

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**  
**федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования**  
**«КУЗБАССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Т.Ф.ГОРБАЧЕВА»**  
**Филиал КузГТУ в г. Белово**

Кафедра Горного дела и техносферной безопасности

**СПЕЦИАЛЬНЫЕ СПОСОБЫ РАЗРАБОТКИ Рыхлых ОТЛОЖЕНИЙ**

Методические материалы для выполнения лабораторных работ

для обучающихся всех форм обучения

специальность «21.05.04 Горное дело»

специализация: 03 «Открытые горные работы»

Составитель В. В. Аксененко

Рассмотрены на заседании кафедры

Протокол № 11 от 16.06.2023г.

Рекомендованы учебно-методической комиссией по специальности 21.05.04 «Горное дело» в качестве электронного издания для использования в образовательном процессе  
Протокол № 8 от 20.06.2023г.

Белово 2023

## Введение

Целями освоения дисциплины «Специальные способы разработки рыхлых отложений» является формирование у обучающихся навыков выполнения важнейших инженерно-технических расчетов, применяемых при разработке месторождений полезных ископаемых открытым способом. Дисциплина формирует теоретические знания, практические навыки, вырабатывает компетенции, которые дают возможность выполнять следующие виды профессиональной деятельности:

- производственно-технологическую;
- проектную;
- научно-исследовательскую;
- организационно-управленческую.

Методические материалы по проведению занятий и организации самостоятельной работы обучающихся предназначены для изучения и закрепления знаний по дисциплине «Специальные способы разработки рыхлых отложений» и составлены в соответствии с рабочей программой дисциплины.

Лабораторные работы выполняются каждым обучающимся самостоятельно в соответствии с данными индивидуального задания, выдаваемого преподавателем. К выполнению задания следует приступать после изучения соответствующего теоретического материала по теме. В методических материалах приведен перечень рекомендуемой учебной и нормативной литературы.

Методические материалы позволяют во время аудиторных занятий, при поддержке преподавателя, изучить ту или иную методику, а затем самостоятельно выполнить необходимые расчеты и чертежи по индивидуальному заданию. Все расчеты выполняет каждый обучающийся самостоятельно в соответствии с заданием. По каждой работе обучающиеся самостоятельно оформляют отчеты.

Содержание отчета:

1. Тема работы.
2. Задачи работы.
3. Краткое описание хода выполнения работы.
4. Ответы на задания или полученные результаты по окончании выполнения работы (схемы, чертежи).
5. Выводы.

# 1. Методические материалы для выполнения лабораторных работ

## Лабораторная работа №1

**Тема: №1 «Физико-механические свойства горных пород и их влияние на выбор технических решений в гидромеханизации».**

**Цель работы:** изучить физико-механические свойства горных пород, оказывающие наибольшее влияние на процессы гидромеханизации.

### 1.1. Общие сведения

Гидромеханизация нашла широкое распространение при разработке рыхлых осадочных пород, почв и слабых полезных ископаемых. В то же время в гидромеханизированных процессах транспортирования, укладки породы в отвалы, намыве закладочного материала и технологической обработки встречаются все виды горных пород и полезных ископаемых.

В процессах гидромеханизации поток жидкости или струя воздействуют на горные породы, находящиеся как в естественном состоянии (в целике), так и в разрыхленном или раздробленном состояниях. Учет свойств пород при этом имеет большое практическое значение.

Физико-механические свойства пород определяют такие важнейшие технологические параметры гидромеханизации, как, например, удельный расход воды, требуемый напор для разрушения грунта, параметры гидротранспорта пород, параметры гидроотвалов и др. Свойства горных пород определяют последовательность и содержание технологических операций, параметры основного оборудования и его износ (табл. 1.1).

Таблица 1.1

Основные технологические процессы и влияние на них физико-механических свойств пород

Производственные процессы	Характеристика физико-механических свойств пород
Размыв грунта гидромониторами	Плотность, прочность на раздавливание, коэффициент сцепления, угол внутреннего трения, размокаемость, пластичность, гранулометрический состав, коэффициент фильтрации, пористость
Гидротранспорт грунта	Гранулометрический состав, плотность, гидравлическая крупность, форма частиц, измельчаемость при гидротранспорте, абразивность
Намыв сооружений и укладка грунта в отвал	Гранулометрический состав, водоотдача, гидравлическая крупность, плотность, коэффициент фильтрации, угол внутреннего трения, коэффициент сцепления, угол откоса при намыве, набухание

Физико механические свойства оказывают наиболее сильное влияние на эффективность гидромеханизации и по существу определяют область ее применения.

В связи с тем, что свойства горных пород подробно изучаются в курсе «Геология», «Геомеханика» и в ряде других дисциплин, ниже рассмотрены только свойства пород, оказывающие наибольшее влияние на процессы гидравлического способа разработки.

## 1.2. Основные физико-механические свойства пород

Влажность ( $W$ ) – отношение заключенной в породе массы воды к массе сухой породы (при температуре 105–107 °С). Выражается в процентах. Если влажность определяется в естественных условиях залегания горных пород, то она соответствует естественной (природной). Влажность весьма важный показатель, характеризующий прочность мягких связных пород, их поведение в откосах карьеров и отвалов. Сухие глинистые породы ведут себя как твердые тела. С увеличением влажности они постепенно снижают прочность, переходят в мягкое состояние, а при сильном увлажнении – в текучее, т. е. полностью ее теряют.

Плотность – величина отношения массы горной породы к занимаемому объему. Так как любая порода состоит из твердых минеральных частиц и расположенных между ними пустот (пор), которые могут быть заполнены воздухом (газами) или водой, то различают плотности: твердых частиц, природной горной породы (с естественной влажностью), сухой породы (скелета).

Плотность природной горной породы ( $\rho$ ) – масса единицы объема породы с естественной влажностью и природным (ненарушенным) сложением. Это величина переменная и зависит от минералогического состава, влажности и пористости. С повышением содержания тяжелых минералов и влажности при данной пористости она увеличивается, с увеличением пористости уменьшается. Так, например, порода с плотностью твердых частиц  $\rho_s = 2600$  кг/м<sup>3</sup> и пористостью 60 % при заполнении пор водой на 50 % будет иметь природную плотность  $\rho = 1340$  кг/м<sup>3</sup>, а при заполнении на 100 % – 1640 кг/м<sup>3</sup>.

$$\rho = \frac{g_1 + g_2}{V_1 + V_2}, \quad (1.1)$$

где  $g_1$  – масса минеральной части (скелета породы), г (т);  $g_2$  – масса воды, полностью или частично заполняющей поры в породе, г (т);  $V_1$  – объем минеральной части (скелета породы), см<sup>3</sup> (м<sup>3</sup>);  $V_2$  – объем пор в породе, см<sup>3</sup> (м<sup>3</sup>).

Плотность пород, разрабатываемых гидравлическим способом, изменяется в пределах (0,6–0,8) – (2,2–2,4) т/м<sup>3</sup>. Плотность пород непостоянна и зависит от условий естественного залегания (влажность, количество воды в порах и т.д.). Значения плотности некоторых горных пород приведены в табл. 1.2.

Таблица 1.2

Плотность горных пород

Наименование и характеристика горной породы	Плотность
Песок сухой	1,6
Гравий мокрый	2,0
Гравий сухой	1,8
Ил речной	1,8
Растительная земля	0,8
Растительная глинистая земля	1,2
Торф	0,6–1,0
Лёсс естественной влажности	1,6
Лёсс, смешанный с галькой или гравием	1,8
Суглинок легкий и лёссовидный	1,75
Суглинок тяжелый	1,9
Глина жирная, мягкая	1,8–1,9
Глина плотная, вязкая	2,1
Песчаники (в зависимости от плотности)	1,8–2,5
Сланцы глинистые	2,3–2,4
Каменный уголь	1,2–1,4
Антрацит	1,3–1,5
Бурый уголь	1,15

Плотность твердых частиц ( $\rho_m$ ) зависит только от минералогического состава породы и возрастает с увеличением содержания тяжелых минералов. Плотность твердых частиц породы, состоящей из одних и тех же минералов, одинакова независимо от пористости и влажности. Этот показатель для большинства горных пород изменяется в пределах 2500–2800 кг/м<sup>3</sup>, а для отдельных типов грунтов является достаточно постоянным: для песков – 2660; для супесей – 2700; для суглинков – 2710; для глин – 2740 кг/м<sup>3</sup>

$$\rho_m = \frac{g_1}{V_1}. \quad (1.2)$$

Плотность сухой породы ( $\rho_{ск}$ ) – масса твердой компоненты (скелета) в единице объема породы при естественной (ненарушенной) структуре. Плотность сухой породы зависит от минералогического состава и ее пористости и определяется по формуле:

$$\rho_{ск} = \frac{g_1}{V_1 + V_2} = \frac{\rho}{1 + 0,01W} \quad (1.3)$$

Показатель плотности пород участвует практически во всех расчетах гидротранспорта и гидроотвалообразования, т. к. существенно влияет на процессы, происходящие в них. Величины  $\rho_m$  и  $\rho_{ск}$  используются для расчета пористости горных пород  $n$ , представляющей собой отношение объема пор к объему всей породы (выражают в долях единицы или в процентах):

$$n = 1 - \frac{\rho_{ск}}{\rho_m}, \quad (1.4)$$

а также коэффициента пористости  $e$ , который выражается как отношение объема пор к объему, занимаемому минеральными частицами:

$$e = \frac{\rho_m}{\rho_{ск}} - 1. \quad (1.5)$$

Пористость оказывает влияние на процесс размыва пород: чем больше пористость пород, тем легче они поддаются гидравлическому размыву. Коэффициент пористости характеризует плотность укладки зерен пород: чем меньше  $e$ , тем плотнее грунт.

По величине общей пористости горные породы разделяются на:

- породы низкой пористости –  $n < 5 \%$ ;
- средней пористости –  $n = 5-20 \%$ ;
- высокой пористости –  $n > 20 \%$ .

Разрыхляемость пород – увеличение объема породы в результате рыхления по сравнению с объемом, занимаемым породой в массиве (до рыхления). Оценивается обычно коэффициентом разрыхления ( $K_r$ ), представляющим отношение объема породы после рыхления к объему ее в массиве.

Коэффициент разрыхления зависит от равномерности дробления породы, крупности ее кусков, емкости и формы сосудов, в которых она размещается, и времени нахождения породы в разрыхленном состоянии.

Степень разрыхления породы со временем уменьшается. Усадку породы в результате ее уплотнения оценивают коэффициентом усадки:

$$i = \frac{V_p - V'_p}{V_p}, \quad (1.6)$$

Где  $V_p$  – объем разрыхленной породы до уплотнения;  $V'_p$  – объем разрыхленной породы после уплотнения.

Значения коэффициента разрыхления для некоторых пород приведены в табл. 1.3.

Таблица 1.3

Значение коэффициента разрыхления

Наименование пород	Коэффициент разрыхления породы	
	до уплотнения	после уплотнения
Песок	1,05–1,2	1,01–1,03
Глинистый сланец	1,3–1,6	1,1–1,2
Скальные породы	1,3–2,0	1,2–1,4
Мягкий уголь	до 1,2	1,05

Влагоемкость – способность горных пород в зависимости от их свойств и геологических условий удерживать то или иное количество воды. Различают гигроскопическую, капиллярную и полную влагоемкость породы. Гигроскопическая влагоемкость – количество влаги, которое способна поглотить сухая порода из воздуха с относительной влажностью 94 %. Капиллярная влагоемкость – количество влаги в порах, содержащих свободную капиллярную подпертую воду. Капиллярная влагоемкость зависит от среднего размера поровых каналов. Полная влагоемкость – максимальное содержание воды в породе.

Водопроницаемость – свойство пород пропускать воду. Оценивается коэффициентом проницаемости, который определяется из выражения:

$$K_{\text{пр}} = \frac{Q \cdot L \cdot \eta}{F \cdot (P_1 - P_2)}, \quad (1.7)$$

где  $Q$  – расход воды, просачивающейся через образец породы;  $L$  – длина образца;  $F$  – площадь поперечного сечения образца;  $(P_1 - P_2)$  – разность давлений соответственно до и после образца;  $\eta$  – вязкость жидкости.

При  $\eta=1$  коэффициент проницаемости называется коэффициентом фильтрации. Коэффициент фильтрации измеряется в кубических метрах в сутки (м<sup>3</sup>/сут).

Водоотдача – свойство породы отдавать воду. Зависит от размера частицы породы, величины и взаимного расположения пор, величины трещин. При схемах с кругооборотом воды слабая водоотдача увеличивает объем гидроотвала и водохранилища.

Сцепление – свойство, характеризующее связность грунта.

Чем больше сила сцепления, тем грунт плотнее и тем труднее он размывается водой, выше удельный расход воды. Влияние силы сцепления на удельный расход воды при размыве пород приведено в табл. 1.4.

Таблица 1.4

Влияние силы сцепления на удельный расход воды

Порода	Сцепление, кг/см <sup>2</sup>	Удельный расход воды на 1 м <sup>3</sup> грунта, м <sup>3</sup>
Пылеватые пески	0,04–0,08	4–6
Супески	0,07–0,42	4–10
Суглинки	0,19–0,68	10–16
Глины	0,36–0,82	12–18
Жирные глины	0,47–0,94	14–20

Набухание – способность породы увеличивать свой объем при насыщении водой. Коэффициент набухания – отношение объема грунта после насыщения водой к его объему в естественном состоянии. Учитывается при определении объема гидроотвала. Коэффициенты набухания пород приведены в табл. 1.5.

Таблица 1.5

Коэффициент набухания пород

Наименование пород	Коэффициент набухания
Глины тяжелые, вязкие	2,0–1,5
Глины обычные, пластичные	1,5
Суглинки тяжелые	1,5–1,45
Суглинки средние	1,45–1,2
Суглинки мелкие	1,2
Супеси	1,15–1,05
Пески пылевидные	1,1
Пески глинистые	1,1–1,05
Пески	1,0

Абразивность – способность породы изнашивать трением металлы, твердые сплавы и другие материалы. Абразивность оценивают по износу. Учитывая влияние окатанности частиц породы на износ оборудования, породы разделяют на окатанные, средней окатанности и острогранные. Пока не существует точной оценки пород по степени окатанности при их гидравлической разработке. Распределение некоторых пород по абразивности приведено в табл. 1.6.



## Абразивность пород

Средняя твёрдость по шкале Мооса	Пески среднезернистые			Пески крупнозернистые			Песчано-гравийная смесь		
	хорошо окатанные зерна	мало окатанные зерна	неокатанные зерна	хорошо окатан- ные зерна	мало окатанные зерна	неокатанные зерна	хорошо окатанные зерна	мало окатанные зерна	неокатанные зерна
4	0,25	0,5	0,75	0,5	0,75	1,0	0,75	1,0	1,5
5	0,5	0,75	1,0	0,75	0,75	1,5	1,0	1,5	2,0
6	0,75	1,0	1,5	1,0	1,5	2,0	1,25	2,0	3,0
7	1,0	1,5	2,0	1,26	2,0	3,0	1,5	3,0	5,0

Гранулометрический состав – процентное содержание частиц различной крупности в единице объема. В табл. 1.7 дана классификация грунтов по крупности.

Таблица 1.7

## Классификация грунтов по крупности

Порода	Фракция	Размер частиц, мм
Валуны окатанные или камни угловатые	крупная	более 800
	средняя	800–400
	мелкая	400–200
Галька окатанная или щебень угловатый	крупная	200–100
	средняя	100–60
	мелкая	60–40
Гравий окатанный или дресва угловатая	очень крупная	40–20
	крупная	20–10
	средняя	10–5
	мелкая	5–2
Песок	крупная	2,0–0,5
	средняя	0,5–0,25
	мелкая	0,25–0,05
Пыль	мелкая	0,05–0,01

Порода	Фракция	Размер частиц, мм
Глина	илватая	0,01–0,005
	грубая	0,005–0,001
	тонкая	менее 0,001

Для оценки крупности грунт просеивают через набор сит с различными размерами ячеек. При этом гранулометрический состав называют механическим. Для более мелких частиц используют способ, основанный на разделении их под действием силы тяжести при оседании в жидкости. Крупность частиц имеет важное значение в процессах гидромеханизации, так как для различных фракций характерны различные гидромеханические процессы при их перемещении в потоках воды. В зависимости от крупности сыпучие горные породы делятся на следующие фракции:

- кусковая – с размером частиц от 200 до 40 мм (галька), в потоках воды перемещается по нижней стенке трубопровода, характеризуется высокими скоростями свободного падения в среде;
- крупнозернистая – с размерами частиц от 40 до 5 мм (крупный гравий), в потоках воды перемещается в пристеночной области, характеризуется большими скоростями свободного падения в среде;
- мелкозернистая – с размерами частиц от 5 до 2 мм (мелкий гравий или дресва), в потоках воды перемещается скачкообразно с относительно малым периодом пребывания во взвешенном состоянии, характеризуется значительными скоростями свободного падения в среде;
- песчаная – с размерами частиц от 2 до 0,05 мм (пески), в потоках воды перемещается с относительно большим пребыванием частиц во взвешенном состоянии, характеризуется незначительными скоростями свободного падения в среде;
- пылевая – с размерами частиц от 0,05 до 0,01 мм (пески), в потоках воды перемещается во взвешенном состоянии, характеризуется небольшими скоростями свободного падения в среде;
- иловая – с размерами частиц от 0,01 до 0,005 мм, в потоках воды перемещается во взвешенном состоянии, в воде осаждаются медленно;
- глинистая – с размерами частиц менее 0,005 мм, в воде дает практически коллоидные смеси, осаждаются крайне медленно.

### 1.3. Построение графика гранулометрического состава

Для наглядного изображения результатов гранулометрического анализа строится график гранулометрического состава. Для компактности графика по оси абсцисс откладывают диаметр частиц в логарифмическом масштабе, по

оси ординат – суммарное процентное содержание частиц с диаметром меньше данного.

Начало координат соответствует фракции 0,01 мм (или 0,001 мм, если определялось содержание глинистых частиц). Масштаб вычисляется по формуле:  $lg10 = lb$ , где  $b$  – произвольный отрезок длины в см или мм. В таблице 1.8 показан масштаб градуировки оси абсцисс при  $b = 50$  мм. Исходя из этого, ось абсцисс делится слева направо на 3 отрезка по 50 мм, на которых откладываются диаметры частиц.

Таблица 1.8

Логарифмический масштаб размеров диаметров частиц по оси абсцисс

Чис- ла	Логариф- мы чисел	Мас- штаб, мм	Размер фрак- ции, мм	Рассто- яние от начала коорди- нат, мм	Размер фрак- ции, мм	Рассто- яние от начала коорди- нат, мм	Размер фрак- ции, мм	Рассто- яние от начала коорди- нат, мм
1	0	0	0,01	0	0,1	50	1	100
2	0,3	15	0,02	15	0,2	65	2	115
3	0,48	24	0,03	24	0,3	74	3	124
4	0,60	30	0,04	30	0,4	80	4	130
5	0,70	35	0,05	35	0,5	85	5	135
6	0,78	39	0,06	39	0,6	89	6	139
7	0,84	42	0,07	42	0,7	92	7	142
8	0,90	45	0,08	45	0,8	95	8	145
9	0,95	48	0,08	48	0,8	98	9	178
10	1,0	50	0,10	50	1,0	100	10	150

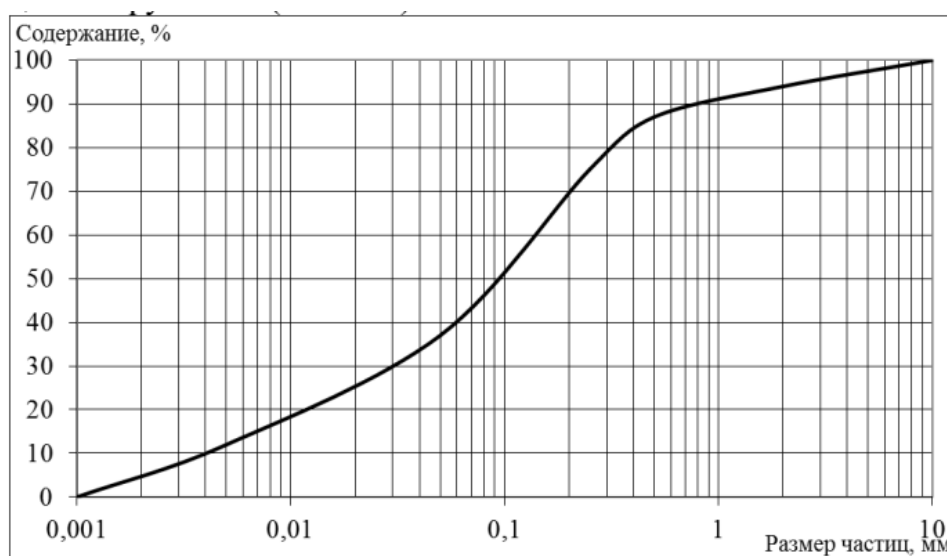


Рис. 1.1. График гранулометрического состава  
(размеры частиц приведены в логарифмической шкале)

На рис. 1.1 показан график гранулометрического состава для пород, характеризующихся следующим распределением фракций по крупности (табл. 1.9)

Таблица 1.9

Распределение фракций по крупности

Характеристика	Качественный состав пород						
	глини- стые	пылева- тые	песчаные			гравий	
Размер частиц, мм	менее 0,005	0,005– 0,05	0,05– 0,25	0,25– 0,5	0,5– 2,0	2,0– 10,0	более 10
Количество их по весу, %	12	25	38	12	7	6	–

На основании данного графика определяется диаметр средней частицы ( $d_{cp}$ ), для чего ось ординат разбивается на  $n$  равных интервалов (в нашем случае принято  $n = 10$ ). Из середины каждого интервала проводятся линии, параллельно оси абсцисс (пунктиром показаны на рисунке), до пересечения с графиком. Точки пересечения сносят на ось ординат и определяют значение диаметра средней частицы в данном интервале ( $d_{cpi}$ ). Значения диаметра средней частицы по интервалам приведены в табл. 1.10.

Таблица 1.10

Диаметры средних частиц по интервалам

Границы интервалов, %	0–10	10–20	20–30	30–40	40–50	50–60	60–70	70–80	80–90	90–100
Середины интервалов, %	5	15	25	35	45	55	65	75	85	95
Размеры средней частицы в интервале, мм	0,0048	0,0086	0,034	0,078	0,092	0,1	0,342	0,602	0,806	6,02

Значение диаметра средней частицы определится из выражения

$$d_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^n d_{cpi}}{n} = \frac{8,08}{10} = 0,808 \text{ мм.} \quad (1.8)$$

Гидравлическая крупность – скорость падения частиц в спокойной воде. Гидравлическая крупность зависит от формы, размеров, удельного веса частиц, вязкости и температуры воды. Ориентировочно значение гидравлической крупности можно принимать по данным В. Н. Гончарова (табл. 1.11) или по данным табл. 1.12.

Таблица 1.11

Гидравлическая крупность при различных режимах течения

Диаметр частиц, мм	Гидравлическая крупность частиц (см/с) при температуре воды				Режим течения
	5°C	10°C	15°C	20°C	
0,01	0,0044	0,00512	0,00588	0,00663	Ламинарный
0,10	0,441	0,512	0,588	0,663	
0,12	0,635	0,737	0,847	0,956	
0,15	0,99	1,15	1,325	1,49	
0,20	1,545	1,711	1,876	2,042	Переходный от ламинарного к турбулентному
0,40	3,785	3,951	4,116	4,242	
1,00	10,505	10,671	10,836	11,002	
1,20	12,745	12,911	13,076	13,212	
1,40	16,105	16,271	16,436	16,602	

Таблица 1.12

Гидравлическая крупность частиц в зависимости от их диаметра

Диаметр частиц, мм	Гидравлическая крупность, см/с	Диаметр частиц, мм	Гидравлическая крупность, см/с
1,75	17,8	10,00	42,5
2,00	19,0	12,50	47,7
2,50	21,25	15,00	52,0
3,00	23,25	17,50	56,2
4,00	26,85	20,00	60,2
5,00	30,0	22,50	63,7
6,00	32,9	25,00	67,2
7,00	35,5	27,50	70,6
8,00	38,0	30,00	73,6

В таблицах 1.11 и 1.12 даны значения гидравлической крупности для грунтов с удельным весом  $\gamma = 2,65$  т/м<sup>3</sup>. Для грунтов с удельным весом, отличающимся от принятого, значение гидравлической крупности из таблиц умножается на поправочный коэффициент, определяемый из выражений:

– для ламинарного и переходного режимов течения

$$Z = \frac{\gamma - 1}{1,65}; \quad (1.9)$$

– для турбулентного режима течения

$$Z = \sqrt{\frac{\gamma - 1}{1,65}}. \quad (1.10)$$

Для частиц размерами меньше 0,01 мм значения гидравлической крупности ( $W$ , см/с) следующие:

$d$ , мм	–	0,008	0,005	0,003	0,002	0,001
$W$ , см/с	–	0,00892	0,00153	0,00055	0,00025	0,00006

При анализе гранулометрической смеси средневзвешенное значение гидравлической крупности определяется следующим образом: по графику гранулометрического состава (рис. 1.1) определяется значение диаметров частиц  $d_1, d_2, d_3, \dots, d_{10}$ , а по таблицам 1.11 и 1.12 – значения гидравлической крупности  $W_1, W_2, W_3, \dots, W_{10}$ , тогда средневзвешенная гидравлическая крупность определяется из выражения

$$W_{\text{ср}} = \frac{W_1 + W_2 + W_3 + \dots + W_{10}}{10}. \quad (1.11)$$

Для определения гидравлической крупности отдельными авторами предложены ряд формул:

– при  $d < 0,01$  мм

$$W = 424(\gamma_r - 1) \cdot d^2; \quad (\text{Ричардс, Стокс})$$

– при  $0,01 < d < 0,14$  мм

$$W = \frac{0,0266}{\gamma_r \cdot d} + 292,5d \cdot (\gamma_r - 1); \quad (\text{Осеен})$$

– при  $0,14 < d < 1,0$  мм

$$W = 125d - 28,274d^2 - 2,93; \quad (\text{А. М. Васильев})$$

– при  $1,0 < d < 2,0$  мм

$$W = 140\sqrt{d(\gamma_r - 1)}; \quad (\text{Риттингер})$$

– при  $d > 2,0$  мм

$$W = 119\sqrt{d(\gamma_r - 1)}; \quad (\text{Ричардс})$$

где  $\gamma_r$  – удельный вес частиц грунта,  $\text{т/м}^3$ ;  $d$  – размеры частиц, мм.

### Вопросы для самоконтроля:

1. Какие физико-механические свойства пород влияют на размыв пород гидромониторами?
2. Какие физико-механические свойства пород влияют на процесс гидротранспорта?
3. Какие физико-механические свойства пород влияют на укладку пород в отвал?
4. Плотность пород.
5. Пористость и разрыхляемость.
6. Влагоемкость и влажность.
7. Водопроницаемость и водоотдача.
8. Сцепление и набухание.
9. Абразивность.
10. Гранулометрический состав пород.

## Лабораторная работа №2

**Тема: «Способы подготовки пород к размыву. Классификация видов обрушений»**

**Цель лабораторной работы:** изучить способы предварительной подготовки пород к размыву при их гидромониторной разработке.

### 2.1. Способы подготовки пород к размыву

При гидромониторной разработке плотных пород (тяжелых суглинков, глин, алевролитов, аргиллитов, выветрелых известняков, песчаников, а так же некоторых полезных ископаемых) требуются значительные затраты напорной воды. При этом образуется малоконцентрированная пульпа, не отвечающая оптимальным условиям транспортирования, а вся технологическая схема гидромеханизации становится энергоемкой, малопродуктивной. Особенно трудоемкой при этом является операция образования «вруба».

Однако смыв этих же пород, предварительно разрыхленных до определенной степени, весьма эффективен, т. к. гидравлический транспорт породы имеет значительные преимущества перед другими видами транспорта. Это и обуславливает целесообразность применения схем гидромониторной разработки пород после ее предварительного рыхления. Способы подготовки пород к размыву приведены в табл. 2.1.

Таблица 2.1

Способы подготовки пород для пульпообразования

Способ подготовки	Основные средства подготовки	Характеристика элементов подготовки
Механический	Экскаваторы	Выемка и складирование в навал или в приемные устройства
	Специальные рыхлители (струи, скреперы)	Подготовка может производиться со складированием породы в навал, одновременно с размыванием или в приемные емкости гидротранспортных установок
	Дробильные устройства	Порода полностью или частично поступает на дробилки специальной или обычной конструкции; после дробления поступает в гидротранспортные установки

Гидравлический	Водонасыщающее оборудование	Рыхление производится напорной водой, подаваемой с помощью насыщающих трубок по фронту работ, которые одновременно частично производят первичное разрушение породы
	Подача самотечного потока воды на верхнюю площадку уступа	За счет движения безнапорного потока по фронту работ происходит насыщение водой породы, частичный ее размыв с ослаблением массива, обрушение уступа
Буровзрывное рыхление	Буровзрывные средства	Расположение скважин, их параметры и конструкция зарядов выбираются в зависимости от типа и необходимой степени дробления по условиям гидротранспорта
Механическая подрезка	Струги, уступоподрезающие машины	Уступ подрезается механическими средствами по всему фронту работ. Смыв проводят гидромониторами

Предварительное рыхление пород связано с дополнительными затратами. Однако опыт гидромеханизации показывает, что применение предварительного рыхления при разработке пород IV категории и выше (в соответствии с классификацией пород по трудности разработки гидромониторами) улучшает технико-экономические показатели гидромеханизации.

Среди существующих способов подготовки пород для размыва наиболее широкое распространение получил механический. Для механической подготовки пород к пульпообразованию могут применяться экскаваторы, бульдозеры, плуги, струги, скреперные устройства, рыхлители, дробильные устройства.

## 2.2. Предварительное рыхление пород драглайнами

Наиболее широкое распространение получил экскаваторный способ рыхления с укладкой породы на уступе. Он производится обычно на карьерах при рыхлении тяжелых суглинков и тощих глин. Используются, как правило, экскаваторы-драглайны, т.к. они имеют увеличенные рабочие параметры, что позволяет им образовывать навалы со значительным объемом породы, приходящимся на единицу длины. Это позволяет снизить число передвижек забойного оборудования при смыве навалов и повысить безопасность работ.

Рыхление драглайном производится по двум схемам:

– экскаватор разрабатывает забой и сбрасывает породу на нижнюю площадку уступа, где она размывается гидромонитором (рис. 2.1).



- экскаватор складировает грунт на верхней площадке уступа (рис. 2.2).

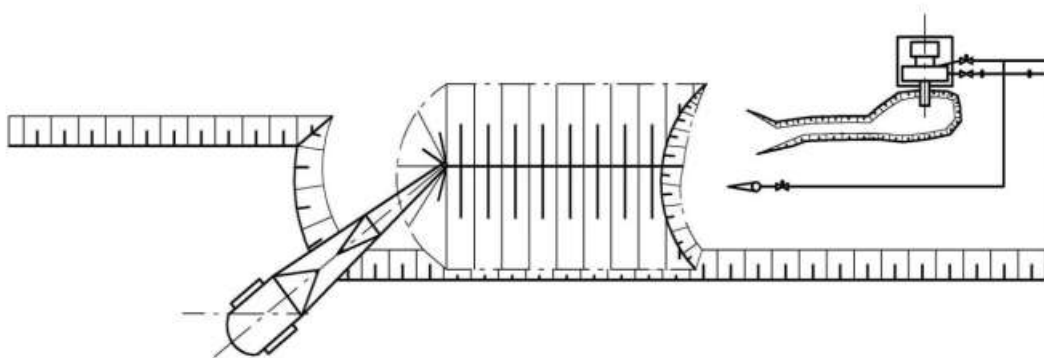


Рис. 2.1. Предварительное рыхление пород экскаватором с укладкой ее в навал, расположенный на нижней площадке уступа

Основным преимуществом первой схемы является высокая производительность экскаватора в связи с малым углом его поворота. Недостаток схемы заключается в жесткой взаимосвязи работы экскаватора и гидромонитора.

Вторая технологическая схема получила наибольшее распространение, т.к. в этом случае экскаваторные работы ведутся с некоторым опережением и гидромониторные работы по смыву производятся независимо от работ по экскавации.

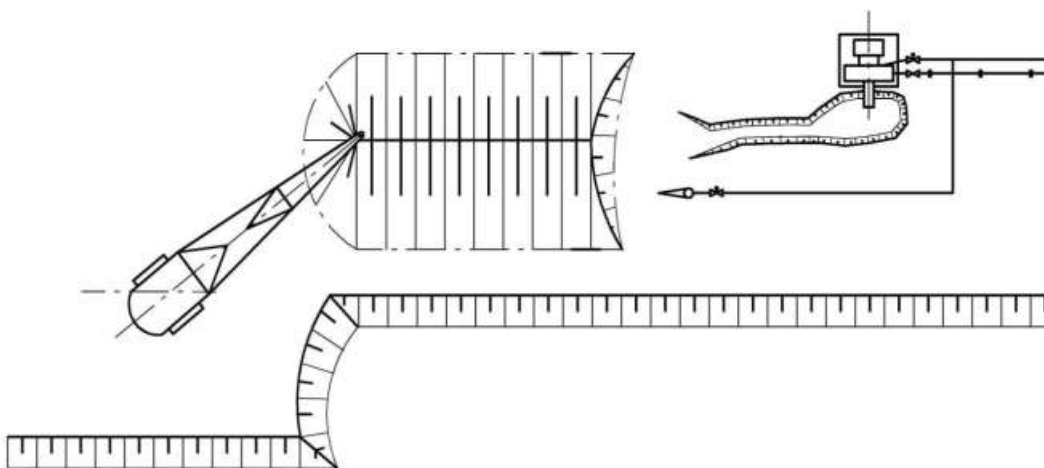


Рис. 2.2. Предварительное рыхление пород экскаватором с укладкой ее на верхней площадке уступа

Возможна совместная разработка целика и навала, когда в толще вскрышного уступа имеются различные по прочности породы с выраженной между ними границей. Рыхлению подвергаются более плотные породы, которые разрабатываются экскаватором и укладываются в навал на менее плотные, не требующие рыхления по условиям размыва (рис. 2.3).

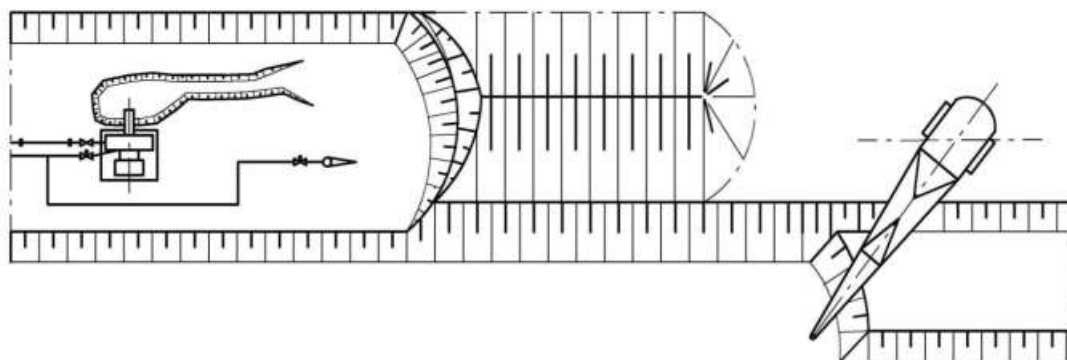


Рис. 2.3. Совместная разработка целика и навала

Экскаваторное рыхление пород осуществляется драглайнами типа ЭШ-10/70 (ЭШ-13/50), ЭШ-15/90 и другие и получило распространение на многих разрезах.

### 2.3. Предварительное рыхление пород бульдозером

Предварительное рыхление бульдозером применяется при малой высоте уступа или при рыхлении нижней части уступа. Рыхление может производиться двумя способами:

- последовательным перемещением бульдозера вкrest фронта работ;
- заходками по фронту.

В обоих случаях бульдозер разрабатывает породу слоями 0,1–0,15 м и перемещает ее в навал или зумпфу землесоса (рис. 2.4).

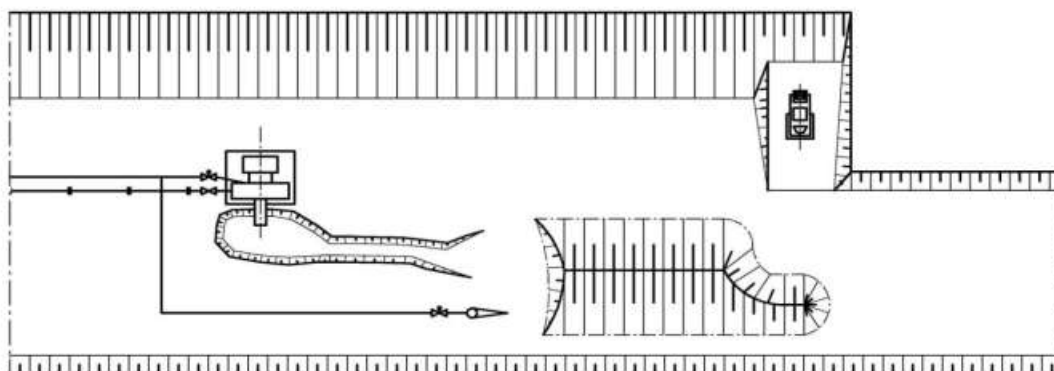


Рис. 2.4. Подготовка породы к размыву бульдозером

При перемещении бульдозера вкrest фронта работ производится постепенное выхолаживание откоса, порода собирается в навалы и смывается гидромониторами. При выемке породы заходками по фронту бульдозер находится на верхней площадке уступа, срезает породу стружками и сбрасывает под откос. Постепенно уменьшая высоту уступа, бульдозер доходит до нижней площадки. Предварительное рыхление породы

бульдозером обеспечивает значительное сокращение расхода воды на размыв.

#### 2.4. Другие способы механического рыхления пород

Для предварительной подготовки пород к размыву могут применяться канатный струг (рис. 2.5), фрезерный рыхлитель (рис. 2.6), бар (рис. 2.7) или уступоподрезающие машины различных конструкций, а также дробление пород дробильными установками.

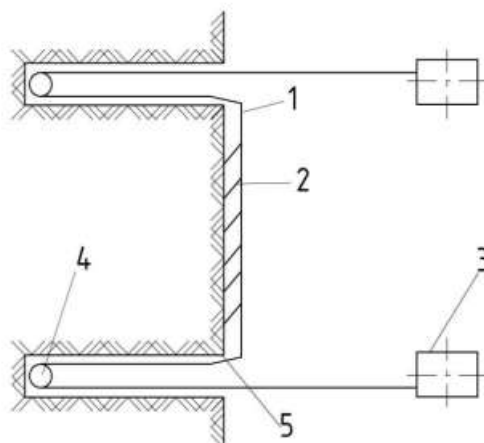


Рис. 2.5. Рыхление с механической подрезкой канатным стругом:  
1 – трос; 2 – резцы; 3 – лебедки; 4 – направляющие блоки; 5 – скважины

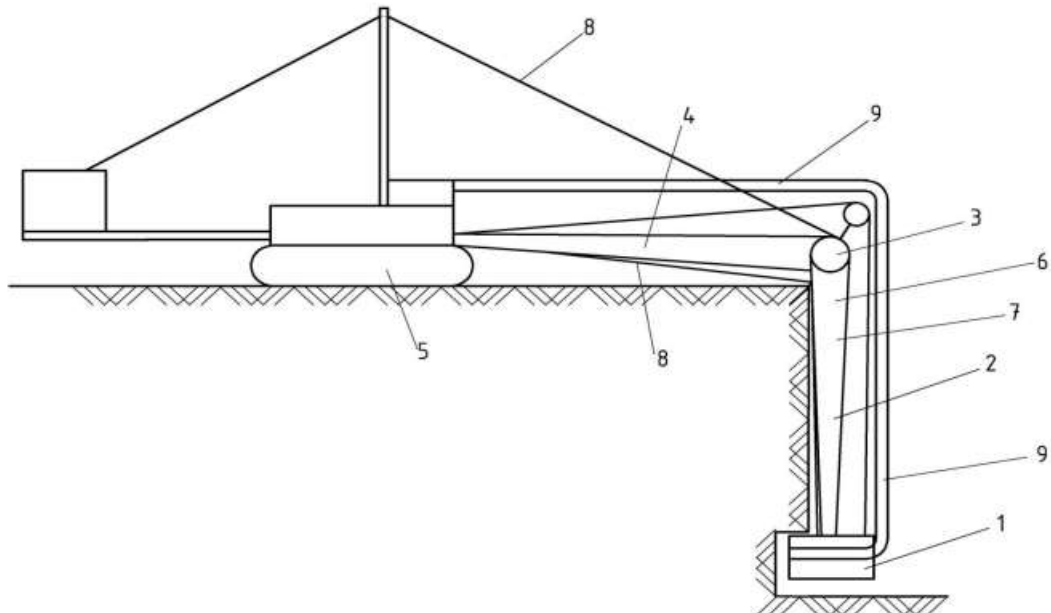


Рис. 2.6. Механическая подрезка уступа фрезерным рыхлителем:  
1 – фрезерный рыхлитель; 2 – стрела; 3 – шарнир; 4 – упор; 5 – тележка;  
6 – электродвигатель; 7 – редуктор; 8 – поддерживающий трос; 9 – труба

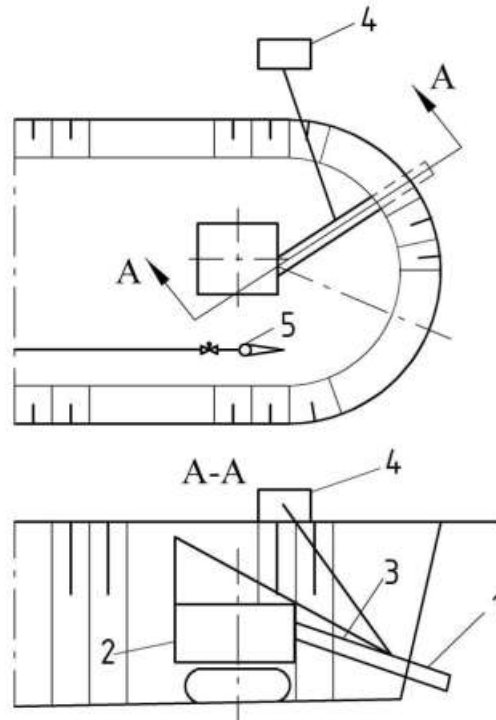


Рис. 2.7. Схема подрезки уступа баром: 1 – подрезной бар; 2 – бульдозер; 3 – штанга; 4 – лебедка; 5 – гидромонитор

## 2.5. Буровзрывное рыхление пород

При разработке тяжелых трудноразмываемых глин и полускальных пород может применяться буровзрывной способ предварительного рыхления пород. Бурение осуществляется станками шнекового бурения. Оптимальный диаметр скважины – 160–200 мм, удельный расход ВВ – 0,2–0,3 кг/м<sup>3</sup>. Расход воды – 3–5 м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>. Разрыхленная порода смывается гидромониторами. При этом значительно (в 2–4 раза) улучшаются технико-экономические показатели.

## 2.6. Предварительное ослабление породного массива водонасыщением

Предварительное рыхление пород водонасыщением возможно осуществлять напорной и безнапорной водой. Насыщение пород напорной водой через перфорированные трубки называется методом Карцева. При напорном водонасыщении вдоль верхней бровки уступа располагают трубки диаметром 12–22 мм, которые потом вбивают в грунт на всю высоту уступа (рис. 2.8).

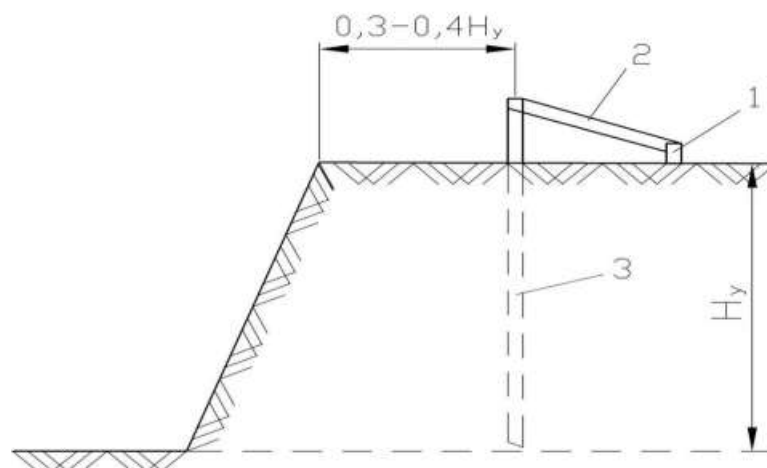


Рис. 2.8. Схема предварительного ослабления породного массива водонасыщением: 1 – магистральный водовод; 2 – гибкий шланг; 3 – труба для водонасыщения

На один гидромонитор принимается по фронту 5–6 трубок.

Трубки соединены при помощи гибких шлангов с водоводом. Напорная вода подается под давлением до 0,8–0,9 МПа. Насыщение водой продолжается 1–3 часа. Нарушение структуры породы в массиве происходит от того, что фильтрующая вода уменьшает связность частиц породы и создает гидродинамическое давление, которое действует по направлению течения воды.

Предварительное водонасыщение самотечным транспортированием воды требует некоторого предварительного объема земляных работ. На верхней площадке уступа проходят траншеи глубиной 1,5–2 м (рис. 2.9). Из вынутаго грунта делают круговое обвалование вокруг траншеи и заполняют выработку водой слоем 3–4 м. Вода через поры и трещины в породе фильтрует и производит водонасыщение породы, что уменьшает силы сцепления между частицами. Так, если при гидромониторной разработке лёсса без водонасыщения удельный расход воды составляет 8–10 м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup> при напоре у насадки гидромонитора 100–120 м водяного столба, то при их водонасыщении удельный расход снизился до 4 м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>, а напор до 60–80 м водяного столба.

Если уступ сложен по высоте разнородными породами, ухудшающими фильтрацию воды, то по дну траншеи целесообразно бурить скважины диаметром 100–150 мм. Тогда вода будет распространяться по всем прослойкам.

В Кузбассе применялась комбинированная схема водонасыщения и безнапорного размыва. При этом месячная производительность гидромониторов в забое увеличилась на 33 % (со 150 до 200 тыс. м<sup>3</sup>).

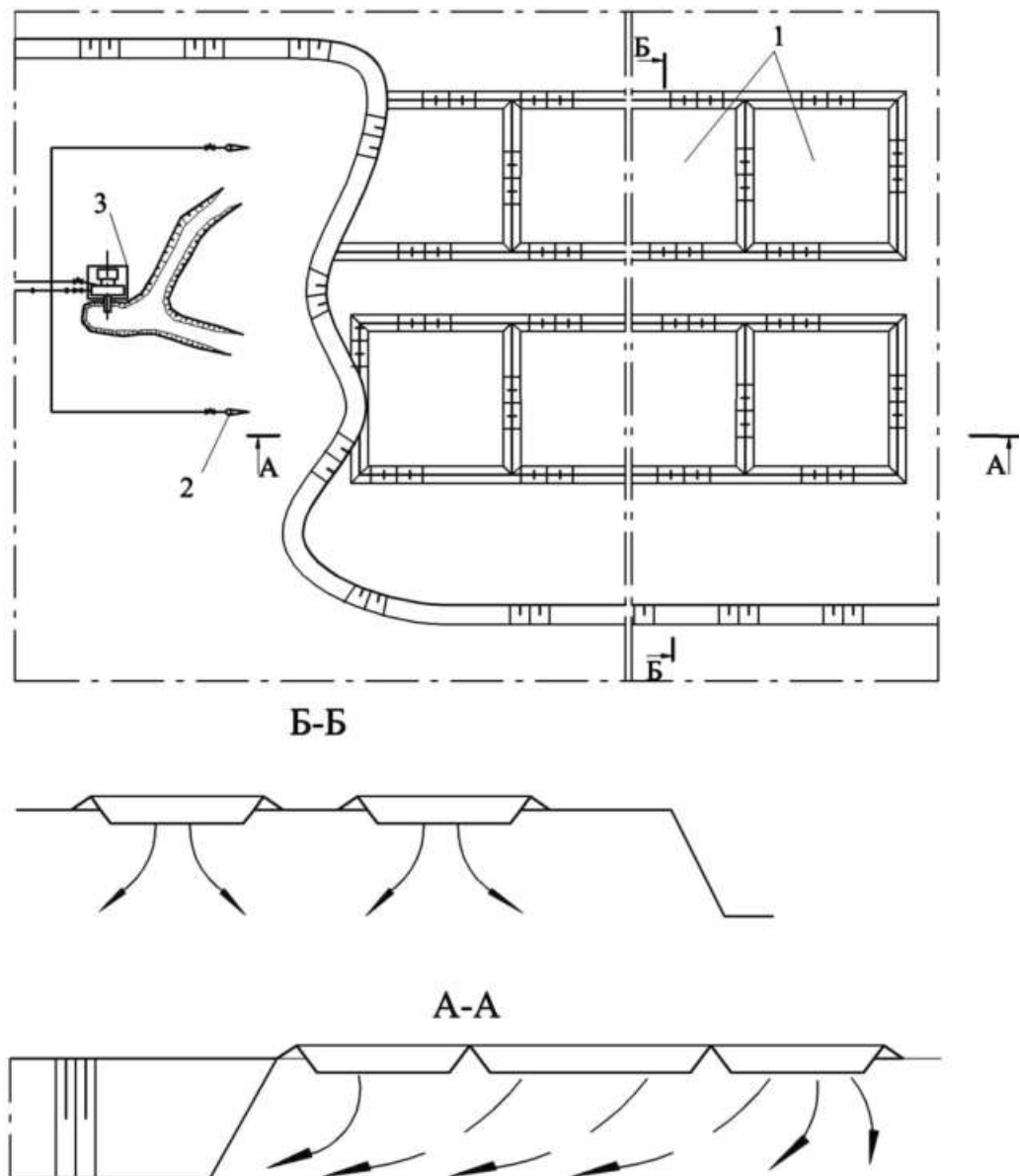


Рис. 2.9. Схема разрушения породного массива безнапорной водой: 1 – траншеи; 2 – гидромонитор; 3 – землесос с зумпфом

## 2.7. Приемно-смесительные установки для гидротранспортирования пород от экскаваторов

Смесительно-транспортные установки по признаку размещения в карьере делятся на стационарные, полустационарные и передвижные. Пульпообразование осуществляется гидромониторами, брызгательными установками, смесительными насадками и др. Установки могут быть на гусеничном, железнодорожном, колесном ходу или на саях.

Механическая подготовка пород в смесительных устройствах состоит в следующем. Экскаватор разгружает породу в приемный бункер с грохотом, на котором происходит разделение породы на классы – <100 мм и >100 мм. Рыхлые породы с размером >100 мм размываются водой. Полускальные дробятся в дробилках. Далее эта порода поступает в зумпф землесоса или в приемную воронку гидроэлеватора. Испытания показали, что возможно получение твердого к жидкому (Т:Ж) как 1:2,5 – 1:3. При сухой загрузке породы в гидроэлеватор пульпа имеет неравномерную консистенцию, что усложняет работу. Коэффициент использования во времени таких установок – 0,9–0,95.

## 2.8. Классификация видов обрушений

Классификация видов обрушений откосов уступов приведена в табл. 2.2, рис. 2.10.

Таблица 2.2

Классификация видов обрушения откосов уступов при гидромониторной разработке (по Г. А. Нуруку)

Тип	Характер обрушения	Горнотехнические условия разработки	Особенности обрушения
I	Оползневое обрушение при однородных породах (рис. 2.10 а)	Высота уступа до 20-25 м	Поверхность скольжения кривая, близкая к цилиндрической
II	Обрушение при разнородных породах (рис. 2.10 б)	При различных сочетаниях отдельных пород	Обрушение происходит по поверхности, разграничивающей два слоя пород
IIIа	Обвал со срезом при однородных породах (рис. 2.10 в)	Высота уступа до 20 м. Глинистые породы и лёссовидные суглинки	После углубления происходит срез породы
IIIб	Обвал с просадкой при однородных породах (рис. 2.10 д)	Высота уступа 10-12 м. Суглинистые породы	При просадке срезаемый слой перемещается на глубину вруба
IV	Непрерывное обрушение по мере размыва (рис. 2.10 г)	Высота уступа до 20-25 м. Преимущественно пески	Обрушение происходит небольшими частями непрерывно

V	Обрушение с опрокидыванием (рис. 2.10 е)	Высота уступа до 15 м. Слежавшиеся породы	Разрушение начинается в верхней части откоса уступа и продолжается до рабочей площадки. Оторвавшийся массив значительно нарушает свою структуру
VI	Обрушение со сползанием массива и опрокидыванием (рис. 2.10 ж)	При различном сочетании разнородных пород	Часть уступа (обычно верхняя) разрушается с опрокидыванием массива, часть – при оползневом обрушении

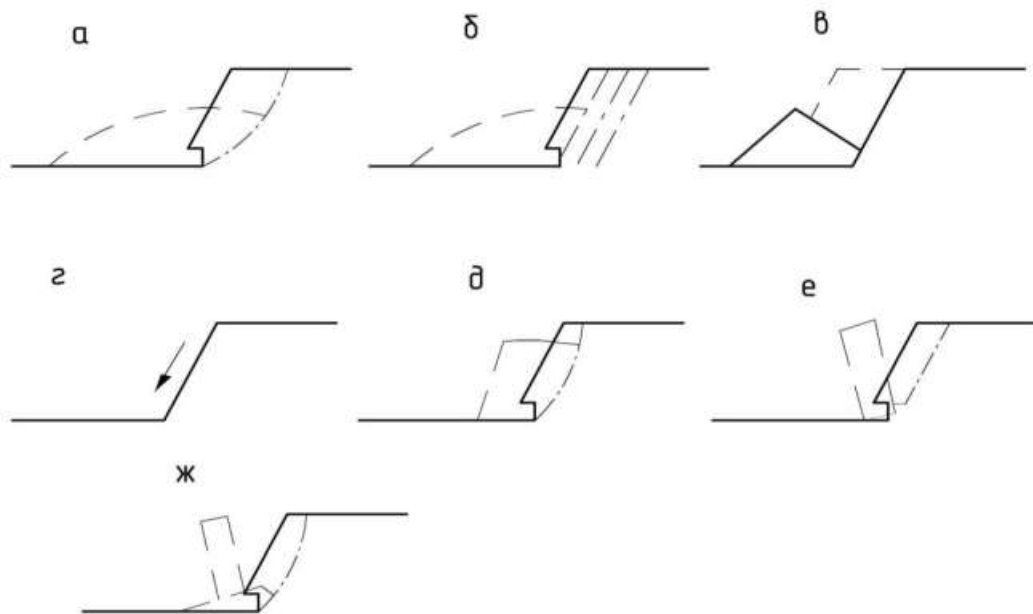


Рис. 2.10. Виды обрушения откоса уступа

### Вопросы для самоконтроля:

1. Основные способы подготовки пород к размыву.
2. Предварительно рыхление пород драглайнами.
3. Предварительно рыхление пород бульдозерами.
4. Специальные способы механического рыхления пород.
5. Ослабление породного массива водонасыщением.
6. Приемно-смесительные установки для гидротранспортирования пород от экскаваторов.
7. Классификация видов обрушений.



## Лабораторная работа №3

### Тема: Гидравлический расчет гидромонитора и параметров гидромониторной струи.

**Цель работы:** Определить диаметр насадки гидромонитора, потери напора в стволе гидромонитора и его насадке, рассчитать структурные и динамические параметры струи и определить силу удара её о забой.

Исходные данные:

1. Гидромонитор ГМН-250С
2. Напор воды перед насадкой ( $H_n$ )-100 м вод.ст.
3. Расход воды (ориентировочный) ( $Q$ ) 1165 м<sup>3</sup>/ч.
4. Расстояние от насадки до забоя ( $l$ ) -20 м.
5. Угол откоса ( $\alpha$ )-70 град.

#### Гидравлический расчет гидромонитора

1. Скорость вылета струи из насадки определяется по формуле

$$V_c = \varphi \sqrt{2gH_n},$$

где  $\varphi$ - коэффициент скорости,  $\varphi=0,92-0,96$ ;

$g$ - ускорение свободного падения,  $g=9,81$  м/с<sup>2</sup>

$$V_c = 0,95 \cdot \sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 50} = 29,8 \text{ м/с.}$$

2. Расчетный диаметр насадки гидромонитора

$$d_n = 0,52 \sqrt{\frac{Q_{гс}}{\sqrt{H_n}}},$$

$$d_n = 0,52 \sqrt{\frac{0,3653}{\sqrt{50}}} = 0,118 \text{ м.}$$

Принимаем близкий по стандарту  $d_n=125$  мм.

3. Уточняем фактический расход воды

$$Q = \mu w \sqrt{2gH_n}, \text{ м}^3 / \text{ч}$$

где  $\mu$ - коэффициент расхода,  $\mu=0,95$ ;

$w$ - площадь поперечного сечения насадки, м<sup>2</sup>

$$w = \frac{\pi d_0^2}{4},$$

$$w = \frac{3,14 \cdot 0,125^2}{4} = 0,0123 \text{ м}^2;$$

$$Q = 0,95 \cdot 0,0123 \cdot \sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 50} = 0,3660 \text{ м}^3 / \text{с} \approx 1318 \text{ м}^3 / \text{ч.}$$

4. Потери напора в стволе и коленах гидромонитора

$$h_k = kQ^2,$$

где  $k$  – коэффициент потерь напора, зависящий от конструкции гидромонитора, для ГМП-250  $k=14,2$

$$h_k = 14,2 \cdot 0,3360^2 = 1,9 \text{ м.вод.ст.}$$

5. Потери напора в насадке

$$h_n = 0,06 \cdot \frac{V_c^2}{2g},$$

$$h_n = 0,06 \cdot \frac{29,8^2}{2 \cdot 9,81} = 2,7 \text{ м.вод.ст.}$$

6. Определение общих потерь напора в гидромониторе

$$h_{\text{ГМ}} = h_k + h_n,$$

$$h_{\text{ГМ}} = 1,9 + 2,7 = 4,6 \text{ м.вод.ст.}$$

7. Длина начального участка струи

$$l_n = d_0 \cdot (A - B \cdot R_e),$$

где  $A, B$  – эмпирические коэффициенты, зависящие от типа гидромонитора и конструктивных особенностей насадки ( для ГМП-250:  $A=76$ ,  $B=12 \cdot 10^{-6}$ );  $R_e$  – число Рейнольдса для начального сечения струи

$$R_e = \frac{V_c d_0}{\nu},$$

где  $\nu$  – кинематический коэффициент вязкости,  $\nu = 1,01 \cdot 10^{-6}$  при температуре воды  $t=20^\circ\text{C}$

$$R_e = \frac{29,8 \cdot 0,125}{1,01 \cdot 10^{-6}} = 3,7 \cdot 10^6;$$

$$l_n = 0,125 \cdot (76 - 12 \cdot 10^{-6} \cdot 3,7 \cdot 10^6) = 4,0 \text{ м.}$$

8. Осевое динамическое давление

$$P_m = P_0 \cdot \left( \frac{l_n}{l} \right)^k,$$

где  $P_0$  – давление перед насадкой, МПа;  $k$  – показатель степени ( при  $d_0=50-190$  мм,  $k=0,5$ )

$$P_0 = \frac{H_n}{100},$$

$$P_0 = \frac{50}{100} = 0,5 \text{ МПа};$$

$$P_m = 0,5 \cdot \left( \frac{4,0}{20} \right)^{0,5} = 0,22 \text{ МПа.}$$

9.- Среднее динамическое давление струи на расстоянии 20 м от насадки

$$P_l = P_m \cdot B_0 \cdot \frac{1 - 0,00044l/d_0}{1 + 0,00044l/d_0},$$

где  $B_0$  – коэффициент начального участка струи и за его пределами,  $B_0=0,6-0,7$

$$P_l = 0,22 \cdot 0,6 \cdot \frac{1 - 0,00044 \cdot 20/0,125}{1 + 0,00044 \cdot 20/0,125} = 0,12 \text{ МПа.}$$

10. Диаметр струи у забоя

$$D = 1,01 d_0 \mu^{0,5} \left( \frac{l}{d_0} \right)^{0,115} \left( \frac{P_0}{P_l} \right)^{0,25},$$

где  $\mu$  – коэффициент, учитывающий расход насадки,  $\mu=0,95$

$$D = 1,01 \cdot 0,125 \cdot 0,95^{0,5} \cdot \left(\frac{20}{0,125}\right)^{0,115} \cdot \left(\frac{0,5}{0,12}\right)^{0,25} = 0,32 \text{ м.}$$

11. Площадь поперечного сечения струи в месте удара о забой

$$\omega = \frac{\pi D^2}{4}, \text{ м}^2$$

$$\omega = \frac{3,14 \cdot 0,32^2}{4} = 0,078 \text{ м}^2.$$

12. Сила удара струи о наклонную преграду

$$R = 2P_1\omega \sin \alpha,$$

$$R = 2 \cdot 0,12 \cdot 0,078 \cdot \sin 65^\circ = 0,017 \text{ МН} = 17 \text{ кН.}$$

### Вопросы для самоконтроля:

1. В чем заключается гидравлический расчет гидромонитора?
2. Какие преграды может встретить струя при гидромониторном размыве на ОГР?
3. От чего зависят коэффициенты А и В, при определении какого параметра используются?
4. Почему производится уточнение расхода воды?
5. Что такое компактность струи и от чего она зависит?
6. Как определяется суммарное и среднее динамическое давление струи при  $l=6-25$  м, при насадке диаметром 57-75 мм и напоре 50-85 м вод.ст?
7. Чему равно значение коэффициента Во и от чего оно зависит?

### Лабораторная работа №4

**Тема: «Определение диаметра водоводов и потерь напора по длине для разветвленной сети»**

**Цель лабораторной работы:** изучить методику расчета диаметра водоводов и величину потерь для водоснабжения средств гидромеханизации.

Способ водоснабжения выбирается в зависимости от наличия воды и ее расхода в каждом конкретном случае. В данном случае расход воды трех гидромониторов ГМП-250 с диаметром насадки 125 мм составляет 3945 м<sup>3</sup>/ч, а дебит водоисточника равен 700 м<sup>3</sup>/ч. Следовательно, принимаем схему водоснабжения с кругооборотом воды и подпиткой.

Расчет диаметров водоводов и потерь напора для разветвленной сети (рисунок 3.1.)

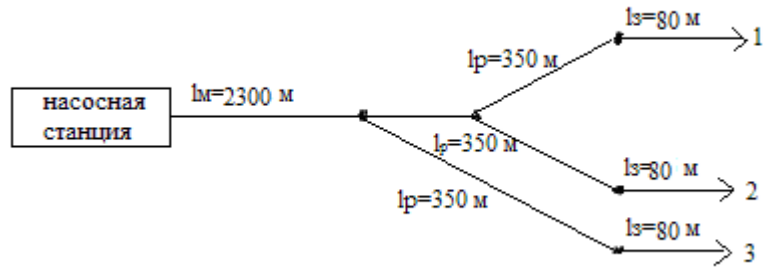


Рисунок 3.1. Схема к расчету водовода

Необходимый расход воды по участкам трубопровода:

- магистральном -  $Q_m = 3945 \text{ м}^3/\text{ч} = 1,1 \text{ м}^3/\text{с}$ ;
- разводящем -  $Q_r = 2630 \text{ м}^3/\text{ч} = 0,7306 \text{ м}^3/\text{с}$ ;
- забойном -  $Q_z = 1315 \text{ м}^3/\text{ч} = 0,3653 \text{ м}^3/\text{с}$ .

Диаметры отдельных участков водоводов составят:

- магистрального

$$d_m = 1,128 \sqrt{Q_m / V}, \text{ м}$$

где  $V$  - скорость течения воды в водоводе (для магистральных и разводящих водоводов  $V = 1,5 \text{ м/с}$ ; для забойных водоводов  $V = 3,0 \text{ м/с}$ ),  $\text{м/с}$ .

$$d_m = 1,128 \sqrt{1,1 / 1,5} = 0,97 \text{ м.}$$

Принимаем диаметр магистрального водовода равным 1000 мм (табл.4.1. [1]), тогда фактическая скорость течения воды в магистральном водоводе составит

$$V_m = \frac{4Q_m}{\pi d_m^2}, \text{ м/с}$$

$$V_m = \frac{4 \cdot 1,1}{3,14 \cdot 1^2} = 1,40 \text{ м/с.}$$

- разводящего

$$d_m = 1,128 \sqrt{0,7306 / 1,5} = 0,79 \text{ м.}$$

Принимаем диаметр разводящего водовода равным 802 мм, фактическая скорость течения воды в разводящем водоводе составит

$$V_m = \frac{4 \cdot 0,7306}{3,14 \cdot 0,802^2} = 1,45 \text{ м/с.}$$

- забойного

$$d_m = 1,128\sqrt{0,3653/3} = 0,39 \text{ м.}$$

Принимаем диаметр забойного водовода равным 414 мм, фактическая скорость течения воды в забойном водоводе составит

$$V_m = \frac{4 \cdot 0,3653}{3,14 \cdot 0,414^2} = 2,7 \text{ м/с.}$$

Потери напора за счет трения в сети водоснабжения будет складываться из потерь на отдельных участках водовода

$$h_l = h_m + h_p + h_z, \text{ м}$$

Где  $h_l$  - потери напора за счет трения по длине водовода, м;

$h_m$  - потери напора за счет трения в магистральном водоводе, м;

$h_p$  - потери напора за счет трения в разводящем водоводе, м;

$h_z$  - потери напора за счет трения в забойном водоводе, м.

Потери напора в магистральном, разводящем и забойном (т.к. ) водоводах определяем по формуле Н.Н.Павловского:

- для магистрального водовода

$$h_m = i \cdot l, \text{ м ,}$$

где  $i$  - потери напора на 1 пог.м трубопровода за счет трения, м/м.

$$i = 0,00122Q^2 / d^{5,315}, \text{ м/м .}$$

$$h_m = 0,00122 \cdot (1,1^2 / 1^{5,315}) \cdot 2300 = 3,4 \text{ м .}$$

- для разводящего водовода

$$h_p = 0,00122 \cdot (0,7306^2 / 0,802^{5,315}) \cdot 300 = 0,63 \text{ м .}$$

- для забойного водовода

По Дарси-Вейсбаху

$$h_z = 0,0155 \cdot 2,7^2 / (9,81 \cdot 0,402) \cdot 80 = 2,3 \text{ м .}$$

Тогда потери напора за счет трения в сети водоснабжения составят

$$h_l = 3,4 + 0,63 + 2,3 = 6,33 \text{ м.}$$

Местные потери напора принимаем равными 10% от общих потерь:

$$h_m = 0,1h_l, \text{ м ,}$$

$$h_m = 0,1 \cdot 6,3 = 0,63 \text{ м .}$$

Полный напор определяется с учетом геодезических отметок рельефа местности, потерь напора в гидромониторе и насадке, а также напора, необходимого для эффективного размыва пород:

$$H = h_T + h_{ГВ} + h_l + h_m + h_{ГМ} + H_0, \text{ м ,}$$

где  $h_T$  - геометрическая высота подъёма воды (разность отметок оси насоса и гидромонитора),  $h_T=16$  м;

$h_{ГВ}$  - геометрическая высота всасывания,  $h_{ГВ}=4$  м;

$h_l$  - потери напора во всасывающем трубопроводе,  $h_l=1,5$  м;

$h_{ГМ}$  - потери напора в гидромониторе (данные из гл.2),  $h_{ГМ}=6,6$  м;

$H_0$  - напор, необходимый для эффективного размыва пород,  $H_0=50$  м.

$$H = 16 + 4 + 1,5 + 0,63 + 6,6 + 50 = 82 \text{ м.}$$

Для обеспечения необходимого напора и расхода ( $H=83$  м,  $Q_m = 3945$  м<sup>3</sup>/ч) принимаем два насоса марок Д2000-89 (техническая характеристика насосов представлена в таблице 3.1.), соединенные параллельно (рисунок 3.2.).

Таблица 3.1.

Техническая характеристика насосов

Марка насоса	Характеристика насоса			Характеристика электродвигателя		Масса насоса, кг
	Расход, м <sup>3</sup> /ч	Напор, м	Диаметр рабочего колеса, мм	Частота вращения, об/мин	Мощность, кВт	
Д2000-89	2000	89	855	1000	800	2480

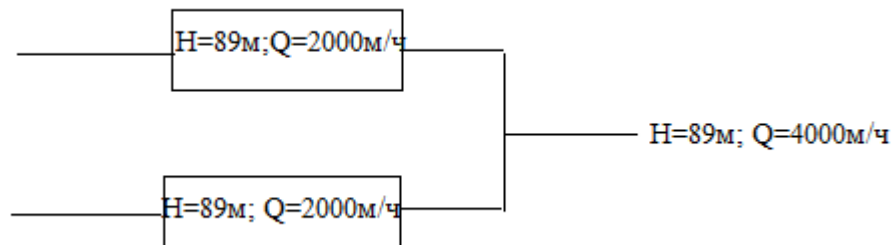


Рисунок 3.2. Схема соединения насосов

По характеру работы насосная станция – непосредственно питающая гидроустановки в забоях, является основной. Станция расположена в подводющем канале на отстойнике. Дно подводщего канала покрывается

изолирующим слоем. Насосная станция располагается в деревянном здании простейшего типа.

Водозабор в водоподводящем канале устраивают при надежном укреплении канала. Около водозабора водохранилище должно иметь глубину 2-3 м. Входящее отверстие водоприемников от горизонта воды должно быть на расстоянии не менее 1,25 м.

### **Вопросы для самоконтроля:**

1. Как подразделяются водоводы на карьерах?
2. Как определяются потери напора магистральных, разводящих и забойных водоводов?
3. Из чего складывается полный напор, необходимый для подбора насоса на водозаборной станции?
4. Что включает предварительная подготовка труб?
5. Какое должно быть расстояние между опорами при прокладке трубопроводов?

### **Лабораторная работа №5**

**Тема: «Прокладка трубопровода. Расчеты самотечного транспортирования воды»**

**Цель лабораторной работы:** изучить методику расчета диаметра водоводов и величину потерь для водоснабжения средств гидромеханизации.

Подготовка труб к прокладке осуществляется на специальных трубозаготовительных площадках.

Подготовка заключается в следующем:

- в выправлении концов труб;
- в снятии фасок;
- в устройстве односторонних скосов на кромках;
- в приваривании фланцев ( при фланцевых соединениях ,  $d < 400 - 500$  мм );
- в приваривании буртика или раструба при быстросъемных соединениях (при  $d < 900$  мм).

После предварительной подготовки трубы раскладываются по трассе, которая готовится заблаговременно (планируется, укладываются деревянные или железобетонные подкладки).

Если трасса проходит по ровной местности, то трубы укладываются просто на подкладках. При сложном рельефе местности для создания

необходимых уклонов и для исключения резких перегибов трубопроводы прокладываются по насыпи, выемке.

Пульповоды прокладываются с уклоном, достаточным для стока пульпы при остановке гидротранспортного агрегата.

В местах пересечения трубопроводами наземных коммуникаций (автодорог, железных дорог и др.) трубы прокладываются в кожухе.

При укладке трубопроводов на опорах расстояние между опорами должно быть 20-23 м, на закруглениях 10-12 м.

При укладке трубопроводов необходимо избегать и крутых изломов в плане. Рекомендуемые радиусы закруглений составляют:

- для труб диаметром  $d < 500$  мм

$$R/d = 6-8,$$

где  $R$  - радиус закругления, м;  $d$  - диаметр трубопровода, м;

- для труб диаметром  $d > 500$  мм

$$R/d \geq 12.$$

При соблюдении этих рекомендаций не возникает дополнительных сопротивлений течению жидкости.

### **Вопросы для самоконтроля:**

1. Дайте формулировку самотечного транспорта воды. Опишите схемы обеспечения гидромониторов водой.
2. Назовите основное условие расчета самотечного транспорта воды.
3. Перечислите гидравлические элементы круглой и прямоугольной форм сечения лотков и каналов.
4. Что такое гидравлический радиус и площадь живого сечения лотка?
5. Что и как необходимо учитывать при гидротранспорте воды по грунтовыми канавам и каналам?

### **Лабораторная работа №6**

**Тема: «Расчет напорного гидротранспорта пульпы»**

**Цель работы:** получение навыков расчета напорного гидротранспорта пульпы различными методами.



## 6.1. Общие сведения

Расчет напорного гидротранспорта твердого материала состоит из выбора диаметра трубопровода и соответствующего оборудования для обеспечения заданной производительности гидротранспортной установки. Исходными данными для расчета обычно являются:

- производительность гидротранспортной установки;
- дальность транспортирования;
- высота подъема гидросмеси;
- свойства транспортируемого материала.

Иногда решают обратную задачу, т.е. задают диаметр трубопровода и тип применяемого оборудования, а в расчете определяют максимально возможную производительность установки. Диаметр трубопровода выбирают методом вариантов. При этом он должен быть не менее чем в 3 раза больше максимального размера транспортируемых кусков.

При разработке пород гидромониторами часовую производительность гидротранспортной установки по гидросмеси определяют по формуле

$$Q_3 = Q_T[(1-P) + q], \quad (6.1)$$

где  $Q_3$  – часовая производительность гидромониторной установки по грунту, м<sup>3</sup>/ч;  $P$  – пористость грунта;  $q$  – удельный расход воды на размыв 1 м<sup>3</sup> грунта.

Плотность пульпы:

$$\rho_r = \frac{q \rho_o + \rho_T(1-P)}{q + (1-P)}, \quad (6.2)$$

где  $\rho_T$  – плотность размываемой породы, т/м<sup>3</sup>.

При гидромониторном размыве консистенцию (объемную) пульпы определяют условиями размыва, т.е. отношение Т:Ж определяют по удельному расходу воды  $q$ .

Концентрацию пульпы (объемную) при этом рассчитывают по формуле

$$S = \frac{\rho_r - \rho_o}{\rho_m - \rho_o}, \text{ м}^3/\text{т}. \quad (6.3)$$

где  $\rho_o$  – плотность воды, т/м<sup>3</sup>;  $\rho_r$  – плотность гидросмеси, т/м<sup>3</sup>.

Объемную концентрацию можно обосновывать и условиями гидротранспорта. Так условиями гидротранспорта ее определяют в случае применения технологии с использованием гидросмесительных устройств. Здесь необходимо стремиться к транспортированию возможно более густых гидросмесей, т.к. в этом случае удельные затраты энергии на перемещение горной массы в турбулентном потоке будут минимальными. Максимально возможная объемная концентрация гидросмеси зависит от крупности твердых частиц и находится в пределах 30–50 %. Минимальное значение эта величина имеет для крупнокусковой горной массы. При транспортировании гравийно-песчаной смеси обычно  $S = 15 - 20\%$ . Однако здесь должна применяться четкая дозировка твердого и жидкого, гарантирующая трубопровод от закупорок.

При условии определения концентрации пульпы по условиям ее транспортирования, часовую производительность установки по гидросмеси определяют по формуле

$$Q_3 = \frac{Q_r(1-P)}{S} 100, \text{ м}^3/\text{т}. \quad (6.4)$$

Зная расход гидросмеси  $Q_3$ , задаваясь величиной критической скорости при приближенном расчете и рассчитывая ее по формулам с учетом физико-механических свойств транспортируемых пород при детальном расчете, можно определить диаметр трубопровода (м) по формуле

$$D_p = \sqrt{\frac{4Q_3}{\pi g_{кр} 3600}}. \quad (6.5)$$

Диаметр трубопровода  $D$  выбирают по сортам труб (ближайший к расчетному  $D_p$ ). Затем определяют фактическую скорость гидросмеси в трубопроводе и проверяют соблюдение условия  $g \geq g_{кр}$ .

Грунтовый насос выбирают по требуемому расходу  $Q_r$  и необходимому напору  $H$  для гидротранспортирования, определяемому по формуле

$$H = h_\lambda + h_m + h_{bc} + h_{п} + h_{ост}, \text{ м}, \quad (6.6)$$

где  $h_\lambda$  – гидравлические сопротивления по длине трубопровода, м;  $h_m$  – местные гидравлические сопротивления (принимают в размере 5–10 % от величины  $h_\lambda$ ), м;  $h_{bc}$  – гидравлические сопротивления во всасывающей магистрали (определяют по технической характеристике грунтового насоса, обычно  $h_{bc}=1,5-2,5$  м);  $h_{п}$  – расчетная высота подъема (принять как разность отметок выпуска гидросмеси на гидроотвале и уровня гидросмеси в зумпфе), м;  $h_{ост}$  – остаточный напор (принять равным 3–5 м).

Фактический рабочий режим гидротранспортной установки определяют по графику. Для этого на график  $Q-H$  наносят характеристику выбранного грунтового насоса при работе на гидросмеси заданной плотности ( $\rho_r$ ). Завод-изготовитель грунтовых насосов определяет рабочую характеристику при их работе на чистой воде. Напор воды на гидросмесь пересчитывают по формуле

$$H_r = H_o \left( 1 + \frac{S^{1/2}}{\sqrt{\varphi_{cp}}} \right), \text{ м}, \quad (6.7)$$

где  $H_o, H_r$  – напор при работе насоса на воде и гидросмеси соответственно, м;  $S$  – объемная концентрация гидросмеси, доли единицы;  $\varphi_{cp}$  – усредненный коэффициент транспортабельности гидросмеси.

После построения рабочей характеристики  $Q-H$  грунтового насоса при работе на гидросмеси строят характеристику  $Q-H$  трубопровода при гидротранспортировании той же гидросмеси с учетом геодезической высоты ее подъема. Точка пересечения характеристик  $Q-H$  грунтового насоса и трубопровода соответствует рабочему расходу ( $Q_p$ ) установки. По величине  $Q_p$  определяют фактическую скорость гидросмеси в трубопроводе, которую проверяют по критической скорости.

## 6.2. Методики расчета основных параметров ( $\mathcal{G}_{кр}, i_{г}$ ) при детальном расчете напорного гидротранспорта

Гидравлические сопротивления и критическую скорость при движении гидросмеси по трубопроводам в турбулентном потоке рассчитывают по эмпирическим и полуэмпирическим формулам.

При гидротранспортировании кусковых материалов и их смесей более мелкими частицами можно пользоваться формулами В.В. Трайниса

$$i_{г} = i_{о} \frac{\rho_{г}}{\rho_{о}} + \frac{\sqrt{gD} (\rho_{г} - \rho_{о}) C}{K_{з} \Psi \mathcal{G} \rho_{о}} ; \quad (6.8)$$

$$\mathcal{G}_{кр} = \sqrt{gD} + \sqrt[3]{\frac{(\rho_{г} - \rho_{о}) C}{K_{з} \Psi \lambda_{о} \rho_{о}}} , \quad (6.9)$$

где  $i_{г}, i_{о}$  – гидравлические сопротивления на 1 м трубопровода соответственно при движении гидросмеси и воды, м;  $\rho_{г}, \rho_{о}$  – плотность гидросмеси и воды соответственно, т/м<sup>3</sup>;  $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;  $K_{з}$  – эмпирический коэффициент (для породы  $K_{з} = 1,4$ ; для угля  $K_{з} = 1,9$ );  $\Psi$  – коэффициент сопротивления при свободном падении твердых частиц в жидкой среде.

Значения коэффициента  $\Psi$  удовлетворительно соответствуют эмпирической формуле

$$\Psi \approx 0,65 \sqrt[6]{\frac{0,66}{\rho_{г} - 1}} , \quad (6.10)$$

где  $\rho_{г}$  – плотность транспортируемого материала, т/м<sup>3</sup>.

Гидравлические сопротивления  $i_{о}$  при движении чистой воды определяют по формуле Дарси-Вейсбаха:

$$i_{о} = \frac{\lambda_{о} \mathcal{G}^2}{D 2 g} . \quad (6.11)$$

Внутренняя поверхность труб может быть гладкой и шероховатой. Абсолютная шероховатость выражается средней высотой  $\Delta$  бугорков шероховатости. Относительную шероховатость определяют по формуле

$$\Delta_{от} = \frac{\Delta}{D}. \quad (6.12)$$

Для шероховатых труб коэффициент гидравлических сопротивлений  $\lambda_o$  не зависит от числа Рейнольдса и является функцией величины  $\Delta_{от}$ . Для гидравлически гладких труб  $\lambda_o = f(R_e)$ . Шероховатость новых стальных цельнотянутых труб в зависимости от продолжительности хранения на складе находится в пределах 0,03–0,1 мм. По мере транспортирования пульпы трубы шлифуются и после 50–150 ч работы их абсолютная шероховатость становится постоянной и равной 0,015–0,02 мм. Такие трубы близки к гидравлически гладким трубам. Для них коэффициент гидравлических сопротивлений определяют по формуле

$$\lambda_o = \frac{1}{(1,8 \lg R_e - 1,52)^2}, \quad (6.13)$$

$$R_e = \frac{\vartheta \cdot D}{\nu}, \quad (6.14)$$

здесь  $\vartheta$  – скорость движения воды в трубопроводе;  $\nu = 0,01$  – коэффициент кинематической вязкости при температуре воды  $t = 20$  °С.

Значение  $\lambda_o$  может быть определено также по справочным таблицам.

Коэффициент  $C$ , входящий в формулы В. В. Трайниса, учитывает содержание  $R$  мелких частиц по массе (породные частицы менее 2 мм, угольные частицы менее 3 мм):

$$C \approx 0,75 \frac{100 - R}{100} \quad \text{при } 15 \% \leq R \leq 100 \%;$$

$$C \approx 1 - 2,4 \frac{R}{100} \quad \text{при } 0 \% \leq R \leq 15 \%.$$

При  $R = 0$  значение  $C = 1$ .

При малых значениях  $C$  ( $C < 0,3 - 0,4$ ) значения  $\vartheta_{кр}$  увеличивают на 15–20 %.

### 6.3. Расчет параметров напорного гидротранспорта по методу ВНИПИИстромсырье

Этот метод используют при определении параметров гидротранспортирования песчано-глинистых грунтов, крупно-, средне- и мелкозернистых песков, супесей, суглинков и глин.

Диаметр пульповода можно рассчитывать из условия работы без заилиения или с частичным заилиением (не более 10–15 % диаметра трубопровода). В случае работы с частичным заилиением потери напора принимают равными потерям напора при критической скорости движения пульпы. При увеличении скорости по сравнению с критической на 5–10 % удельные потери напора (на 1 м длины пульповода) могут быть приняты равными потерям при соответствующей критической скорости. В этом случае потери напора (м) на 1 м пульповода определяют по формуле

$$i_n = i_o + \left[ i_{п.кр} - i_o \left( \frac{g_{кр}}{g_p} \right)^2 \sqrt[4]{\frac{g_{кр}}{g_p}} \right], \quad (6.15)$$

где  $g_{кр}, g_p$  – соответственно критическая и расчетная (фактическая) скорость движения пульпы, м/с;  $i_{п.кр}$  – потери напора при критической скорости, м;  $i_o$  – потери напора на 1 м длины трубопровода для воды, м.

Расчетная (фактическая) скорость  $g_p$  определяется по формуле

$$g_p = \frac{4Q_3}{\pi D^2 3600}, \quad (6.16)$$

где  $Q_3$  – производительность грунтового насоса (землесосной станции), м<sup>3</sup>/ч.

Критическую скорость движения пульпы определяют по формуле

$$g_{кр} = 2,8 \sqrt[6]{S} \frac{\sqrt{gD}}{\sqrt[4]{C_\varphi}}, \quad (6.17)$$

где  $S$  – объемная концентрация пульпы;  $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;  $D$  – диаметр пульповода, м;  $C_\varphi$  – коэффициент

лобового сопротивления частиц при свободном падении в воде для разнородных пород.

Диаметр пульповода  $D$  определяется методом перебора, т.е. с соблюдением условия  $\vartheta_p \geq \vartheta_{кр}$ . Желательно чтобы отношение  $\vartheta_p / \vartheta_{кр}$  было не более 1,2.

Потери напора на 1 м длины пульповода при критической скорости для песчано-гравийных грунтов и крупнозернистых песков определяют по формуле

$$i_{п.кр} = i_o (1 + 8\sqrt{S}). \quad (6.18)$$

Значения  $i_{п.кр}$  для средне- и мелкозернистых песков определяют по формуле

$$i_{п.кр} = i_o (1 + 6\sqrt{S}). \quad (6.19)$$

Для супесей, суглинков, илов и глин:

$$i_{п.кр} = i_o (1 + 4\sqrt{S}). \quad (6.20)$$

Потери напора на 1 м длины трубопровода для воды определяют по формуле Дарси-Вейсбаха (порядок расчета смотри выше).

Средний коэффициент лобового сопротивления гранулометрического состава породы определяют по формуле

$$(\sqrt{C_\varphi})^{-1,5} = \frac{(\sqrt{C_{x_1}})^{-1,5} x_1 + (\sqrt{C_{x_2}})^{-1,5} x_2 + \dots + (\sqrt{C_{x_n}})^{-1,5} x_n}{100}, \quad (6.21)$$

где  $(\sqrt{C_{x_n}})^{-1,5}$  – коэффициент лобового сопротивления частиц данной фракции (определяют по данным табл. 6.1);  $x_1, x_2, \dots, x_n$  – содержание фракций, принимаемое по графику гранулометрического состава породы, %.

Таблица 6.1

Размер фракций, мм	$(\sqrt{C_{x_n}})^{-1,5}$	Размер фракций, мм	$(\sqrt{C_{x_n}})^{-1,5}$	Размер фракций, мм	$(\sqrt{C_{x_n}})^{-1,5}$
80-40	1,7	7-5	1,9	1-0,5	0,75
40-20	1,8	5-3	1,75	0,5-0,25	0,4
20-10	2	3-2	1,5	0,25-0,1	0,1
10-7	1,95	2-1	1,2	<0,1	0,025

Значения коэффициента  $C_\varphi$  для соответствующего значения  $(\sqrt{C_\varphi})^{-1,5}$  принимают по табл. 6.2.

Таблица 6.2

$(\sqrt{C_\varphi})^{-1,5}$	$C_\varphi$	$(\sqrt{C_\varphi})^{-1,5}$	$C_\varphi$	$(\sqrt{C_\varphi})^{-1,5}$	$C_\varphi$	$(\sqrt{C_\varphi})^{-1,5}$	$C_\varphi$
0,1	21,7	0,195	8,8	0,46	2,83	0,95	1,07
0,105	20,2	0,2	8,5	0,48	2,67	1,0	1,0
0,110	18,9	0,21	8,0	0,50	2,52	1,05	0,97
0,115	17,8	0,22	7,4	0,52	2,39	1,1	0,88
0,120	16,9	0,23	7,1	0,54	2,28	1,15	0,82
0,125	16,0	0,24	6,7	0,56	2,16	1,2	0,79
0,130	15,1	0,25	6,3	0,58	2,07	1,25	0,75
0,135	14,5	0,26	6,0	0,6	1,98	1,3	0,71
0,140	13,7	0,27	5,75	0,62	1,89	1,35	0,68
0,145	13,2	0,28	5,47	0,64	1,82	1,4	0,64
0,150	12,6	0,29	5,21	0,66	1,77	1,45	0,61
0,155	12,0	0,30	4,97	0,68	1,67	1,5	0,58
0,160	11,5	0,32	4,57	0,7	1,6	1,7	0,49
0,165	11,1	0,34	4,22	0,72	1,55	1,8	0,46
0,170	10,6	0,36	3,91	0,74	1,49	1,9	0,43
0,175	10,2	0,38	3,64	0,76	1,43	2,0	0,4
0,180	9,9	0,40	3,41	0,78	1,39	2,1	0,35
0,185	9,6	0,42	3,18	0,85	1,24	2,2	0,34
0,190	9,1	0,44	2,98	0,9	1,15	2,3	0,33

При приближенном расчете гидротранспорта значения критической скорости и потерь напора можно принимать по табл. 6.3.

Общие потери напора по длине пульповода определяют по формуле

$$h_{\text{об}} = i_{\text{п.кр}} L_{\text{п}} K_{\text{м.с}}, \quad (6.22)$$

где  $L_{\text{п}}$  – длина пульповода, м;  $K_{\text{м.с}} = 1,05–1,1$  – коэффициент, учитывающий местные сопротивления в пульповоде (меньшее значение принимают при длинных пульповодах с малым числом фланцевых соединений и углов поворота).



Таблица 6.3

Породы	Диаметр пульпо- вода	Отношение твердого к жидкому (Т:Ж)											
		1:5			1:10			1:15			1:20		
		$\rho_{кр}$ , м/с	$i_{п.кр}$ , м	$\rho_{кр}$ , м/с	$i_{п.кр}$ , м	$\rho_{кр}$ , м/с	$i_{п.кр}$ , м	$\rho_{кр}$ , м/с	$i_{п.кр}$ , м	$\rho_{кр}$ , м/с	$i_{п.кр}$ , м	$\rho_{кр}$ , м/с	$i_{п.кр}$ , м
Песчано-гравийные с содержанием гравия и гальки свыше 40 % ( $C\varphi = 0,06$ ; $d_{cp} = 8,8$ мм)	600	5,48	0,091	4,95	0,06	4,6	0,046	4,4	0,039				
	500	5	0,094	4,46	0,062	4,2	0,048	4,05	0,04				
	400	4,5	0,101	4,03	0,065	3,74	0,05	3,62	0,046				
	300	3,85	0,105	3,44	0,071	3,24	0,055	3,1	0,047				
Песчано-гравийные с содержанием гравия и гальки 20 – 40 % ( $C\varphi = 0,9 - 1,0$ ; $d_{cp} = 2,2$ мм)	600	4,76	0,07	4,28	0,045	4	0,036	3,84	0,031				
	500	4,34	0,073	3,9	0,047	3,64	0,038	3,5	0,032				
	400	3,87	0,078	3,47	0,05	3,28	0,039	3,12	0,033				
	300	3,34	0,081	3,02	0,054	2,8	0,042	2,7	0,036				
Крупнозернистые пески с содержа- нием гравия до 10 % ( $C\varphi = 1,8 - 2,0$ ; $d_{cp} = 0,89$ мм)	600	4,04	0,053	3,62	0,034	3,4	0,026	3,26	0,023				
	500	3,67	0,054	3,3	0,035	3,08	0,027	2,96	0,023				
	400	3,32	0,056	2,94	0,037	2,76	0,028	2,64	0,024				
	300	2,83	0,060	2,54	0,038	2,38	0,029	2,28	0,026				
Мелкозернистые пески ( $C\varphi = 3,9$ ; $d_{cp} = 0,28 - 0,4$ мм)	600	3,42	0,025	3,05	0,017	2,86	0,014	2,74	0,012				
	500	3,10	0,026	2,88	0,018	2,58	0,014	2,50	0,013				
	400	2,77	0,027	2,48	0,019	2,32	0,015	2,22	0,014				
	300	2,40	0,028	2,16	0,020	2	0,016	1,92	0,015				
Лёссовидные суглинки ( $C\varphi = 17,8$ ; $d_{cp} = 0,12$ мм)	600	2,32	0,012	2,07	0,008	1,94	0,0067	–	–				
	500	2,12	0,013	1,88	0,008	1,77	0,0069	–	–				
	400	1,88	0,013	1,68	0,009	1,57	0,0074	–	–				
	300	1,62	0,014	1,45	0,010	1,36	0,0076	–	–				

Необходимое число землесосов рассчитывают в зависимости от их производительности по пульпе и необходимого напора по трассе пульповода. Землесосы устанавливаются по трассе таким образом, чтобы перед каждой землесосной установкой второго и последующих подъемов оставался напор 5-8 м от предыдущей землесосной установки.

Для определения производительности землесоса по пульпе (т. е. рабочей точки принятого землесоса) пересчитывают характеристику землесоса с воды на пульпу и строят график, на который наносят расчетную характеристику пульповода, начиная с расхода, соответствующего его критической скорости, до пересечения кривой пульповода с кривой землесоса. Точка пересечения является рабочей точкой землесоса для заданных консистенции и высоты подъема пульпы, длины и диаметра пульповода.

Для пересчета характеристики землесоса с воды на пульпу рекомендуют формулу Л. С. Животовского:

$$H_{\Pi} = \frac{H_0 \rho_{\Gamma}}{\rho_0} \left[ 1 - 0,05 \frac{\rho_{\Gamma} - \rho_0}{\rho_0} \left( \frac{Q_0 C_{\varphi}^{0,75}}{n_{\text{в}} D_{\text{к}}^3} \right)^{-1} \right], \quad (6.23)$$

где  $H_{\Pi}$  – напор, развиваемый землесосом на пульпе, м;  $H_0$  – напор, развиваемый землесосом на воде, м;  $Q_0$  – расход землесоса по воде, соответствующий максимальному КПД, м<sup>3</sup>/с;  $D_{\text{к}}$  – наружный диаметр колеса землесоса, м;  $n_{\text{в}}$  – частота вращения вала землесоса, 1/с.

#### **6.4. Расчет параметров напорного гидротранспорта по методу ВНИИГ им. Веденеева**

Этот метод применяют для расчета параметров гидравлического транспортирования песчаных, гравийных и галечных грунтов, а также продуктов дробления плотностью 2,6–2,7 т/м<sup>3</sup> при средней крупности 0,25–70 мм. При отношении средней крупности ( $d_{\text{ср}}$ ) к диаметру трубы ( $D_{\Pi}$ ) не менее 0,15 и объемной концентрации ( $S$ ), не превышающей 0,3.

Средневзвешенные значения крупности ( $d_{\text{ср}}$ , мм), пористости ( $P_{\text{ср}}$ ), плотности ( $\rho_{\text{т.ср}}$ ) и коэффициента транспортабельности ( $\varphi_{\text{ср}}$ ) породы определяют по формулам

$$d_{\text{ср}} = \frac{\sum_{i=1}^n d_i \cdot x_i}{100}; \quad (6.24)$$

$$P_{\text{ср}} = \frac{\sum_{i=1}^n P_i \cdot x_i}{100}; \quad (6.25)$$

$$\rho_{\text{т.ср}} = \frac{\sum_{i=1}^n \rho_{\text{т}i} \cdot x_i}{100}; \quad (6.26)$$

$$\varphi_{\text{ср}} = \frac{\sum_{i=1}^n \varphi_i \cdot x_i}{100}, \quad (6.27)$$

где  $d_i$ ,  $P_i$ ,  $\rho_{\text{т}i}$ ,  $\varphi_i$  – соответственно среднеарифметическое значение крупности, пористости, плотности и коэффициента транспортабельности  $i$ -го грунта;  $x_i$  – процентное содержание  $i$ -го грунта, %.

Значения коэффициента транспортабельности грунта для различных фракций представлены в табл. 6.4.

Таблица 6.4

Фракция грунта, мм	0,015– 0,10	0,10– 0,25	0,25– 0,5	0,5– 0,1	1,0– 2,0	2–3	3–5	5–10	более 10
$\varphi$	0,02	0,2	0,4	0,8	1,2	1,5	1,8	1,9	2,0

Коэффициент разнородности грунта определяют из равенства:

$$j = \frac{3d_{10}}{d_{90}}, \quad (6.28)$$

где  $d_{10}$  и  $d_{90}$  – диаметр частиц грунта, меньше которых в составе содержится соответственно 10 и 90 %.

Объемная концентрация гидросмеси:

$$S = \frac{\rho_{\Gamma} - \rho_o}{\rho_{\Gamma, \text{cp}} - \rho_o}, \quad (6.29)$$

где  $\rho_{\Gamma}$ ,  $\rho_o$ ,  $\rho_{\Gamma, \text{cp}}$  – плотность соответственно гидросмеси, воды и средняя плотность грунта, т/м<sup>3</sup>.

Критическую скорость движения пульпы определяют по формуле

$$g_{\text{кр}} = 8,3 \cdot \sqrt[3]{D_{\text{п}}} \cdot \sqrt[6]{S \varphi_{\text{cp}}}, \quad (6.30)$$

где  $D_{\text{п}}$  – диаметр пульповода, м.

Удельные гидравлические сопротивления ( $i_{\Gamma}$ , м/м) в пульповодах определяют из равенства:

$$i_{\Gamma} = i_o + \Delta i, \quad (6.31)$$

где  $i_o$  – удельные гидравлические сопротивления (потери напора) в трубопроводе при транспортировании воды, м/м;  $\Delta i$  – дополнительные удельные потери напора, обусловленные наличием твердых частиц, м/м.

Удельные гидравлические сопротивления ( $i_o$ ) при движении чистой воды определяют по известной формуле Дарси-Вейсбаха.

Коэффициент гидравлических сопротивлений ( $\lambda_o$ ) можно принимать по данным табл. 6.5.

Таблица 6.5

Диаметр трубопровода	150	200	250	300	350	400
Коэффициент $\lambda_o$	0,0185	0,0180	0,0175	0,0165	0,0160	0,0155
Диаметр трубопровода	450	500	600	700	800	–
Коэффициент $\lambda_o$	0,0155	0,0150	0,0145	0,0140	0,010	–

$$\Delta i = \delta \cdot \sqrt[4]{j} \cdot \sqrt[3]{S^2} \left( \frac{Q_{\Gamma, \text{кр}}}{Q_{\Gamma}} \right), \quad (6.32)$$

где  $Q_{г.кр}$ ,  $Q_{г}$  – соответственно производительность по гидросмеси при критической и действительной скоростях, м<sup>3</sup>/ч;  $\delta$  – коэффициент, учитывающий влияние относительной крупности частиц грунта ( $d_{ср} / D_{п}$ ), определяемый по табл. 6.6.

При  $100(d_{ср} / D_{п}) < 0,05$  коэффициент  $\delta$  определяют по формуле

$$\delta = \frac{100d_{ср}}{D_{п}} \quad (6.33)$$

Таблица 6.6

100 · (d <sub>ср</sub> / D <sub>п</sub> )	Коэффициент $\delta$ при диаметре труб, м						
	0,1–0,35	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
0,05	0,05	0,051	0,052	0,053	0,054	0,055	0,56
0,10	0,09	0,1	0,11	0,125	0,14	0,15	0,16
0,15	0,12	0,13	0,155	0,18	0,21	0,23	0,25
0,20	0,14	0,17	0,205	0,24	0,27	0,3	0,33
0,30	0,18	0,21	0,26	0,3	0,34	0,375	0,41
0,4	0,215	0,275	0,325	0,37	0,4	0,435	0,475
0,5	0,23	0,305	0,36	0,405	0,44	0,475	0,505
0,6	0,24	0,33	0,38	0,43	0,47	0,505	0,535
0,7	0,247	0,35	0,4	0,45	0,49	0,53	0,56
0,8	0,25	0,365	0,41	0,465	0,51	0,545	0,58
0,9	0,255	0,375	0,42	0,48	0,53	0,565	0,605
1,0	0,26	0,385	0,43	0,49	0,54	0,58	0,615
1,5	0,27	0,402	0,46	0,53	0,58	0,63	0,665
2,0	0,28	0,415	0,47	0,55	0,595	0,65	0,69
2,5	0,285	0,425	0,48	0,565	0,605	0,665	0,705
3,0	0,29	0,43	0,49	0,575	0,62	0,675	0,715
3,5	0,295	0,435	0,5	0,585	0,63	0,68	0,725
4,0	0,3	0,45	0,51	0,595	0,635	0,685	0,735
4,5	0,3	0,45	0,52	0,6	0,64	0,69	0,735
5,0 и более	0,3	0,45	0,53	0,6	0,64	0,69	0,735

## 6.5. Расчет параметров напорного гидротранспорта по методу В. С. Кнороза

Этот метод расчета гидротранспорта применяют при транспортировании крупнозернистых ( $0,15 \text{ мм} < d < 1,5 \text{ мм}$ ), мелкозернистых ( $0,07 \text{ мм} < d < 0,15 \text{ мм}$ ), пылеватых частиц и отходов обогатительных фабрик ( $d \leq 0,07 \text{ мм}$ ).

Критические скорости (м/с) для вышеуказанных грунтов определяют по формулам:

– при  $0,15 \text{ мм} < d < 1,5 \text{ мм}$

$$v_{\text{кр}} = 0,855 \left( 0,35 + 1,36 \sqrt[3]{P_{\text{в}} D_{\text{п}}^2} \right); \quad (6.34)$$

– при  $0,07 \text{ мм} < d < 0,15 \text{ мм}$

$$v_{\text{кр}} = 0,255 \left( 1 + 2,48 \sqrt[3]{P_{\text{в}}} \cdot \sqrt[4]{D_{\text{п}}} \right); \quad (6.35)$$

– при  $d \leq 0,07 \text{ мм}$

$$v_{\text{кр}} = 0,2 \left( 1 + 3,43 \sqrt[3]{P_{\text{в}} D_{\text{п}}^{0,75}} \right); \quad (6.36)$$

где  $P_{\text{в}}$  – весовая концентрация гидросмеси, %;

$$P_{\text{в}} = \frac{\rho_{\text{г}} - \rho_{\text{о}}}{\rho_{\text{т.ср}} - \rho_{\text{о}}} \cdot \frac{\rho_{\text{т.ср}}}{\rho_{\text{о}}} \cdot 100. \quad (6.37)$$

Удельное гидравлическое сопротивление:

$$i_{\text{г}} = i_{\text{о}} \cdot \frac{\rho_{\text{г}}}{\rho_{\text{о}}}. \quad (6.38)$$

Расчеты гидротранспорта можно проводить либо в одну, либо в две стадии. При двухстадийном расчете выполняют:

- а) *приближенный расчет;*
- б) *детальный (проверочный) расчет.*

При приближенном расчете диаметр пульповодов принимают на основе ориентировочных значений критических скоростей, которые принимают по таблицам. А затем определяют потери напора при движении пульпы с этой скоростью, подбирают тип и качество землесосов (ориентировочно).

При детальном расчете значение критической скорости и гидравлические сопротивления определяют с учетом физико-

механических свойств транспортируемого грунта по одной из методик, а затем уточняют параметры землесосной установки.

**Пример 1.** Произвести двухстадийный расчет напорного гидротранспорта пульпы при следующих исходных данных:

– породы песчаные (песка до 50%) с гравием и небольшим содержанием глинистых фракций; (супесь тяжелая, IV категории);

– средний диаметр частиц  $d_{\text{ср}} = 0,15$  мм, по составу неоднородные;

– часовая производительность гидромониторной установки по грунту  $W_{\text{г}} = 120$  м<sup>3</sup>/ч;

– дальность транспортирования  $L = 1500$  м;

– высотная отметка карьера  $H_{\text{к}} = +40$ ;

– высотная отметка гидроотвала  $H_{\text{го}} = +60$ ;

– высота уступа  $H_{\text{у}} = 15$  м;

– высота дамбы обвалования  $H_{\text{д}} = 15$  м;

– удельный расход воды принимают по данным [1, табл. 2.6]  $q = 8$  м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>;

– пористость грунта  $P = 0,3$ ;

– плотность грунта  $\rho_{\text{т}} = 2,5$  т/м<sup>3</sup>;

– содержание частиц < 2 мм  $R = 94$  %.

### ***Приближенный расчет***

1. Часовая производительность землесосной установки по пульпе (формула 6.1)

$$Q_{\text{г}} = 120 [(1 - 0,3) + 8] = 1040 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

2. Плотность пульпы (формула 6.2)

$$\rho_{\text{г}} = \frac{8 \cdot 1 + 2,5(1 - 0,3)}{8 + (1 - 0,3)} = 1,12 \text{ т/м}^3.$$

3. Консистенцию пульпы принимаем по удельному расходу воды, т. е. Т:Ж равно 1:8.

4. Концентрация (объемная) твердых частиц в пульпе (формула 6.3)

$$S = \frac{1,12 - 1,0}{2,5 - 1,0} \times 100 = 8 \%$$

5. Ориентировочно значение диаметра пульповода определим на основании данных табл. 6.7.

Таблица 6.7

Диаметр трубопровода	Критическая скорость транспортирования, м/с			
	глинистых фракций	песчаных с примесью глинистых фракций	песка 50 % и гравия с небольшим содержанием глинистых фракций	гравия, щебня
200	1,6	1,9	2,4	3
300	1,8	2,1	2,9	3,6
400	2,2	2,4	3,4	4,3
500	2,5	3,0	3,8	4,8
600	2,7	3,2	4,1	5,3

Необходимо, чтобы при выбранном диаметре пульповода фактическая скорость была на 10–20 % выше значения критической скорости, т.е.

$$g_{\phi} \geq g_{кр}$$

Задаемся рядом значений диаметров пульповодов, при этом  $g_{\phi}$  определяем по формуле (формула 6.5)

$$g_{\phi} = \frac{4Q_3}{\pi D^2 3600}, \text{ м/с}$$

– при диаметре пульповода 200 мм:

$$g_{\phi} = \frac{4 \cdot 1040}{3,14 \cdot 0,2^2 \cdot 3600} = 9,2, \text{ м/с}; \quad g_{кр} = 2,4 \text{ м/с}; \quad g_{\phi} \geq g_{кр};$$

– при диаметре пульповода 300 мм:

$$g_{\phi} = \frac{4 \cdot 1040}{3,14 \cdot 0,09 \cdot 3600} = 4,1 \text{ м/с}; \quad g_{кр} = 2,9 \text{ м/с}; \quad g_{\phi} \geq g_{кр};$$

– при диаметре пульповода 400 мм:

$$g_{\phi} = \frac{4 \cdot 1040}{3,14 \cdot 0,16 \cdot 3600} = 2,3 \text{ м/с}; \quad g_{кр} = 3,4 \text{ м/с}; \quad g_{\phi} \geq g_{кр}.$$

Принимаем диаметр пульповода равным 350 мм при котором фактическая скорость движения гидросмеси равна 3 м/с.



## Потери напора при приближенном расчете

Потери напора при гидротранспорте определяют из следующего выражения:

$$H = h'_{\Pi} + h'_B + h_{\text{вс}} + h_{\lambda} + h_M + h_o, \text{ м},$$

где  $h'_{\Pi}$  – потери напора, обусловленные высотой подъема пульпы, м вод. ст.;  $h'_B$  – потери напора, расходуемые на всасывание пульпы, м вод. ст.;  $h_{\text{вс}}$  – потери напора во всасывающем трубопроводе (принимают равными  $h_{\text{вс}} = 1,5-2,5$  м вод. ст.);  $h_{\lambda}$  – потери напора по длине пульповода, м вод. ст.;  $h_M$  – местные потери, (принимают  $h_M = (0,1-0,15)h_{\lambda}$ );  $h_o$  – остаточный напор (принимают равным  $h_o = 3-5$  м вод. ст.).

Потери напора, обусловленные высотой подъема пульпы, определяют из выражения

$$h'_{\Pi} = h_{\Pi} \cdot \rho_{\Gamma}, \text{ м},$$

где  $h_{\Pi}$  – разность отметок оси землесоса в карьере и оси трубопровода на гидроотвале, м;  $\rho_{\Gamma}$  – плотность пульпы, т/м<sup>3</sup>.

Разность отметок оси землесоса в карьере и оси трубопровода на гидроотвале определяют как

$$h_{\Pi} = H_y + (H_{\text{го}} - H_{\text{к}}) + H_q = 15 + (60 - 40) + 15 = 50, \text{ м}.$$

Тогда  $h'_{\Pi} = 50 \cdot 1,12 = 56$  м.

Потери напора, расходуемые на всасывание пульпы:

$$h'_B = h_B \cdot \rho_{\Gamma}, \text{ м},$$

где  $h_B$  – высота всасывания пульпы (обычно принимают по технической характеристике землесоса, примем  $h_B = 4$  м);

$$h'_B = 4 \cdot 1,12 = 4,5, \text{ м}.$$

Потери напора по длине пульповода

$$h_{\lambda} = i_{\Pi} \cdot \rho_{\Gamma} \cdot L, \text{ м},$$

где  $i_{\Pi}$  – потери напора на 1 м длины пульповода, м;  $L$  – длина пульповода, м.

Потери напора на 1 м длины пульповода могут быть определены из выражения

$$i_{\text{п}} = i_0 \cdot K, \text{ м/м,}$$

где  $i_0$  – потери напора при движении чистой воды, м/м;  $K$  – коэффициент, учитывающий консистенцию пульпы (принимается по данным табл. 6.8).

Таблица 6.8

Т:Ж	1:3	1:5	1:8	1:10	1:12
$K$	1,6	1,5	1,4	1,4	1,2

Потери напора при движении чистой воды составят (формула 6.11)

$$i_0 = \frac{\lambda_0 g^2}{D 2 g} = \frac{0,016 \cdot 3^2}{0,35 \cdot 2 \cdot 9,8} = 0,02096, \text{ м/м.}$$

Значения коэффициента  $\lambda_0$  приняты по данным табл. 6.5.

Тогда:

$$i_{\text{п}} = 0,02096 \cdot 1,4 = 0,0294, \text{ м/м;}$$

$$h_{\lambda} = 0,0294 \cdot 1,12 \cdot 1500 = 49,5 \text{ м.}$$

Местные потери составят:  $h_{\text{м}} = 0,1 h_{\lambda} = 0,1 \cdot 49,5 = 5 \text{ м;}$

Остаточный напор принимаем:  $h_0 = 4,5 \text{ м.}$

Следовательно, потери напора при гидротранспорте составят:

$$H = 56 + 4,5 + 2,5 + 49,5 + 5 + 4,5 = 122 \text{ м.}$$

По производительности и напору принимаем ориентировочно тип и количество землесосов для землесосной установки.

Для нашего примера имеем:  $Q_3 = 1040 \text{ м}^3/\text{ч; } H = 122 \text{ м.}$

Принимаем 2 землесоса ГРУ-2000 с параметрами:

$Q_3 = 1050 \text{ м}^3/\text{ч; } H = 63 \text{ м.}$

Для обеспечения необходимого напора землесосы соединяем последовательно.

## Детальный расчет напорного гидротранспорта

При детальном расчете производим проверку и уточнение выбранных приближенным методом диаметра пульповода и грунтовых насосов по действительным значениям критической скорости и гидравлических сопротивлений.

Расчет произведем по методике В. В. Трайниса для гидротранспорта кусковатых смесей.

Численные значения коэффициентов, входящих в формулу Трайниса, составят:

$$C = 0,75 \frac{100 - 94}{100} = 0,045;$$

$$\Psi = 0,65 \sqrt[6]{\frac{0,66}{2,5 - 1}} = 0,57.$$

Тогда значение критической скорости (формула 6.9):

$$g_{кр} = \sqrt{9,8 \cdot 0,35} \sqrt[3]{\frac{1,12 - 1,0}{1,4 \cdot 0,57 \cdot 0,016 \cdot 1,12}} \cdot 0,045 = 1,35, \text{ м/с.}$$

При малых значениях  $C$  ( $C < 0,3 - 0,4$ ) значение  $g_{кр}$  увеличивают на 15–20 %, следовательно, фактическое значение критической скорости при диаметре пульповода 350 мм составит:

$$g_{кр} = 1,35 \cdot 1,2 = 1,62 \text{ м/с.}$$

Так как фактическая скорость течения пульпы значительно превышает критическую ( $3 > 1,62$ ), проверяем режимы течения пульпы в пульповодах диаметром 400 и 450 мм

$$g_{кр400} = 1,73 \text{ м/с, } g_{ф400} = 2,3, \text{ м/с;}$$

$$g_{кр450} = 1,84 \text{ м/с, } g_{ф450} = 1,82 \text{ м/с.}$$

Окончательно принимаем диаметр пульповода 400 мм.

### Потери напора при детальном расчете

Потери напора на 1 м длины пульповода (формула 6.8):

$$i_r = i_o \frac{\rho_r}{\rho_o} + \frac{\sqrt{g \cdot D} (\rho_r - \rho_o)}{K \Psi g \rho_o} C, \text{ м/м.}$$

Потери напора на 1 м при движении чистой воды составят (формула 6.11):

$$i_0 = \frac{\lambda_0 g^2}{D 2 q} = \frac{0,0155 \cdot 2,3^2}{2 \cdot 9,8 \cdot 0,4} = 0,0105, \text{ м/м.}$$

При движении пульпы с  $\rho_r = 1,12 \text{ т/м}^3$ :

$$i_r = 0,0105 \cdot \frac{1,12}{1,0} + \frac{\sqrt{9,8 \cdot 0,4} \cdot (1,12 - 1,0)}{1,4 \cdot 0,57 \cdot 2,3 \cdot 1,0} \cdot 0,045 = 0,0176, \text{ м/м.}$$

Потери напора по длине пульповода  $h_\lambda$  рассчитываем по формуле

$$h_\lambda = i_r L$$

$$h_\lambda = 0,0176 \cdot 1500 = 26,4 \text{ м.}$$

Потери напора при гидротранспорте составят

$$H = 56 + 4,5 + 2,5 + 26,4 + 2,6 + 5 = 97 \text{ м.}$$

Окончательно принимаем 2 забойных землесоса ГРУ-2000 с параметрами  $Q_3 = 1050 \text{ м}^3/\text{ч}$ ,  $H = 63 \text{ м}$ . Для обеспечения необходимого напора принимаем последовательную схему соединения.

**Пример 2.** Определить параметры гидротранспортирования для следующих условий:

– содержание фракций: +10; 10–5; 5–3; 3–2; 2–1; 1–0,5; 0,5–0,25; 0,25–0,1; – 0,1 мм равно соответственно 0; 2; 5; 10; 10; 15; 20; 30; 8 %;

– пористость породы  $P = 35 \%$ ;

– консистенция пульпы 1:5;

– расход пульпы  $Q_{\text{п}} = 4000 \text{ м}^3/\text{ч}$ ;

– плотность породы  $\rho_r = 2,65 \text{ т/м}^3$ ;

– высота подъема пульпы  $h_r = 10 \text{ м}$ ;

– длина пульповода  $L_{\text{п}} = 800 \text{ м}$ .

### **Порядок расчета**

1. Определяем плотность пульпы (формула 6.2)

$$\rho_r = \frac{q \cdot \rho_o + \rho_r \cdot (1 - P)}{q + (1 - P)} = \frac{5 \cdot 1 + 2,65 \cdot (1 - 0,35)}{5 + (1 - 0,35)} = 1,19, \text{ т/м}^3.$$

2. Определяем объемную концентрацию пульпы (формула 6.3)

$$S = \frac{1,19 - 1}{2,65 - 1} = 0,115.$$

3. Для определения коэффициента лобового сопротивления по табл. 6.1 определяем значение  $(\sqrt{C_\varphi})^{-1,5}$  и находим их средневзвешенное значение (формула 6.21)

$$\begin{aligned} (\sqrt{C_\varphi})^{-1,5} &= \frac{1,95 \cdot 1,2 + 1,9 \cdot 0,8 + 1,75 \cdot 5 + 1,5 \cdot 10 + 1,2 \cdot 10}{100} + \\ &+ \frac{0,75 \cdot 15 + 0,4 \cdot 20 + 0,1 \cdot 30 + 0,025 \cdot 8}{100} = 0,62. \end{aligned}$$

Зная значение  $(\sqrt{C_\varphi})^{-1,5}$ , по табл. 6.2 определяем значение  $C_\varphi$ , которое равно в данном случае равно 1,89.

4. По расходу пульпы ориентировочно принимаем диаметр пульповода  $D = 600$  мм.

5. По табл. 6.3 находим критическую скорость  $\mathcal{G}_{кр} = 4$  м/с.

6. Рассчитываем диаметр пульповода (формула 6.5)

$$D = \sqrt{\frac{4 \cdot 4000}{3600 \cdot 4 \cdot 3,14}} = 0,59 \text{ м.}$$

Принимаем ближайший стандартный диаметр пульповода  $D = 600$  мм (внутренний диаметр) с учетом толщины стенки трубы.

7. Определяем критическую скорость движения пульпы (формула 6.17)

$$\mathcal{G}_{кр} = 2,8 \cdot \sqrt[6]{0,115} \cdot \frac{\sqrt{9,81 \cdot 0,6}}{\sqrt[4]{1,89}} = 4,05 \text{ м/с.}$$

8. Определяем фактическую скорость движения пульпы (формула 6.16)

$$\mathcal{G}_ф = \frac{4 \cdot 4000}{3,14 \cdot 0,6^2 \cdot 3600} = 3,94 \text{ м/с.}$$

Так как скорость движения пульпы меньше критической скорости на 2%, потери напора можно принять по табл. 6.3 для ориентировочных расчетов или определить по формуле для детальных расчетов (формула 6.18):

$$i_{п.кр} = \frac{\lambda_o \cdot g_{кр}^2}{2 \cdot q \cdot D} \times (1 + 8\sqrt{S}) = \frac{0,01 \cdot 4,05^2}{2 \cdot 9,81 \cdot 0,6} \times (1 + 8\sqrt{0,115}) = 0,052, \text{ м.}$$

9. Определяем общие потери напора по длине пульповода

$$h_{об} = i_{г.кр} \cdot L_{п} \cdot K_{мс} = 0,052 \cdot 800 \cdot 1,05 = 43,6, \text{ м.}$$

10. Определяем напор землесосной станции

$$H_{п} = h_{об} + h_{г} \cdot \rho_{г} = 43,6 + 10 \cdot 1,19 = 55,5, \text{ м.}$$

11. При напоре землесосной станции 55,5 м и расходе пульпы 4000 м<sup>3</sup>/ч по каталогу принимаем землесос 20ГРУ-8Т с колесом диаметром 1250 мм.

12. По полученным данным строим характеристику землесоса  $Q_{п} = f(H_{п})$ .

13. Определяем фактическую скорость движения и потери напора на 1 м длины пульповода при расходе пульпы 4500 м<sup>3</sup>/ч

$$g_{ф} = \frac{4 \cdot 4500}{3,14 \cdot 0,6^2 \cdot 3600} = 3,43 \text{ м/с;}$$

$$i_{п} = i_o + \left[ i_{п.кр} - i_o \times \left( \frac{g_{кр}}{g_p} \right)^2 \times 4 \sqrt{\frac{g_{кр}}{g_p}} \right] =$$

$$= \frac{0,01 \cdot 4,05^2}{2 \cdot 9,81 \cdot 0,6} + \left[ 0,052 - \frac{0,1 \cdot 4,05^2}{2 \cdot 9,81 \cdot 0,6} \left( \frac{4,05}{3,43} \right)^2 \right] \cdot 4 \sqrt{\frac{4,05}{3,43}} = 0,054 \text{ м.}$$

14. Определяем напор землесосной станции

$$H_{п} = 0,054 \cdot 800 \cdot 1,05 + 10 \cdot 1,19 = 57,2, \text{ м.}$$

15. Определяем фактическую скорость движения пульпы и потери напора на 1 м длины пульповода при расходе пульпы 5000 м<sup>3</sup>/ч.

$$g_{\Phi} = \frac{4 \cdot 5000}{3,14 \cdot 0,6^2 \cdot 3600} = 4,9 \text{ м/с};$$

$$i_{\Pi} = \frac{0,01 \cdot 4,05^2}{2 \cdot 9,81 \cdot 0,6} + \left[ 0,052 - \frac{0,1 \cdot 4,05^2}{2 \cdot 9,81 \cdot 0,6} \left( \frac{4,05}{4,9} \right)^2 \right] \cdot 4 \sqrt{\frac{4,05}{4,9}} = 0,0565 \text{ м};$$

16. Определяем напор землесосной станции

$$H_{\Pi} = 0,055 \cdot 800 \cdot 1,05 + 10 \cdot 1,19 = 59,4, \text{ м.}$$

По этим данным строим характеристику пульповода  $Q_{\Pi} = f(H_{\Pi})$ . Точка пересечения обеих кривых дает рабочую точку землесоса при заданных длине пульповода и высоте подъема. В случае переменной длины пульповода определяют рабочие точки землесоса при *min* и *max* длине пульповода с учетом высоты подъема в обоих случаях. Годовая производительность землесоса в этом случае равна среднему значению из значений, соответствующих двум рабочим точкам землесоса.

### **Вопросы для самоконтроля**

1. Какие свойства пород оказывают влияние на процесс гидротранспортирования пульпы?
2. В чем заключается расчет напорного гидротранспорта?
3. Перечислите основные условия применения различных методик расчета критических скоростей и удельных гидравлических сопротивлений.
4. По каким параметрам производят выбор грунтовых насосов?
5. Схемы соединения грунтовых насосов.
6. Порядок определения диаметра пульповода.
7. Рассказать порядок определения «рабочей точки» землесосной станции.
8. Какие параметры и показатели определяют по графику гранулометрического состава?
9. Критическая скорость движения пульпы.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №7

### Тема: *«Расчет самотечного гидротранспорта пульпы»*

Целью работы является получение студентами навыков расчета самотечного гидротранспорта пульпы.

#### 7.1. Общие сведения

При самотечном (безнапорном) гидротранспортировании перемещение потока гидросмеси происходит под действием силы тяжести за счет разности отметок между начальной и конечной точками транспортирования. При этом поток всегда имеет свободную поверхность. Основной целью расчета самотечного гидротранспорта является определение необходимого уклона и параметров лотков или земляных канав.

К преимуществам безнапорного гидротранспорта относят отсутствие энергетических затрат на перемещение потока гидросмеси, небольшие капитальные затраты (транспортируемая система обладает малой металлоемкостью и не требует особого качества исполнения и специальных загрузочных механизмов), высокую надежность работы при попадании негабаритов и посторонних предметов. Основным недостатком безнапорного гидротранспорта является необходимость иметь значительную разность отметок и ограниченность условий применения рельефом местности.

В условиях открытых горных разработок лотки для самотечного гидротранспорта пород подразделяют на забойные (для транспорта гидросмеси в пределах рабочей площадки уступа), распределительные (для транспорта гидросмеси от рабочих площадок к основной магистрали), магистральные (для транспорта гидросмеси вне контуров карьеров), отвальные (для укладки породы на гидроотвалах). Забойные, распределительные и отвальные лотки собираются из отдельных секций. Магистральные лотки изготавливают на месте работ из досок толщиной 4–5 см, которые соединяют в четверть и скрепляют при помощи деревянных хомутов. Расстояние между хомутами магистральных и секционных лотков 1,5 и 1 м соответственно. Забойные, распределительные и отвальные лотки являются сборно-разборными. Иногда применяют металлические лотки.



## 7.2. Транспортирование твердых частиц

Теоретические основы безнапорного гидротранспорта базируются на следующих физических процессах, сопровождающих движение гидросмеси.

1. Поток, двигаясь на наклонной плоскости, увеличивает свою кинематическую энергию и интенсивность внутреннего турбулентного перемешивания.

2. Силы воздействуют на твердые частицы и перемещают их как во взвешенном состоянии, так и состоянии волочения в придонной области.

3. В зависимости от уклона дна изменяется устойчивость твердых частиц, так как часть их веса проектируется на направление движения. При больших уклонах их передвигать легче (при уклоне, большем угла естественного откоса, частицы будут двигаться под действием собственного веса и без воды). Находясь же в потоке во взвешенном состоянии, частицы утяжеляют поток, что приводит к увеличению двигающей силы.

4. Наличие твердых частиц (особенно в природной области потока) увеличивает силу сопротивления движению.

Основной характеристикой самотечного гидротранспорта является транспортирующая способность потока. Она характеризуется собой предельное количество твердого, которое поток способен переносить вместе с водой. На эффективность транспортирования оказывают влияние уклон дна, площадь и форма поперечного сечения потока, расход воды, гранулометрический состав и плотность твердого, местные сопротивления.

Транспортирующая способность потока зависит от неоднородности по крупности частиц и наличия мелких фракций, которые создают транспортирующую способность жидкости. Добавление в кусковую породную смесь некоторого количества мелких фракций резко увеличивает транспортирующую способность по массе твердого. На транспортирующую способность потока большое влияние оказывает сила взаимодействия перемещаемого твердого и дна, которая зависит от коэффициента трения. Транспортирующая способность жидкости характеризуется критической скоростью потока  $U_{кр}$ , при которой транспортирующая способность используется полностью. При уменьшении скорости

транспортирующая способность уменьшается, а при возрастании скорости она увеличивается

Гидротранспорт твердого безнапорным потоком воды может происходить как во взвешенном состоянии, так и донным волочением. Мелкие частицы перемещаются во взвешенном состоянии, а куски горной массы движутся в основном в придонной части короткими скачками, перекачиванием или скольжением. Методы расчета для этих видов движения твердой фазы различны.

Расчет безнапорного гидротранспорта заключается в определении необходимого уклона дна потока и его поперечных размеров при заданных производительности по твердому, удельном расходе воды и физико-механических свойствах транспортируемой горной массы.

Ниже рассмотрен универсальный метод расчета безнапорного гидротранспорта, разработанный канд. техн. наук В. К. Тарасовым. Суть метода заключается в подборе эффективного сочетания критической скорости  $g_{кр}$  и уклона  $i$ . Для обеспечения требуемой скорости потока необходим уклон. Чем крупнее и тяжелее куски, тем больше должна быть скорость потока. Для получения большой скорости потока необходим большой уклон. Увеличение уклона лотка вызывает уменьшение устойчивости (сопротивляемости) транспортируемых кусков, т. е. на наклонной поверхности требуется меньшая скорость для их перемещения. Составляющая веса кусков проектируется на ось движения. В экспериментах отмечались режимы, когда добавка твердого в поток вызывала ускорение движения.

В основу метода положена расшифровка физического смысла коэффициента Шези ( $C$ ), который представляет собой соотношение величин, характеризующих активные силы и силы сопротивления. Если принять  $\tau = k_T g^2$ , что соответствует развитой турбулентности, то уравнение равномерного движения примет вид:

$$\frac{k_T g^2}{\rho_{см}} = R i. \quad (7.1)$$

где  $R$  - гидравлический радиус, м;  $R = \omega / x$ ,  $x$  - смоченный периметр, м;  $i$  - гидравлический уклон (потери напора на единицу длины потока).

Из этого уравнения следует что

$$g = \sqrt{\frac{\rho_{см}}{k_T}} \sqrt{Ri} = C \sqrt{Ri}. \quad (7.2)$$

Таким образом, для гидротранспорта

$$C = \sqrt{\frac{\rho_T}{k_T}}, \quad (7.3)$$

где  $k_T$  – коэффициент, характеризующий трение на границах потока.

Значения  $g_{кр}$  меняются в сравнительно небольшом диапазоне. Это свидетельствует о возможности применения инженерных методов расчета параметров безнапорного гидротранспортирования. Исследования показали, что при  $\rho_T > 1,05 \text{ т/м}^3$  добавка твердого вызывает ускорение потока (коэффициент Шези увеличивается, см. рис. 7.1), а при  $\rho_T \leq 1,05 \text{ т/м}^3$  увеличивается трение на границах потока.

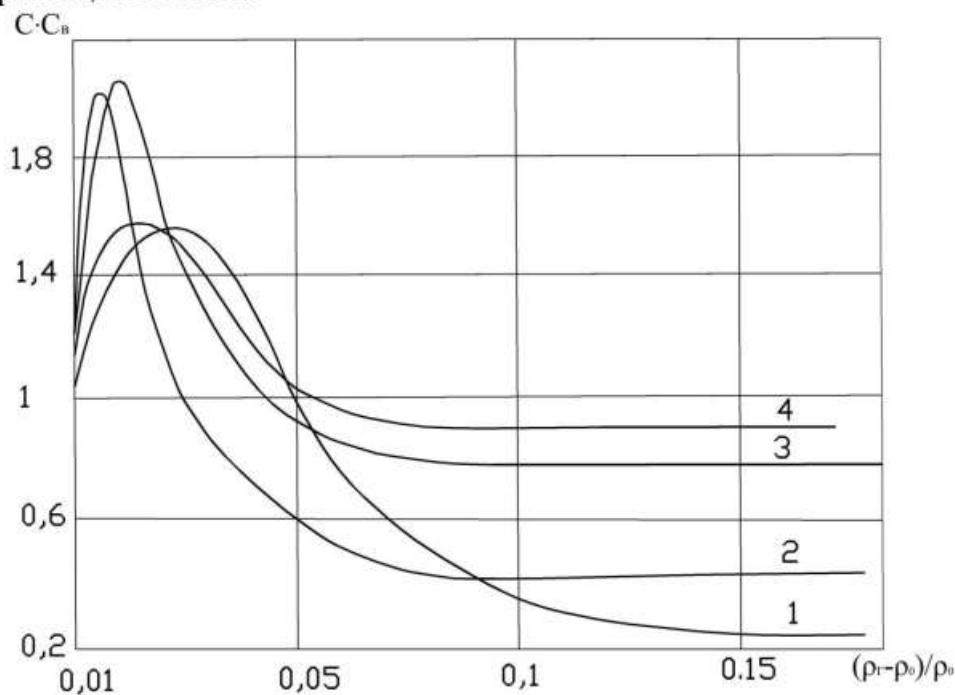


Рис. 7.1. График зависимости коэффициента Шези для гидросмеси ( $C$ ) от отношения  $(\rho_T - \rho_0)/\rho_0$  ( $C_B$  – коэффициент Шези для воды):

1, 2, 3, 4 – соответственно при транспортировании крупнокусковой горной массы, песчано-гравелистой смеси, угля, угольно-породной смеси

Параметры безнапорного гидротранспорта рассчитываем в следующем порядке.

1. Определяем критическую скорость потока (с некоторым запасом транспортирующей способности) по формуле

$$g_{\text{кр}} = B \sqrt[4]{\frac{1}{F_r}} \sqrt[9]{\frac{\rho_T - \rho_0}{\rho_0} \left( \frac{\rho_T - \rho_0}{\rho_0} \right)^2}, \quad (7.4)$$

где  $F_r = W^2 / (g \cdot d)$  – критерий динамического подобия Фрунда, определяемый для транспортируемой фракции;  $d$  – средняя крупность фракций, м;  $B$  – коэффициент, который зависит от свойств транспортируемой горной массы, и характеризуется следующими данными: песчано-гравелистая смесь –  $B = 3,85$ ; смесь угля и породы –  $B = 3,95$ ; рядовой уголь –  $B = 3,45$ ; крупнокусковой уголь –  $B = 2,86$ .

2. Определяем площадь живого сечения потока по формуле

$$\omega = \frac{Q_T + Q_B}{g_{\text{кр}}}, \quad (7.5)$$

где  $Q_T, Q_B$  – соответственно расход твердого и воды, м<sup>3</sup>/с.

3. Находим размеры живого сечения потока.
4. Определяем гидравлический радиус.
5. Находим коэффициент Шези для воды.
6. Определяем коэффициент Шези для гидросмеси.
7. Рассчитываем уклон лотка.

**Пример 1.** Определить ширину деревянного лотка ( $b_{\text{л}}$ ), его уклон, глубину потока ( $h_{\text{п}}$ ) для безнапорного гидротранспорта песчано-гравелистой смеси при следующих исходных данных:

- средняя крупность фракций  $d = 0,007$  м;
- плотность твердого  $\rho_T = 2,7$  т/м<sup>3</sup>;
- гидравлическая крупность  $W = 0,29$  м/с;
- производительность по горной массе  $Q = 0,036$  м<sup>3</sup>/с при отношении  $Q_T : Q_B = 1,0 : 7,5$ .

### **Порядок расчета**

1. Определяем плотность гидросмеси

$$\rho_{\Gamma} = \frac{\rho_{\Gamma} \cdot \frac{Q_{\Gamma}}{Q_{\text{В}}} + \rho_{\text{о}}}{1 + \frac{Q_{\Gamma}}{Q_{\text{В}}}} = \frac{2,7 \cdot 0,13 + 1}{1 + 0,13} = 1,2 \text{ т/м}^3.$$

2. По формуле определяем критическую скорость

$$\begin{aligned} g_{\text{кр}} &= 3,85 \cdot 4 \sqrt{\frac{1}{F_r}} \cdot 9 \sqrt{\frac{\rho_{\Gamma} - \rho_{\text{о}}}{\rho_{\text{о}}} \cdot \left(\frac{\rho_{\Gamma} - \rho_{\Gamma}}{\rho_{\text{о}}}\right)^2} = \\ &= 3,85 \cdot 4 \sqrt{\frac{9,81 \cdot 0,007}{0,29^2}} \cdot 9 \sqrt{\frac{1,2 - 1}{1} \cdot \left(\frac{2,7 - 1,2}{1}\right)^2} = 3,3 \text{ м/с.} \end{aligned}$$

3. По формуле определяем площадь живого сечения потока

$$\omega = \frac{(Q_{\Gamma} + Q_{\text{В}})}{g_{\text{кр}}} = \frac{0,036 + 0,036 \cdot 7,5}{3,3} = 0,092 \text{ м}^2.$$

4. Из условия  $b_{\text{л}} = 3h_{\text{п}}$  определяем размеры живого сечения потока:

– глубина потока

$$h_{\text{п}} = \sqrt{\frac{\omega}{3}} = \sqrt{\frac{0,092}{3}} \approx 0,18 \text{ м;}$$

– ширина лотка

$$b_{\text{л}} = \frac{\omega}{h_{\text{п}}} = \frac{0,092}{0,18} = 0,5 \text{ м.}$$

5. Находим для прямоугольного лотка гидравлический радиус

$$R = \frac{\omega}{\chi} = \frac{b \cdot h_{\text{п}}}{b + 2h_{\text{п}}} = \frac{0,092}{0,5 + 2 \cdot 0,18} = 0,107 \text{ м.}$$

6. По формуле определяем коэффициент Шези для воды ( $n_{\text{ш}} = 0,012$ , см. лаб. работу № 5)

$$C = \frac{1}{n_{\text{ш}}} R^{1/6} = \frac{0,107^{1/6}}{0,012} = 57,4.$$

7. Находим коэффициент Шези для гидросмеси.

Определяем параметр Архимеда, который в данном случае равен 0,2, и по нему на графике (см. рис. 7.1) находим поправку

к коэффициенту Шези, равную 0,4. Тогда коэффициент Шези для гидросмеси –  $C = 0,4 \cdot 57,4 = 22,96$ .

8. Определяем уклон дна лотка

$$i = \frac{g_{кр}^2}{C^2 \cdot R} = \frac{3,3^2}{22,96^2 \cdot 0,0107} \approx 0,2.$$

### ***Вопросы для самоконтроля***

1. Что называется самотечным гидротранспортом?
2. В чем заключается расчет самотечного гидротранспорта пульпы?
3. На каких физических процессах, сопровождающих движение гидросмеси, базируются основы расчета безнапорного транспортирования твердых частиц?
4. Как подразделяются лотки для самотечного гидротранспорта в условиях открытых горных разработок?
5. Порядок расчета параметров самотечного гидротранспорта пульпы.

### **Список рекомендуемой литературы**

1. Ялтанец, И.М. Справочник по гидромеханизации. – М.: Горная книга, 2011. – 737 с.
2. Ялтанец, И.М. Гидромеханизированные и подводные горные работы. Кн. 1. – Разработка пород гидромониторами и землесосными снарядами : учебник для студентов вузов, обучающихся по специальности «Открытые горные работы» направления подготовки «Горное дело». – М.: МГГУ, 2009. – 546 с.
3. Дмитриев, Г. П. Напорные гидротранспортные системы : справ. пособие / Г. П. Дмитриев, Л. И. Махарадзе, Т. Ш. Гочиташвили. – М.: Недра, 1991. – 304с.
4. Нурок, Г. А. Процессы и технология гидромеханизации открытых горных работ. – М.: Недра, 1985.

## **2. Организация самостоятельной работы**

Самостоятельная работа по дисциплине организуется следующим образом:

1. До начала освоения дисциплины обучающемуся необходимо ознакомиться с содержанием рабочей программы дисциплины в следующем порядке:

1.1 содержание знаний, умений, навыков и (или) опыта профессиональной деятельности, которые будут сформированы в процессе освоения дисциплины;

1.2 содержание конспектов лекций, размещенных в электронной информационной среде филиала КузГТУ в порядке освоения дисциплины, указанном в рабочей программе дисциплины;

1.3 содержание основной и дополнительной литературы.

2. В период освоения дисциплины обучающийся осуществляет самостоятельную работу в следующем порядке:

2.1 выполнение практических и (или) лабораторных работы и (или) отчетов в порядке, установленном в рабочей программе дисциплины;

2.2 подготовка к опросам и (или) тестированию в соответствии с порядком, установленном в рабочей программе дисциплины;

2.3 подготовка к промежуточной аттестации в соответствии с порядком, установленном в рабочей программе дисциплины.

В случае затруднений, возникших при выполнении самостоятельной работы, обучающемуся необходимо обратиться за консультацией к педагогическому работнику. Периоды проведения консультаций устанавливаются в расписании консультаций.

В соответствии с рабочей программой дисциплины «Специальные способы разработки рыхлых отложений» в качестве самостоятельной работы предусмотрено:

1. Изучение теоретического материала;
2. Составление обзора по теме: «Повышение эффективности работы гидромониторно-землесосного комплекса разреза путем согласования режимов работы его основных систем»;
3. Выполнение разделов курсовой работы;
4. Подготовка к экзамену.

Список вопросов для подготовки к экзамену:

1. Область применения гидромеханизации на карьерах.
2. Основные процессы и технология гидромеханизации горных работ.
3. Условия применения основного оборудования гидромеханизации: гидромониторов, землесосов, земснарядов, загрузочных аппаратов — и

оборудования для механической подготовки трудноразрабатываемых пород к пульпообразованию.

4. Методические основы расчета процессов гидромеханизации: гидравлического разрушения, самотечного и напорного гидротранспорта, укладки пород в гидроотвалы и осветления воды.

5. Гидротехнические сооружения гидроотвалов.

6. Главные особенности гидродобычи полезных ископаемых при их попутном обогащении.

7. Применение гидравлического транспорта пород и полезных ископаемых на дальние расстояния

8. Исторические сведения о развитии гидромеханизации открытых горных работ.

9. Научно-технический прогресс в области гидромеханизации.

10 Состояние и направления совершенствования гидромеханизации в Кузбассе.

11 Главные особенности гидромеханизации открытых горных разработок.

12 Технологическое оборудование при гидромеханизации открытых горных работ

13 Принципиальные технологические схемы гидромеханизации открытых горных работ.

14 Элементы системы разработки.

15 Влияние свойств пород на процессы гидромеханизации.

16 Влияние физико-механических свойств пород на гидромониторный размыв, разработку земснарядами и драгами, на процессы гидротранспортирования и укладки пород в отвалы.

17 Классификация горных пород по трудности их разработки.

18. Разработка пород гидромониторно-землесосным комплексом.

19 Процесс подготовки пород к размыву.

20 Гидромониторный размыв породы – процесс пульпоприготовления.

21 Гидротранспортирование.

22 Гидроотвалообразование.

23 Правила безопасности при разработке пород гидромониторно-землесосным комплексом.

24 Процессы разработки горных пород драгами и земснарядами .

25 Процессы выемки пород земснарядами.

26 Процессы выемки пород драгами.

27 Правила безопасности при земснарядной и дражной разработках

28 Вскрытие и системы гидравлической разработки месторождений.



- 29 Вскрытие карьерных полей при применении гидромониторно-землесосных комплексов.
- 30 Системы открытой гидравлической разработки.
- 31 Гидротехнические сооружения.
- 32 Общие понятия о гидротехнических сооружениях.
- 33 Классификация гидротехнических сооружений.
- 34 Водосбросные устройства.

Список литературы:

### **Основная литература**

1. Повышение эффективности работы гидромониторно-землесосного комплекса разреза путем согласования режимов работы его основных систем [Текст]: учебное пособие для студентов вузов, обучающихся по специальности "Открытые горные работы" направления подготовки "Горное дело" / С. И. Протасов, Е. А. Кононенко, П. А. Самусев, Ю. И. Литвин; ФГБОУ ВПО «Кузбас. гос. техн. ун-т им. Т. Ф. Горбачева», Каф. открытых горн. работ. – Кемерово : Издательство КузГТУ, 2015. – 155 с. – Доступна Электронная версия:

<http://library.kuzstu.ru/meto.php?n=91331&type=utchnposob:common>

### **Дополнительная литература**

2. Ялтанец, И.М. Справочник по гидромеханизации / И.М. Ялтанец, Н.И. Леванов; Под ред. И.М. Ялтанца. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: «Мир горной книги», Издательство МГГУ, издательство «Горная книга», 2008. – 673 с.

3. Кузнецов, В.В. Гидромеханика и основы гидравлики (Теоретический курс с примерами практических расчетов): учебное пособие / В.В. Кузнецов, К.А. Ананьев; Кузбас. гос. техн. ун-т им. Т.Ф. Горбачева. – Кемерово, 2013. – 266 с.

### **Методическая литература**

1. Подготовка пород к размыву [Электронный ресурс]: методические указания к лабораторным работам по дисциплине «Гидромеханизация открытых горных работ» для студентов специальности 21.05.04

(130400.65) «Горное дело», образовательная программа «Открытые горные работы», всех форм обучения / П. А. Самусев, В. Ф. Воронков; ФГБОУ ВПО «Кузбас. гос. техн. ун-т им. Т. Ф. Горбачева», Каф. открытых горн. работ. – Кемерово, 2015. – 30с. – Доступна электронная версия:

<http://library.kuzstu.ru/meto.php?n=8601>

2. Гидромеханизация открытых горных работ: Методическое пособие для выполнения курсовой работы по дисциплине «Гидромеханизация открытых горных работ» для студентов специальности 21.05.04 «Горное дело»

специализация 03 «Открытые горные работы» специализация/ В.Ф. Белов, филиал КузГТУ в г. Белово, Кафедра горного дела и техносферной безопасности. – Белово, 2019. – 10с. Доступна электронная версия:

<https://eos.belovokyzgty.ru/course/view.php?id=544>

### **Профессиональные базы данных и информационные справочные системы**

1. Электронная библиотека КузГТУ <https://elib.kuzstu.ru/>
2. Электронная библиотечная система «Лань» <http://e.lanbook.com>
3. Электронная библиотечная система Новосибирского государственного технического университета [https://library.kuzstu.ru/method/ngtu\\_metho.html](https://library.kuzstu.ru/method/ngtu_metho.html)
4. Электронная библиотечная система «Юрайт» <https://urait.ru/>
5. Информационно-справочная система «Технорматив»: <https://www.technormativ.ru/>

### **Периодические издания**

1. Вестник Кузбасского государственного технического университета: научно-технический журнал (электронный) <https://vestnik.kuzstu.ru/>
2. Горное оборудование и электромеханика: научно-практический журнал (электронный) <https://gormash.kuzstu.ru/>
3. Горная промышленность: научно-технический и производственный журнал (печатный)
4. Горный журнал: научно-технический и производственный журнал (печатный)
5. Горный информационно-аналитический бюллетень: научно-технический журнал (печатный)
6. Уголь: научно-технический и производственно-экономический журнал (печатный)

### **Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет»**

1. Официальный сайт Кузбасского государственного технического университета имени Т.Ф. Горбачева. Режим доступа: <https://kuzstu.ru/>.
2. Официальный сайт филиала КузГТУ в г. Белово. Режим доступа: <http://belovokyzgty.ru/>.
3. Электронная информационно-образовательная среда филиала КузГТУ в г. Белово. Режим доступа: <http://eos.belovokyzgty.ru/>
4. Научная электронная библиотека eLIBRARY.RU <https://elibrary.ru/defaultx.asp?>

Составитель  
Аксененко Виталий Владимирович

## **СПЕЦИАЛЬНЫЕ СПОСОБЫ РАЗРАБОТКИ РЫХЛЫХ ОТЛОЖЕНИЙ**

Методические материалы для выполнения лабораторных работ  
и организации самостоятельной работы обучающихся

Специальности «21.05.04 Горное дело»

Специализации: 03 «Открытые горные работы»

Печатается в авторской редакции