

**МЕТОД ПРОЕКТИРОВОЧНОГО РАСЧЕТА ВНУТРИФАБРИЧНЫХ
ГИДРОТРАНСПОРТНЫХ КОМПЛЕКСОВ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИЙ
НАДЕЖНОСТЬ ТЕХНОЛОГИИ ПО ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ**

Запропонований метод розрахунку параметрів внутрішньофабричного гідротранспортного комплексу, який забезпечує надійність технології збагачення за обсягом випуску товарних концентратів.

**THE METHOD OF DESIGNING CALCULATION OF INTRA-FACTORY
HYDROTRANSPORT COMPLEXES WHICH ENSURES THE
RELIABILITY OF TECHNOLOGY WITH REGARD TO PRODUCTIVITY**

The method of calculation of intra-factory hydrotransport complex parameters is offered which ensures the reliability of ore-dressing technology with regard to marketable concentrates' throughput.

В связи с тем, что в существующих экономических реалиях рентабельность процесса переработки минерального сырья является главным условием функционирования обогатительных фабрик, большое значение приобретает проблема обоснования надежности технологий обогащения полезных ископаемых [1 – 3]. При проектировании обогатительных фабрик важно заранее определить возможность получения заданного объема товарной продукции требуемого качества в установленные сроки, а также оценить необходимые для этого затраты. Поэтому сегодня уже недостаточно выбрать некоторые параметры гидротранспортных установок, обеспечивающие работоспособность оборудования, необходимо, чтобы предложенное решение обеспечивало надежность всей технологии по производительности и по качеству выпускаемых товарных концентратов [4, 5].

Проблема оценки надежности технологий обогащения требует комплексного решения, поскольку затрагивает основные составляющие обогатительного производства. Вопросы надежности технологий обогащения рассматривались в работах [6 – 8]. Однако большая часть авторов исследовала проблемы надежности работы обогатительного и технологического оборудования и не рассматривала проблему надежности технологии в целом. Известны так же работы, посвященные надежности внутрифабричных гидротранспортных комплексов [1, 8, 9, 10], в которых рассматриваются вопросы долговечности и работоспособности насосов и трубопроводов. Анализ известных методов расчета гидротранспортных установок для технологий обогащения [1, 2, 8 - 10] показывает, что традиционно параметры гидротранспортных установок определяются без учета требований надежности технологий обогащения по показателям качества и производительности товарных концентратов.

Целью статьи является разработка метода расчета параметров внутрифабричных гидротранспортных комплексов, обеспечивающих надежность технологий обогащения по объему выпускаемых товарных концентратов.

При проектировании внутрифабричных гидротранспортных комплексов для

технологий обогащения минерального сырья всю совокупность обогатительного оборудования целесообразно разделить на группы по технологическим операциям, одновременно выполняемым однотипными аппаратами. При этом количество и последовательность таких аппаратов определяются соотношением их производительностью и технологической нагрузки, а также регламентированным уровнем надежности технологии обогащения.

Гидротранспортные установки в технологиях обогащения обеспечивают функционирование каждой технологической операции, а также их согласование внутри технологического цикла. Расчет балансов продуктов обогащения и водо-шламовой схемы технологии обогащения для каждой технологической операции производится, как минимум, для трех потоков – для исходного продукта, концентрата и отходов.

Таким образом, для каждой технологической операции необходимо рассчитывать параметры двух или трех гидротранспортных комплексов, подача и концентрация гидросмеси для которых определяются характеристиками и количеством аппаратов. Каждый гидротранспортный комплекс может состоять из нескольких гидротранспортных установок, включающих зумпф, насос, и трубопроводную магистраль. В ходе проектировочного расчета каждого гидротранспортного комплекса необходимо при заданных ограничениях на концентрацию и подачу гидросмеси, а также при известной расходно-напорной характеристике насоса определить необходимое число установок и диаметр их трубопроводов, обеспечивающие сверхкритический режим течения гидросмеси с заданным значением параметра гидротранспортирования.

Если магистраль гидротранспортной установки состоит из вертикального трубопровода, то расчет параметров и режимов транспортирования производится, исходя из гидравлической крупности, определяемой по средневзвешенному диаметру транспортируемых частиц, а также средневзвешенного параметра Архимеда. Для гидротранспортных установок, магистрали которых содержат горизонтальные участки, в транспортируемом материале выделяют три класса крупности: тонкие частицы (менее 0.15 мм); мелкие частицы (более 0.15 мм и менее 2 мм); кусковые частицы (более 2 мм) [1, 2, 9, 10].

При расчете параметров и режимов работы гидротранспортных установок рекомендуется принимать значение коэффициента гидравлического сопротивления трения, равное 0.015 и соответствующее квадратичной области, значение параметра гидротранспортирования (k) выбирать из диапазона $k = 1,1 \div 1,5$, а для вычисления безразмерного эмпирического коэффициента (k_0) использовать формулу [9, 10]

$$k_0 = 2,345d^{0,145}; \quad (1)$$

где $d = \sum_i d_i R_i$ - средневзвешенный диаметр частиц транспортируемого материала; d_i - диаметр частиц i -го класса крупности; R_i - объемная доля частиц i -

го класса в транспортируемом материале.

При проведении расчетов расходно-напорная характеристика насосов в пределах рабочей области аппроксимируется зависимостью [2]

$$H = C - AQ^2; \quad (2)$$

$$A = \frac{H_I - H_{II}}{Q_{II}^2 - Q_I^2}; \quad C = \frac{H_I Q_{II}^2 + H_{II} Q_I^2}{Q_{II}^2 - Q_I^2},$$

где H , Q - напор и подача насоса; C , A - коэффициенты аппроксимации расходно-напорной характеристики насоса; H_I , H_{II} - напор соответственно на верхней и нижней границах рабочей области; Q_I , Q_{II} - подача насоса на верхней и нижней границах рабочей области.

Начальными данными для расчета являются расходно-напорная характеристика насоса; регламентированное значение производительности комплекса по твердому; регламентированное значение концентрации гидросмеси; регламентированное значение содержания контролируемого компонента в транспортируемом материале; гранулометрический состав транспортируемого материала; фракционный состав транспортируемого материала; длина трубопровода гидротранспортной установки; разница геодезических отметок конца и начала трубопровода установки; коэффициент обобщенного трения частиц о стенку трубопровода; коэффициент, учитывающий потери напора на местных гидравлических сопротивлениях.

Расчет производится в четыре этапа.

На первом этапе на основании требований к технологической операции, а также с учетом сепарационных характеристик используемых аппаратов и их показателей надежности рассчитывается регламентированная подача установок гидротранспортного комплекса [11]

$$Q_i = \frac{q_i e (1 - \omega) W \prod_{j=i}^N \vartheta_j}{\alpha_i S_i n_i [T^H] \prod_{j=i}^N \beta_j \delta_j}; \quad (3)$$

$$\delta_j = \frac{T_{н.бп}^j - T_{бп}^j}{T_{н.бп}^j}; \quad \omega = \frac{W_{ck}}{W},$$

где n_i - количество гидротранспортных установок, обеспечивающих соответствующий поток технологической операции; ϑ_i - содержание ценного компонента в питании i -й технологической операции; β_i - содержание ценного компонента в продукте i -й технологической операции; W - необходимый объем товарного концентрата; W_{ck} - объем товарного концентрата, имеющийся на складе; $T_{бп}^j$ -

время работы j -й технологической операции с ухудшением качества концентрата; $T_{н.бр}^j$ - время работы j -й технологической операции без ухудшения качества концентрата; $[T^H]$ - допустимое значение необходимой наработки; q - коэффициент запаса технологической операции по производительности; e - коэффициент, учитывающий структуру технологической секции, количество работающих и резервных аппаратов, их надежность и вид резерва (табл.1) [3, 6, 7].

Таблица 1 – Формулы для вычисления коэффициента e

Структура технологической секции	Формула для расчета
m параллельно включенных аппаратов с вероятностью безотказной работы p	$e = \frac{1}{m[1 - (1 - p)^m]}$
m последовательно включенных аппаратов с вероятностью безотказной работы p	$e = \frac{1}{mp^m}$
m параллельных и r резервных аппаратов при ненагруженном резерве с интенсивностью отказов аппаратов y и с интенсивностью восстановления аппаратов x .	$e = \frac{1}{m} \left(1 + \frac{m^{n+1} \left(\frac{y}{x} \right)^{r+1}}{1 + \sum_{k=1}^r m^k \left(\frac{y}{x} \right)^k} \right)$
m параллельных и r резервных аппаратов при нагруженном резервировании с интенсивностью отказов аппаратов y и с интенсивностью восстановления аппаратов x .	$e = \frac{1}{m} \left(1 + \frac{m \prod_{k=1}^r (m+k) \left(\frac{y}{x} \right)^{r+1}}{1 + \sum_{k=1}^r \left(\frac{y}{x} \right)^{2k-1} \prod_{j=1}^k (m+j)} \right)$

На втором этапе по начальным данным рассчитывают коэффициенты аппроксимации расходно-напорной характеристики насоса, геодезический уклон трубопровода, параметры Архимеда, гидравлическую крупность и средневзвешенные диаметры для отдельных классов крупности и для всего материала. Затем из рекомендованного диапазона значений выбирают величину параметра гидротранспортирования и рассчитывают значения вспомогательных величин по формулам

$$\Omega_i = 2.78 \sqrt[3]{\frac{Ar_2 - Ar_1 S_1}{1 + Ar_1 S_1} S_2 (1 - S_2) \frac{w_2}{\sqrt{gd_2}}} + 7.5 \sqrt{f \frac{Ar_3 - Ar_1 S_1}{1 + Ar_1 S_1} S_3}; \quad (4)$$

$$J = \left(0,5 \mu \lambda k^2 \Omega_i^2 + i_g \right) \left(1 + \frac{(1 - S_1)}{1 + Ar_1 S_1} Ar_1 S_1 \right) + 0,387 \frac{Ar_2 - Ar_1 S_1}{1 + Ar_1 S_1} \frac{S_2 (1 - S_2)}{k \Omega_i} \frac{w_2}{\sqrt{gd_2}} + f \frac{Ar_3 - Ar_1 S_1}{1 + Ar_1 S_1} S_3; \quad (5)$$

$$Ar_i = \frac{\rho_i - \rho_0}{\rho_0}; \quad S_i = R_i S; \quad i_g = \frac{\Delta Z}{L}; \quad Ar = \sum_i Ar_i R_i; \quad S = \sum_i S_i,$$

где k - параметр гидротранспортирования; k_0 - эмпирический безразмерный коэффициент; i_g - геодезический уклон трубопровода; ΔZ - разность геодезических отметок конца и начала трубопровода; L - длина трубопровода; ρ_i - плотность частиц i -го класса; ρ_0 - плотность воды; w_2 - гидравлическая крупность частиц мелкого класса; g - ускорение свободного падения; d_2 - средневзвешенный диаметр частиц мелкого класса; L - длина трубопровода; λ - коэффициент гидравлических сопротивлений трения; μ - коэффициент, учитывающий потери напора на местных гидравлических сопротивлениях; f - коэффициент обобщенного трения частиц о стенку трубопровода.

На третьем этапе рассчитывают количество насосных установок гидротранспортного комплекса и диаметр их напорного трубопровода. Для установок с горизонтальным трубопроводом используются зависимости

$$n_i = \frac{q_i e(1-\omega)W}{\alpha_i S_i [T^H]} \sqrt{\frac{A}{C - JL}} Q_i \frac{\prod_{j=i}^N \vartheta_j}{\prod_{j=i}^N \beta_j \delta_j}; \quad (6)$$

$$D_i = \sqrt[5]{\frac{C - JL}{gA} \left(\frac{4}{\pi k \Omega_i} \right)^{0.4}}, \quad (7)$$

а для установок с вертикальными трубопроводами формулы

$$n_i = \sqrt{\frac{8\mu\lambda(1 + ArS) + Ag\pi^2 D_i^5}{C - i_g(1 + ArS)}} \frac{q_i e(1-\omega)W}{\alpha_i S [T^H] \pi \sqrt{gD_i^5}} Q_i \frac{\prod_{j=i}^N \vartheta_j}{\prod_{j=i}^N \beta_j \delta_j}; \quad (8)$$

$$\frac{(1-S)w_0}{k_0 \sqrt{gArSD_i}} - \frac{2\sqrt{C - i_g(1 + ArS)}}{kk_0 \sqrt{ArS} \sqrt{8\mu\lambda(1 + ArS) + Ag\pi^2 D_i^5}} + 1 = 0; \quad (9)$$

где w_0 - средневзвешенная гидравлическая крупность частиц транспортируемого материала; D_i - внутренний диаметр напорного трубопровода.

Уравнения (6) – (9) являются нелинейными и решаются численно одним из стандартных методов, например, методом дихотомии.

На третьем этапе осуществляется расчет режима течения во всасывающих трубопроводах насосных установок. Сначала режим течения рассчитывают при

условии, что диаметры всасывающего и напорного трубопроводов магистрали равны. В этом случае режим течения будет бескавитационным, если выполняется неравенство

$$\tau_1 D^{7,5} - \tau_2 D^5 - \tau_3 D + \tau_0 > 0; \quad (10)$$

$$\tau_1 = 0,387 \frac{Ar_2 - Ar_1 S_1}{1 + Ar_1 S_1} \frac{S_2(1 - S_2)}{Q_i} \frac{w_2 L}{\sqrt{gd_2}}; \quad \tau_0 = \frac{8\mu\lambda L}{g\pi^2} \left(1 + \frac{1 - S_1}{1 + Ar_1 S_1} Ar_1 S_1\right) Q_i^2;$$

$$\tau_2 = \frac{P_a - P_k}{\rho_0 g} - f \frac{Ar_3 - Ar_1 S_1}{1 + Ar_1 S_1} S_3 L - 10\varphi \left(\frac{N}{C_R}\right)^{4/3} Q_i^{2/3}; \quad \tau_3 = \frac{8Q_i^2}{\rho_0 g \pi^2},$$

где P_a - атмосферное давление; P_k - давление насыщенных паров жидкости; φ - коэффициент запаса [2, 9, 10]; N - частота вращения рабочего колеса насоса; C_R - константа Руднева используемого насоса [2, 9, 10].

Если неравенство (10) не выполняется, то необходимо, изменив значение параметра гидротранспортирования, определить такой диаметр всасывающего трубопровода, при котором режим течения будет бескавитационным и сверхкритическим:

$$D_* = D \left(\frac{k}{k_*}\right)^{0.4}, \quad (11)$$

где D_* - новый диаметр всасывающего трубопровода; k_* - новое значение параметра гидротранспортирования для всасывающего трубопровода.

Допустимое значение k_* определяют из решения неравенства

$$k_*^3 - D k^{0.4} \frac{\tau_3}{\tau_0} k_*^{2.6} - D^5 k^2 \frac{\tau_2}{\tau_0} k_* + D^{7,5} k^3 \frac{\tau_1}{\tau_0} > 0. \quad (12)$$

По величине диаметра всасывающего трубопровода, вычисленного по формуле (11), при известном значении k_* из сортамента выбирается труба с наиболее близким диаметром, не нарушающим условия

$$[k_*] \leq k \left(\frac{D}{D_0}\right)^{2.5},$$

где $[k_*]$ - решение неравенства (12); D_0 - диаметр трубы, выбранной из сортамента.

Таким образом, на основании выражений (1) – (12) возможен расчет параметров внутрифабричного гидротранспортного комплекса, обеспечивающих сверхкритические бескавитационные режимы работы, а также, надежность тех-

нологии обогащения по объему выпускаемых товарных концентратов. Предложенный метод расчета позволяет также прогнозировать параметры внутрифабричного гидротранспортного комплекса при изменении технологической схемы или сырьевой базы месторождения, а также при замене насосов, обогатительных аппаратов или технологического оборудования.

На основании данного метода путем последовательных расчетов возможно определение допустимых показателей надежности оборудования или режимов работы гидротранспортного комплекса, превышение которых приведет к потере надежности технологии обогащения по производительности товарных концентратов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Совершенствование режимов работы гидротранспортных установок технологий углеобогащения / Е.Л. Звягильский, Б.А. Блюсс, Е.И. Назимко, Е.В. Семененко. – Севастополь: «Вебер», 2002. – 247 с.
2. Проблемы разработки россыпных месторождений / И.Л. Гуменик, А.М. Сокил, Е.В. Семененко и др. – Днепропетровск: Січ, 2001. – 224 с.
3. Болошин Н.Н., Гашичев В.И. Надежность работы технологических узлов и оборудования обогатительных фабрик.-М.:Недра,1974.-137с.
4. ГОСТ 27.204-83. Надежность в технике. Технологические системы. Технические требования к методам оценки надежности по параметрам производительности.-Введ.впервые;Введ. 01.01.85.-М.:Изд-во стандартов,1984.-38 с.
5. ГОСТ 27.202-83. Надежность в технике. Технологические системы. Методы оценки надежности по параметрам качества изготавливаемой продукции. - Взамен ГОСТ 23641-79, ГОСТ 16467-70, ГОСТ 16.304-74, ГОСТ 16.305-74,ГОСТ 16.306-74;Введ.01.07.84.-М.:Изд-во стандартов,1984.-52 с.
6. Надежность и эффективность в технике: Справочник. – Т 2: Математические методы в теории надежности и эффективности / Под. Ред. Б.В. Гнеденко. – М.: Машиностроение, 1987.– 280 с.
7. Гаркушин Ю.К., Смирнов В.В. Надежность и эффективность оборудования углеобогачительных фабрик. – Днепропетровск: Полиграфист, 1999. – 182 с.
8. Семененко Е.В. Обоснование рациональных режимов работы насосов углеобогачительных фабрик // Обогащение полезных ископаемых. - Днепропетровск, 2000. Вып. №7(48). - С. 119 - 124.
9. Надежность и долговечность напорных гидротранспортных систем / Л.И. Махарадзе, Т.Ш. Гочиташвили, Д.Г. Сулаберидзе, Л.А. Алехин. – М.: Недра, 1984. – 128 с.
10. Дмитриев Г.П., Махарадзе Л.И., Гочиташвили Т.Ш. Напорные гидротранспортные системы: Справочное пособие. – М.: Недра, 1991. – 304 с.
11. Семененко Е.В. Шмелев А.Н. Обеспечение надежности технологии обогащения с учетом требуемого объема товарного концентрата // Научно-технический сборник «Обогащение полезных ископаемых». - Днепропетровск, 2003. Вып. №17(58). - С. 11 - 17.