

гам». На основании выполненных модельных условий был разработан аналитический метод прогноза основных технологических параметров намывных хвостохранилищ [6]. Без больших капитальных затрат появляется возможность оперативно управлять состоянием тела ограждающих дамб в процессе их эксплуатации путем уменьшения расхода фильтрационного потока через намытый массив и снижения высотного положения кривой депрессии. Шаг по вертикали между ярусами дренажей на границе между пляжной и прудковой зонами определяется с учетом возможного снижения водозахватной способности низовых противофильтрационных устройств и состояния внешних откосов.

Список литературы

1. Сухорученков А.И. Железородное сырье: прогноз на завтра // *Металлы Евразии*. 2005. №1. С. 32–34.
2. Основы проектирования, строительства и эксплуатации хвостохранилищ большой вместимости / Л.К. Антоненко, В.Г. Зотеев, А.И. Коваленко, А.М. Иваненко, Т.К. Костерова // *Горный журнал*. 1990. № 11. С.43–45.
3. Антоненко Л.К., Зотеев В.Г. Проблемы безопасной эксплуатации хвостохранилищ и пути их решения // *Горный журнал*. 1998. № 1. С.65–67.

4. Трубецкой К.Н., Уманец В.Н., Никитин М.Б. Классификация техногенных месторождений, основные категории и понятия // *Горный журнал*. 1989. № 12. С. 6–9.
5. А.с. 1301911 РФ, МКИ E02B 7/06. Способ возведения хвостохранилища / Мельников И.Т., Лаушкин Б.А. (РФ).
6. Мельников И.Т. Математическое описание технологии возведения намывных хвостохранилищ равнинного и нагорного типов // *Вестник МГТУ им. Г.И. Носова*. 2007. № 1. С. 3–9.

Bibliography

1. Syhoruchencov A.I. Ore material: forecast on tomorrow // *Metals Europe Asia*. 2005. №1. p. 32–34.
2. Bases of designing, building and operation of tail-storing хвостохранилищ the big capacity // Antonenko L.K., Zoteev V.G., Kovalenko A.I., Ivanenko A.M., Rosterova T. K // *Mining magazine*. 1990. № 11. p. 43-45.
3. Antonenko L.K., Zoteev V.G. Problems to safe usage tail-storing and way of their decision // *Mining magazine*. 1998. № 1. p. 65-67.
4. Trubetskoy K.N., Umanets V.N., Nikitin M.B. Classification of technogenic deposits, the basic categories and concepts // *Mining magazine*. 1989. № 12. p. 6-9.
5. The copyright certificate 1301911, MCI E02B 7/06. A way of erection of tail-storing. Inventors Melnikov I.T., Laushkin B.A.
6. Melnikov I.T. Analytical method for determining the technological parameters of plain and upland of tail-storing // *the Bulletin of MGTU of G.I. Nosova, Magnitogorsk*, № 1, 2007, S.3-9.

УДК 622.012:658.5

Мельников И.Т., Пыталев И.А., Корнилов С.Н., Кутлубаев И.М., Васильев К.П., Мельников И.И., Шевцов Н.С.

СНИЖЕНИЕ ЭНЕРГОЁМКОСТИ ГИДРОТРАНСПОРТА ХВОСТОВ ОБОГАТИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА ЖЕЛЕЗОРУДНЫХ ГОРНО-ОБОГАТИТЕЛЬНЫХ КОМБИНАТОВ

Статья посвящена решению актуального вопроса – снижению энергоёмкости и металлоёмкости гидротранспортирования отходов обогащения железорудных горно-обогатительных предприятий. На основе результатов выполненных промышленных экспериментов предложена методика определения основных технологических параметров гидротранспорта – критических гидравлических уклонов, расходов транспортируемой пульпы и диаметров пульпопроводов.

Ключевые слова: хвосты, горно-обогатительные производство, гидротранспорт, энергоёмкость, металлоёмкость, пульпопровод, гидравлический уклон, хвостохранилище.

The article is devoted to solving the urgent problem – reducing the energy and metal during hydrotransportation of tailings of iron ore mining and processing enterprises. Based on the results of experiments proposed a method of industrial identify of the main technological parameters of hydraulic transport – critical hydraulic gradients, the cost of the transported slurry and slurry pipelines diameters.

Key words: tailings, mining-treatment manufacture, hydro transport, energy capacity, meta capacity, slurry pipeline, hydraulic gradient, tailing.

Для горной промышленности характерно ухудшение горно-геологических условий разработки полезных ископаемых. По мере эксплуатации месторождений увеличивается глубина горных работ, высота внешних отвалов и хвостохранилищ, а также дальность транспортирования отходов горно-обогатительного производства. В настоящее время разрабатываются месторождения, содержание железа в которых не превышает 40%, а годовой выход хвостов на разных предприятиях варьирует от 0,876 до 38,67 млн т. Динамика работы крупнейших железорудных горно-обогатительных предприятий России, Украины и Казахстана приведены в *табл. 1*.

Горно-обогатительные комбинаты чёрной металлургии России эксплуатируют свыше 35 крупных хвостохранилищ, в которые уложено более 2,5 млрд м³ хвостов. Только на трёх ведущих предприятиях железорудной отрасли, являющихся объектами исследований, к 2010 году в хвостохранилищах Качканарского (ОАО «Ванадий»), Соколовско-Сарбайского («АО

УРПО ССПО») и ГОП ОАО «ММК» накоплено соответственно 757, 335 и 102 млн м³ отходов обогащения. В Приднепровском регионе, являющимся основным поставщиком железорудного сырья на Украине, аккумулировано более 3,5 млрд м³ хвостов. В настоящее время в связи с увеличением высоты хвостохранилищ и дальности транспортирования пульпы затраты на складирование 1 т хвостов соизмеримы с затратами на добычу 1 т железной руды.

Процесс обогащения руды связан с большим потреблением воды. Удельный расход технологической оборотной воды на 1 т руды или концентрата, являющийся интегральным критерием качества и обогатимости полезного ископаемого, для различных ГОКов представлен в *табл. 2*.

В связи с невысоким содержанием железа в сырой руде и вовлечением в разработку труднообогатимых руд объёмы перекачиваемой пульпы достигают 20–90 тыс. м³/ч. Гидротранспорт хвостов обога-

щения с весовой консистенцией $R=Ж:Т$ более 15–20 м³ на 1 т твёрдого приводит к транспортированию больших объёмов пульпы и, как следствие, к необходимости подачи значительных объёмов оборотной воды из прудков-отстойников хвостохранилищ на обогатительные фабрики (ОФ). Поэтому существующие системы гидротранспорта являются энергоёмкими, трудозатратными, а данные показатели неуклонно возрастают по мере наращивания хвостохранилищ и вовлечения в эксплуатацию новых, более удалённых накопителей отходов обогащения.

Большие объёмы перекачиваемой пульпы вызывают необходимость применения стальных пульпопроводов большого диаметра от 500 до 1200 мм, срок службы которых не превышает 3–5 лет из-за большого абразивного износа и суммарная длина которых составляет десятки километров. Это является причиной высокой металлоёмкости процесса удаления отходов обогащения. Реализация внутризаводского сгущения однозначно обеспечивает снижение энергозатрат и металлоёмкости, но приводит к увеличению гидравлического уклона и необходимости

Показатели работы горно-обогатительных комбинатов России, Украины и Казахстана в период 1970–2010 гг.

Горно-обогатительный комбинат	Содержание Fe в руде, %		Объём добычи сырой руды Gr, млн т					Выход хвостов G _{хв} , млн т				
	Сырая	Товарная	1970	1980	1990	2000	2010	1970	1980	1990	2000	2010
Качканарский	15,67	61,16	22,49	40,06	45,07	39,86	47,35	18,16	32,24	36,92	32,14	38,67
Лебединский	32,69	68,45	–	25,65	43,65	44,99	47,56	–	16,04	25,22	25,07	28,70
Михайловский	40,80	61,95	–	17,69	38,06	41,30	44,96	–	17,69	18,50	21,33	26,73
Соколовско-Сарбайский	34,30	65,73	24,11	28,67	27,30	30,13	40,22	12,99	16,60	13,80	16,75	23,43
Ингулецкий	32,59	63,79	26,01	33,13	35,23	27,92	31,44	15,65	20,08	20,29	16,42	18,47
Полтавский	30,50	63,32	6,17	25,73	28,11	16,30	28,55	3,74	15,44	17,01	9,786	17,98
Костомукшский	29,59	68,00	–	–	23,55	19,17	26,61	–	–	14,32	12,11	16,75
Северный	35,37	65,39	31,71	40,02	42,46	14,73	28,39	18,06	23,85	23,80	8,752	15,01
Ковдорский	24,12	64,91	6,98	14,00	16,39	9,14	16,51	4,05	8,87	10,61	5,918	10,94
Оленегорский	27,34	65,71	11,04	14,14	15,76	10,69	14,75	6,52	8,74	9,86	6,818	10,08
Южный	34,66	65,23	33,52	33,92	35,62	18,72	16,74	19,11	18,41	18,45	10,37	9,180
Коршуновский	30,07	62,4	12,86	17,75	13,93	8,83	11,29	7,47	10,74	8,32	5,355	7,082
Центральный	33,2	66,77	–	–	15,78	10,11	11,73	–	–	10,13	6,080	6,007
Лисаковский	40,16	49,25	–	8,89	11,74	1,85	3,12	–	2,71	5,25	0,872	1,353
ГОП «ММК»	34,18	61,78	16,46	8,30	2,63	1,64	2,51	8,46	4,93	1,01	0,474	0,876
Средневзвешенное арифметическое	31,15	63,18	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Всего			189,34	307,95	395,28	295,38	371,73	114,21	196,34	233,49	178,26	231,99

Таблица 2

Удельные расходы технологической воды на обогатительной фабрике на 1 т руды или концентрата, весовая консистенция транспортируемой руды

Горно-обогатительный комбинат	Удельный расход воды [*] , м ³ /т		Весовая консистенция пульпы ^{**} R=Ж:Т, м ³ /т
	концентрата $q_T^K = R \cdot \gamma_{XB} / \gamma_K$	руды $q_T = R \cdot \gamma_{XB}$	
Лебединский	35,90	16,87	31,84
Михайловский	20,65	17,85	30,10
Стойленский	34,80	17,40	34,80
Соколовско-Сарбайский	22,64	9,87	17,5
Качканарский	42,36	10,9	9,0
Магнитогорский	28,19	13,11	24,6
Лисаковский	20,83	14,0	42,5
Ковдорский	44,80	11,52	15,5
Средневзвешенное арифметическое	29,58	13,01	23,1

* Расчётные показатели.

** По данным практики.

Таблица 1

подключения сгустительных установок и дополнительных последовательно включённых гидромашин.

Эффективность работы горно-обогатительной комбинатов в значительной мере зависит от того, насколько рационально спроектированы их хвостовые хозяйства. Основным вопросом при расчете гидротранспорта является определение удельных и общих потерь напора в пульпопроводе, пропускной способности гидротранспортной системы и её энергоёмкость. Поэтому целью данной работы явилась разработка методики для определения рациональной степени сгущения пульпы с учётом

подключения дополнительных гидромашин из-за увеличения гидравлических потерь при транспортировании сгущенных пульп и затрат на сгустительные установки.

Скорость движения двухфазных потоков, соответствующая наименее энергоёмкому режиму гидротранспортирования, называется одними авторами критической [1, 2], скоростью на границе выпадения осадка [3] или первой критической скоростью [4, 5]. Гидравлический уклон, отвечающий критической скорости, принято называть критическим или наивыгоднейшим [6, 7].

К настоящему времени как в нашей стране, так и за рубежом проведено множество экспериментальных исследований по гидротранспорту гидросмесей и твердого материала с самыми различными физико-механическими характеристиками в трубах малого и большого диаметра и предложено большое количество эмпирических и полуэмпирических формул для определения гидравлического уклона пульповодов. Детальный анализ существующих расчетных формул позволяет большинство из них представить общим выражением в функции диаметра трубопроводов и скорости движения пульпы [8]:

$$J_n = J_0 + \Delta J = A' \frac{V}{D} + B' \frac{D}{V}, \quad (1)$$

где J_0 – гидравлический уклон пульпопровода при движении чистой воды, м/м; J – дополнительные потери напора на взвешивание твердого в потоке, м/м; A' и B' – переменные коэффициенты пропорциональности, которые являются функциями $A' = f(\lambda)$; $B' = f(\lambda, d_{cp}, \delta_T, \delta_n)$.

Заменим в формуле (1) скорость выражением $V = Q \cdot (900 \cdot \pi \cdot D^2)^{-1}$, после преобразования получим формулу гидравлического уклона при $\lambda = const$.

$$J_n = J_0 + \Delta J = A \cdot \lambda \cdot \frac{Q^2}{D^5} + B \cdot \lambda \cdot \frac{D^{2.5}}{Q}, \quad (2)$$

где J_0 и J_n – гидравлический уклон на чистой воде и пульпе, м/м; ΔJ – дополнительные потери напора, обусловленные наличием твердых частиц в потоке жидкости, м/м; λ – коэффициент сопротивления пульпопровода; Q – расход транспортируемой пульпы по трубопроводу, м³/ч; D – обычный (стандартный) диаметр пульпопровода, м; $A = (164,52 \cdot 10^6)^{-1} \text{ м}^{-1} \cdot \text{ч}^2$; B – параметр, не зависящий от скорости (расхода) и диаметра трубопровода и являющийся функцией различных характеристик гидросмеси, а также ее жидкой и твердой составляющих, рассчитывается по формуле, $\text{м}^{0.5} \cdot \text{ч}^{-1}$:

$$B = 2826 \cdot K \cdot (\delta_n - 1) \cdot d_{cp}^x \cdot (\delta_T - 1)^y, \quad (3)$$

для ламинарной области в диапазоне крупностей $0,010 < d_{cp} < 0,15 \text{ мм}$

$$K = 1045 \text{ м}^{-1.75} \cdot \text{ч}^{-1}; \quad x = 2,25; \quad y = 1,25;$$

для переходной области в интервале частиц диаметром $0,15 < d_{cp} < 1,5 \text{ мм}$

$$K = 91,2 \text{ м}^{-0.25} \cdot \text{ч}^{-1}; \quad x = 0,75; \quad y = 1,25;$$

для турбулентной области с геометрической крупностью зерен $1,5 < d_{cp} < D \text{ мм}$

$$K = 207 \text{ м}^{0.5} \cdot \text{ч}^{-1}; \quad x = 0; \quad y = 0,5;$$

$$\delta_n = \frac{\gamma_n}{\gamma_0} \text{ и } \delta_T = \frac{\gamma_T}{\gamma_0} - \text{относительная плотность}$$

пульпы и твердых частиц (безразмерные);

$$\gamma_0 = 1,0 - \text{плотность воды, т/м}^3.$$

d_{cp} – средневзвешанная геометрическая крупность транспортируемых частиц (при установлении размерности подставляется в метрах, а при расчетах следует подставлять в мм);

Плотность транспортируемой пульпы связана с весовой консистенцией R следующей зависимостью:

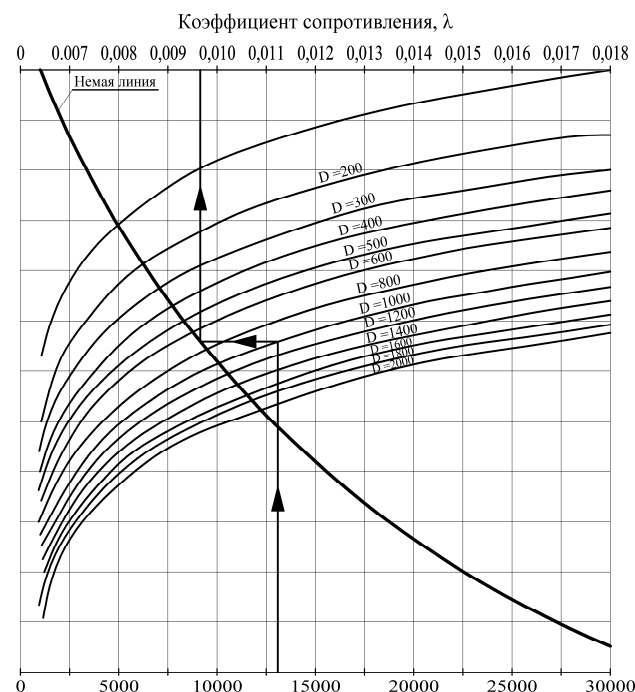
$$\delta_n = (1 + R) \cdot (R + \delta^{-1})^{-1}. \quad (4)$$

Используя функциональную зависимость $\lambda_{гг} = f(Re)$ проф. Конакова П.К. [8] и учитывая замечания проф. Дюранда [9], нами получена зависимость коэффициента сопротивления пульповодов с установившейся шероховатостью [10]:

$$\lambda = 0,308 \cdot \left[\lg(m \cdot Q_n \cdot D^{-1}) \right]^2, \quad (5)$$

где m ; – внутренний диаметр пульпопровода, м, $m = 35,386$; Q_n – расход пульпы, м³/ч.

Выражение (5) графически представлено номограммой на **рис. 1**, из анализа которой следует, что коэффициент сопротивления пульпопровода λ уменьшается с увеличением количества транспортируемой по трубопроводу пульпы при $D = const$ и с увеличением диаметра пульпопровода при $Q = const$.



Пропускная способность трубопровода Q_n , м/ч
Рис. 1. Номограмма для расчёта коэффициента сопротивления пульпопровода λ в зависимости от расхода транспортируемой пульпы и диаметра пульповода

После подстановки уравнения (5) в зависимость (2) получим уравнение гидравлического уклона пульпопровода (м/м) при переменном значении $\lambda \neq const$:

$$J_n = 0,308 \cdot \left[\lg(m \cdot Q_n^2 \cdot D^{-5} + B \cdot D^{2.5} \cdot Q_n^{-1}) \right]. \quad (6)$$

Продифференцируем функциональную зависимость (6) по одной из двух переменных. Решая уравнения $\frac{\partial J_n}{\partial Q_n} = 0$ при $D = const$ и $\frac{\partial J_n}{\partial D} = 0$ при $Q = const$,

получим два уравнения:

$$A \cdot Q_n^3 \cdot \left[2 \cdot \lg(m \cdot Q_n \cdot D^{-1}) - 0,8686 \right] - B \cdot D^{2.5} \cdot \left[\lg(m \cdot Q_n \cdot D^{-1}) + 0,8686 \right] = 0; \quad (7)$$

$$A \cdot Q_n^3 \cdot \left[0,8686 - 5 \cdot \lg(m \cdot Q_n \cdot D^{-1}) \right] + B \cdot D^{7.5} \cdot \left[2,5 \cdot \lg(m \cdot Q_n \cdot D^{-1}) + 0,8686 \right] = 0. \quad (8)$$

Оба уравнения трансцендентные, для их решения можно использовать математические методы оптимизации с помощью ЭВМ и производить поиск корней $Q_{нкp}$ по зависимости (7) и $D_{кp}$ по зависимости (8).

Подставляя найденные корни в уравнения (5), (6), можно определить критический гидравлический уклон и коэффициент сопротивления пульпопровода.

Критические весовые расходы пульпы и твёрдого материала (т/ч) определяются по формуле

$$G_{нкр} = Q_{нкр} \cdot \gamma_n, \quad (9)$$

$$G_{Ткр} = Q_{нкр} \cdot \gamma_0 \cdot (\delta_n - 1) \cdot \delta_T \cdot (\delta_T - 1)$$

Весовая консистенция (%) транспортируемой пульпы по отношению к весу пульпы рассчитывается из нижеприведённого соотношения

$$P_{зкр} = 100 \cdot \frac{G_{Ткр}}{G_{нкр}}. \quad (10)$$

Расчет удельных затрат энергии (на доставку 1 т хвостов гидротранспортом на расстояние 1 км) производили по следующему выражению, кВт·ч/т·км:

$$q_0 = 500 \cdot \frac{J_{нкр}}{P_{зкр}}. \quad (11)$$

Металлоёмкость систем гидротранспорта отходов обогащения в основном определяется весом стальных труб. Это объясняется тем, что чаще всего используются трубы большого диаметра \varnothing 500–1200 мм, протяженность которых достигает десятков километров. Учитывая тот факт, что от надёжности работы систем гидроудаления хвостов зависит бесперебойная работа горнодобывающих предприятий и обогатительного производства, на одну рабочую нитку в проектах закладывается дополнительно одна резервная и одна ремонтная. Масса одного погонного метра стальных труб M (кг/м) разного диаметра в зависимости от толщины стенки Δ рассчитывается по формуле

$$M = 0,02465 \cdot \Delta \cdot (D - \Delta), \quad (12)$$

где D и Δ – наружный диаметр трубы и толщина стенки, мм.

По предложенной методике выполнены расчёты основных технологических параметров напорного гидротранспорта для следующих условий: количество транспортируемых хвостов $G_{хв} = 500$ т/ч, $\gamma_T = 3,0$ т/м³ и средне-взвешенный диаметр хвостов изменялся в пределах $d_{ср} = 0,05; 0,1; 0,2; 0,3; 0,4$ и $0,5$ мм. Результаты расчетов по предложенной методике представлены на рис. 2 и 3.

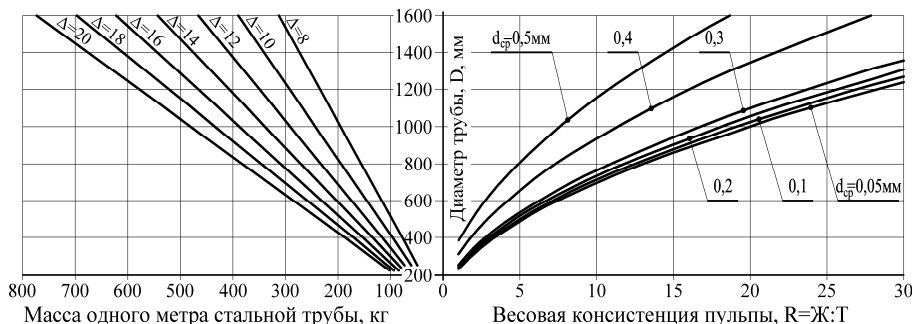


Рис. 2. Зависимость критического диаметра пульпопровода и веса 1 м стальной трубы от весовой консистенции пульпы R и средневзвешенной крупности транспортируемого материала

Анализ результатов расчёта по предлагаемой методике показывает, что сгущение пульпы приводит к значительному увеличению гидравлических уклонов, снижению энергоёмкости транспортирования и уменьшению диаметров пульпопроводов при обеспечении наиболее экономичных незаилающих режимов гидротранспортирования.

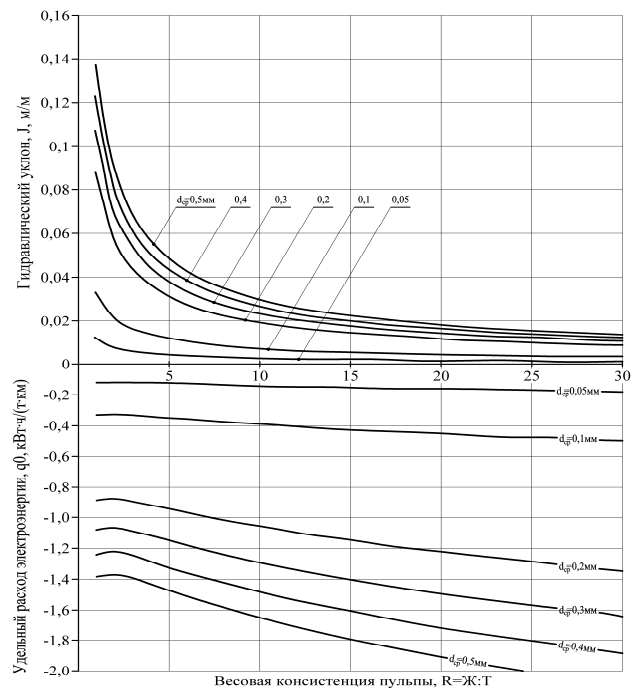


Рис. 3. Зависимости гидравлического уклона J_h и удельного расхода электроэнергии q_0 от весовой консистенции пульпы R и средневзвешенной крупности транспортируемого материала $d_{ср}$

Выводы

Коэффициент сопротивления пульпопровода λ не является величиной постоянной, а уменьшается с увеличением количества транспортируемой пульпы при $D = const$ и увеличением диаметра пульпопровода при $Q = const$.

Расчёты показывают, что крупность хвостов оказывает влияние на величину гидравлического уклона. При $d_{ср} = 0,1$ мм при консистенции $R = 20$ гидравлический уклон $J = 0,004$, а при $d_{ср} = 0,5$ мм и $R = 20$ гидравлический уклон $J = 0,018$, т.е. почти в 5 раз больше. Поэтому технология внутризаводского сгущения пульпы на ОФ должна производиться параллельно с процессом предварительной пульпоподготовки – удалением крупных фракций хвостов. При этом должно соблюдаться требование гидротехников по обеспечению необходимой крупности для возведения хвостохранилищ намывным способом.

На энергоёмкость процесса гидротранспортирования большое внимание оказывает консистенция пульпы. При консистенции $R = 20$ и для $d_{cp} = 0,5$ мм энергоёмкость составляет $q_0 = 1,89$ кВт ч/т км, а при $R = 5$ энергоёмкость снижается до $q_0 = 1,456$ кВт ч/т км, т.е. почти в 5 раз.

Сгущение пульпы с $R=20$ до $R=5$ при $d_{cp}=0,1$ мм приводит к уменьшению требуемого диаметра пульповодов с 1,34 до 0,66 м, а при $d_{cp}=0,5$ мм с 0,99 до 0,49 м. Уменьшение диаметра для рассматриваемых условий приводит к снижению металлоёмкости соответственно на 200 и 110 кг на 1 п.м длины трассы.

Увеличение гидравлического уклона при сгущении пульпы приводит к необходимости эксплуатации центробежных или объёмных гидромашин с развиваемым напором более 20–30 МПа.

Список литературы

1. Холин Н.Д. Основные проблемы гидромеханизации // Строительная промышленность. 1937. № 16.
2. Кнороз В.С. Движение гидросмесей в напорных трубопроводах и метод их расчёта // Известия ВНИИГ. 1941. Т. 30.
3. Роев Г.Н. Устойчивые режимы и потери напора при напорном движении пульпы в пульповодах // Известия Академии Наук СССР, ОТН. 1939. №8.
4. Юфин А.П. Движение неоднородной жидкости по горизонтальным стальным незаилённым трубам // Известия Академии Наук СССР, ОТН. 1949. №8.
5. Иванов А.Е. Перемещение грунта напорными и безнапорными потоками. М.: Речиздат, 1952.
6. Евдокимов П.Д. Анализ существующих методов и формул для гидравлического расчёта пульповодов и практические рекомендации // Известия ВНИИГ. 1952. Т. 48.

7. Мельников Т.И. Анализ существующих формул для определения критических скоростей и гидравлических уклонов в пульповодах // Труды МГМИ. 1959. Вып. 15. С. 69–109.
8. Конаков П.К. Новая формула для коэффициента сопротивления для гладких труб // ДАН СССР. 1946. Т. 10. С. 70–77.
9. Durand R., Condolios E. Donnes techniques sur le refulement hydraulique des materiaux solides tn Conditte. Congres du centenaire de Societe de l'industrie minerale, Paris, Juin, 22F, 1955.
10. Мельников И.Т., Мельников Т.И., Горбатов А.И. Критический гидравлический уклон пульповода // Изв. вузов. Горный журнал. 1997. № 7–8. С. 143–146.

Bibliography

1. Choline ND The main problems jetting. Construction Industry, 1937, № 16.
2. Knorozov VS The motion of slurry in the pressure pipe and method of their calculation. // Proceedings of VNIIG, volume 30, 1941.
3. Roer GN Stable regimes and pressure drop during discharge the motion of the slurry in a slurry pipeline. // Proceedings of the Academy of Sciences of the USSR, OTN, 1939, № 8.
4. Yufin AP The motion of an inhomogeneous fluid in horizontal steel pipe nezailenym. // Proceedings of the Academy of Sciences of the USSR, OTN, 1949, № 8.
5. Ivanov AE Moving the soil pressure and pressure flow, Rechizdat, 1952.
6. PD Evdokimov Analysis of existing methods and formulas for calculating the hydro-ravlicheskogo slurry pipelines, and practical advice. // Proceedings of VNIIG, v.48, 1952.
7. Melnikov TI Analysis of existing formulas for determining the critical velocity and hydraulic gradient in the slurry pipeline. // Proceedings of MGMI, issue 15, 1959, p. 69–109.
8. Konakov PK The new formula for the drag coefficient for smooth pipes // Dokl. 1946. t. 10. S. 70–77.
9. Durand R., Condolios E. Donnes techniques sur le refulement hydraulique des materiaux solides tn Conditte. Congres du centenaire de Societe de l'industrie minerale, Paris, Juin, 22F, 1955.
10. Mel'nikov IT, Mel'nikov TI, AI Gorbatov The critical hydraulic gradient slurry pipeline. // Mountain Journal of Math. Universities, 1997, № 7–8, p. 143–146.