. -183 с.
97. Фазлуллин М. И. Кучное выщелачивание благородных металлов // -М.: Изд. Академии горных наук, 2001, -647 с.
98. Фридман Б. Э. Гидромеханизация земляных работ // -М.: Металлургиздат, 1949, 398 с.
99. Халезов Б. Д., Ватолин Н. А., Неживых В. А., Тверяков А. Ю. Сырьевая база подземного и кучного выщелачивания // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал), 2002. №5 39-40 с.
100. Харин А. И., Новиков М. Ф. Гидромеханизация земляных работ в строительстве // - М. : Стройиздат, 1989. -191 с.
101. Хныкин В. Ф., Хузин Ю. Ш., Триандафилов М. С. Гидровскрышные работы на карьерах горнорудной промышленности // - М.: Недра, 1973. -109 с.
102. Холин Н. Д., Словутский С. О., Никонов Г. П. Гидромеханизация вскрышных работ на угольных карьерах // -М.: Углетехиздат, 1948. -123 с.
103. Центробежные насосы для абразивных гидросмесей // Каталог под редакцией Д. С. Сомойловича, цинтихимнефтемаш, М. 1989. -25 с.
104. Чаплыгин В. В., Демченко А. В. Состояние и возможности гидромеханизации на разрезах Кузбасса // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал), 2015. №S11 с. 410-418.
105. Чаповский Е. Г. Лабораторные работы по грунтоведению и механике грунтов // -М.: «Недра», 1966. -154 с.
106. Чернов А. И. Гидромеханизация открытых горных работ в условиях Северо-Востока СССР // -Магадан: Магаданское книжное издательство, 1970. -248 с.
107. Шкундин Б. М. Землесосные снаряды // -М.: Энергия, 1973. -267 с.
108. Шкундин Б. М. Машины для гидромеханизации земляных работ // -М.: Стройиздат, 1974. -184 с.

109. Штин С. М. Рыбинскому ЗАО «Завод гидромеханизации» - 65 лет // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал), 2015. №S11. с. 419-426.
110. Юфин А. П. Гидромеханизация // -М. 2-е, перераб. и доп. издание. 1974, -223 стр.
111. Ялтанец И. М. Виды горных и строительных работ, выполняемых средствами гидромеханизации // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал), 2010. №10 с. 26-36.
112. Ялтанец И. М. Проектирование открытых гидромеханизированных и дражных разработок месторождений // М.: Издательство Московского государственного горного университета, 2003. -758 с.
113. Ялтанец М. И. Проектирование гидромеханизации открытых горных работ // - М. : Изд-во Моск. гос. горн. ун-та, 1994. - 480 с.
114. Ялтанец М. И. Справочник по гидромеханизации // - М.: Горная книга, 2011. - 736 с.
115. Burgess K. E. and Reizes A. The effect of sizing specific gravity and concentration on the performace of centrifugal pumps. Proc Inst Mech Engr vol 19036/76 p. 91.
116. Fairbank L. A., Solids in suspension, effects on the characteristics of centrifugal pumps. Trans ASME 1968. -68 с.
117. Kruseman G.P., Ridder N.A. Analysis and evaluation of pumping test data. 1994. P.21.
118. O'Brien and G. Folsom The transortation of sand in pipelines, University of California Press Barkeley, 1939 California.
119. Vocaldo J. and Sagoo M. S. Slurry flow in pipes and pumps. Trans ASME vol95 series B, Journal of Engineering industry №1 Feb 1973 p.65.