

УДК 621.689:622.276

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ПОТЕРЬ НАПОРА ПРИ ГИДРОТРАНСПОРТЕ СГУЩЕННЫХ ПУЛЬП ХВОСТОВ ОБОГАЩЕНИЯ РУД

В.И.АЛЕКСАНДРОВ, *д-р техн. наук, профессор, alexvict@spmi.ru*

Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», Санкт-Петербург, Россия

ПАВЕЛ ВЛАСАК, *д-р техн. наук, профессор, vlasak@ih.cas.cz*

Институт гидродинамики Академии наук Чешской Республики, Прага, Чешская Республика

Применение стандартных методик расчета гидротранспорта, используемых для гидросмесей с малыми концентрациями твердой фазы, для гидротранспорта высококонцентрированных смесей приводит к значительным расхождениям между практическими значениями потерь напора и полученными в результате расчета. Основным фактором, определяющим ошибки расчета гидротранспорта гидросмесей с высокими концентрациями твердой фазы, при использовании стандартных методик является то, что в них не учитываются реологические характеристики и параметры, в значительной степени влияющие на величину удельных потерь напора. Предлагаемая модель движения пульпы и разработанная на основе этой модели расчетная методика позволяют определять параметры гидротранспорта с погрешностью не более 0,1.

Ключевые слова: потери напора, концентрация, пульпа, реологические характеристики.

Аналитическое определение потерь напора при гидротранспорте сгущенных пульп является задачей более сложной в сравнении с аналогичной задачей для гидросмесей с массовой концентрацией твердых частиц не более 30 %.

За последние 25-30 лет наряду с разработкой эмпирических методов расчета был накоплен значительный массив информации о фактических потерях напора. Это позволило специалистам обобщить известные методики и разработать универсальный расчетный метод для определения основных параметров гидравлического транспорта гидросмесей с относительно невысоким содержанием твердых частиц в объеме перекачиваемых пульп [1, 2, 5].

Дальнейшее совершенствование гидравлического транспорта и высокие требования по экологическим и энергетическим вопросам связаны с необходимостью перехода на перекачку сгущенных гидросмесей с содержанием твердых частиц не менее 55-65 %. Свойства сгущенных гидросмесей отличаются от обычных (разделяющихся) смесей с низкими концентрациями твердых частиц. При течении гидросмесей с концентрациями 35-40 % начинают проявляться реологические свойства, характеризующиеся такими параметрами как начальное (статическое) напряжение сдвига, динамическое напряжение сдвига, градиент скорости сдвига. Существующие методы для определения параметров гидротранспорта сгущенных гидросмесей приводят к противоречивым результатам, на 50-100 % отличающимся от фактических измеренных значений по потерям напора.

В последнее десятилетие по проектам ЗАО «Механобр инжиниринг» на горно-обогатительных предприятиях начали работать комплексы по глубокому сгущению хвостовой пульпы. Работа систем гидротранспорта высокоплотных пульп на этих предприятиях позволила определить фактические параметры гидротранспорта.

В таблице приведены характеристики гидротранспортных систем и измеренные параметры при стабильных режимах сгущения и гидротранспорта хвостовой пульпы на трех ГОКах.

Параметры гидротранспорта сгущенной пульпы на горно-обогатительных комбинатах

Комбинаты	$q_{тв}$, т/ч	$d_{ср}$, мм	c_m , %	$Q_{см}$, м ³ /ч	$D_{тр}$, м	$I_{см}$, м/км
Актюбинский	283	0,03	55	326	315	15
Олимпиадинский	547	0,061	64	502	300	24
Благодатненский	758	0,045	70	570	400	30

Примечания: $q_{тв}$ – количество транспортируемых хвостов; $d_{ср}$ – средневзвешенный диаметр твердых частиц; c_m – массовая концентрация твердых частиц; $Q_{см}$ – расход пульпы; $D_{тр}$ – диаметр пульповода; $I_{см}$ – потери напора по длине пульповода

При составлении рабочей документации для этих предприятий выполнялись расчеты параметров гидротранспорта сгущенной хвостовой пульпы и были получены значения потерь напора, существенно превышающие фактические. Такие значительные расхождения расчетных и фактических значений параметров гидротранспорта сгущенных гидросмесей потребовали разработки новой расчетной модели с учетом отличия обычных гидросмесей с невысокими концентрациями твердой фазы и сгущенных смесей, склонных к проявлению реологических свойств.

Принятая ранее расчетная модель гидротранспорта пульп основывалась на уравнении Дарси – Вейсбаха с учетом относительной плотности транспортируемой пульпы. При этом гидросмесь рассматривалась как однородная жидкость с плотностью, отличной от чистой жидкости. В такой модели расчетные значения потерь напора были пропорциональны потерям напора для чистой жидкости на величину относительной плотности сгущенной гидросмеси. Фактически кривые потерь напора сгущенной гидросмеси на графиках зависимости потерь напора от скорости потока сдвигались по ординате на величину относительной плотности смеси.

Предлагаемая в данной статье модель движения высокоплотной пульпы предполагает, что гидросмеси мелкозернистых хвостов обогащения при объемных концентрациях $c_{об} \geq 0,25$ образуют седиментационно устойчивые жидкости, которые при течении гидросмеси практически равномерно распределяются по сечению трубопровода. При таких концентрациях твердой фазы гидросмеси проявляют реологические свойства, характеризующиеся начальным (статическим) напряжением сдвига τ_0 , эффективной (кажущейся) вязкостью $\eta_{см}$ и скоростью сдвига $dv/dr = \dot{\gamma}$ (градиентом скорости), характеризующей изменение скорости по сечению потока гидросмеси.

Основным уравнением, описывающим движение реологической гидросмеси, является уравнение Бингама:

$$\tau = \tau_0 + \eta_{см} \frac{dv}{dr} = \tau_0 + \eta_{см} \dot{\gamma}, \quad (1)$$

где τ – суммарное касательное напряжение, возникающее на стенке трубопровода; τ_0 – начальное (статическое) напряжение; $dv/dr = \dot{\gamma}$ – градиент скорости сдвига; $\eta_{см}$ – динамическая вязкость гидросмеси.

Характерная схема течения реологической смеси в трубопроводе приведена на рис.1. Рассмотрим схему сил, действующих на выделенный объем сгущенной гидросмеси в отрезке трубопровода длиной L . Из условия равновесия выделенного объема найдем соотношение между нормальными P , обусловленными действующим давлением p и касательными T силами от касательных напряжений τ , действующих по внутренней поверхности трубы:

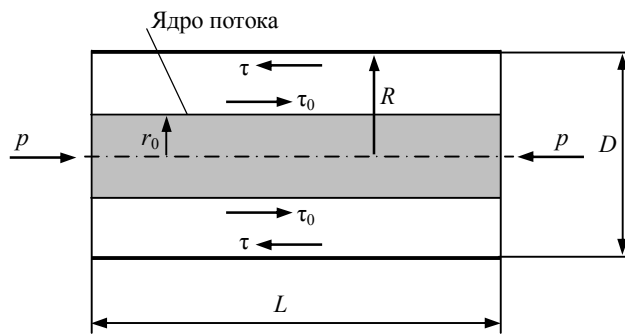


Рис.1. Схема потока высококонцентрированной гидросмеси
 D – диаметр трубы; L – длина трубы; r_0 – радиус ядра потока;
 τ_0 – напряжение начальное (статическое); τ – касательное
напряжение на стенке трубы; p – давление

$$P = p \frac{\pi D^2}{4}; \quad T = \tau \pi D L; \quad P = T \Rightarrow p \frac{\pi D^2}{4} = \tau \pi D L \Rightarrow \tau = \frac{p D}{4 L}; \quad \tau = \frac{i D}{4}, \quad (2)$$

где $i = p/L$ – потери давления на длине трубопровода L , Па/м.

Формулу (1) запишем в следующем виде:

$$\tau - \tau_0 = \eta_{cm} \dot{\gamma} = \tau(1 - \sigma),$$

откуда получим

$$\tau = \frac{\eta_{cm} \dot{\gamma}}{1 - \sigma},$$

где $\sigma = \tau_0/\tau$ – относительное напряжение сдвига.

С учетом выражения (2) можно записать

$$i = \frac{4 \eta_{cm} \dot{\gamma}}{(1 - \sigma) D}.$$

Так как $i_{cm} = \frac{i}{\rho_{cm} g}$, то

$$i_{cm} = \frac{4 \eta_{cm} \dot{\gamma}}{(1 - \sigma) \rho_{cm} g D}, \quad (3)$$

где i_{cm} – потери напора, м вод.ст./м.

Можно продолжить преобразования формулы (3), заменив $\dot{\gamma} = \frac{8 v_{cp}}{D}$ и учитывая, что

$Re = \frac{v_{cm} D \rho_{cm}}{\eta_c}$. После подстановки в (3) получим для потерь напора

$$i_{cm} = \frac{32 v_{cm}^2}{(1 - \sigma) Re g D} \quad \text{или} \quad i_{cm} = \frac{64 v_{cm}^2}{(1 - \sigma) Re 2 g D},$$

где $64/(1 - \sigma) Re = \lambda_\sigma$ – коэффициент гидравлических сопротивлений течению реологических гидросмесей, учитывающий соотношение напряжений τ_0 и τ .

В итоге получим обычный вид формулы Дарси – Вейсбаха для определения потерь напора при течении высококонцентрированных гидросмесей

$$i_{cm} = \lambda_\sigma \frac{v_{cp}^2}{2 g D}.$$

Для определения τ_0 , η_{cm} и $\dot{\gamma}$ воспользуемся известными эмпирическими формулами [3, 4, 6], полученными авторами при обработке экспериментальных данных по гидравлическому транспорту высококонцентрированных гидросмесей хвостов обогащения медной руды Джекказганского ГМК.

Были выведены следующие расчетные формулы:

- начальное напряжение сдвига

$$\tau_0 = \exp 4,89 \cdot c_{об}^{2,57};$$

- кажущаяся вязкость

$$\eta_{\text{см}} = \mu_0 e^{9,933c_{06}} ;$$

- скорость сдвига

$$\dot{\gamma} = \frac{1}{2} \left(\frac{\text{Re} \eta_{\text{см}}}{\rho_{\text{см}}} \right)^3 \left(\frac{3,6\pi c_{\text{см}} \rho_{\text{ТВ}}}{q_{\text{ТВ}}} \right).$$

Расчетная методика была применена при выполнении расчетов параметров гидротранспорта для предприятий, приведенных в таблице. Приведем эти расчеты и сравним их с фактическими значениями потерь напора.

Последовательно выполним расчеты системы гидротранспорта Актюбинского ГОКа по следующим зависимостям:

- Потери напора

$$i_{\text{см}} = \lambda_{\sigma} \frac{v_{\text{ср}}^2}{2gD},$$

где

$$i_{\sigma} = \frac{64}{(1-\sigma)\text{Re} p},$$

$p = 0,27 \exp(0,85c_{06})$ – корректирующий коэффициент,

$$p = 0,27 \cdot 2,72^{0,85 \cdot 0,289} = 0,345.$$

- Число Рейнольдса

$$\text{Re} = \frac{v_{\text{ср}} D \rho_{\text{см}}}{\eta_{\text{см}}} = \frac{1,282 \cdot 0,3 \cdot 1578}{0,018} = 33717.$$

- Начальное напряжение сдвига

$$\tau_0 = e^{4,89} \cdot 0,289^{2,57} = 5,49 \text{ Па}.$$

- Скорость сдвига

$$\dot{\gamma} = \frac{1}{2} \left(\frac{\text{Re} \eta_{\text{см}}}{\rho_{\text{см}}} \right)^3 \left(\frac{3,6\pi c_{\text{см}} \rho_{\text{ТВ}}}{q_{\text{ТВ}}} \right)^2 = \frac{1}{2} \left(\frac{33717 \cdot 0,018}{1578} \right)^3 \left(\frac{3,6 \cdot \pi \cdot 0,289 \cdot 3000}{282,64} \right) = 34,2 \text{ с}^{-1}.$$

- Проверка скорости сдвига

$$\dot{\gamma} = \frac{8v_{\text{ср}}}{D} = \frac{8 \cdot 1,282}{0,3} = 34,2 \text{ с}^{-1}.$$

- Напряжение на стенке трубопровода

$$\tau = \tau_0 + \eta_{\text{см}} \dot{\gamma} = 5,49 + 0,018 \cdot 34,2 = 6,1 \text{ Па}.$$

- Относительное напряжение сдвига

$$\sigma = \frac{5,49}{6,1} = 0,9.$$

- Коэффициент гидравлических сопротивлений

$$\lambda_{\sigma} = \frac{64}{(1-0,9) \cdot 33717 \cdot 0,345} = 0,055.$$

• Расчетные потери напора

$$i_{\text{см}} = 0,055 \frac{1,282^2}{2 \cdot 9,81 \cdot 0,3} = 0,0153 \text{ м вод. ст./м.}$$

Зная фактические потери напора при гидротранспорте, равные 15,41 м/км, оценим величину относительных отклонений от полученных расчетных значений:

$$\varepsilon_1 = \frac{\text{Расчет} - \text{Факт}}{\text{Расчет}} = \frac{15,3 - 15,41}{15,3} = -0,007 ;$$

$$\varepsilon_2 = \frac{\text{Расчет} - \text{Факт}}{\text{Факт}} = \frac{15,41 - 15,3}{15,41} = 0,007 .$$

Таким образом, ошибка расчетных значений потерь напора относительно фактических, измеренных значений составляет менее одного процента.

Для системы гидротранспорта сгущенной пульпы Олимпиадинского ГОКа получим значения потерь напора

$$i_{\text{см}} = 0,045 \frac{1,97^2}{2 \cdot 9,81 \cdot 0,3} = 0,0298 \text{ м вод.ст./м}$$

с относительной погрешностью при фактических потерях напора, равных 24 м/км,

$$\varepsilon_1 = \frac{\text{Расчет} - \text{Факт}}{\text{Расчет}} = \frac{29,8 - 24}{29,8} = 0,194 ;$$

$$\varepsilon_2 = \frac{\text{Факт} - \text{Расчет}}{\text{Факт}} = \frac{24 - 29,8}{24} = -0,241 .$$

Расчетные потери напора при гидротранспорте сгущенной пульпы обогатительной фабрики Благодатненского месторождения составят

$$i_{\text{см}} = 0,165 \frac{1,26^2}{2 \cdot 9,81 \cdot 0,4} = 0,0335 \text{ м вод. ст./м;}$$

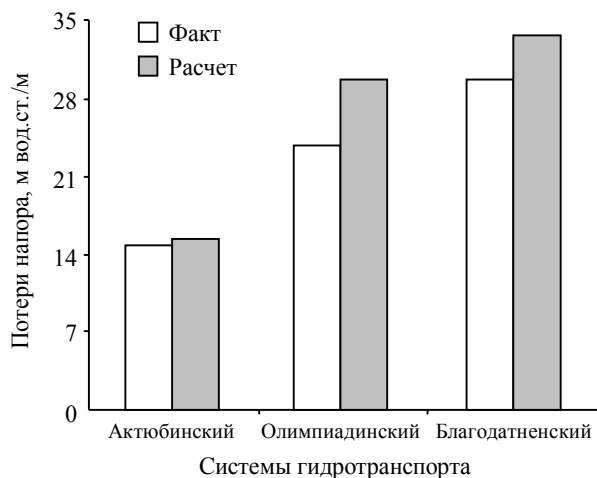


Рис.2. Результаты расчета и фактические данные потерь напора систем гидротранспорта

относительные погрешности при фактических потерях напора, равных 30 м/км,

$$\varepsilon_1 = \frac{\text{Расчет} - \text{Факт}}{\text{Расчет}} = \frac{33,5 - 30}{33,5} = 0,104 ;$$

$$\varepsilon_2 = \frac{\text{Факт} - \text{Расчет}}{\text{Факт}} = \frac{30 - 33,5}{30} = -0,117 .$$

На рис.2 приведены расчетные и фактические значения потерь напора в системах гидротранспорта рассмотренных предприятий.

Как видно из сравнения приведенных результатов расчетов параметров гидротранспорта высокоплотных пульп с фак-

тическими параметрами, наблюдаемыми на работающих системах, предлагаемая модель движения пульпы и разработанная на основе этой модели расчетная методика позволяют определять параметры гидротранспорта с погрешностью не более 0,25.

ЛИТЕРАТУРА

1. Александров В.И. Методы снижения энергоемкости в системах гидравлического транспорта гидросмесей высокой концентрации / СПГГИ(ТУ). СПб, 2000. 224 с.
2. Александров В.И. Расчетная методика определения параметров напорного гидротранспорта хвостов обогащения руд // Обогащение руд. 2009. № 4. С.39-41.
3. Александров В.И. Минимизация энергозатрат при гидравлическом транспортировании пульпы / В.И.Александров, С.Ю.Авксентьев, И.М.Горелкин // Обогащение руд. 2012. № 3. С.39-42.
4. Александров В.И. Энергоемкость гидравлического транспортирования крупнодисперсных и мелкодисперсных гидросмесей / В.И.Александров, П.Н.Махараткин, С.Ю.Авксентьев // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. 2012. № 7. С.72-79.
5. Thomas D.G. Transport characteristics of suspensions // Part VI – Minimum transport velocity for large particle size suspensions in round horizontal pipes. AIChE J. 1998. Vol.8. P.373-378.
6. Gillies R.G., Hill K.B., McKibben M.J., Shook C.A. Solids transport by laminar Newtonian flows // Powder Technology. 1999. Vol.104. P.269-277.

REFERENCE

1. Alexandrov V.I. Metody snizhenija jenergoemkosti v sistemah gidravlicheskogo transporta gidrosmesej vysokoj koncentracii (*Methods to reduce energy consumption in the hydraulic transport of mixtures of high concentration*). SPGGI(TU). St Petersburg, 2000, p.224.
2. Alexandrov V.I. Raschetnaja metodika opredelenija parametrov napornogo gidrotransporta hvostov obogaschenija rud (*Calculation method of determining the parameters of the pressure hydraulic transport of tailings ores*). Obogaschenie rud. 2009. N 4, p.39-41.
3. Alexandrov V.I., Avksentiev S.Y., Gorelkin I.M. Minimizacija jenergozatrata pri gidravlicheskom transportirovanii pul'py (*Energy consumption minimization in hydraulic transportation of pulp*). Obogaschenie rud. 2012. N 3, p.39-42.
4. Alexandrov V.I., Makharatkin P.N., Avksentiev S.Y. Jenergoemkost' gidravlicheskogo transportirovanija krupnodispersnyh i melkodispersnyh gidrosmesej (*Specific power consumption of hydraulic transportation of mixtures with coarse and fine solid particles*). Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Gornyj zhurnal. 2012. N 7, p.72-79.
5. Thomas D.G. Transport characteristics of suspensions. Part VI – Minimum transport velocity for large particle size suspensions in round horizontal pipes. AIChE J. 1998. Vol.8, p.373-378.
6. Gillies R.G., Hill K.B., McKibben M.J., Shook C.A. Solids transport by laminar Newtonian flows. Powder Technology, 1999. Vol.104, p.269-277.

DESIGN PROCEDURE OF PRESSURE LOSSES FOR HYDROTRANSPORT OF THE HIGH CONCENTRATION PULPS

V.I.ALEKSANDROV, *Dr. of Engineering Sciences, Professor, alexvict@spmi.ru*
National Mineral Resources University (Mining University), St Petersburg, Russia

PAVEL VLASAK, *Dr. of Engineering Sciences, Professor, vlasak@ih.cas.cz*
The Institute of Hydrodynamics of the Academy of Sciences, Prague, Czech Republic

In the paper it is shown that application of standard design methods for hydrotransport used for slurry with small concentration of a solid phase and for hydrotransport of high concentration slurry leads to considerable divergences between practical values of pressure losses which are received as a result of calculation. A major factor, which defines errors of calculation of hydrotransport of slurry with high concentration of a solid phase by means of standard techniques, is that these techniques do not consider rheological characteristics and parameters substantially influencing the amount of specific pressure losses. The offered model of a pulp movement and technique developed on the basis of this model allow to define hydrotransport parameters with a margin error no more than 0,1.

Key words: pressure losses, concentration, slurry, rheological parameters.