

**РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ГИДРОТРАНСПОРТА  
ВЫСОКОКОНЦЕНТРИРОВАННЫХ ГИДРОСМЕСЕЙ  
В УСЛОВИЯХ ПРЕДПРИЯТИЙ КРИВБАССА**

Для технології складування на підприємствах Кривбасу відходів збагачення, згущених до концентрації пасти, запропоновано методики розрахунків параметрів та режимів роботи/ гідротранспортних установок з урахуванням гідравлічних та реологічних характеристик.

**CALCULATION OF HIGH CONCENTRATION SLURRIES  
HYDROTRANSPORT PARAMETERS IN CONDITIONS OF KRIVBAS  
ENTERPRISES**

The methods of calculation of parameters and regimes of hydrotransport plants operation for technology of stocking of cleaning rejects condensed till paste concentration at Krivbas enterprises taking into account hydraulic and rheological characteristics are offered.

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 аккумуляции жидких отходов остается для них актуальной и острой. Особенно актуальным это является для горнообогатительных 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 складываемых 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.

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 неработо-

способности 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 научно 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]

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

где  $\tau_w$  – напряжение сдвига;  $\tau_0$  – начальное напряжение сдвига;  $\eta$  – эффективная вязкость гидросмеси;  $\dot{\gamma}$  – скорость деформации.

Использование уравнения (1) позволяет разработать для некоторых случаев методики и алгоритмы расчета параметров гидротранспорта, а также поверочного и проектировочного расчетов.

При расчете параметров гидротранспорта целью расчета является определение величины критической скорости, гидравлического уклона или критического диаметра трубопровода для выбранного материала, заданного диаметра трубопровода, 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 Букин-гама. 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 [7]:

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

где  $i$  – гидравлический уклон;  $k_{\tau}, k_{\eta}$  – коэффициенты аппроксимации;  $D$  – диаметр трубопровода;  $Q$  – объемный расход суспензии;  $\rho_0$  – плотность жидкой фазы суспензии;  $g$  – ускорение свободного падения.

Зависимость (2) справедлива при расходе суспензии, превышающем критический [7]

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

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:

$$D = \frac{2}{B} \sqrt[3]{\frac{\eta Q_P}{\tau_0}}; \quad i = \frac{2A}{\rho_0 g} \sqrt[3]{\frac{\tau_0^4}{\eta Q_P}};$$

$$H = \frac{2A}{\rho_0 g} \sqrt[3]{\frac{\tau_0^4}{\eta Q_P}} kL + \Delta Z; \quad N = \rho \left(1 + \frac{i_z}{ki}\right) \frac{2A}{\eta_H} \sqrt[3]{\frac{\tau_0^4 Q_P^2}{\eta}} kL;$$

$$i_z = \frac{\Delta Z}{L}; \quad B = \sqrt[3]{\frac{0,0383 k_v \pi}{\sigma^3}}; \quad A = B \left[ k_{\tau} + \frac{k_{\eta}}{B^3} \right],$$

где  $k_v$  – коэффициент запаса по критической скорости;  $Q_P$  – регламентированный расход суспензии;  $\sigma$  – коэффициент запаса по диаметру трубы;  $\Delta Z$  – разница геодезических высот магистрали;  $k$  – коэффициент, учитывающий местные гидравлические сопротивления;  $L$  – длина магистрали;  $i_z$  – геодезический уклон магистрали;  $\eta_H$  – среднее для рабочей области выбранного насоса значение коэффициента полезного действия.

Поверочный расчет выполняется с целью определения технологических показателей гидротранспортного комплекса при выбранном насосном оборудовании, расходно-напорная характеристика которого в рабочей области аппроксимирована линейной функцией [8, 9]

$$H_p = \chi(\gamma - \beta Q),$$

где  $H_p$  – напор насоса при перекачивании суспензии;  $\chi$  – коэффициент пересчета расходно-напорной характеристики насоса с воды на суспензию;  $\gamma$  – фиктивный напор насоса при нулевой подаче, коэффициенты аппроксимации паспортной расходно-напорной характеристики насоса [8];  $\beta$  – коэффициент снижения напора, коэффициенты аппроксимации паспортной расходно-напорной характеристики насоса [8];  $Q$  – подача насоса при перекачивании суспензии.

Таким образом, гидротранспортная установка в зависимости от концентрации пульпы будет обеспечивать следующий объемный расход:

$$Q = \mu \frac{\frac{\gamma\chi}{kL} - \rho \frac{\Delta Z}{kL} - \frac{k_\tau 4\tau_0}{\rho_0 g D}}{1 + \frac{\chi\beta\mu}{kL}}; \quad (3)$$

$$\mu = \frac{\rho_0 g \pi D^4}{k_\eta 32\eta},$$

где  $\rho$  – относительная плотность суспензии;  $\mu$  – модуль расхода магистрали гидротранспортного комплекса [8, 9].

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

$$Q_0 = \frac{\rho \Delta Z}{kL} \mu - Q_\tau; \quad (4)$$

$$Q_\tau = \frac{k_\tau \tau_0 \pi D^3}{k_\eta 8\eta},$$

где  $Q_0$  – расход пульпы в направлении к насосу при внезапной остановке гидротранспортного комплекса;  $Q_\tau$  – фиктивный расход пульпы в направлении к насосу при внезапной остановке гидротранспортного комплекса, обусловлен-

ный реологическими характеристиками суспензии.

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

$$i_z < i_F; \\ i_F = \frac{4k_\tau k \tau_0}{\rho_0 g \rho D}, \quad (5)$$

где  $i_F$  – критический геодезический уклон, при котором обратное течение пульпы при внезапной остановке гидротранспортного комплекса будет сдерживаться за счет начального напряжения сдвига.

Выражение (3), с учетом формул (4) и (5), может быть переписано в виде, использующем безразмерные эффективные величины, что является более удобным для анализа и расчетов

$$Q = MG; \\ M = \frac{\mu}{1 + \tilde{\beta}\mu}; \quad G = \tilde{\gamma} - k\rho \left( \frac{i_z}{k^2} + i_F \right); \\ \tilde{\gamma} = \frac{\gamma\chi}{kL}; \quad \tilde{\beta} = \frac{\chi\beta}{kL}.$$

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 ГО-Ков Кривбасса и обеспечивать надежность использования технологии пастового сгущения и складирования отходов обогащения.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Світлий, Ю.Г. Гідравлічний транспорт / Ю.Г. Світлий, В.С. Білецький. – Донецьк: Східний видавничий дім, 2009. – 436 с.
2. Круть, О.А. Водовугільне паливо / О.А. Круть. – К.: Наукова думка, 2002. – 172 с.
3. Світлий, Ю.Г. Гідравлічний транспорт твердих матеріалів / Ю.Г. Світлий, О.А. Круть. – Донецьк: Східний видавничий дім, 2010. – 268 с.
4. Яхно, О.М. Гідравліка неньютонівських рідин: навч. посібник / О.М. Яхно, І.В. Желяк. – К.: Вища школа, 1995. – 199 с.
5. Уилкинсон, У.Л. Неньютоновские жидкости / У.Л. Уилкинсон. – М.: Мир, 1964. – 155 с.
6. Урьев, Н.Б. Высококонцентрированные дисперсные системы / Н.Б. Урьев. – М., 1980. – 320 с.
7. Круть, А.А. Развитие физико-технических основ технологий приготовления и гидротранспортирования водоугольных суспензий высокой концентрации: дисс. ... д-ра техн. наук: 05.15.09 / Круть Александр Анатольевич. – Днепропетровск, 2011. – 278 с.
8. Совершенствование режимов работы гидротранспортных установок технологий углеобогащения / Е.Л. Звягильский, Б.А. Блюсс, Е.И. Назимко, Е.В. Семененко. – Севастополь: «Вебер», 2002. – 247 с.
9. Курганов, А.М. Справочник по гидравлическим расчетам систем водоснабжения и канализации / А.М. Курганов, Н.Ф. Федоров. – Л.: Стройиздат, 1973. – 408 с.

**УСТАНОВЛЕНИЕ ХИМИЧЕСКОГО МЕХАНИЗМА  
ОБРАЗОВАНИЯ ПРОДУКТОВ ТЕРМОДЕСТРУКЦИИ ИЗ  
НЕКОНДИЦИОННОГО УГОЛЬНОГО СЫРЬЯ**

В роботі описано основні хімічні процеси, що проходять при термічній конверсії твердого палива. Наведено методику розрахунку виходу продуктів термічної деструкції з низькосортного вугілля та відходів вуглезбагачення.

**THE ESTABLISHMENT OF CHEMICAL MECHANISM OF  
THERMAL CONVERSION PRODUCTS' FORMATION OF NON-  
STANDARD COAL MATERIAL**

In this article the main chemical processes of thermal degradation of solid fuel were described. The calculation procedure of yield of thermal conversion products of low-grade coal and coal slime was given.

Основные технологические процессы переработки углей связаны с тепловым воздействием, сопровождающимся различными термохимическими превращениями с разрушением первоначальной структуры угольного вещества, разрывом химических связей при нагреве и образованием продуктов реакции с новым строением, свойствами и атомным составом [1]. Наряду с этим возникает необходимость в совершенствовании уже известных способов его переработки и разработке новых экологически чистых геотехнологий, которые осуществлялись бы путём комбинированной термической обработки угля с одновременным получением твердого остатка и производством электрической или тепловой энергии.

При этом учёными рассматривается возможность использования в таких технологиях низкосортного угля, а также углепромышленных отходов различного происхождения и состава [2,3]. Такое сырьё отличается низкой теплотворной способностью, повышенной влажностью, зольностью, сернистостью и солённостью, вследствие чего не имеет большого спроса на топливном рынке. Однако по прогнозным оценкам запасы в Украине низкосортных углей составляет 22,2 млрд. т, из них 12% относят к бурым углям, а 88% – к каменным углям низкой степени метаморфизма. По данным института УкрНИИУглеобогащение на обогатительных фабриках Украины в отстойниках и илонакопителях находится до 170 млн. т мелкодисперсных и высокозольных шламовых продуктов, которые занимают площадь около 1800 га.

Таким образом, в сложившейся ситуации актуальной научной задачей является исследование явлений, протекающих при термическом воздействии на некондиционное угольное сырьё и установление физико-химических механизмов образования продуктов термической деструкции для получения ценного технологического газа, что и послужило целью данной работы.

Принято, что протекание химических процессов термической деструкции органических соединений некондиционного топлива подчиняется известным