

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ И РЕЖИМОВ РАБОТЫ ГИДРОТРАНСПОРТНЫХ УСТАНОВОК ПРИ МОДЕРНИЗАЦИИ

Наведено результати використання при модернізації гідротранспортних установок кар'єрів Вільногірського гірничо-металургійного комбінату нових методів розрахунку параметрів гідротранспорту, які враховують полідисперсність розсипу, вміст у ній частинок з різною густиною, а також усталені пульсації тиску та витрати гідросуміші

FORECASTING OF HYDROTRANSPORT PLANT PARAMETERS AND OPERATING REGIMES DURING MODERNIZATION

The results of using of new calculation methods of hydrotransport parameters during modernization of hydrotransport plants of quarries of Volnogorsk Mining and Smelting Enterprise are adduced. These methods take into account placer's polydispersity, content of particles of different density as well as steady-state pulsations of slurry pressure and discharge

По запасам полиметаллических руд, содержащих минералы титана, циркон, алюмосиликаты и прочие минералы Украина считается монополистом в Европе и входит в первую десятку стран-поставщиков в мире. Большая часть этого минерального сырья представлена россыпными месторождениями, разработка которых ведется открытым способом с применением методов гидромеханизации, а обогащение россыпей осуществляется гравитационными методами. В таких технологиях основным процессом гидромеханизации является напорное гидротранспортирование. Анализ условий эксплуатации и режимов работы гидротранспортных комплексов на карьерах Вольногорского горно-металлургического комбината (ВГМК) и Иршанского горно-обогатительного комбината (ИГОКа) позволил выделить следующие факторы, приводящие к завышенным расходам воды и электроэнергии. Во-первых, для материалов, составляющих полиметаллические россыпи, характерны не только полидисперсность (табл. 1), но и существенное различие в плотностях частиц (табл. 2), что недостаточно учитывается известными методиками расчета критической скорости и гидравлического уклона [1 – 4]. Во-вторых, существующие методы расчета гидротранспортных систем ориентированы на средние значения параметров при установившемся режиме работы. Однако применение центробежных насосов сопровождается генерированием в трубопроводе установившихся пульсаций давления и подачи, которые провоцируют выпадение транспортируемых частиц на дно потока. В-третьих, при открытой разработке полиметаллических россыпей концентрация и плотность пульпы фактически определяются в процессе пульпообразования, которым управляет оператор гидромониторов без учета процесса гидротранспортирования. В современных условиях выбор рациональных параметров процессов гидромеханизации возможен только при комплексном учете всех этих факторов, что сдерживается отсутствием соответствующей научно-методической базы.

Таким образом, установление закономерностей, описывающих комплексное влияние на гидравлический уклон и критическую скорость полидисперсности

транспортируемого материала, содержания в нем частиц различной плотности и установившихся пульсаций давления и расхода гидросмеси, является актуальной научной проблемой, имеющей важное значение для повышения эффективности технологий гидромеханизации.

Таблица 1 – Гранулометрический состав россыпей Восточного участка Малышевского месторождения

Границы класса Крупности частиц	Массовая доля частиц класса крупности, %		
	Есть все материалы	Нет глины или суглинка	Нет глины и суглинка
менее 0,15 мм	24.10	16.05	7.15
от 0,15 до 3 мм	75.58	83.58	92.43
более 3 мм	0.33	0.37	0.41

Таблица 2 – Распределение плотности частиц по классам крупности для россыпей Восточного участка Малышевского месторождения

Границы класса Крупности частиц	Плотность частиц класса крупности, кг/м ³		
	Есть все материалы	Нет глины или суглинка	Нет глины и суглинка
менее 0,15 мм	3036	3229	4005
от 0,15 до 3 мм	2727	2726	2726
более 3 мм	2700	2700	2700

Цель статьи – развитие методов расчета параметров и режимов работы гидротранспортных установок при открытой разработке россыпных месторождений путем учета закономерностей механических процессов, происходящих при гидротранспортировании полидисперсных материалов, содержащих частицы различной плотности, в режимах с установившимися пульсациями давления и расхода гидросмеси для минимизации энергоемкости и водопотребления технологий гидромеханизации.

Анализ более 20 методик расчета параметров гидротранспорта показал, что существующими методиками расчета гидравлического уклона и критической скорости гидротранспортирования россыпей и руд полидисперсность материала и различие в плотностях его частиц учитываются с недостаточной точностью, не рассматриваются существующие в реальных условиях установившиеся пульсации подачи и давления пульпы, а также не описывается влияние изменения дополнительного гидравлического уклона и критической скорости при понижении температуры гидросмеси с учетом внешнего теплозащитного слоя и внутреннего слоя обледенения.

При разработке методики расчета гидравлического уклона использовалось уравнение Бернулли для потока гидросмеси, а при определении критической скорости – условие, ограничивающее турбулентные касательные напряжения на поверхности трубопровода. При оценке интервалов изменения показателей режима работы гидротранспортной установки использовано решение системы уравнений для нестационарного движения жидкости в трубопроводе с учетом изменений характеристик центробежного насоса при колебании подачи.

При установившихся пульсациях давления и расхода гидросмеси в настоящем исследовании предлагается вместо рабочей точки системы определять возможную область ее работы, заключенную между максимально и минимально возможными расходно-напорными характеристиками (РНХ) насоса и трубопровода. При этом РНХ трубопровода определяются для смеси разнородных по плотности и средней крупности твердых частиц и представляют собой совокупность n' различных твердых материалов, каждый из которых характеризуется плотностью $\bar{\rho}_s^i$, средним диаметром частиц δ_i , гранулометрическим составом и массовой долей θ_i в смеси твердых материалов ($i = 1, 2 \dots n'$). С учетом этого рабочие точки гидротранспортной установки, ограничивающие возможную область работы, и значения критических подач пульпы определяются из решения уравнений

$$\gamma - \Delta Z \rho_* - \beta Q - \alpha Q^2 = \frac{(1 \pm \Gamma) A_0 \lambda_w L}{2gD(1 - C_p)^2 F^2} Q^2 \pm \delta \Gamma' Q; \frac{u_{kp}}{A_1} = \sqrt{1 \pm \Gamma} \ln \left(\frac{u_{kp}}{A_2} \right);$$

$$\Gamma = \frac{2\delta}{A_0 \lambda_w} \frac{aF}{Q} \frac{D}{L} \frac{\sqrt{1+s^2}}{\Omega}; s = \frac{A_3}{\omega} \frac{\lambda_w Q}{2DF}; \Gamma = \beta + \alpha(2 + \delta)Q; \Omega = \frac{ch \left(2 \frac{\omega L}{a} \right) + \cos \left(2s \frac{\omega L}{a} \right)}{sh \left(2 \frac{\omega L}{a} \right)},$$

где u_{kp} – критическая скорость гидротранспортирования; ΔZ – перепад высот на трассе; L – длина трубопровода; F – площадь трубопровода; ω – частота колебаний параметров потока пульпы; a – скорость распространения возмущений по трубопроводу; ρ_* – эффективная относительная плотность пульпы [4]; Q – подача насоса по пульпе; γ, β, α – коэффициенты аппроксимации суммарной расходно-напорной характеристики насосов; δ – отношение амплитуды колебания скорости потока к ее стационарному значению; A_0, A_1, A_2 – параметры, учитывающие характеристики материала твердой фазы, а также расходно-напорных характеристик трубопровода и насосов [1]; D – диаметр трубопровода; C_p – расходная концентрация пульпы.

Представленные зависимости впервые позволяют достоверно рассчитывать параметры гидротранспорта при транспортировании материалов различного гранулометрического состава с существенной разницей в плотностях частиц, оценивать интервалы изменения параметров процесса гидротранспорта сыпучих полидисперсных материалов в режиме установившихся пульсаций давления и расхода гидросмеси, а также минимизировать дополнительный гидравлический уклон, обусловленный колебаниями расхода и давления гидросмеси.

Разработанные методы расчета параметров гидротранспорта использовались с 2005 по 2009 г. при обосновании модернизаций гидротранспортных установок на карьерах ВГМК (табл. 3) с целью снижения энергоемкости и водопотребления (табл. 4, 5).

Были обоснованы следующие изменения в схеме гидротранспортирования: исключение из магистрали и демонтаж бустерной пульпонасосной станции

Таблица 3 – Характеристики магистралей гидротранспортных установок карьеров ВГМК в 2005 – 2009 гг.

Период работы	Длина магистрали установки карьера, м		Насосы, используемые для подачи россыпей карьера	
	"7 Север"	"7 Юг"	"7 Север"	"7 Юг"
с 10.05 по 04.06 г.	8209	8911	WRMAN 20 АН (1 шт.) GIW WBC18×20 (HD) (2 шт.)	GIW WBC18×20 (HD) (3 шт.)
с 05.06 по 04.07 г.	9231	8911	GIW WBC18×20 (HD) (3 шт.)	GIW WBC18×20 (HD) (3 шт.)
с 04.07 по 10.07 г.	9231	9761	GIW WBC18×20 (HD) (2 шт.) GIW LSA 18×20-44(45) (1 шт.)	GIW WBC18×20 (HD) (3 шт.)
с 11.07 по 01.08 г.	9231	9761	GIW WBC18×20 (HD) (3 шт.)	GIW WBC18×20 (HD) (3 шт.)
с 02.08 по 05.09 г.	9231	9761	GIW WBC18×20 (HD) (2 шт.) GIW LSA 18×20-44(45) (1 шт.)	GIW WBC18×20 (HD) (2 шт.) GIW LSA 18×20-44(45) (1 шт.)
с 06.09 по 07.09 г.	10551	9786	GIW WBC18×20 (HD) (2 шт.) GIW LSA 18×20-44(45) (1 шт.)	GIW WBC18×20 (HD) (2 шт.) GIW LSA 18×20-44(45) (1 шт.)

Таблица 4 – Показатели работы гидротранспортной установки карьера "7 Север" в 2005 – 2009 гг.

Наименование Показателей	Период работы					
	с 10.05 по 04.06 г.	с 05.06 по 04.07 г.	с 04.07 по 10.07 г.	с 11.07 по 01.08 г.	с 02.08 по 05.09 г.	с 06.09 по 07.09 г.
Грузопоток, т/ч	648	1063	1058	1014	1052	1060
Подача воды, м ³ /ч	2478	2589	2229	2828	2656	2371
Подача пульпы, м ³ /ч	2709	2969	2606	3189	3031	2749
Потребление электроэнергии, квт·ч	3213	3935	3578	3069	3985	3691
Удельный расход оборотной воды, м ³ /т	3.927	2.426	2.144	2.823	2.555	2.240
Удельный расход электроэнергии, квт·ч/т	5.100	3.701	3.426	4.290	3.838	3.485
Концентрация пульпы, %	0.088	0.129	0.144	0.121	0.125	0.138
Плотность пульпы, т/м ³	1.158	1.233	1.260	1.218	1.225	1.248

(ПНС), находившейся возле обогатительного производства, а также ПНС, находившейся возле балки Глубокой; включение в магистраль новой бустерной ПНС на междурядном целике; спрямление трубопроводов магистрали в месте предыдущего размещения ПНС; оборудование и включение в магистраль новой бустерной ПНС в месте спрямления трубопроводов; продвижение вслед за

фронтом горных работ забойной ПНС гидротранспортной установки карьера "7 Юг" на 1200 м; установка на всех ПНС гидротранспортной установки карьера "7 Юг" и на бустерных ПНС гидротранспортной установки карьера "7 Север" насосов WBC18×20 (HD) с рабочими колесами диаметром 54"; изменение мест размещения насосов GIW LSA 18×20-44(45) с рабочим колесом диаметром 45" на гидротранспортных установках ВГМК. Реализация этих технических предложений в период с 2005 по 2009 г.г. позволила предотвратить возникновение кавитационных и критических режимов работы; снизить потребление электроэнергии и оборотной воды; продлить срок эксплуатации гидротранспортного комплекса без установки дополнительного четвертого насоса.

Таблица 5 – Показатели работы гидротранспортной установки карьера "7 Юг" в 2005 – 2009 гг.

Наименование Показателей	Период работы					
	с 10.05 по 04.06 г.	с 05.06 по 04.07 г.	с 04.07 по 10.07 г.	с 11.07 по 01.08 г.	с 02.08 по 05.09 г.	с 06.09 по 07.09 г.
Грузопоток, т/ч	614	1047	935	993	976	977
Подача воды, м ³ /ч	2228	2775	2372	3166	2641	2386
Подача пульпы, м ³ /ч	2447	3149	2706	3520	2990	2734
Потребление электроэнергии, квт·ч	3036	4383	3824	4425	3977	3657
Удельный расход оборотной воды, м ³ /т	3.793	2.669	2.630	3.213	2.759	2.445
Удельный расход электроэнергии, квт·ч/т	5.148	4.204	4.189	4.453	4.142	3.755
Концентрация пульпы, %	0.093	0.120	0.125	0.105	0.117	0.128
Плотность пульпы, т/м ³	1.167	1.216	1.225	1.189	1.211	1.230

Для оценки эффективности внедрение научных результатов впервые в отечественной практике была создана система мониторинга гидротранспортного комплекса ВГМК, разработана методическая база мониторинга, обеспечивающая сбор информации и оперативную оценку параметров и режимов работы гидротранспортного комплекса (табл. 4, 5).

Для характеристики состояния гидротранспортной установки, при изменении длины магистрали или установке насосов с рабочими колесами другого диаметра, использовалась величина, равная отношению длины магистрали гидротранспортной установки, выраженная в метрах, к сумме диаметров рабочих колес используемых насосов, выраженных в дюймах, и вычисляемая по формуле (табл. 6 – 8)

$$\Lambda = \frac{L}{\sum_{i=1}^N D'_i},$$

где Λ – величина, характеризующая состояние гидротранспортной установки, м"; D'_i – диаметр рабочего колеса i -го насоса, "; N – количество используемых насосов.

Таблица 6 – Значения параметра Λ для гидротранспортных установок карьеров ВГМК за период с 2005 по 2009 гг.

Карьер	Длина магистрали, м	Насосы, используемые для подачи россыпей	Значение Λ , м/''
"7 Север"	8209	WRMAN 20 АН (1 шт.) GIW WBC18×20 (HD) (2 шт.)	50.05
	9231	GIW WBC18×20 (HD) (3 шт.)	56.98
	9231	GIW WBC18×20 (HD) (2 шт.) GIW LSA 18×20-44(45) (1 шт.)	60.33
	10551	GIW WBC18×20 (HD) (2 шт.) GIW LSA 18×20-44(45) (1 шт.)	68.96
"7 Юг"	8911	GIW WBC18×20 (HD) (3 шт.)	55.01
	9761	GIW WBC18×20 (HD) (3 шт.)	60.25
	9761	GIW WBC18×20 (HD) (2 шт.) GIW LSA 18×20-44(45) (1 шт.)	63.88

Таблица 7 – Показатели работы гидротранспортной установки карьера "7 Север" в зависимости от значения параметра Λ

Наименование показателей	Значение Λ , м/''			
	50.05	56.98	60.33	68.96
Грузопоток, т/ч	648	1038	1055	1060
Подача воды, м ³ /ч	2478	2709	2442	2371
Подача пульпы, м ³ /ч	2709	3079	2819	2749
Потребление электроэнергии, квт·ч	3213	3502	3781	3691
Удельный расход оборотной воды, м ³ /т	3.927	2.624	2.350	2.240
Удельный расход электроэнергии, квт·ч/т	5.100	3.996	3.632	3.485
Концентрация пульпы, %	8.8	12.5	13.5	13.8
Плотность пульпы, т/м ³	1.158	1.225	1.242	1.248

Таблица 8 – Показатели работы гидротранспортной установки карьера "7 Юг" в зависимости от значения параметра Λ

Наименование показателей	Значение Λ , м/''		
	55.01	60.25	63.88
Грузопоток, т/ч	830	964	976
Подача воды, м ³ /ч	2502	2769	2513
Подача пульпы, м ³ /ч	2798	3113	2862
Потребление электроэнергии, квт·ч	3710	4125	3817
Удельный расход оборотной воды, м ³ /т	3.231	2.922	2.602
Удельный расход электроэнергии, квт·ч/т	4.676	4.321	3.948
Концентрация пульпы, %	10.6	11.5	12.2
Плотность пульпы, т/м ³	1.191	1.207	1.220

Для гидротранспортных установок обоих карьеров с увеличением значения Λ величины грузопотока, концентрации и плотности пульпы возрастают, удельные расходы оборотной воды и электроэнергии – снижаются. При этом зависимости объема потребленной электроэнергии, подачи воды и пульпы от величины Λ имеют максимумы, которые реализуются для гидротранспортной

установки карьера "7 Юг" около значения 60.25 м/м (см. табл. 8), а для карьера "7 Север" – между 56.98 и 60.33 м/м (см. табл. 7).

Расхождения между показателями работы гидротранспортных установок карьеров "7 Юг" и "7 Север", и соответствующими данными табл. 7 и 8, обусловлены разницей геодезических отметок трасс трубопроводов, а также особенностями работы узлов пульпоприготовления. Однако для обеих гидротранспортных установок тенденция изменения всех параметров одинакова – с увеличением значения Λ удельные потребления воды и электроэнергии убывают, что подтверждает эффективность проведенных модернизаций этих гидротранспортных установок.

Таким образом, с учетом вышеизложенного материала, можно сделать следующие выводы.

На основе выявленных зависимостей параметров гидротранспорта от крупности и плотности транспортируемых частиц, впервые разработана методика расчета гидравлического уклона и критической скорости гидротранспортирования полидисперсных материалов с различной плотностью частиц, что позволяет достоверно рассчитывать параметры гидротранспорта при транспортировании материалов различного гранулометрического состава с существенной разницей в плотностях частиц и тем самым повысить точность определения гидравлического уклона на 11 %, а критической скорости на 8 % по сравнению с существующими методиками [1 – 3].

На основе установленных зависимостей величины дополнительного гидравлического уклона, обусловленного транспортированием твердых частиц, от частоты и амплитуды колебаний давления и расхода пульпы впервые разработана методика оценки интервалов изменения параметров процесса гидротранспорта сыпучих полидисперсных материалов в режиме установившихся пульсаций давления и расхода гидросмеси, позволяющая оценить отклонение от стационарных значений подачи и напора насосов, а также вероятность возникновения критического режима в результате гармонических колебаний параметров пульпы на входе в гидротранспортную магистраль.

Внедрение на ВГМК разработанных научных основ в виде методического обеспечения расчетов в период с 2005 по 2009 г.г. позволило обосновать изменения в схеме гидротранспортирования, обеспечившие предотвращение кавитационных и критических режимов работы; снижение потребления электроэнергии (на 6,95 – 10,54 %) и оборотной воды (на 6,53 – 22,14 %); продление на 3 года срока эксплуатации гидротранспортного комплекса без установки дополнительного четвертого насоса. Фактический экономический эффект от модернизации гидротранспортного комплекса ВГМК за период с 2005 по 2009 г.г. составил 10,18 млн. грн.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Обоснование параметров и режимов работы систем гидротранспорта горных предприятий / Ю.Д. Баранов, Б.А. Блюсс, Е.В. Семененко, В.Д. Шурыгин. – Д.: Новая идеология, 2006. – 416 с.
2. Дмитриев Г.П., Махарадзе Л.И., Гочиташвили Т.Ш. Напорные гидротранспортные системы. – М.: Недра, 1991. – 304 с.
3. Смолдырев А.Е. Трубопроводный транспорт. – М.: Недра, 1980. – 390 с.
4. Криль С.И. Напорные взвесенесущие потоки. – К.: Наук. думка, 1990. – 160 с.