

УДК 622.753:622.648.24

Б.А. БЛЮСС, д-р техн. наук,
Е.В. СЕМЕНЕНКО, канд. техн. наук,
В.Б. БОБРОВ

(Украина, Днепропетровск, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова НАН Украины)

РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ И РЕЖИМОВ РАБОТЫ СИСТЕМЫ ОТВЕДЕНИЯ И СКЛАДИРОВАНИЯ ОТХОДОВ ОБОГАЩЕНИЯ

Одно из основных условий уменьшения экологического кризиса в Украине – переход на безопасные технологии добычи, переработки и складирования отходов обогащения минерального сырья. При этом условием выживания для всех горных предприятий Украины в настоящее время является удешевление процесса производства, снижение себестоимости и повышение конкурентоспособности продукции [1–5]. Для горнодобывающих и горно-обогатительных предприятий наиболее эффективный способ воплощения стратегии развития, учитывающей оба указанных фактора, – оптимизация системы транспортирования и складирования отходов обогащения [2–5]. Как показывает опыт отечественных и зарубежных исследователей, наиболее рациональным решением для горно-обогатительных комбинатов (ГОК) Кривбасса является применение напорного гидротранспорта [6, 7]. Однако этот вид транспорта характеризуется высокой энергоемкостью, поэтому одно из основных условий его эффективного применения – это выбор и обоснование рациональных параметров и режимов работы [8]. Таким образом, их выбор и обоснование является актуальной научно-практической задачей [1, 2, 9, 10].

На многих железорудных ГОКах Кривбасса используется картвый способ замыва хранилищ отходов, когда пульпа из основного трубопровода, проложенного по дамбе, подается в хранилище через равномерно расположенные выпуски [11]. Поэтому основной особенностью гидротранспортных установок, обеспечивающих отвод отходов обогащения, является разветвленная сеть выпусков в конце магистрали. От таких установок требуется уже не просто отвести регламентированный объем отходов, а и обеспечить при этом заданные параметры течения в каждом из выпусков. В этом случае параметры и режимы работы гидротранспортной установки определяют не только энергоемкость процесса отведения, но и качество укладки отходов, т.е. надежность бортов и откосов хранилища.

Большая часть хранилищ отходов, расположенных в Кривбассе, была создана во второй половине прошлого века, они уже заполнены более чем на 70% своего объема и в ближайшие годы будут выводиться из эксплуатации. Так, на Южном ГОКе завершается эксплуатация хранилища отходов "Войково" и предполагается введение второй карты хранилища "Объединенное". Очевидно,

что изменившиеся со времени проектирования существующих хранилищ экономические условия, а именно: значительное удорожание электроэнергии, сокращение запасов воды и существенное ужесточение требований экологической безопасности, нуждаются в новом подходе к расчету параметров и режимов работы гидротранспортных установок. При этом на первом плане стоят условия обеспечения минимальной энергоемкости и регламентированных параметров подачи пульпы в карты хранилища.

Исследованием и расчетом параметров и режимов работы гидротранспортных установок, обеспечивающих отвод отходов обогащения железорудных ГОКов, занимались многие [3–10, 12, 13]. При этом основное внимание уделялось изучению зависимости критической скорости и гидравлического уклона от параметров транспортируемого материала [5–8], пересчету расходно-напорных характеристик насосов при перекачивании гидросмеси [12, 13], регламенту и надежности работы установок [5, 9, 10] или же разработке средств защиты от гидравлических ударов [3, 4].

Вопросом течения гидросмеси в трубопроводе с системой выпусков в трубопроводе с равномерной раздачей пока никто не занимался. Так, нормативный документ, которым руководствовались при проектировании существующих хранилищ и используют при создании новых, "РСН 275-75. Временные указания по технологии возведения намывных хвостохранилищ горно-обогатительных комбинатов" не содержит методики расчета таких трубопроводов. Например, диаметры и расстояние между выпусками нужно выбирать исходя из опыта эксплуатации [11].

Таким образом, цель работы – это разработать математическую модели и метод расчета параметров и режимов работы гидротранспортного комплекса с разветвленной системой выпусков пульпы в конце магистрали.

Замыв карт хранилища отходов обычно производится через четыре выпуска, расположенных на откосах дамбы (рис. 1). Последний выпуск отходит от торца трубопровода, а остальные три привариваются в трубопроводе на расстоянии 100 калибров друг от друга и от торца трубопровода (рис. 1) [11].

В рамках гидравлики процесс течения пульпы из магистрального трубопровода через отводы в карту хранилища отходов может быть охарактеризован как процесс истечения из отверстия или насадка [11, 14]. Если диаметр отверстия в трубопроводе, проложенном по дамбе, совпадает с диаметром отвода, то процесс течения в таком отводе аналогичен процессу истечения через насадок Вентури [14]. В этом случае расход пульпы через отвод может быть рассчитан так [14]:

$$; F_b = \frac{\pi D_b^2}{4} ; H = \frac{P - P_A}{\rho_0 g} - \rho \Delta Z ; \quad (1)$$

$$\mu = \frac{\mu_0}{1 + \frac{a + e\ell}{\text{Re}_T}}; \quad \mu_0 = \frac{B\ell^{0,123\alpha}}{1 + E\ell}; \quad \text{Re}_T = \frac{D_b}{\nu} \sqrt{2gH}; \quad l = \frac{L_b}{D_b}; \quad \Delta Z = L_b \sin \alpha,$$

где Q_b – расход пульпы через отвод, м³/с; μ – коэффициент расхода при истечении через насадок Вентури [14]; F_b – площадь поперечного сечения отвода, м²; g – ускорение свободного падения, м/с² ($g=9,81$); H – характеристический напор, м вод. ст. [14]; Re_T – число Рейнольдса для течения в отводе; D_b – диаметр отвода, м; P – абсолютное давление в начальном сечении отвода, Па; P_A – атмосферное давление, Па; ρ – относительная плотность пульпы, ($\rho=1,04$); ΔZ – разница геодезических отметок конечного и начального сечения отвода, м; ρ_0 – плотность воды, кг/м³ ($\rho_0=1000$); ℓ – основание натурального логарифма, ($\ell=2,71$); α – угол наклона отвода к горизонту, рад; E, a, e, B – эмпирические коэффициенты ($E=0,0057, a=97, e=211, B=0,822$) [12]; ν – кинематический коэффициент вязкости пульпы, м²/с [7, 8]; π – константа, равная 3,14.

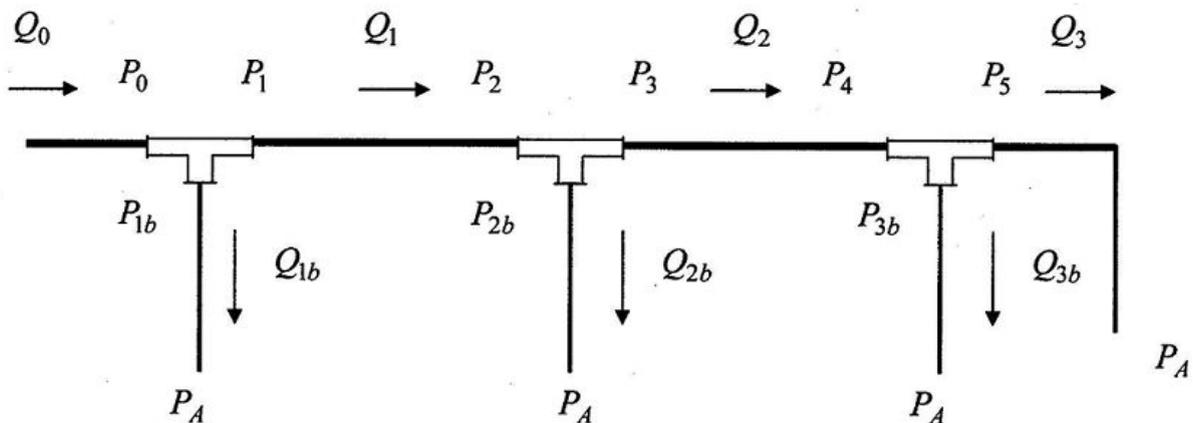


Рис. 1. Принципиальная схема распределения потоков и давлений на участке замыва карты

Если же диаметр отверстия в трубопроводе, проложенном по дамбе, меньше диаметра отвода, то процесс течения в таком отводе аналогичен процессу истечения из отверстия в тонкой стенке [14]. В этом случае при расчете расхода пульпы через отвод в формулах (1) значение коэффициента расхода нужно принимать равным 0,592 [14]. При этом поток внутри отвода

может быть безнапорным и не занимать всего поперечного сечения трубопровода.

Значение H для рассматриваемых случаев будет зависеть от величин давлений в начальном сечении отвода и в магистральном трубопроводе до и после отвода, соотношения расходов пульпы в отводе и в магистральном трубопроводе, соотношения диаметров отвода и магистрального трубопровода, порядкового номера отвода (рис. 1).

Зависимость давлений в начальном сечении отвода и в магистральном трубопроводе до и после отвода от соотношения расходов в отводе и в магистральном трубопроводе, от соотношения диаметров отвода и магистрального трубопровода достаточно полно была исследована в работах [11, 14].

Используя результаты работ [11, 14] для расчета давления потока после тройников и уравнение Бернули для участков трубопровода между тройниками, можно записать выражения для расчета давлений в начальных сечениях каждого отвода [14]:

$$\frac{P_{1b}}{\rho_0 g} = \frac{P_0}{\rho_0 g} - \xi_b^{(0)} \frac{\rho Q_0^2}{2gF_0^2}; \quad (2)$$

$$\frac{P_{2b}}{\rho_0 g} = \frac{P_0}{\rho_0 g} - \xi_c^{(0)} \frac{\rho Q_0^2}{2gF_0^2} - \xi_b^{(1)} \frac{\rho(Q_0 - Q_{1b})^2}{2gF_0^2} - J_{12}\Delta L; \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{P_{3b}}{\rho_0 g} = & \frac{P_0}{\rho_0 g} - \xi_c^{(0)} \frac{\rho Q_0^2}{2gF_0^2} - \xi_c^{(1)} \frac{\rho(Q_0 - Q_{1b})^2}{2gF_0^2} - \\ & - \xi_b^{(2)} \frac{\rho(Q_0 - Q_{1b} - Q_{2b})^2}{2gF_0^2} - (J_{12} + J_{23})\Delta L; \end{aligned} \quad (4)$$

$$\xi_b^{(0)} = A_b - B_b \frac{Q_{1b}}{Q_0} + E_b \left(\frac{Q_{1b}}{Q_0} \right)^2; \quad \xi_b^{(1)} = A_b - B_b \frac{Q_{2b}}{Q_0 - Q_{1b}} + E_b \left(\frac{Q_{2b}}{Q_0 - Q_{1b}} \right)^2; \quad (5)$$

$$\xi_b^{(2)} = A_b - B_b \frac{Q_{3b}}{Q_0 - Q_{1b} - Q_{2b}} + E_b \left(\frac{Q_{3b}}{Q_0 - Q_{1b} - Q_{2b}} \right)^2; \quad (6)$$

$$\xi_c^{(1)} = A_c - B_c \frac{Q_{2b}}{Q_0 - Q_{1b}} + E_c \left(\frac{Q_{2b}}{Q_0 - Q_{1b}} \right)^2; \quad \xi_c^{(0)} = A_c - B_c \frac{Q_{1b}}{Q_0} + E_c \left(\frac{Q_{1b}}{Q_0} \right)^2; \quad (7)$$

$$J_{12} = \frac{0,154\rho(Q_0 - Q_{1b})^2}{\lg^2\left(\frac{4(Q_0 - Q_{1b})}{10\pi Dv}\right)gF_0^2} + \frac{C}{Q_0 - Q_{1b}}; \quad (8)$$

$$J_{23} = \frac{0,154\rho(Q_0 - Q_{1b} - Q_{2b})^2}{\lg^2\left(\frac{4(Q_0 - Q_{1b} - Q_{2b})}{10\pi Dv}\right)gF_0^2} + \frac{C}{Q_0 - Q_{1b} - Q_{2b}}; \quad F_0 = \frac{\pi D^2}{4}, \quad (9)$$

где P_{1b} – абсолютное давление в начальном сечении первого отвода, Па; P_0 – абсолютное давление перед участком намыва, Па; Q_0 – расход пульпы, поступающей на участок намыва, м³/с; F_0 – площадь поперечного сечения магистрального трубопровода, м²; P_{2b} – абсолютное давление в начальном сечении второго отвода, Па; P_{3b} – абсолютное давление в начальном сечении третьего отвода, Па; Q_{1b} – расход пульпы через первый отвод, м³/с; Q_{2b} – расход пульпы через второй отвод, м³/с; J_{12} – гидравлический уклон при течении пульпы между первым и вторым отводами, м вод. ст./м; J_{23} – гидравлический уклон при течении пульпы между вторым и третьим отводами, м вод. ст./м; ΔL – расстояние между отводами, м; $\xi_b^{(0)}$, $\xi_b^{(1)}$, $\xi_b^{(2)}$ – коэффициенты местного гидравлического сопротивления при отборе потока из магистрального трубопровода в отвод [14]; $\xi_c^{(0)}$, $\xi_c^{(1)}$ – коэффициенты местного гидравлического сопротивления при течении потока через тройник с отводом [12]; A_b , B_b , E_b , A_c , B_c , E_c – эмпирические коэффициенты ($A_b=1,209$, $B_b=0,3716$, $E_b=2,4695$, $A_c=0,8112$, $B_c=1,0198$, $E_c=0,8902$) [14]; D – диаметр магистрального трубопровода, м.

На основании формул (1) с учетом выражений (2) – (9) характеристические напоры для каждого отвода можно записать в следующем виде

$$; \quad (10)$$

$$H_0 = \frac{P_0 - P_A}{\rho_0 g} - \rho \Delta Z ; \quad \wp = \frac{\rho}{2gF_0^2} ; \quad Q_1 = Q_0 - Q_{1b} ;$$

$$\psi_2 = \frac{J_{12}}{\wp} \Delta L + A_c (Q_0^2 + Q_1^2) + E_c Q_{1b}^2 + B_c Q_0 Q_{1b} ; \quad \psi_1 = A_b Q_0^2 ; \quad Q_2 = Q_0 - Q_{1b} - Q_{2b} ;$$

$$\psi_3 = (J_{12} + J_{23}) \frac{\Delta L}{\wp} + A_c (Q_0^2 + Q_1^2) + A_b Q_2^2 - B_c (Q_{2b} Q_1 + Q_0 Q_{1b}) + E_c (Q_{1b}^2 + Q_{2b}^2)$$

где H_i – напор в начальном сечении i -го отвода, м вод. ст.; H_0 – напор в начале участка замыва, м вод. ст.; Q_1 – расход пульпы в трубопроводе между первым и вторым отводами, м³/с; Q_2 – расход пульпы в трубопроводе между первым и вторым отводами, м³/с; i – номер отвода, отсчитанный от начала участка намыва ($i=1, 2, 3$).

Подставив выражение (10) в формулу (1) и проделав несложные преобразования, получим уравнение для расчета расхода пульпы через i -й отвод:

$$Q_{ib}^2 - \frac{2g \wp B_b Q_{i-1}}{w_b} Q_{ib} - \frac{2g}{w_b} (H_0 - \wp \psi_i) = 0 \quad ; \quad w_b = 2g \wp E_b + \left(\frac{1}{\mu F_b} \right)^2$$

решение которого

$$Q_{ib} = \frac{g \wp B_b}{w_b} \left(1 + \sqrt{1 + 2w_b \frac{H_0 - \wp \psi_i}{g \wp^2 B_b^2 Q_{i-1}^2}} \right) Q_{i-1} \quad . \quad (11)$$

Величина H_0 зависит от расходно-напорных характеристик выбранных насосов и магистрали до участка намыва,

$$J_0 = \frac{0,154 \rho Q_0^2}{\lg^2 \left(\frac{4Q_0}{10\pi Dv} \right) g F_0^2} + \frac{C}{Q_0} ;$$

где H – суммарный напор насосов, м вод. ст.; H_b – разница между осью первого насоса геодезической отметкой дамбы, с которой осуществляется выпуск пульпы, и оси первого насоса, м; H_z – высота пульпы в зумпфе, м; J_0 – гидравлический уклон при течении пульпы по магистральному трубопроводу, м вод. ст./м; L_0 – длина магистрального трубопровода, м; C – константа, зависящая от критической скорости и плотности пульпы, м³/с [6–8].

Для расчета величины Q_0 , а также величин всех остальных расходов в области сверхкритических режимов методом дихотомии:

$$H = J_0 L_0 + (J_{12} + J_{23}) \Delta L + J_3 L_3 + \rho (H_b - H_z - \Delta Z) + \rho \sum_{j=0}^2 \xi_c^{(j)} Q_j^2 ;$$

$$J_3 = \frac{0,154 \rho Q_3^2}{\lg^2 \left(\frac{4Q_3}{10\pi Dv} \right) g F_0^2} + \frac{C}{Q_3} ; \quad Q_3 = Q_0 - Q_{1b} - Q_{2b} - Q_{3b} ;$$

$$\xi_c^{(2)} = A_c - B_c \frac{Q_{3b}}{Q_2} + E_c \left(\frac{Q_{3b}}{Q_2} \right)^2 ,$$

где J_3 – гидравлический уклон при течении пульпы после третьего отвода, м вод. ст./м; L_3 – длина трубопровода за третьим отводом, м; Q_3 – расход пульпы в трубопроводе после третьего отвода, м³/с; Q_{3b} – расход пульпы через третий отвод, м³/с.

По предлагаемой методике для условий проектируемой на ЮГОКе второй карты хранилища отходов "Объединенное" были выполнены расчеты параметров и режимов гидротранспорта по разным схемам с насосами фирм GIW и Warman. Все расчеты для указанных выше вариантов производились для плотности отводимой пульпы 1,04 т/м³, что соответствует массовой концентрации 6%.

Были определены следующие параметры: подача пульпы, напор одного насоса, мощность одного насоса, давление перед вторым насосом и давление перед участком намыва. Расчеты производились для двух вариантов намыва карт хранилища отходов, которые различаются длиной трубопровода, проложенного по дамбе хранилища. Результаты расчетов представлены в

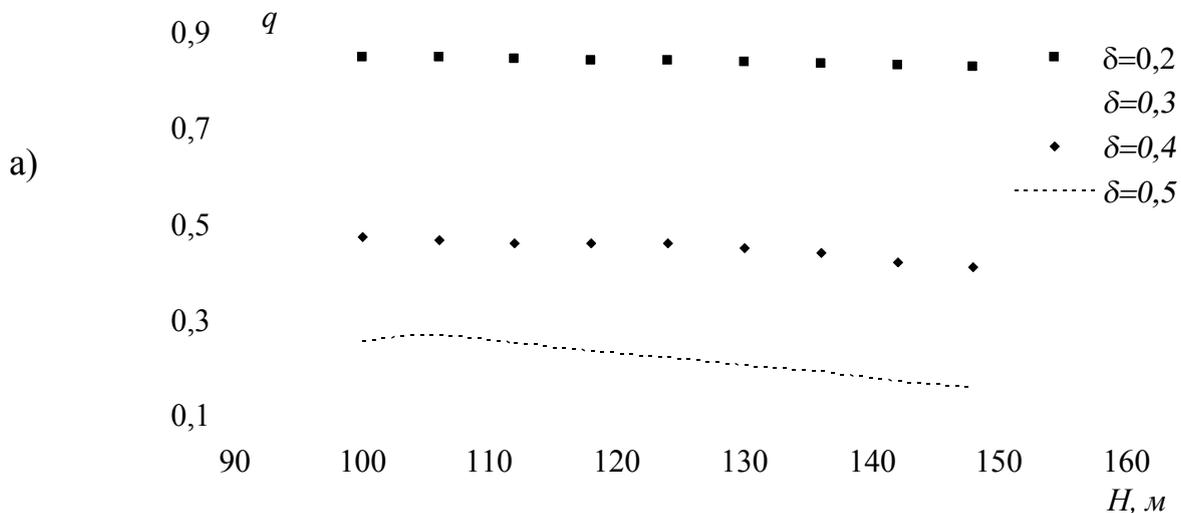
безразмерных величинах (см. рис. 2 и 3):

$$q = \frac{Q_L}{Q_0}; \quad b = \frac{Q_b}{Q_0}; \quad e = \frac{q}{b^*}; \quad \delta = \frac{D_b}{D}.$$

После проведенного анализа результатов расчета следует, что при течении в сверхкритических режимах значения расхода пульпы через отводы и расходов в трубопроводах между отводами для разных высот подачи пульпы при всех расчетных схемах можно усреднить. При этом максимальное значение среднего отклонения не превышает 4% от среднего значения, а при использовании безразмерных переменных зависимость расходов в системе распределения от диаметров трубопроводов можно представить в виде рис. 2 и 3.

С учетом этого величины безразмерных расходов пульпы через торцевой и боковые выпуски можно усреднить по высоте подачи пульпы, а зависимость этих величин от соотношения диаметров магистрального трубопровода и отводов с инженерной точностью можно аппроксимировать функциями следующего вида:

$$\begin{aligned} q^* &= 1.076 - 1.058\delta - 1.061\delta^2; & b^* &= 1.061\delta^2 + 1.058\delta - 0.076; & (12) \\ e &= 35.423 - 253.35\delta + 612.92\delta^2 - 490.03\delta^3. \end{aligned}$$



Усредненя та транспортування

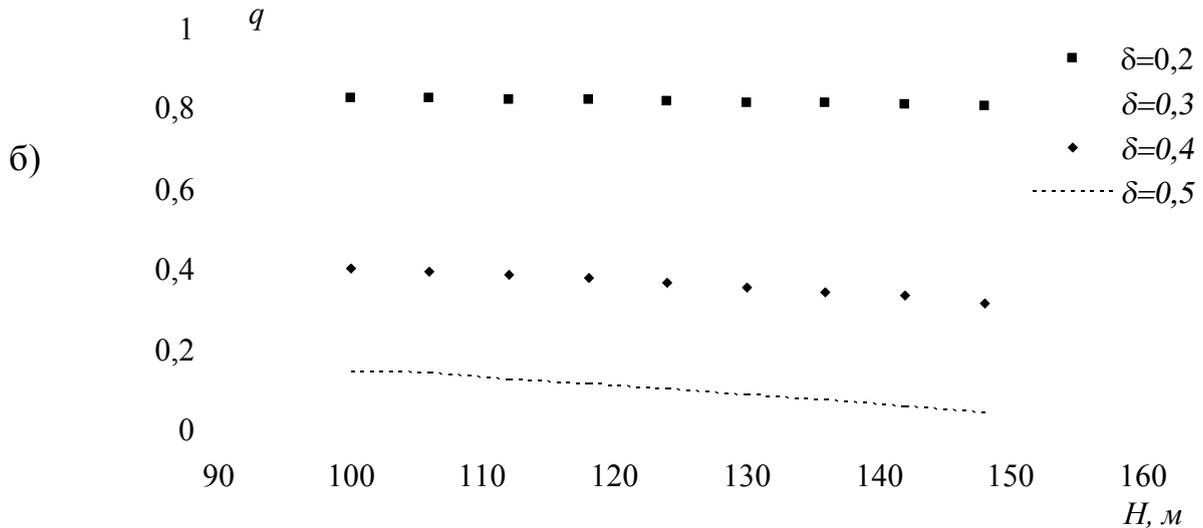
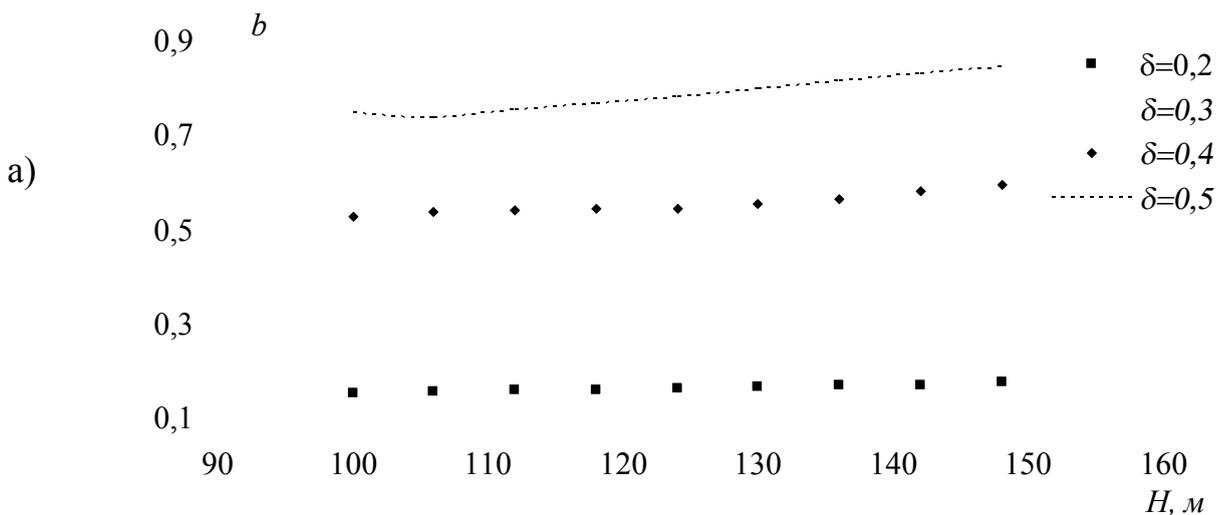


Рис. 2. Кривые зависимости безразмерного расхода через торцевой выпуск от высоты подачи пульпы для различного соотношения диаметров магистрального трубопровода и отводов при выпуске пульпы на минимальном (а) и максимальном (б) удалении от фабрики

С использованием выражений (12) при известном соотношении расходов через торцевой и боковые выпуски можно вычислить требуемое соотношение диаметров магистрального трубопровода и отводов (рис. 4):

$$\delta^* = 0,57 \left(\sqrt{\frac{4,075 + \varepsilon}{1 + \varepsilon}} - 0,875 \right),$$

где ε – требуемое соотношение расходов через боковые и торцевой выпуски.



Усредненя та транспортування

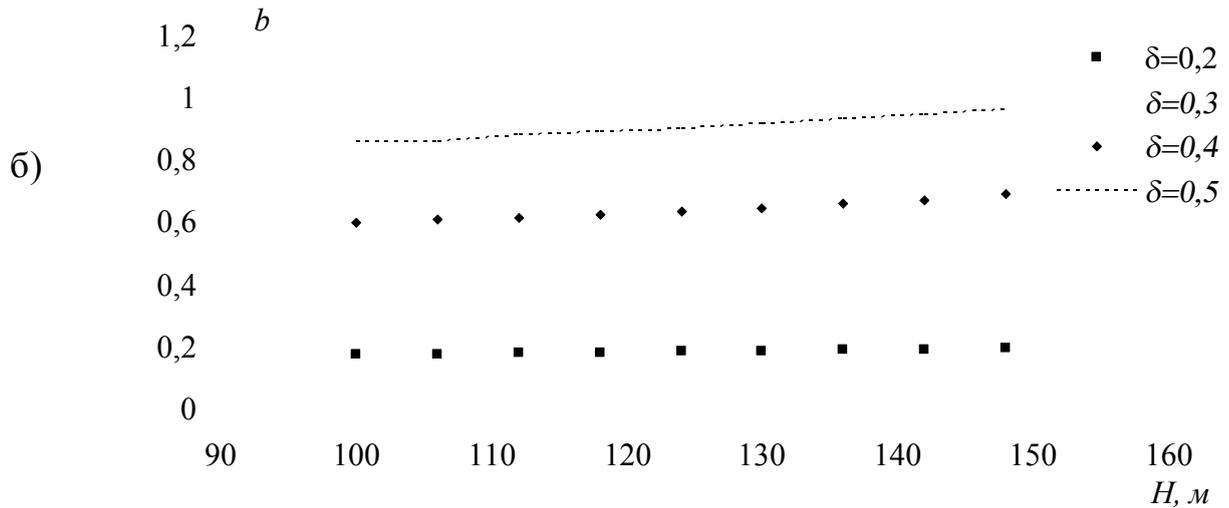


Рис. 3. Кривые зависимости суммарного безразмерного расхода через боковые выпуски от высоты подачи пульпы для различного соотношения диаметров магистрального трубопровода и отводов при выпуске пульпы на минимальном (а) и максимальном (б) удалении от фабрики

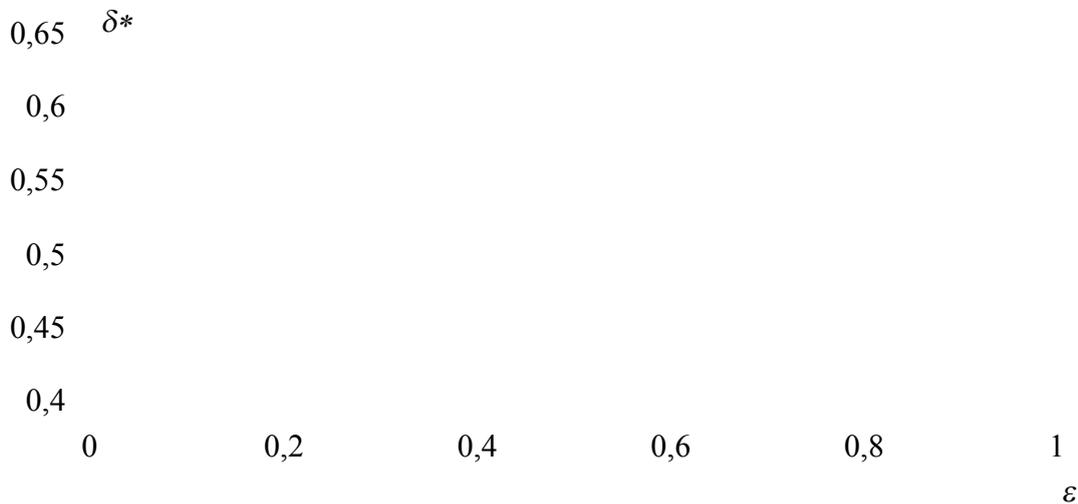


Рис. 4. Кривая зависимости соотношения диаметров магистрального трубопровода и отводов от требуемого соотношения расходов через торцевой и боковые выпуски

Полученные результаты использованы институтом УКРГИПРОруда для оценки эффективности работы системы отведения отходов обогащения ЮГОКа и разработки рекомендаций по ее модернизации на период выведения из эксплуатации хранилища "Войково" и начала эксплуатации второй карты хранилища "Объединенное".

Список литературы

1. Проблемы разработки россыпных месторождений / И.Л. Гуменик, А.М. Сокил, Е.В. Семененко, В.Д. Шурыгин. – Д.: Січ, 2001. – 224 с.

Усреднення та транспортування

2. Совершенствование режимов работы гидротранспортных установок технологий углеобогащения / **Е.Л. Звягильский, Б.А. Блюсс, Е.И. Назимко, Е.В. Семенов**. – Севастополь: Вебер, 2002. – 247 с.
3. **Дмитриев Г.П., Махарадзе Л.И., Гочиташвили Т.Ш.** Напорные гидротранспортные системы. – М.: Недра, 1991. – 304 с.
4. **Джваршеишвили А.Г.** Системы трубопроводного транспорта горно-обогатительных предприятий. – М.: Недра, 1981. – 384 с.
5. **Нурок Г.А.** Процессы и технологии гидромеханизации открытых горных работ. – М.: Недра, 1985. – 583 с.
6. **Коберник С.Г., Войтенко В.И.** Напорный гидротранспорт хвостов горно-обогатительных комбинатов. – Киев: Наукова думка, 1967. – 138 с.
7. **Карасик В.М., Асауленко И.А., Витошкин Ю.К.** Интенсификация гидротранспорта продуктов и отходов обогащения горно-обогатительных комбинатов. – К.: Наук. думка, 1976. – 156 с.
8. Теория и прикладные аспекты гидротранспортирования твердых материалов / **Асауленко И.А., Витошкин Ю.К., Карасик В.М., Криль С.И., Очеретько В.Ф.** – К.: Наук. думка, 1981. – 364 с.
9. **Семенов Е.В., Блюсс Б.А.** Обеспечение бескавитационного режима работы гидротранспортного комплекса с несколькими насосами // Межвед. сб. науч. тр. "Геотехн. механика". – 2002. – Вып. № 40. – С. 217–222.
10. **Семенов Е.В.** Перспективы повышения надежности и эффективности работы гидротранспортного комплекса ВГГМК // *Металлург. и горноруд. пром-сть*. – 2004. – № 4. – С. 74–78.
11. РСН 275-75. Временные указания по технологии возведения намывных хвостохранилищ горно-обогатительных комбинатов. – К.: Госстрой УССР, 1975. – 180 с.
12. **Самойлович Д.С., Кузнецов О.В.** К расчету параметров центробежных грунтовых насосов для гидросмеси // *Горн. журн.* – 1986. – № 8. – С. 43–46.
13. **Заря А.Н.** КПД насоса, работающего на гидросмеси // *Горн. электромеханика и автоматика: Научн.-техн. сб.* – 1982. – Вып. 41. – С. 125–129.
14. **Альтшуль А.Д.** Гидравлические сопротивления. – М.: Недра, 1982. – 224 с.

© Блюсс Б.А., Семенов Е.В., Бобров В.Б., 2006

*Надійшла до редколегії 14.10.2006 р.
Рекомендовано до публікації*