

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Борисенко В.Г. Исследование напряжений вокруг выработок в условиях объемной задачи / В.Г. Борисенко, Г.В. Вардерсян // Известия ВУЗов, 1965. - № 12. - С. 23-27.
2. Трумбачев В.Ф. Применение оптического метода для исследования напряженного состояния пород / В.Ф. Трумбачев, Л.С. Молодцова. - М.: АН СССР, 1963. - 95 с.
- 3 Трумбачев В.Ф. Изучение распределения напряжений вокруг горизонтальных выработок оптическим методом / В.Ф. Трумбачев // Исследование горного давления. - М., 1960. - С. 23-27.
4. Волошин Н.Е. Борьба с выбросами породы в шахте / Н.Е. Волошин, В.И. Тарасьев. - Донецк: Донбасс, 1968. - 54 с.
5. Результаты исследования напряжений в массиве горных пород / П.Я. Галушко, Я.И. Куренков, Ю.К. Френзе, М.А. Халиловский // Известия ВУЗов. - 1968. - № 11. - С. 22-26.
6. . Сурков А.И. Исследование исследования напряжений на объемных моделях оптическим методом: научная и техническая информация / А.И. Сурков, В.Ф. Трумбачев. - М.: ЦИТИ угля, 1958. - Вып. 3. - 25 с.
7. Зорин А.Н. Исследование выбросов пород, разработка метода их прогноза и способов предотвращения: автореф. дисс. докт. техн. наук: 05.15.11 / А.Н. Зорин; ИГТМ АН УССР. - Днепропетровск, 1974. - 48 с.
8. Колесников В.Г. Исследование и разработка способа управляемого разрушения выбросоопасных пород при проведении выработок механическим способом: автореф. дисс. канд. техн. наук: 05.15.11 / В.Г. Колесников; ИГТМ АН УССР. - Днепропетровск, 1977. - 19 с.
9. Софийский К.К. Исследование и разработка элементов технологии комбайнового проведения выработок по выбросоопасным породам: автореф. дисс. канд. техн. наук: 05.15.11 / К.К. Софийский; ДГИ. - Днепропетровск, 1978. - 17 с.

УДК 622.648.23:621.65:622.271.623

Б.А. Блюсс, д-р техн. наук,
Е.В. Семененко, канд. техн. наук
(ИГТМ НАН Украины)

НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ ГИДРОМЕХАНИЗАЦИИ ДЛЯ ОТКРЫТОЙ РАЗРАБОТКИ РОССЫПНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Розроблено методику розрахунку гідравлічного ухилу та критичної швидкості гідротранспортування полідисперсних розсіпів і руд с частинками з різною густиною, методику оцінки інтервалів зміни цих параметрів у режимі усталених пульсацій тиску й витрати пульпи

THE DEVELOPMENT OF SCIENTIFIC FOUNDATION OF HYDROMECHANIZATION FOR QUARRY OPERATION OF GRAVEL DEPOSITS

The procedure of calculation of hydraulic gradient and critical velocity during hydrotransportation of polydisperse placers and ores with particles of different density as well as estimation procedure of variation interval of these parameters at the regime with steady-state pulsations of pulp pressure and discharge are elaborated

1. Актуальность темы.

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 основными процессами гидромеханизации являются напорное гидротранспортирование и пульпообразование. Анализ условий эксплуатации и

режимов работы гидротранспортных комплексов на карьерах полиметаллических россыпных месторождений Украины позволил выделить следующие факторы, приводящие к завышенным расходам воды и электроэнергии [1 – 3]. Во-первых, для материалов, составляющих полиметаллические россыпи, характерны не только полидисперсность, но и существенное различие в плотностях частиц, что недостаточно учитывается известными методиками расчета критической скорости и гидравлического уклона. 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 [1 – 3].

Таким образом, установление закономерностей, характеризующих процесс пульпообразования, а также 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.

Анализ технологий гидромеханизации, используемые при открытой разработке россыпных месторождений, характерных для них технические средства и методов расчета [1 – 3]. Рассмотрено более 20 методик расчета критической скорости и гидравлического уклона при течении пульп, которые разрабатывались для различных условий, а следовательно, по-разному учитывают одни и те же факторы, используют различные методы для описания одних и тех же зависимостей. Анализ показал, что все эти методики разработаны для моно- и полидисперсных материалов одной плотности, а в современных условиях значения параметров гидротранспорта полидисперсных россыпей и руд с частицами различной плотности определяются по этим методикам с существенной погрешностью [4 – 7].

Например, сравнение результатов расчетов гидравлических уклонов и критических скоростей транспортирования техногенных россыпей ЦГОКа, выполненных в соответствии с «Временными указаниями по технологии возведения намывных хвостохранилищ горно-обогатительных комбинатов», с результатами замеров показывает относительную ошибку при определении критической скорости в диапазоне от 5 до 35 % и гидравлического уклона – в диапазоне от 10 до 50 %. Кроме того, эти методики ориентированы на стационарные режимы работы и не учитывают влияние существующих в реальных условиях установившихся пульсаций подачи и давления пульпы [4 – 7].

2. Цель работы.

Таким образом, целью статьи является развитие научных основ гидромеханизации при открытой разработке россыпных месторождений путем учета закономерностей механических процессов, происходящих при пульпообразовании и гидротранспортировании полидисперсных материалов, содержащих частицы различной плотности, в режимах с установившимися пульсациями давления и расхода гидросмеси для минимизации энергоемкости и водопотребления технологий гидромеханизации.

3. Решаемая научная задача.

Разработать методическое обеспечение расчетов гидродинамических и технологических параметров процессов гидромеханизации при открытой разработке полиметаллических россыпей, обеспечивающее расчет систем водоснабжения, пульпообразования и гидротранспортирования как единого технологического комплекса на основе теоретических и экспериментальных исследований закономерностей процессов пульпообразования и особенностей систем водоснабжения.

Анализ существующих методик расчета параметров гидротранспорта при течении пульпы, а также обобщение результатов экспериментов позволил авторам разработать метод расчета гидравлического уклона и критической скорости гидротранспортирования полидисперсных материалов с частицами различной плотности, а также обоснованы диапазоны изменения значений этих величин при установившемся пульсирующем режиме течения пульпы. С учетом того, что природные и техногенные россыпи являются смесью разнородных по плотности и средней крупности твердых частиц и представляют собой совокупность n' различных твердых материалов, каждый из которых характеризуется плотностью ρ_s^i , средним диаметром частиц δ_i , гранулометрическим составом и массовой долей θ_i в смеси твердых материалов ($i = 1, 2 \dots n'$), для расчета гидравлического уклона в сверхкритических режимах, а также критической скорости гидротранспортирования получены следующие формулы [4 – 7]:

$$i = \xi \varphi i_w + (1 - \sigma_l) i_g \sin \varphi + i_z \rho_*; \quad u_{kp} = (1 + \psi_{kp}) Fr_{kp} \sqrt{gD}; \quad (1)$$

$$i_w = \frac{\lambda_w Q_w^2}{2gDF^2}; \quad i_g = \frac{1 + \rho_s C(1 - z_0)}{1 + C(1 - z_0)}; \quad \frac{Fr_{kp}}{A_1 \Phi} = \ln(A_2 Fr_{kp}); \quad F = 0.25\pi D^2; \quad A_2 = \frac{\sqrt{g} D^{3/2}}{10v_w};$$

$$\Phi = C(1 - C) \sqrt{\frac{th(2.38\psi_{kp}^{0.433})}{1 + A_0 th(11.41\psi_{kp}^{0.86})}} \sqrt{\frac{(1 + \psi_{kp}) \left(1 + 0.527 \cos\left(\frac{90n_{0.01}C}{1 - (1 - n_{0.01})C} \right) \right)}{C^2 + R_{kp} (1 + \psi_{kp}) (1 - C)^2 \psi_{kp}^2}};$$

$$A_0 = 0.52 \lg^{1.65} \left[\sum_{i=1}^{n'} \theta_i \frac{w_s^i \delta_i}{v_w} \right]; \quad n_s = 0.76 - 0.16 th \left(2.82 \lg^2 \left[\sum_{i=1}^{n'} \theta_i \frac{w_s^i \delta_i}{v_w} \right] \right); \quad C = \sum_{i=1}^{n'} C^i;$$

$$\begin{aligned} \wp_\varphi &= \sigma \wp \cos \varphi + (1 - \sigma) \wp' (1 - \cos \varphi); A_1 = 1.316 \left(\sum_{i=1}^{n'} \theta_i \frac{\delta^i}{D} \right)^{\frac{n_s}{2}} \sqrt{\sum_{i=1}^{n'} \theta_i Ar_i}; \\ \wp &= z_1 \left(1 - th \left[5.33 \left(1 - Fr_{kp} \frac{\sqrt{gD}}{Q_w} F \right) \right] \varepsilon \right); \wp' = \frac{1}{(1 - C')^2} \frac{1}{1 + z_0 C'} + R z_0^2; C' = \sum_{i=1}^{n'} C'^i; \\ n_c &= 4.1 - 2.1 \operatorname{sign} \left[\lg \left(\frac{w_s^i \delta_i}{5.01 v_w} \right) \right] th \left[\frac{1}{2} \left| \lg \left(\frac{w_s^i \delta_i}{5.01 v_w} \right) \right|^{4/3} \right]; z_0 = 1 + \frac{w_s F}{Q_w} (1 - C')^{n_c}; \\ C^i & \left[1 - \frac{f_p^i}{2.22} \left(1 - \frac{3.3 C^i}{2 - n_{0.1}^i} \right)^{2.16} \right] = \frac{\psi^i}{1 + \psi^i}; C'^i \left[1 - \frac{w_s^i}{u_w} (1 - C'^i)^{n_i} \right] = \psi^i; R = \sum_{i=1}^{n'} \frac{\bar{\rho}_s^i \psi^i}{1 + \psi^i}; \\ f_p^i &= 1 + \operatorname{sign} \left[\lg \left(\frac{w_s^i \delta_i}{7.59 v_w} \right) \right] th \left[0.967 \left| \lg \left(\frac{w_s^i \delta_i}{7.59 v_w} \right) \right|^{0.6} \right]; \psi^i = \frac{G_s}{\rho_0 Q_w} \frac{\theta_i}{\bar{\rho}_s^i}; \psi = \sum_{i=1}^{n'} \psi^i; \\ z_1 &= \left[\frac{1}{(1 + \psi)(1 - C)^2} + R \left(\frac{\psi}{C} \right)^2 \right]; \varepsilon = \frac{\lg^{1.65} \left(\sum_{i=1}^{n'} \theta_i \frac{w_s^i \delta_i}{v_w} \right) th(11.41 \psi_{kp}^{0.86})}{1.92 + \lg^{1.65} \left(\sum_{i=1}^{n'} \theta_i \frac{w_s^i \delta_i}{v_w} \right) th(11.41 \psi_{kp}^{0.86})}, \end{aligned}$$

где $\bar{\rho}_s$ – средневзвешенная плотность транспортируемого материала; σ_l – доля длины трубопровода, приходящаяся на горизонтальные участки; i_z – геодезический уклон; ρ_* – эффективная плотность пульпы; Q_w – объемный расход жидкой фазы; u_{kp} – критическая скорость пульпы; D – диаметр трубы; v_w – кинематический коэффициент вязкости воды; C – объемная концентрация; w_s – средневзвешенная гидравлическая крупность твердой фазы; $n_{0.01}$ – объемная доля в материале частиц диаметром менее 0.01 мм; ψ_{kp} – отношение расходов фаз в критическом режиме; φ – угол наклона трубопровода к горизонту; Ar_i – параметр Архимеда для частиц i -го материала; G_s – грузопоток; ρ_0 – плотность воды.

Для оценки достоверности разработанного метода расчета использовались данные экспериментов по гидротранспорту россыпи Восточного участка Малышевского месторождения титан-цирконовых песков (рис. 1 и 2). Из рис. 1 и 2 видно, что разница между экспериментальными величинами и рассчитанными по предложенной в настоящей работе методике не превышает 10 %, и она меньше, чем при использовании других методик.

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) трубопровода и

насоса. С учетом формул (1) рабочие точки гидротранспортной установки, ограничивающие возможную область работы, и значения критических подач пульпы определяются из решения уравнений [8, 9]

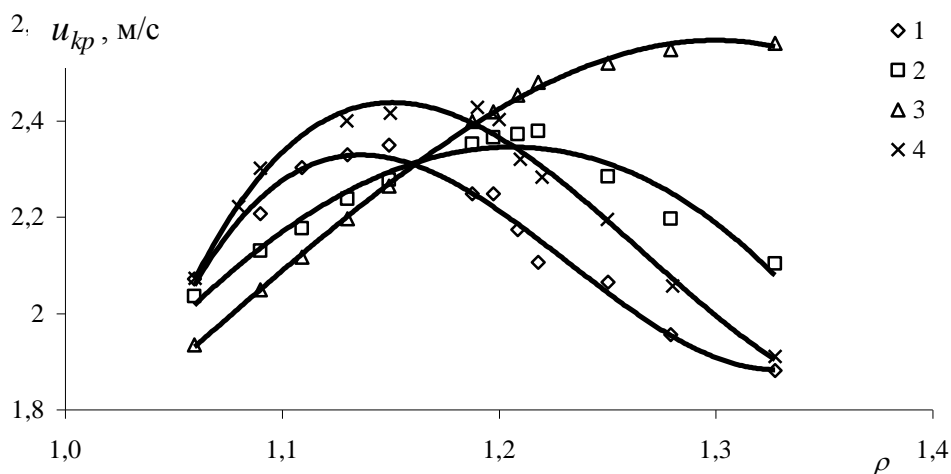


Рис. 1. – Сравнение экспериментальных и расчетных зависимостей критической скорости при гидротранспорте песков карьеров ВГМК по трубопроводу диаметром 150 мм от плотности пульпы: 1 – результаты экспериментов Харьковского отделения ВОДГЕО; 2 – расчет по методике НИИСПа; 3 – расчет по методике П-59-72; 4 – расчет по предлагаемой методике.

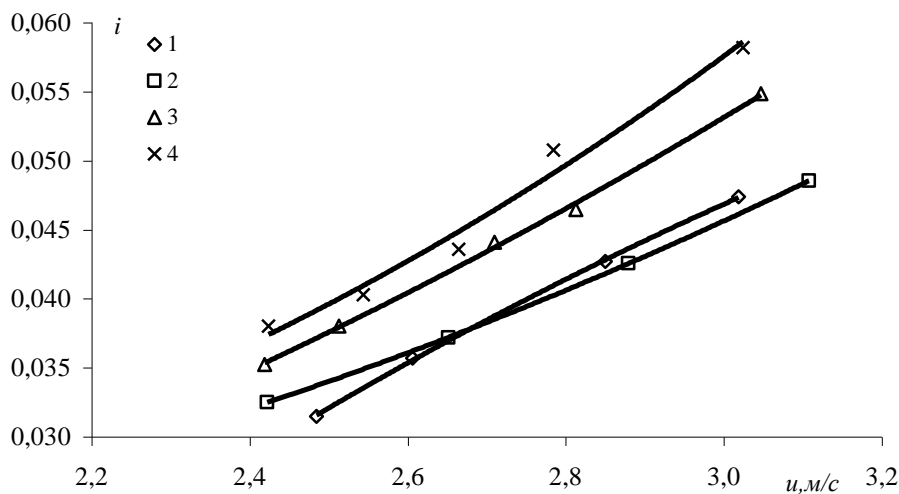


Рис. 2. – Сравнение экспериментальных и расчетных зависимостей гидравлического уклона при гидротранспорте песков карьеров ВГМК по трубопроводу диаметром 150 мм от скорости пульпы при различной относительной плотности пульпы: 1 – результаты экспериментов Харьковского отделения ВОДГЕО ($\rho = 1,06$); 2 – расчет по предлагаемой методике ($\rho = 1,06$); 3 – результаты экспериментов Харьковского отделения ВОДГЕО ($\rho = 1,33$); 4 – расчет по предлагаемой методике ($\rho = 1,33$).

$$\gamma - \Delta Z \rho_* - \beta Q - \alpha Q^2 - (1 - \sigma_l) i_g L \sin \varphi = (1 \pm \Gamma) \wp_\varphi i_w L \pm \delta \Gamma' Q; \frac{Fr_{kp}}{A_1 \Phi} = \sqrt{1 \pm \Gamma} \ln(A_2 Fr_{kp}); \quad (2)$$

$$\Gamma = \frac{2\delta\Lambda}{\wp_\varphi \lambda_w} \frac{a}{L} \frac{D}{\omega} \sqrt{1+s^2}; \quad s = \frac{A_k \lambda_w u}{\omega 2D}; \quad \Gamma' = \beta + \alpha(2+\delta)Q; \quad \theta = \frac{\omega L}{a}; \quad \Lambda = \left(\operatorname{cth}(2\theta) + \frac{\cos(2s\theta)}{\operatorname{sh}(2\theta)} \right)^{-1},$$

где ΔZ – перепад высот на трассе; L – длина трубопровода; Γ – параметр, учитывающий колебания расхода и давления пульпы; ω – частота колебаний параметров потока пульпы; a – скорость распространения возмущений по трубопроводу; Q – подача насоса по пульпе; γ, β, α – коэффициенты аппроксимации РНХ насоса; δ – отношение амплитуды колебания скорости потока к ее стационарному значению; u – скорость течения воды в трубопроводе; A_k – параметр, зависящий от характеристик твердой фазы и РНХ магистрали.

При этом определяются три значения критической скорости, которые различаются знаком и величиной параметра Γ в уравнениях (2). В первом случае величина Γ положительна, во втором равна нулю, а в третьем отрицательна. Из формул следует, что зависимость амплитуды колебаний дополнительного гидравлического уклона от частоты колебаний давления и расхода пульпы определяется величиной $\Lambda\sqrt{1+s^2}$. Численные исследования показали, что влияние параметра s на величину Λ проявляется в ограниченном интервале значений параметра θ (рис. 3, 4). При значениях θ , превышающих 2,57, величина Λ может считаться равной единице при любых значениях s . Величина s определяет количество экстремумов в зависимости $\Lambda(\theta)$, а также их величины. При этом наличие экстремумов в рассматриваемой зависимости наблюдается только при значениях s , больших 1. Значение функции $\Lambda\sqrt{1+s^2}$ в точках экстремума с достаточной для инженерных расчетов точностью можно аппроксимировать функцией вида (рис. 4, табл. 1)

$$\Lambda\sqrt{1+s^2} = \frac{A}{s^M}; \quad A = z_0 + z_1N + z_2N^2 + z_3N^3; \quad M = y_0 + y_1N + y_2N^2 + y_3N^3, \quad (3)$$

где N – порядковый номер экстремума.

Таблица 2 – Значения коэффициентов аппроксимации зависимости (3)

Тип экстремума	z_0/y_0	z_1/y_1	z_2/y_2	z_3/y_3
Максимумы	2,559/1,901	-1,71/-0,344	0,496/0,059	-0,048/-0,002
Минимумы	1,106/0,87	1,435/0,329	-0,497/-0,038	0,049/0,0007

Для условий открытой разработки месторождений предложена модель процесса пульпообразования, учитывающая распространенную на карьерах россыпных месторождений практику применения гидромониторов, а также разработана модель системы водоснабжения гидротранспортных карьерных установок, учитывающая как особенности процесса пульпообразования, так и разветвленность трубопроводов подачи воды. При разработке этих моделей предполагалось, что система водоснабжения карьерного гидротранспортного комплекса имеет одну водозаборную станцию, состоит из m забойных установок, на каждой из которых процесс пульпообразования обеспечивают k гидромониторов, а подача воды в зумпф осуществляется по n трубопроводам. В общем случае для расчета величин расходов в этой трубопроводной сети необходимо решить систему из $2(k+n)m$ нелинейных алгебраических уравнений. Однако анализ реальных значений расходов воды в трубопроводах, различий в длине этих трубопроводов и в геоде-

зических отметках забойных станций в условиях открытых россыпных месторождений позволил предложить ряд упрощений, с учетом которых режимы работы системы водоснабжения описываются следующими уравнениями [3, 10, 11]:

$$\begin{aligned} & (z_g + (a_g + \alpha)k^2)Q_g^2 + n^2\alpha Q_z^2 + 2kn\alpha Q_g Q_z + k(b_g + \beta)Q_g + n\beta Q_z - \gamma_g = 0; \quad b_m = \frac{I_m B_m}{K_m}; \\ & k^2\alpha Q_g^2 + (z_z + n^2\alpha)Q_z^2 + 2kn\alpha Q_g Q_z + k\beta Q_g + n\beta Q_z - \gamma_z = 0; \quad a_m = \frac{I_m A_m}{K_m^2}; \quad c_m = I_m C_m; \\ & \beta = k(b_R + mb_m); \quad \alpha = z_R + a_R + (z_m + a_m)m^2; \quad \gamma_g = \Delta H_g + \gamma_*; \quad \gamma_z = \Delta H_z + \gamma_*; \quad \gamma_* = c_m + c_R + c_g, \end{aligned}$$

где ΔH_g – перепад геодезических отметок точки водозабора и сопла гидромонитора; ΔH_z – перепад геодезических отметок точек водозабора и подачи воды в зумпф; Q_g – расход воды через сопла гидромонитора; Q_z – расход воды через трубопровод, подающий воду в зумпф; z_z – гидравлическое сопротивление трубопровода, подающего воду в зумпф; z_g – гидравлическое сопротивление трубопровода, подводящего воду к гидромонитору; z_R – гидравлическое сопротивление трубопровода, подающего воду с междрудного целика на узел пульпообразования; z_m – гидравлическое сопротивление трубопровода, подающего воду по междрудному целику; c_R, b_R, a_R – коэффициенты аппроксимации РНХ насосов на промежуточной станции, размещенной на междрудном целике; c_g, b_g, a_g – коэффициенты аппроксимации РНХ насосов на бустерной насосной станции перед гидромонитором; c_m, b_m, a_m – коэффициенты аппроксимации РНХ насосов водозаборной станции; I_m – количество последовательных подъемов давления; K_m – количество параллельно работающих насосов; C_m, B_m, A_m – коэффициенты аппроксимации РНХ насосных станций, оборудованных несколькими насосами.

Разработанная модель процесса пульпообразования учитывает зависимость параметров гидросмеси в зумпфе от расхода воды, подаваемой на гидромониторы и в зумпф, и количества гидромониторов, используемых для размыва горной массы. При этом концентрацию, плотность и массовый расход гидросмеси предлагается определять так [3, 10, 11]:

$$C_z = \frac{Y}{1 + E + Y}; \quad \rho_z = 1 + \frac{ArY}{1 + E + Y}; \quad \psi_z = \frac{Y}{1 + E}; \quad E = \frac{n}{k} q_z; \quad Y = \frac{k_z}{k} A_g; \quad q_z = \frac{Q_z}{Q_g}, \quad (4)$$

где C_z – концентрация гидросмеси в зумпфе, д. ед.; q_z – параметр пульпообразования; ρ_z – относительная плотность гидросмеси в зумпфе; E – показатель процесса пульпообразования; Y – показатель производительности гидромонитора; k_z – количество гидромониторов, работающих на забой; A_g – удельная производительность гидромонитора.

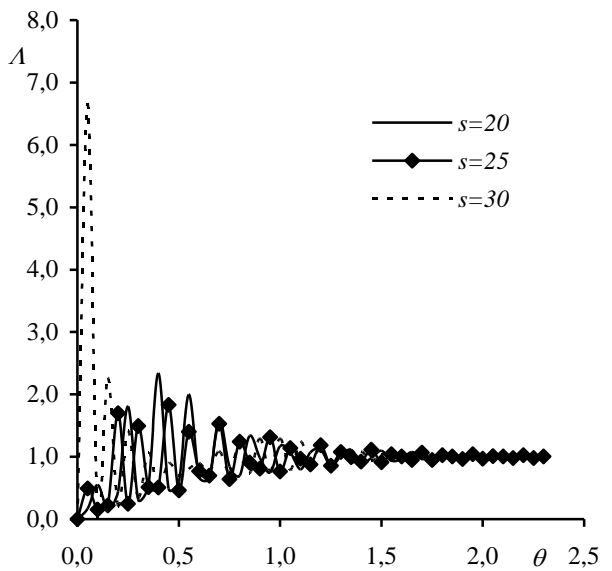
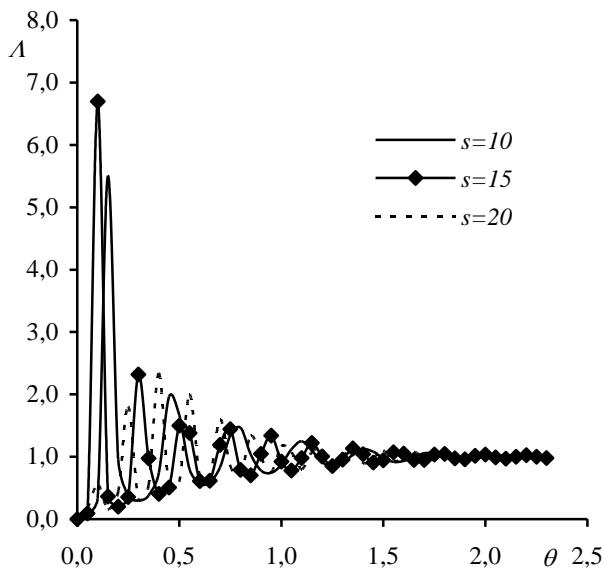
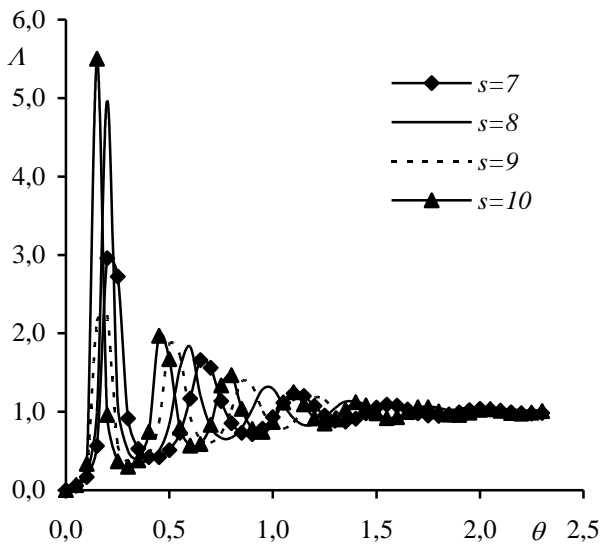
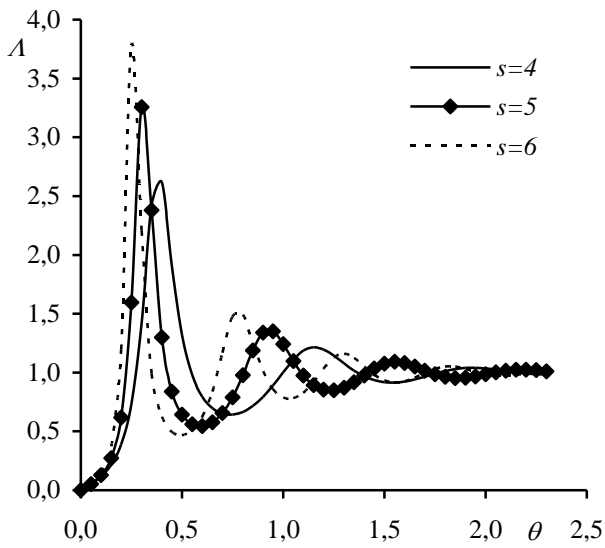
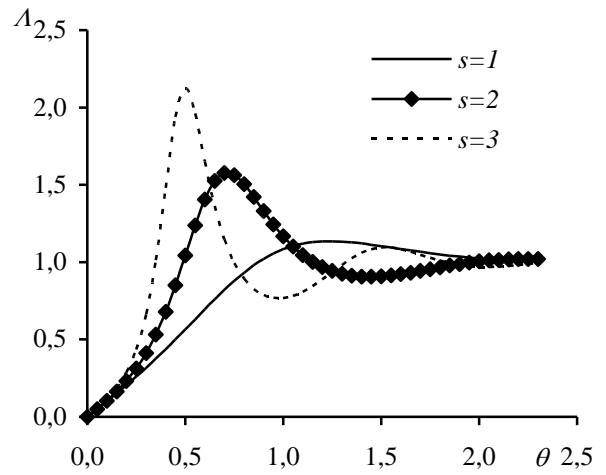
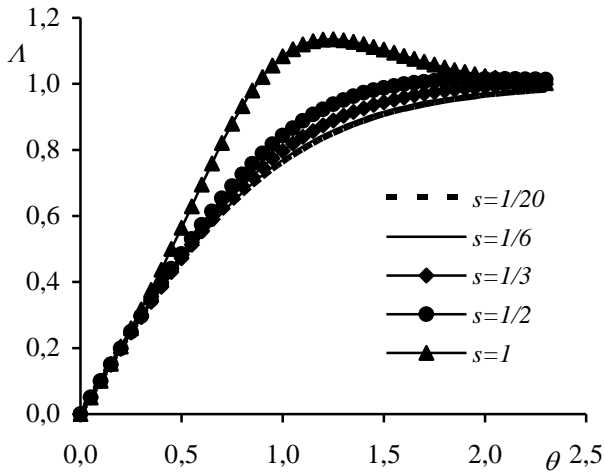


Рис. 3. – Зависимость величины Λ от θ при различных значениях s

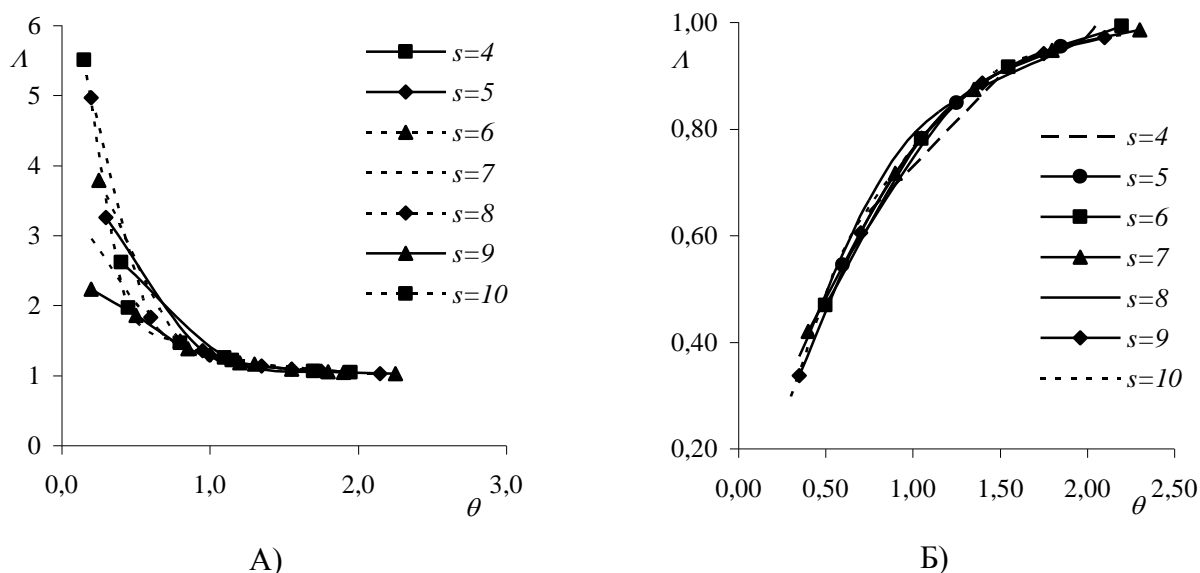


Рис. 4. – Зависимость величин максимумов (А) и минимумов (Б) функции $\Lambda(\theta)$ от θ при различных значениях s .

Обработка данных наблюдений, проведенных в условиях карьеров ВГМК (табл. 2), позволила получить эмпирические зависимости между параметрами процесса пульпообразования (рис. 5), сравнить их с теоретическими (рис. 6) и подтвердить достоверность уравнений (4), а также установить зависимость параметров пульпы в трубопроводе от параметров процесса пульпообразования (рис. 7). Анализ графиков на рис. 5 позволил установить, что процесс пульпообразования на гидротранспортном комплексе ВГМК осуществляется в основном в двух диапазонах значений q_z (табл. 3).

Таблица 2 – Характеристика режимов пульпообразования

Параметр	Режим пульпообразования				
	№1	№2	№3	№4	№5
Расход пульпы, м ³ /ч	3478	3352	3416	3481	3453
Расход воды, м ³ /ч	3217	2845	2923	3112	3019
Расход твердого, м ³ /ч	261	507	493	370	435
Плотность пульпы, т/м ³	1,14	1,26	1,25	1,18	1,22
Производительность по твердому, т/ч	734	1425	1387	1038	1222
Удельный расход твердого, м ³ тв./м ³ в.	0,082	0,178	0,169	0,119	0,145
Удельный расход воды, м ³ в./м ³ тв.	13,16	5,67	5,93	8,44	7,18
Истинная концентрация пульпы, дол. ед.	0,079	0,144	0,138	0,101	0,120
Расходная концентрация пульпы, дол. ед.	0,075	0,151	0,145	0,106	0,126

Таблица 3 – Параметры диапазонов изменения значений q_z в процессе пульпообразования

Область №	Диапазон изменения q_z		Среднее значение	Коэффициент вариации, %
	От	До		
1	0,343	0,495	0,405	10,04
2	0,572	0,783	0,633	12,86

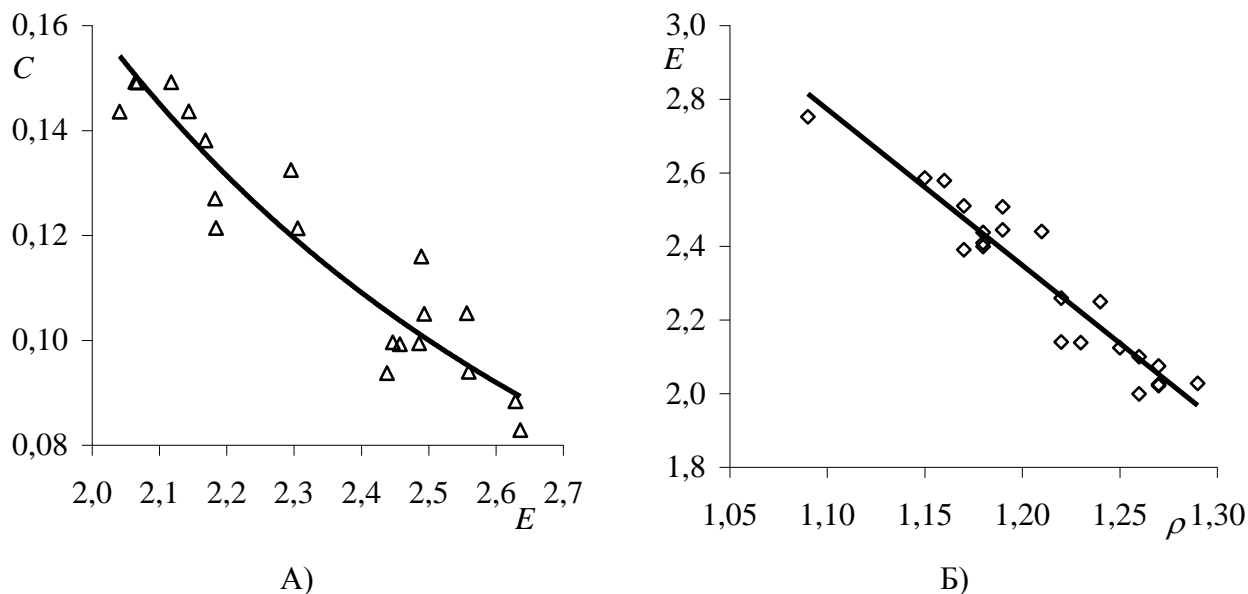


Рис. 5. – Сравнение результатов расчетов согласно модели процесса пульпообразования с результатами экспериментальных исследований зависимостей: А) объемной концентрации пульпы (дол. ед.) от E (ошибка не более 14%); Б) E от относительной плотности пульпы (ошибка не более 17%).

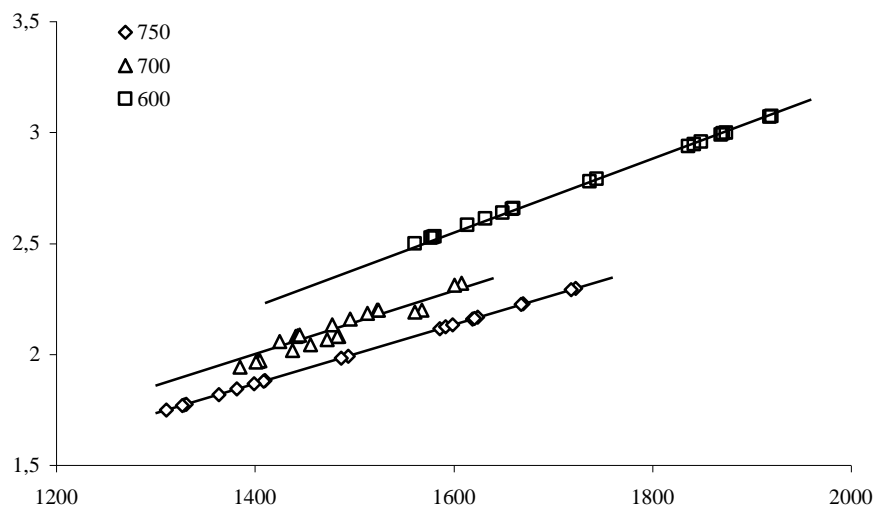


Рис. 6. – Сравнение с экспериментальными данными теоретических зависимостей параметра nq_z от расхода воды в зумпф ($\text{м}^3/\text{ч}$) при различном расходе воды на гидромонитор ($\text{м}^3/\text{ч}$)

Совместное рассмотрение моделей системы водоснабжения и процесса пульпообразования и предложенной методики расчета параметров гидротранспорта позволяет при открытой разработке месторождений рассматривать все трубопроводные системы как единый технологический комплекс. Это обеспечивает прогноз параметров процессов гидромеханизации и оценку режимов работы трубопроводных установок.

С учетом того, что в гидротранспортных установках нижняя часть стенки трубы за счет трения твердых частиц, транспортируемых по дну трубы, изнаши-

вается быстрее, чем верхняя, в работе предложено новое условие обеспечения прочности трубопровода гидротранспортных установок в процессе эксплуатации

$$\frac{n_p}{m_p \sqrt{\varepsilon}} \leq \left(\frac{1}{\theta} - \frac{1}{m_p} \right) \sqrt{\frac{1+q}{\varepsilon}} + \theta; \quad (6)$$

$$\theta = \frac{k\Delta(1-k\Delta)B + k\Delta(1-\Delta)N + 2(1-\Delta)^2 M}{2k^2 \Delta^2 (1-\Delta)B}; \quad q = \frac{1 + ArC}{1 + Ar} \frac{\alpha E_o p_a}{P^2 C}; \quad \varepsilon = (1-\mu)^2 \frac{E_o}{E};$$

$$B = \pi^2 - \frac{4}{3} \Phi_0^2 + \pi \psi K_1 - \frac{8}{3} \Phi_0 \psi K_2 + \pi \Phi_1 K_3 + \Phi_1 \psi K_1 K_3 - \frac{4}{3} \psi^2 K_2^2; \quad m_p = \frac{4k_0 \sigma_T}{P n_g};$$

$$N = \pi^2 - \frac{4}{3} \Phi_0^2 + \pi \psi K_1 - \frac{4}{3} \Phi_0 \psi (K_2 - K_3) + \pi \Phi_1 K_4 + \Phi_1 \psi K_1 K_4 - \frac{4}{3} \psi^2 K_2 K_3;$$

$$M = \pi \psi K_2 + (\pi \psi + \Phi_0 \Phi_1) K_3 - \Phi_0 \Phi_1 K_4 - \psi \Phi_1 K_2 K_4 - \psi \Phi_1 K_3^2; \quad n_p = \frac{\rho \mu}{P \sqrt{C}} \sqrt{\frac{E_o}{\rho_o}};$$

$$\Delta = \frac{d}{D}; \quad k = \frac{d}{d_1}; \quad \Phi_0 = \pi + \frac{\sin \psi}{2}; \quad \Phi_1 = \psi - \frac{2}{3} \sin \psi + \frac{\sin 2\psi}{12}; \quad K_n = \frac{1}{k^3} \left(\frac{1-\Delta k}{1-\Delta} \right)^n - 1; \quad \psi = \frac{G^{0.524}}{1,45},$$

где α – объемная доля воздуха, растворенного в воде; p_a – атмосферное давление; μ – коэффициент Пуассона материала трубы; g – ускорение свободного падения; σ_T – предел текучести материала трубы; k_0 – коэффициент однородности материала трубы; n_g – коэффициент допустимого превышения рабочего давления; P – рабочее давление в трубопроводе; E_o – объемный модуль упругости воды; E – объемный модуль упругости материала трубы; k – степень износа стенки трубопровода ($k \leq 1$); G – потолок взвешивания частиц.

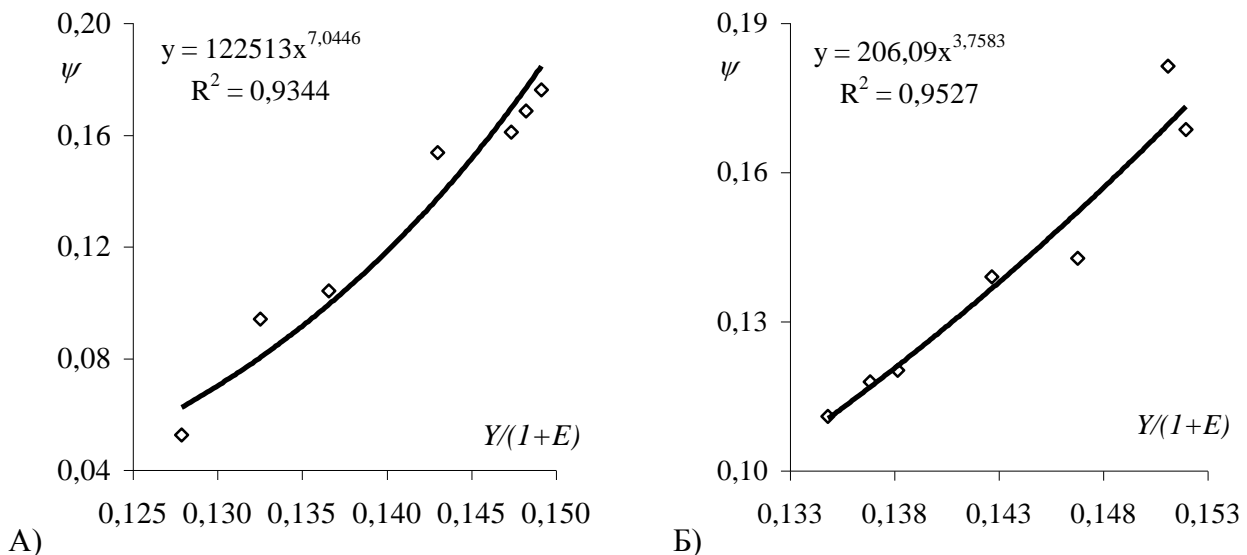


Рис. 7. – Аппроксимация зависимости отношения объемных расходов твердой и жидкой фаз пульпы в трубопроводе от параметров процесса пульпообразования:

А) режимы №1 и №3; Б) режимы №2 и №4.

При этом значения θ , удовлетворяющие неравенству (6) и не превышающие его единственный положительный вещественный корень θ_* , находятся в интервале

$$\frac{m_p \sqrt{1+q}}{\sqrt{1+q+n_p}} \leq \theta_* \leq m_p.$$

Величина ψ характеризует размер сектора интенсивного износа и определяется потолком взвешивания частиц, для расчета которого в напорных потоках впервые предложена методика, учитывающая несимметричность распределения твердой фазы по сечению трубопровода при транспортировании частиц крупностью до 0.1 мм и от 0.1 до 3 мм (рис. 8).

Для определения потолка взвешивания частиц полидисперсного материала было рассмотрено уравнение движения одиночной частицы в горизонтальном потоке жидкости. При этом учитывались следующие силы, действующие на частицу: силы Бассэ, Магнуса, Сафмена, Архимеда, силы инерционной природы, связанные с наличием присоединенных масс, а также сила аэродинамического сопротивления и сила тяжести. Решение этого уравнения позволило получить зависимость для расчета вертикальной скорости частицы, записать выражение для вертикальной проекции равнодействующей сил, действующих на частицу в турбулентном потоке, и, усреднив ее за период турбулентной пульсации, предложить выражение для расчета величины G с инженерной точностью (рис. 9) и определить длину дуги интенсивного износа трубы [3, 12]

$$G = \frac{N}{\rho^M} \text{Re}^{0.912}; \quad N = 201144 - 931813C; \quad M = 0,5915 + 1,481C - 80,32C^2.$$

Достоверность предлагаемой расчетной зависимости была проверена путем сравнения результатов расчетов с данными экспериментов по гидротранспорту угля, песка и отходов обогащения, проведенных в ИГМ НАН Украины (табл. 5).

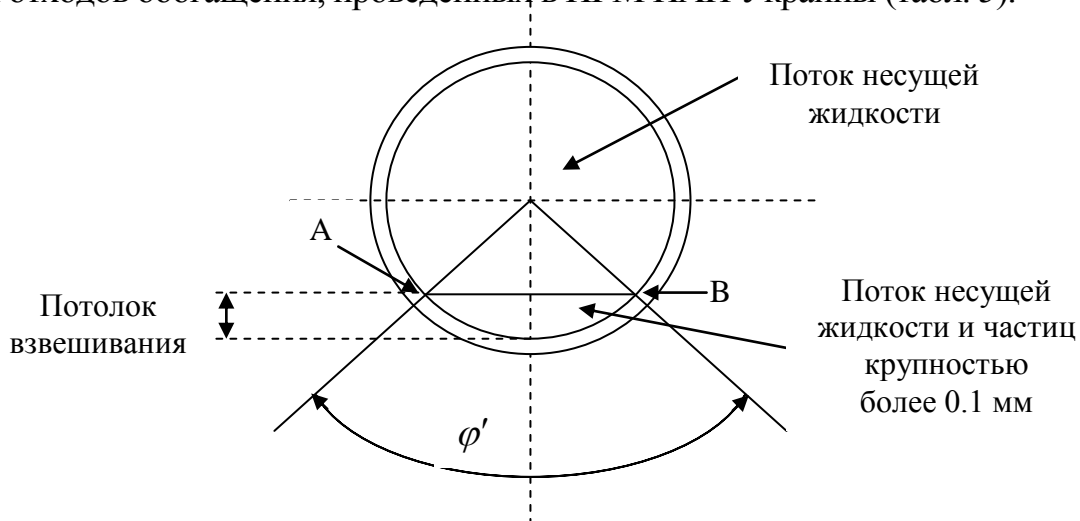


Рис. 8. Схема потока гидросмеси в трубопроводе при наличии в транспортируемом материале частиц крупностью от 0.1 до 3 мм

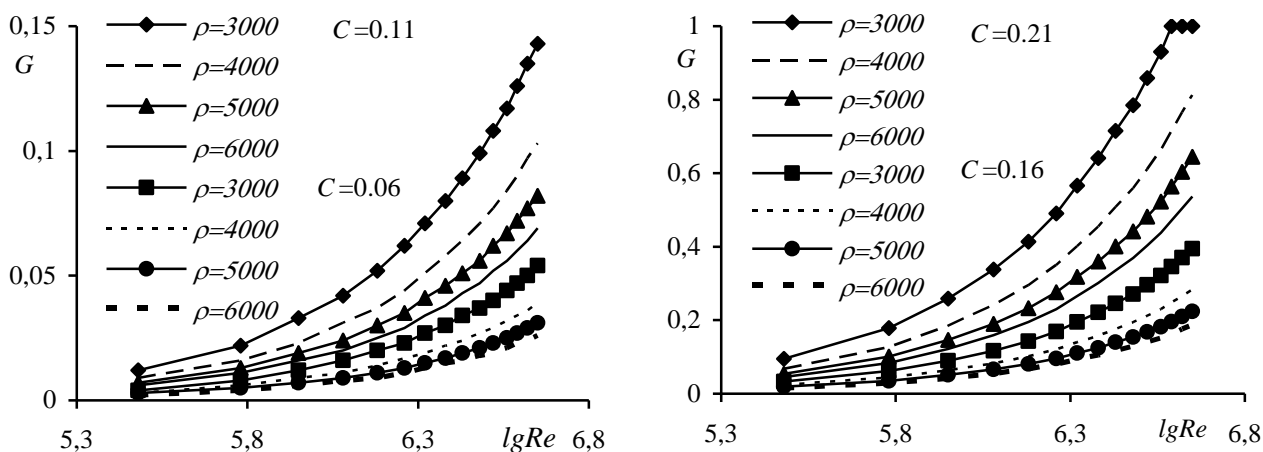


Рис. 9. – Зависимость потолка взвешивания частиц разной плотности в трубе диаметром 0,6 м от числа Рейнольдса для гидросмесей с разной концентрацией

Таблица 5 – Сравнение результатов расчетов потолка взвешивания частиц различных материалов с результатами экспериментов

Характеристика твердых частиц			Относительное среднеквадратическое отклонение, %
Материал	Плотность, кг/м ³	Диаметр, мм	
Уголь	1630	от 0,37 до 3,44	8,40
Песок	2650	от 0,21 до 0,49	11,13
Отходы обогащения	3200	от 0,13 до 0,56	10,63
По всем материалам			10,16

Примечание. Диаметры трубопровода 103, 202, 206 и 308 мм.

4. Выводы, отражающие решение научной задачи.

Приведенные выше научные разработки прошли апробацию в промышленных условиях ВГМК в период с 2001 по 2008 г. Это позволило обосновать следующие изменения в схеме гидротранспортирования: исключение из магистрали и демонтаж бустерной пульпонасосной станции, находившейся возле обогатительного производства, а также пульпонасосной станции, находившейся возле балки Глубокой; включение в магистраль новой бустерной пульпонасосной станции на межрудном целике; спрямление трубопроводов магистрали в месте предыдущего размещения пульпонасосной станции; оборудование и включение в магистраль новой бустерной пульпонасосной станции в месте спрямления трубопроводов; продвижение вслед за фронтом горных работ забойной пульпонасосной станции второй очереди на 1200 м; установка на всех пульпонасосных станциях второй очереди и на бустерных пульпонасосных станциях первой очереди 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; установка насоса Д2000 на каждой головной пульпонасосной станции непосредственно перед гидромонитором после отбора воды для подачи в зумпф по трубам диаметром 150 мм; исключение из схемы водоснабжения насоса второго подъема Д6300, находившегося в поме-

щении пульпонасосной станции на борту карьера. Реализация этих технических предложений в период с 2005 по 2007 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.

Фактический экономический эффект от научно обоснованной модернизации гидротранспортного комплекса ВГМК за период с 2005 по 2007 год составил 10,18 млн. грн., доля ИГТМ НАН Украины при использовании рекомендаций, научно-методических, технологических и инженерно-технических решений составляет 9,5 % от общего экономического эффекта, то есть 967,1 тыс. грн.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Проблемы разработки россыпных месторождений / [И.Л. Гуменик, А.М. Сокил, Е.В. Семененко, В.Д. Шурыгин]. – Днепропетровск: Січ, 2001. – 224 с.
2. Совершенствование режимов работы гидротранспортных установок технологий углеобогащения / [Е.Л. Звягильский, Б.А. Блюсс, Е.И. Назимко, Е.В. Семененко]. – Севастополь: Вебер, 2002. – 247 с.
3. Обоснование параметров и режимов работы систем гидротранспорта горных предприятий // [Ю.Д. Баранов, Б.А. Блюсс, Е.В. Семененко, В.Д. Шурыгин]. – Днепропетровск: Новая идеология, 2006. – 416 с.
4. Семененко Е.В. Метод расчета параметров гидротранспорта отходов и продуктов обогащения / Е.В. Семененко, С.И. Криль // Обогащение полезных ископаемых: Научн.-техн. сб. – Днепропетровск, 2006. – №25(66)-26(67). – С. 176–183.
5. Криль С.И. Расчет параметров гидротранспорта песков россыпных и техногенных месторождений / С.И. Криль, Е.В. Семененко // Металлургическая и горнорудная промышленность: Научн.-техн. и произв. журнал. – №5. – 2006. – С. 77 – 80.
6. Криль С.И. Расчет параметров гидротранспорта разноплотностных полидисперсных материалов / С.И. Криль, Е.В. Семененко // Всеукраинский научно-технический журнал «Промышленная гидравлика и пневматика». – 2006. – №3(13). – С. 38 – 43.
7. Блюсс Б.А. Расчет параметров трубопроводных систем для транспортирования технологических пульп / Б.А. Блюсс, Е.В. Семененко, М.Н. Лившиц // Физико-технические проблемы разработки месторождений полезных ископаемых. – 2009. – №1. – С. 29 – 34.
8. Блюсс Б.А. Моделирование пульсационных процессов при нестационарном течении гидросмеси в круглом трубопроводе / Б.А. Блюсс, Е.В. Семененко // Вибрации в технике и технологиях. – 2007. – №3(48). – С. 93 – 96.
9. Блюсс Б.А. Расчет параметров трубопроводных систем для транспортирования технологических пульп / Б.А. Блюсс, Е.В. Семененко // Обогащение руд. – 2008. – №1. – С. 29 – 34.
10. Блюсс Б.А. Обеспечение эффективной работы карьерных гидротранспортных комплексов с учетом процесса пульпообразования / Б.А. Блюсс, Е.В. Семененко, В.Д. Шурыгин // Разработка рудных месторождений: Научн.-техн. сб. – 2005. – Вып. 89. – С. 15 – 19.
11. Блюсс Б.А. Расчет термогидромеханических параметров трубопроводного транспорта полидисперсных материалов / Б.А. Блюсс, Е.В. Семененко // Металлургическая и горнорудная промышленность: Научн.-техн. и произв. журнал. – №1. – 2005. – С. 85 – 89.
12. Блюсс Б.А. Расчет областей миграции частиц полидисперсного разноплотностного материала по сечению трубопровода при напорном гидротранспорте / Б.А. Блюсс, Е.В. Семененко, В.Д. Шурыгин // Обогащение полезных ископаемых: Научн.-техн. сб. – Днепропетровск, 2005. – №22(63). – С. 115 – 121.