

Д-р техн. наук Е.В. Семененко,  
инженер С.Н. Киричко  
(ИГТМ НАН Украины)

## **МЕТОДЫ РАСЧЕТА РАЦИОНАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ ДЛЯ ТЕХНОЛОГИЙ ОБОГАЩЕНИЯ МИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ**

В роботі розглянуто та вдосконалено методи розрахунку раціональних параметрів гідротехнічних систем для технологій збагачення мінеральної сировини шляхом адаптації для використання полівінілхлоридних та поліетиленових труб і домішок до несучої рідини гідродинамічно активних та поверхнево-активних речовин.

## **METHODS OF CALCULATION OF RATIONAL PARAMETERS OF HYDROENGINEERING SYSTEMS FOR MINERAL CONCENTRATION TECHNOLOGIES**

The methods of calculation of rational parameters of hydroengineering systems for mineral concentration technologies are considered in the work and are improved by adaptation for use of polyvinylchloride and polyethylene pipes as well as for drag reducing agents and surfactants addition to carrying fluid.

Оценка экономической эффективности элементов гидротехнических систем для технологий обогащения минерального сырья (ГТСТОМС) в существующих экономических условиях является важной и актуальной задачей, поскольку дает возможность определить рациональные параметры и режимы работы этих элементов, отвечающие требованиям технической целесообразности, экономичности и надежности [1 – 4]. Без выполнения этих требований горное производство не имеет перспективы, поскольку будет или нерентабельным, или неконкурентоспособным относительно зарубежных корпораций. Этим определяется объект исследования – эффективность ГТСТОМС.

Специалистами бывшего СССР были разработаны рекомендации по определению экономически обоснованных параметров и режимов работы гидротранспортных систем [4 – 6], однако они ориентированы на условия плановой экономики, не учитывают экологические факторы и особенности складирования отходов обогащения в существующие хранилища. Ряд зарубежных фирм, таких как Alcan, Golder Paste Technology Ltd. и Strathcona (Канада), Кольская горно-рудная компания и ЗАО «Механобр инжиниринг» (Россия), Кемиро Ой. и Оутокумпу (Финляндия) решает эту проблему внедрением технологий складирования пастообразных пульп, тогда как специалисты «ФЛСмидс Минералз», АМЕК «Мира Фоллз» и некоторые другие критически оценивают эффективность этой технологии, указывая, что в каждом отдельном случае требуется обоснование концентрации складированной пульпы и интенсивности намыва.

Параметры и режимы работы обогатительной фабрики (ОФ) жестко определяются требованиями качества и объемов получаемой продукции, а параметры и режимы работы хранилища отходов (ХО) и оборотной воды – требованиями экологической безопасности. Поэтому основными элементами ГТСТОМС, параметры и режимы работы которых могут быть обоснованы с точки зрения экономичности и рентабельности, являются установки трубопроводного транспорта [7, 8].

Этим обусловлена цель статьи – разработка методов расчета рациональных параметров ГТСТОМС.

Основными параметрами, определяющими соответствие рациональных режимов работы этих установок указанным требованиям, являются скорость движения потока гидросмеси и концентрация в нем твердого материала определенного гранулометрического состава. Критериями оценки могут являться удельные показатели, отнесенные на один метр кубический или тонну транспортируемого материала.

Для трубопроводных систем, транспортирующих воду, известны рекомендации по выбору количества и диаметра труб, обеспечивающих минимум приведенных затрат, что учитывается общепринятым и закрепленным в нормативных документах экономическим фактором [9, 10]

$$n = \left[ \left( \frac{\alpha}{m} \beta - 1 \right) \frac{b}{\alpha} \right]^{\frac{\alpha+m}{\beta+1}} \frac{1}{W^{\beta+1}} Q_P; \quad D = W^{\frac{1}{\alpha+m}} \left( \frac{Q_P}{n} \right)^{\frac{\beta+1}{\alpha+m}}; \quad (1)$$

$$W = \frac{9,8mK \left( f E_H + E_1 + T\sigma\gamma \right)}{\eta b \alpha E_H + E_2}, \quad (2)$$

где  $\gamma$  – коэффициент неравномерности водопотребления;  $\sigma$  – стоимость электроэнергии;  $T$  – средняя продолжительность работы за год;  $f$  – стоимость насосной станции;  $r$  – коэффициент запаса мощности насосно-силового оборудования;  $\eta$  – КПД насосов;  $n$  – количество ниток трубопровода;  $D$  – диаметр трубопровода;  $Q_P$  – расчетная подача;  $a, b, \alpha$  – параметры аналитической зависимости удельной стоимости прокладки трубопровода;  $K, \beta, m$  – параметры зависимости потерь напора от расхода воды и диаметра трубы;  $W$  – экономический фактор.

Зависимости (1), (2) можно применять также и для систем оборотного водоснабжения, однако они неприменимы для гидротранспортных установок, требующих других подходов [1 – 3].

Анализ затрат, которые необходимо учесть при оценке экономической эффективности, показал, что их можно подразделить на две группы: связанные с процессом транспортирования и обусловленные особенностями данного производства.

Суммарные удельные затраты можно представить в следующем виде [4, 5]:

$$Z = E_0 + p_0 \bar{C} + \frac{2E_0 + p_1 + q_a + q_b}{C} + E_1 - E_0 + p_1; \quad (3)$$

$$B = \frac{q_b}{C}; \quad q_a = \frac{nM}{QT_C}; \quad q_b = \frac{E_2}{Q}, \quad (4)$$

где  $Z$  – суммарные удельные затраты;  $A$  – удельные затраты на транспор-

тирование;  $B$  – удельные технологические затраты;  $E_0$  – стоимость энергии при транспортировании одного кубического метра гидросмеси, приведенной к единице объемной концентрации;  $p_0$  – удельные затраты на один кубометр транспортируемого материала, обусловленные износом пульповодов и грунтовых насосов, приведенные к единице концентрации;  $p_1$  – удельные затраты на один кубометр воды, обусловленные износом водоводов и насосов водоснабжения;  $q_a$  – параметр, характеризующий затраты на оплату труда;  $E_1$  – стоимость энергии при транспортировании одного кубического метра воды в установках водоснабжения и водоотлива;  $n$  – количество рабочих, задействованных на всех видах работ, связанных с обслуживанием гидротранспорта;  $M$  – тарифная ставка рабочих;  $Q$  – производительность гидротранспортной установки по пульпе;  $T_C$  – длительность рабочей смены;  $q_b$  – параметр, характеризующий технологические затраты;  $E_2$  – суммарные затраты, связанные с проведением вскрышных и добычных работ, транспортом твердого до забойной насосной станции, а также с пульпообразованием.

Рациональное значение концентрации гидросмеси определяется из условия минимума суммарных удельных затрат

$$C_* = \sqrt{q_0 + \frac{q}{Q}}; \quad q = \frac{\frac{nM}{T_C} + E_2}{E_0 + p_0}; \quad q_0 = \frac{2E_0 + p_1}{E_0 + p_0}. \quad (5)$$

Полученное по формуле (5) рациональное значение концентрации гидросмеси зависит от подачи установки и должно обеспечивать требуемый для обогатительного производства грузопоток, что обеспечивается совместным решением (5) и уравнения

$$C = \frac{G}{\rho_S Q}, \quad (6)$$

где  $G$  – грузопоток.

Нетрудно показать, что искомые значения объемного расхода и концентрации гидросмеси будут определяться из выражений:

$$Q_* = \frac{B}{1 + \sqrt{1 + 2B}} \frac{q}{q_0}; \quad C_* = \sqrt{\frac{q_0}{B}} \sqrt{B + 1 + \sqrt{1 + 2B}}; \quad B = 2 \frac{q_0 G^2}{q^2 \rho_S^2}. \quad (7)$$

Экономичным значением скорости движения гидросмеси является значение скорости, соответствующее минимальным суммарным затратам (как транспортным, так и связанным с ними технологическим), отнесенным к одному кубометру транспортируемого материала [4]. Поэтому оценка экономичных значений скоростей должна производиться, исходя из тех же видов затрат, выра-

женных в зависимости от скорости гидросмеси:

$$Z = \left( 2E_0 + \frac{4E_1}{\pi D^2 C} + p_2 + E_3 \right) V^2 + \frac{4q_1}{\pi D^2 C V} + 2E_3; \quad q_1 = \frac{nM}{T_C} + E_2, \quad (8)$$

где  $V$  – средняя расходная скорость течения пульпы;  $p_2$  – удельные затраты на один кубометр воды, обусловленные износом водоводов и насосов водоснабжения;  $E_3$  – затраты на насосы гидромониторов, смывные и закладочные комплексы.

Рациональное значение скорости движения гидросмеси определяется из условия минимума суммарных удельных затрат

$$V_* = \sqrt[3]{\frac{2q_1}{\pi D^2 C (2E_0 + p_2 + E_3 + 4E_1)}}, \quad (9)$$

Полученное по формуле (9) рациональное значение скорости движения гидросмеси зависит от концентрации и должно обеспечивать требуемый для обогащительного производства грузопоток, что обеспечивается совместным решением (9) и уравнения

$$V = \frac{4G}{\rho_S C \pi D^2}. \quad (10)$$

Нетрудно показать, что искомое значение объемной концентрации гидросмеси будет определяться по формуле

$$C_* = B \left[ \sqrt[3]{1 + \sqrt{1 - B_*^3}} + \sqrt[3]{1 - \sqrt{1 - B_*^3}} \right]; \quad (11)$$

$$B = \sqrt[3]{\frac{4E_1}{q_1}} \frac{2G}{\rho_S \pi D^2}; \quad B_* = (2E_0 + p_2 + E_3) \frac{B \pi D^2}{3E_1}. \quad (12)$$

Подставляя рассчитанное по формулам (11) и (12) значение концентрации гидросмеси в выражение (9), получим величину скорости, обеспечивающую требуемый грузопоток на ОФ.

Наиболее часто в качестве критерия оптимальности принимают годовые приведенные затраты, определяемые по проектным данным и действующим в данный момент нормативным документам [4 – 6]. Строительство и длительная эксплуатация гидротранспортной установки часто вносят существенные коррективы в структуру приведенных затрат. Поэтому проектные значения параметров установки отличаются от оптимальных. В связи с этим в некоторых работах [5] критерий оптимальности получен на основе статистического анализа связи промышленных зна-

чений экономического показателя с параметрами гидротранспортной установки. Правильность такого способа формирования целевой функции объясняется достаточно глубокой разработкой математического аппарата статистического анализа и достоверностью связи промышленных значений критерия оптимальности с параметрами установки.

Для формирования функционала на основе статистического анализа промышленных данных были установлены технические показатели трубопровода, оказывающие существенное влияние на критерий оптимальности. Это позволило с учетом особенностей трубопроводов подачи отходов в хранилище (рис. 1) сформировать следующий функционал [5]:

$$S = a_0 + a_1 E + a_2 M + a_3 K + a_4 \Delta_T + a_5 n_c z_T; \quad (13)$$

$$E = \frac{\rho Q}{\eta Q_T} \left( k_i L^* + \Delta Z_n \right); M = \pi D \delta L^* k_L; \Delta_T = 8,17 \frac{iDC^{0,66} V_{kp}^{2,5}}{\rho_T - 1}; \quad (14)$$

$$L^* = L_C - \delta L_n; \Delta Z_n = \Delta Z_0 + H_B n; L_C = L_M + L_D^0 - L_H; L_M = L_I + L_{II}, \quad (15)$$

$$\delta L = L_p \left[ m - 1 \right] + 2m L_\Delta \cos \alpha - L_H; \quad \Delta Z_0 = H_B^0 - H_B, \quad (16)$$

где  $a_i$  – коэффициенты, получаемые в результате статистической обработки промышленных данных;  $M$  – металлоемкость трубопровода, т/м;  $K$  – количество обслуживающего персонала;  $\Delta_T$  – износ трубопровода;  $n_c$  – число насосных станций;  $z_T$  – затраты на транспортирование одной тонны твердого материала;  $\rho$  – плотность гидросмеси;  $Q_T$  – подача транспортируемого материала;  $\eta$  – КПД насосов, д. ед.;  $k_i$  – коэффициент, учитывающий местные потери напора;  $\Delta Z$  – геодезический подъем трассы;  $\delta$  – толщина стенки трубопровода;  $k_L$  – извилистость магистрали;  $C$  – объемная концентрация гидросмеси;  $V_{kp}$  – критическая скорость гидротранспортирования;  $L_M$  – длина магистральной части трубопровода, м;  $L_I$  – длина трубопровода между насосными станциями первого и второго подъема, м;  $L_{II}$  – длина трубопровода между насосной станцией второго подъема и бортом хранилища, м;  $L_H$  – удлинение бермы дамбы после замыва отметки, м (рис. 1);  $L_D^0$  – длина дамбового трубопровода, проложенного по упорной ограждающей дамбе хранилища, м (рис. 1);  $m$  – количество прямых участков в дамбовом трубопроводе, шт.;  $n$  – номер дамбы, начиная с упорной ограждающей дамбы хранилища;  $L_p$  – ширина бермы дамбы в период намыва, м (рис. 1);  $L_\Delta$  – длина откоса ограждающей дамбы хранилища, м (рис. 1);  $H_B^0$  – высота упорной ограждающей дамбы хранилища, м (рис. 1);  $H_B$  – высота ограждающей дамбы хранилища, м (рис. 1);  $\alpha$  – угол наклона трубопровода к горизонту, рад.

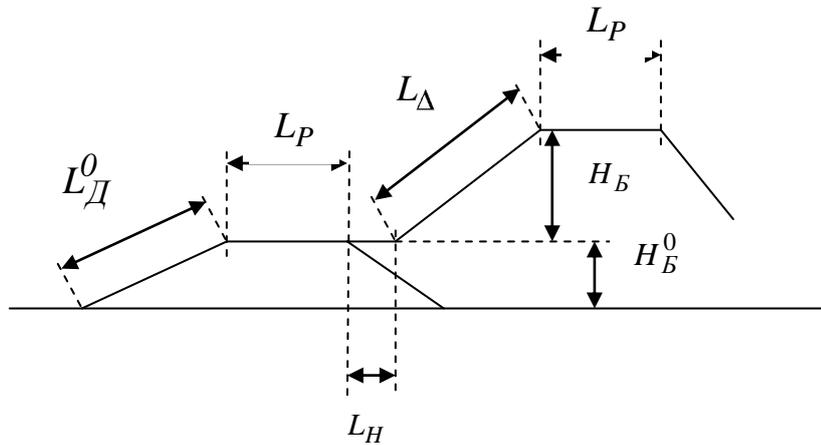


Рис. 1 – Схема обозначений геометрических характеристик трубопровода установки отвода отходов обогащения.

Значение функционала (13) суммируется для всех уровней от упорной ограждающей дамбы до последней дамбы, с которой будет осуществляться намыв,

$$\bar{S} = \sum_{n=1}^N a_0 + a_1 E + a_2 M + a_3 K + a_4 \Delta_T + a_5 n_c z_T \bar{z}, \quad (17)$$

где  $N$  – порядковый номер последней дамбы, с которой будет осуществляться намыв, начиная с упорной ограждающей дамбы хранилища.

Для определения минимума функционала (17) рекомендуется использовать разработанный Ю.Д. Арсеньевым и обоснованный для решения задач гидротранспорта В.Н. Докукиным метод базовой точки, который предполагает поиск минимума относительного изменения критерия оптимальности по отношению к его базовому значению [5, 6]

$$\delta S = \frac{\bar{S}}{S'} - 1, \quad (18)$$

где  $S'$  – базовое значение критерия оптимальности, рассчитываемое по формуле (17) при исходных значениях оптимизируемых параметров.

Минимум функционала (18) определяется итерационным способом, при этом в случае поиска рационального значения скорости используются следующие соотношения и начальные условия [5, 6]:

$$X = \left( \frac{3.2}{\theta_1 X^{0,4}} + 4 \frac{a_4 \Delta_T}{\theta_1 \psi_1'} \right)^{-0,4}; \quad X = \frac{V}{V'}; \quad X_0 = 0,6 \left( \frac{D' \cdot 0,08 a_2 \delta L \cdot k_L + 1,87 a_3}{1,3 \psi_1' a_4 \Delta_T} \right)^{0,48} \quad (19)$$

$$\theta_1 = \frac{D' \cdot 0,08 a_2 \delta L^* k_L + 1,87 a_3}{\psi_1'}; \quad \psi_1' = \frac{11,8 a_1 L^* L' \rho'}{\eta \rho_1 C'} + 1,53 a_1 + a_5 \frac{L^* \dot{v}'}{H_c} n_c. \quad (20)$$

При определении рационального значения концентрации гидросмеси используются такие соотношения и начальные условия [5, 6]:

$$Y = \left( \frac{0,32}{Y^{8,4}} \frac{a_4 A_T'}{\psi_2'} + 2\theta_3 \right)^{-0,7}; \quad Y = \frac{C}{C'}; \quad Y_0 = \left( \theta_3 + 0,3 \frac{a_4 A_T'}{\psi_2'} \right)^{-0,7}; \quad (23)$$

$$\psi_2' = D' \cdot 0,08 a_2 L^* \delta + 1,53 a_3 \pm \frac{0,02 \Delta Z_n a_1}{\eta \rho_T C'}; \quad \theta_3 = \frac{k_i L^* \dot{v}' + \Delta Z_n C' a_1 \rho_T - 1}{\psi_2' \eta \rho_T}. \quad (24)$$

Усовершенствованы методы расчета рациональных параметров и режимов работы трубопроводных систем, которые позволяют определять значения скорости и концентрации гидросмеси, обеспечивающие минимум приведенных затрат за расчетный период при условии подачи регламентированного грузопотока. Эти методы адаптированы для случая использования поливинилхлоридных и полиэтиленовых труб или добавок к несущей жидкости гидродинамически активных и поверхностно-активных веществ, учитывают снижение приведенных затрат за счет диагностирования технического состояния оборудования, а также позволяют оптимизировать затраты на техническое обслуживание.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Булат, А.Ф. Модели элементов гидротехнических систем горных предприятий: Монография / А.Ф. Булат, О.В. Витушко, Е.В. Семенов. – Днепропетровск: Герда, 2010. – 216 с.
2. Обоснование параметров и режимов работы систем гидротранспорта горных предприятий / Ю.Д. Баранов, Б.А. Блюсс, Е.В. Семенов, В.Д. Шурыгин. – Днепропетровск: Новая идеология, 2006. – 416 с.
3. Семенов, Е.В. Научные основы технологий гидромеханизации открытой разработки титан-цирконовых россыпей / Семенов Евгений Владимирович. – К.: Наукова думка, 2011. – 231 с.
4. Покровская, В.Н. Пути повышения эффективности гидротранспорта / В.Н. Покровская. – М.: Недра, 1972. – 160 с.
5. Покровская, В.Н. Трубопроводный транспорт в горной промышленности / В.Н. Покровская. – М.: Недра, 1985. – 191 с.
6. Докукин, В.П. Повышение эффективности эксплуатации систем трубопроводного гидротранспорта / В.П. Докукин. – Санкт-Петербург: СПГТИ(ТУ), 2005. – 105 с.
7. Блюсс, Б.А. Обоснование параметров и режимов картового замыва хранилища отходов обогащения при использовании гидротранспорта / Б.А. Блюсс, Е.В. Семенов, В.Б. Бобров // “Металлургическая и горнорудная промышленность”. – №6 – 2006. – С. – .
8. Блюсс, Б.А. Расчет параметров и режимов работы системы отведения и складирования отходов обогащения / Б.А. Блюсс, Е.В. Семенов, В.Б. Бобров // Научно технический сборник “Обогащение полезных ископаемых”. – № 27-28. – 2006. – С. – .
9. Курганов, А.М. Справочник по гидравлическим расчетам систем водоснабжения и канализации / А.М. Курганов, Н.Ф. Федоров. – Л.: Стройиздат, 1973. – 408 с.
10. Margalet, R. Information Theory in Ecology / R. Margalet. – General Systems. – 1958. – v. 3. – P. 45 – 56.

## **ИДЕНТИФИКАЦИЯ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ И СОСТОЯНИЙ СИСТЕМЫ ВНУТРИФАБРИЧНОГО ГИДРОТРАНСПОРТА**

Представлені результати дослідження зв'язків між діагностичними параметрами системи внутрішньофабричного гідротранспорту та її станами.

### **IDENTIFICATION OF DIAGNOSTIC PARAMETERS AND THE STATES OF FACTORY-INDOOR HYDROTRANSPORT**

The results of the study of cause and effect relationships between the diagnostic parameters of factory-indoor hydrotransport and condition are described.

Наиболее эффективным контролем в период рабочей эксплуатации является непрерывный контроль информационных диагностических параметров оценки технического состояния гидротранспортных систем для раннего выявления зарождающихся дефектов, выявления причин и координат возникновения дефектов, оценки тенденции смены текущего технического состояния.

Сложная горная электромеханическая система состоит из ряда конструктивных элементов, соединенных соответственно определенной заданной структуре. В зависимости от места включения элемента его отказ может вызвать или нарушение работоспособности отдельного узла или системы в целом. При этом реальная сложность функциональных связей между составляющими элементами систем гидротранспорта и множество их структурных параметров весьма затрудняют формализацию описания движения всей системы. Для решения этой задачи анализируемую систему целесообразно разделить на подсистемы и т.д., проводя, таким образом, структурную декомпозицию. После проведения такой, любую из подсистем на любом уровне можно рассматривать отдельно от системы в целом и от смежных подсистем.

Целью работы является исследование причинно-следственных связей между диагностическими параметрами системы внутрифабричного гидротранспорта и ее состояниями.

Во множестве элементов и узлов диагностируемой конструкции, исходя из условия максимальной экономической эффективности и быстрого действия, необходимо выделить такие узлы, отказы которых вызовут в системе наиболее опасные и экономически невыгодные последствия. Такие узлы называются слабыми. Выявление таких узлов и оценку их критичности для системы выполняют при помощи коэффициента повторяемости неисправностей, их средней частотой, стоимостными и трудовыми затратами на устранение пропущенных отказов и проведение процесса диагностирования.

Протекающие в объектах и системах процессы могут быть выражены математически неким оператором  $W_0(a, x, t)$ , где  $a(a_1, \dots, a_i, \dots, a_n)$  – вектор параметров оператора;  $a_i$  –  $i$ -й параметр;  $x$  – входной сигнал;  $t$  – время.

Задача определения качественных параметров, которые могут быть исполь-