

С.Н. КИРИЧКО,

Е.В. СЕМЕНЕНКО, д-р техн. наук

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

Н.А. НИКИФОРОВА, канд. техн. наук

(Украина, Днепропетровск, Национальная металлургическая академия Украины)

ОБОСНОВАНИЕ МЕТОДОВ РАСЧЕТОВ ПАРАМЕТРОВ ГИДРОТРАНСПОРТА ВЫСОКОКОНЦЕНТРИРОВАННЫХ ГИДРОСМЕСЕЙ

Днепропетровская область – крупный промышленный регион, в котором сосредоточены предприятия металлургической, химической и машиностроительной отраслей промышленности, расположенный на пересечении водных путей, железнодорожных и автомобильных магистралей, направленных к месторождениям каменных углей и железной руды. Металлургические заводы, коксохимические комбинаты и тепловые электростанции являются крупнейшими потребителями воды, основного экологического ресурса планеты, а также основными источниками загрязнения водного бассейна региона. Несмотря на использование на таких предприятиях замкнутых циклов водоснабжения, проблема аккумулирования жидких отходов остается для них актуальной и острой. Особенно актуальным это является для горно-обогатительных комбинатов (ГОК) Кривбасса, большая часть которых заканчивает эксплуатацию хранилищ отходов, построенных в 60-70 годы прошлого столетия. Дальнейшее развитие региона во многом определяется промышленным потенциалом этих предприятий, поскольку они, с одной стороны, являются потребителями угля, железной руды и прочих ресурсов, чем обеспечивают работоспособность отечественных предприятий, а с другой стороны, выпускают продукцию, потребителями которой являются многие предприятия страны.

Одним из факторов, сдерживающих повышение производительности ГОКов Кривбасса, а в некоторых случаях и угрожающих им полной остановкой, является недостаточный объем хранилищ, что во многом обусловлено особенностями складированных отходов обогащения. Химический состав жидкой фазы и гранулометрический состав твердой фазы отходов ГОКов Кривбасса, а также тот факт, что концентрация транспортируемых суспензий не превышает 5% по массе, требуют значительных объемов хранилищ. Ввиду солидных сроков эксплуатации существующих хранилищ, а также невозможности выделения в пределах городской черты новых территорий единственным выходом является внедрение современных технологий сгущения, позволяющих складировать суспензии с массовыми концентрациями не менее 60% [1-3].

Кроме сокращения объемов отходов, аккумулируемых в хранилищах, использование таких технологий позволяет еще и существенно сократить потребление ГОКами технической воды за счет дополнительного ее объема, получаемого из системы после сгущения гидросмеси, подлежащей складированию.

Усреднення та транспортування

Некоторые отечественные и зарубежные фирмы, например, "Хаймек" (Украина), "СЕТКО" (США), "Инжиниринг доберсек ГмбХ" (Германия) и "Варман" (Австралия) уже разработали и внедряют технологии, позволяющие если не очистить подобные промышленные стоки полностью, то, по крайней мере, сгустить их до концентрации пасты, при которой у большей части суспензий проявляются вязкопластические свойства. Все эти технологии характеризуются повышением энергоемкости процесса гидротранспортирования суспензии при снижении величины грузопотока.

Известно, что внедрение пастового сгущения отходов на большинстве предприятий Канады, Америки и Африки было обусловлено не экономическими причинами, а необходимостью повышения общей безопасности сооружений и решения вопросов экологии.

Ожидались следующие преимущества складирования сгущенных и пастообразных отходов ГОКов: уменьшение опасности разжижения отложений отходов при сейсмической активности; уменьшение объема отстойного пруда; возврат в процесс обогащения большего количества реагентов; уменьшение фильтрации загрязненных вод и уменьшение загрязнения грунтовых вод; уменьшение проблем с водой в засушливых зонах; более экономичное складирование сгущенных отходов по сравнению с обычными, особенно в холодных регионах.

Однако реальные результаты внедрения пастового сгущения в горной промышленности зарубежных стран не подтвердили этих ожиданий.

Фактически в большинстве случаев применения этой технологии наблюдалась сегрегация материала, при которой мелкая фракция образовывала очень пологий уклон, что требовало дополнительного обвалования упорной призмы хранилища. Кроме того, почти во всех случаях уклоны оказывались более пологими, чем предполагалось, и сделать их более крутыми не представлялось возможным. В результате объекты занимали слишком большие площади, и использование земли было неэффективным.

Кроме того, при гидротранспорте и складировании сгущенных до состояния пасты отходов в традиционное хранилище велика вероятность возникновения рисков, таких, как опасность запрессовки сгустителя отходами в результате его неработоспособности или отключения электроэнергии; опасность запрессовки отходами пульповода, который при забивке пастой практически невозможно опорожнить с помощью центробежных насосов; снижение прочностных свойств намывных дамб хранилища отходов по сравнению с существующими намывными дамбами в связи с попаданием пасты на пляж хранилища; высокая стоимость капитальных затрат на строительство и оборудование комплекса сгущения, гидротранспорта и складирования пасты; существенное увеличение в пусковой период (первые 3 – 5 лет) эксплуатационных затрат на гидротранспорт и складирование отходов, сгущенных до состояния пасты, по сравнению с затратами при традиционном складировании отходов.

Таким образом, доля затрат на транспортирование гидросмесей, сгущенных до концентрации пасты, становится доминирующей в эксплуатационных затратах. Широкое применение этих разработок сдерживается отсутствием на-

Усреднения та транспортування

учно обоснованных методов расчета реологических характеристик гидросмесей, содержащих отходы ГОКов Кривбасса, параметров и режимов гидротранспорта суспензий при таких концентрациях. Это делает актуальной разработку научно обоснованных методов расчета параметров и режимов гидротранспорта гидросмесей с концентрацией пасты, поскольку окончательное решение о применении данных технологий может приниматься только после проведения соответствующих исследований складированного материала, выполнения расчетных обоснований технологии круглогодичной укладки отходов в хранилище, оценки технологических и эксплуатационных рисков и экологических последствий внедрения.

Анализ реологических кривых известных видов вязкопластических сред позволил оценить возможный вид реологической характеристики гидросмесей, содержащих отходы ГОКов Кривбасса, после сгущения их до концентрации пасты [2, 4-6]

$$\tau_w = \sigma_\tau \tau_0 + \sigma_\eta \eta \dot{\gamma}, \quad (1)$$

где τ_w – напряжение сдвига; τ_0 – начальное напряжение сдвига; η – эффективная вязкость гидросмеси; $\dot{\gamma}$ – скорость деформации; σ_τ, σ_η – коэффициенты, учитывающие изменение реологических характеристик гидросмеси при добавлении реагентов.

Использование уравнения (1) позволяет разработать для некоторых случаев методики и алгоритмы расчета параметров гидротранспорта, а также поверочного и проектировочного расчетов. При этом нужно иметь в виду, что в технологиях сгущения пульпы используются флокулянты, которые одновременно могут являться гидродинамически активными веществами (ГДАВ). Присутствие ГДАВ уменьшает амплитуду и частоту турбулентных пульсаций в пристеночной области потока и увеличивает толщину вязкого подслоя, что приводит к уменьшению гидравлического сопротивления трения жидкости о стенку трубы. [7-11]. Введение ГДАВ во взвесенесущие потоки малой концентрации также вызывает снижение гидравлического сопротивления, однако, в меньшей степени, чем при отсутствии в потоке частиц твердой фазы [10, 11]. При этом интенсивность снижения гидравлического сопротивления потоков пульпы с добавками ГДАВ во многом зависит от свойств твердой фазы. В потоках пульпы с концентрацией пасты ГДАВ снижает трение между частицами, уменьшая начальное напряжение сдвига и эффективную вязкость, однако в этом случае положительный эффект еще больше зависит от свойств твердых частиц. Поэтому влияние присутствия ГДАВ при гидротранспорте гидросмесей, содержащих отходы ГОКов Кривбасса, требует отдельных исследований для каждого конкретного случая.

При расчете параметров гидротранспорта целью расчета является определение величины критической скорости, гидравлического уклона или критического диаметра трубопровода для выбранного материала, заданного диаметра трубопровода

Усреднення та транспортування

при регламентированном расходе пульпы или грузопотоке в зависимости от концентрации суспензии.

В этом случае с учетом формулы (1) зависимость между гидравлическим уклоном и объемным расходом гидросмеси описывается уравнением Букингама. Точное решение этого уравнения при расчетах практически не используется, большая часть исследователей предпочитает решать упрощенное уравнение Букингама [4, 5]. Как показывают результаты исследований, единственное реальное решение полного уравнения после приведения его к безразмерному виду может быть получено численно в следующем универсальном виде [12]:

$$i = k_{\tau} \frac{4\sigma_{\tau}\tau_0}{\rho_0 g D} + k_{\eta} \frac{32\sigma_{\eta}\eta Q}{\rho_0 g \pi D^4}, \quad (2)$$

где i – гидравлический уклон; k_{τ}, k_{η} – коэффициенты аппроксимации; D – диаметр трубопровода; Q – объемный расход суспензии; ρ_0 – плотность жидкой фазы суспензии; g – ускорение свободного падения.

Зависимость (2) справедлива при расходе суспензии, превышающем критический [12]

$$Q_{kp} = 0,0383 \frac{\pi D^3 \tau_0 \sigma_{\tau}}{8 \eta \sigma_{\eta}}.$$

Проектировочный расчет проводится с целью определения показателей назначения насосов (подачи пульпы и суммарного напора насосов), необходимых для обеспечения регламентированных параметров и режимов работы гидротранспортного комплекса:

$$D = \frac{2}{B} \sqrt[3]{\frac{\sigma_{\eta} \eta Q_p}{\sigma_{\tau} \tau_0}}; \quad i = \frac{2A}{\rho_0 g} \sqrt[3]{\frac{\sigma_{\tau}^4 \tau_0^4}{\sigma_{\eta} \eta Q_p}}; \quad B = \sqrt[3]{\frac{0,0383 k \pi}{\sigma^3}}; \quad A = B \left[k_{\tau} \sigma_{\tau} + \frac{k_{\eta} \sigma_{\eta}}{B^3} \right],$$

где k – коэффициент запаса по критической скорости; Q_p – регламентированный расход суспензии; σ – коэффициент запаса по диаметру трубы.

Проверочный расчет выполняется с целью определения технологических показателей гидротранспортного комплекса при выбранном насосном оборудовании в зависимости от концентрации пульпы:

$$\frac{Q}{\mu} = \sqrt{0,25(A+B)^2 + A \left(\Gamma - \frac{k_{\tau} 4\sigma_{\tau}\tau_0}{\rho_0 g D} \right)} - 0,5(A+B); \quad (3)$$

$$A = \frac{kL}{\alpha\mu^2}; \quad \Gamma = \frac{\gamma - \rho\Delta Z}{kL}; \quad B = \frac{\beta}{\alpha\mu}; \quad \mu = \frac{\rho_0 g \pi D^4}{k_{\eta} 32 \sigma_{\eta} \eta},$$

Усреднення та транспортування

где χ – коэффициент пересчета расходно-напорной характеристики насоса с воды на суспензию; γ , β – коэффициенты аппроксимации паспортной расходно-напорной характеристики насоса; ρ – относительная плотность суспензии; Z – разница геодезических высот магистрали; k – коэффициент, учитывающий местные гидравлические сопротивления.

Учитывая особенности хранилищ отходов ГОКов Кривбасса, которые возвышаются относительно геодезической отметки обогатительного производства на 30-40 метров, для предотвращения аварий в результате гидравлических ударов при внезапной остановке насосов нужно определять объемный расход при обратном течении пульпы

$$Q_0 = \frac{\rho \Delta Z}{kL} \mu - Q_\tau; \quad Q_\tau = \frac{k_\tau \sigma_\tau \tau_0 \pi D^3}{k_\eta \sigma_\eta 8\eta}. \quad (4)$$

Из формулы (4) видно, что обратного тока пульпы при остановке гидротранспортного комплекса не будет, если выполняется следующее условие:

$$\frac{\Delta Z}{L} < i_F; \quad i_F = \frac{4k_\tau k \sigma_\tau \tau_0}{\rho_0 g \rho D}.$$

Кроме обратного течения пульпы, необходимо учитывать, что уравнение (1) справедливо для установившегося и равномерного режима течения вязкопластической пульпы при развитом течении, когда начальное напряжение τ_0 имеет наименьшее значение за счет деструкции внутренней структуры потока. В начальный момент до начала движения структурные связи в объеме вязкопластической жидкости достаточно велики и зависят от времени состояния покоя, предшествующего возникновению движения. Для случая начала движения можно записать [12, 13]:

$$\tau' = n \tau_0, \quad (5)$$

где τ' – статическое напряжение покоя при отсутствии движения пульпы; n – коэффициент превышения статического напряжения покоя над начальным напряжением при развитом движении, который может принимать значения от 3 до 7.

Очевидно, что надежность работы гидротранспортной установки, складывающей отходы в виде пастообразной пульпы, будет обеспечена, если напор насосов, обеспечивающих номинальную подачу, будет достаточным для преодоления статического напряжения покоя в пределах своей рабочей области

$$Q' > Q_t, \quad (6)$$

Усреднения та транспортування

где Q' – подача, которую способны обеспечить выбранные насосы при запуске рассматриваемой установки; Q_l – подача насоса на левой границе рабочей области.

С учетом (5) решение (3) может быть записано в виде

$$\frac{Q'}{\mu} = \sqrt{0,25(A+B)^2 + A \left(\Gamma - \frac{k_\tau 4\sigma_\tau \tau_0}{\rho_0 g D} n \right)} - 0,5(A+B),$$

при этом, после несложных преобразований условие (6) может быть преобразовано в ограничение для величины коэффициента n :

$$n < H_\tau \frac{\rho_0 g D}{k_\tau 4\sigma_\tau \tau_0} - \frac{k_\eta 8\sigma_\eta \eta Q_l}{k_\tau \pi D^3 \sigma_\tau \tau_0}; \quad H_\tau = \gamma - \beta Q_l - \alpha Q_l^2 - \rho \Delta Z.$$

Разработанное методическое обеспечение расчетов параметров и режимов работы гидротранспортных комплексов, перекачивающих высококонцентрированные суспензии, ориентировано на экспериментальное определение реологических параметров транспортируемых сред, что позволяет максимально адаптировать его к условиям ГОКов Кривбасса и обеспечивать надежность использования технологии пастового сгущения и складирования отходов обогащения.

Список литературы

1. Світлий Ю.Г., Білецький В.С. Гідравлічний транспорт. – Донецьк: Східний видавничий дім, 2009. – 436 с.
2. Круть О.А. Водовугільне палив. – К.: Наук. думка, 2002. – 172 с.
3. Світлий Ю.Г., Круть О.А. Гідравлічний транспорт твердих матеріалів. – Донецьк.: Східний видавничий дім, 2010. – 268 с.
4. Яхно О.М., Желяк І.В. Гідравліка неньютонівських рідин: Навч. посібник. – К.: Вища школа, 1995. – 199 с.
5. Уилкинсон У.Л. Неньютоновские жидкости. – М.: Мир, 1964. – 155 с.
6. Урьев Н.Б. Высококонцентрированные дисперсные системы. – М.: Химия, 1980. – 320 с.
7. Семененко Е.В., Никифорова Н.А. Обоснование метода расчета параметров гидротранспорта в присутствии гидродинамически активных добавок // Сб. науч. тр. Донбасского государственного технического университета. – 2007. – Вып. 25. – С. 72-80 (9/7с.).
8. Повх И.Л., Никулин В.А. Турбулентное течение вязкой жидкости и слабых растворов полимеров в трубах // Физическая гидродинамика: Сб. стат. – К.-Донецк: Вища школа, 1977. – С. 25-34.
9. Иванюта Ю.Ф., Чекалова Л.А. Экспериментальное исследование турбулентного течения слабых растворов полимеров в трубах различного диаметра // Инженерно-физический журнал. – 1971. – Т. XXI, № 1. – С. 5-11.
10. Повх И.Л., Ступин А.Б. Влияние добавок полиакриламида на снижение гидравлических потерь в водных потоках с твердыми частицами // Инженерно-физический журнал. – 1972. – Т. XXII, №5. – С. 919 – 921.
11. Покровская В.Н. Трубопроводный транспорт в горной промышленности. – М.: Недра, 1985. – 192 с.
12. Круть А.А. Развитие физико-технических основ технологий приготовления и гид-

Усереднення та транспортування

ротранспортирования водоугольных суспензий высокой концентрации: дисс. ... д-ра техн. наук. – Днепропетровск, 2011. – 278 с.

13. Авксентьев, С.Ю. Определение рациональных режимов гидротранспорта пастообразных хвостов обогащения медно-цинковых руд: дисс. ... канд. техн. наук: – СПб, 2009. – 121 с.

© Киричко С.Н., Семененко Е.В., Никифорова Н.А., 2012

*Надійшла до редколегії 03.09.2012 р.
Рекомендовано до публікації д.т.н. П.І. Піловим*