



**УДК 622.693.4:621.796**

**Семененко Е.В., д.т.н., с.н.с., Киричко С.Н.**

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

## **НОВАЯ ТЕХНОЛОГИЯ СКЛАДИРОВАНИЯ ПУЛЬП С КОНЦЕНТРАЦИЕЙ ПАСТЫ**

Анализ передового опыта внедрения технологий, ориентированных на сгущение отходов обогащения до пульп с концентрацией пасты (ПКП), на ГОКах стран СНГ, на обогатительных фабриках Финляндии (Кемиро Ой), Африки (Warman), Канады (Alcan, Strathcona, Golder Paste Technology Ltd), США («СЕТКО») и Российской Федерации (Кольская горно-рудная компания, НПК «Механобр-инжиниринг»), свидетельствует что существующие технологии складирования отходов обогащения в виде ПКП являются различными модернизациями технологий складирования отходов обогащения в виде пульп низкой концентрации, когда основное насосное оборудование расположено возле обогатительного производства и обеспечивает подачу пульпы на верхние отметки хранилища отходов (ХО). Такая ситуация во многом объясняется практикой проектных организаций действовать по прецеденту, стремлением максимально использовать уже существующие, проверенные и хорошо зарекомендовавшие себя решения, при разработке нового проекта. При этом для таких технологий не рассматривались вопросы рациональных параметров складирования ПКП, поскольку геометрические размеры труб и характеристики оборудования выбирались по аналогии и на основании существующего опыта. Кроме того научно обоснованные методы расчета и оценки таких параметров для систем складирования ПКП отсутствуют.

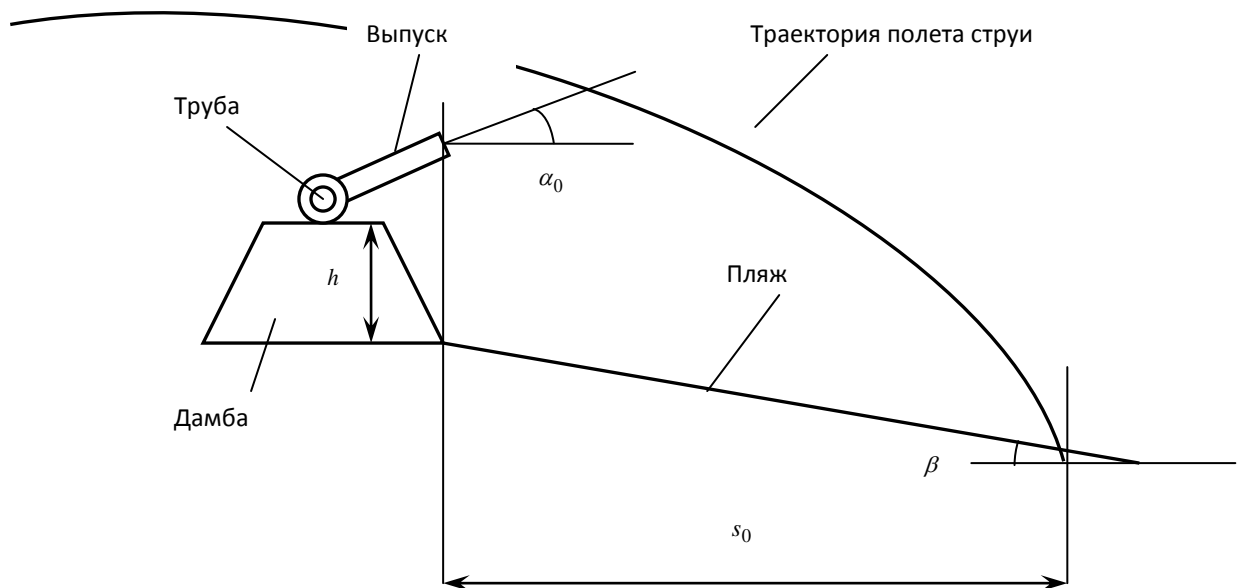


Міжнародна науково-технічна конференція "Гідроаеромеханіка в інженерній практиці"  
Секція I  
"Технічна гідромеханіка"

Опыт внедрения рассматриваемых технологий выявил ряд проблем. Так общим недостатком оказалась проблема с организацией доставки ПКП к месту сброса. Традиционно для этого используется трубопроводный гидротранспорт, обеспечить надежность работы которого при транспортировании ПКП не всегда удается. Пока что этот вопрос решен для установок с длинами магистралей не более 500 м при минимальных геодезических подъемах. То есть для условий соответствующих новым ХО, и не позволяющим обеспечить надежность работы в условиях уже эксплуатируемых ХО с высотой подачи пульпы на высоту свыше 30 м. Кроме того ПКП требуют трубопроводов значительно меньшего диаметра чем те, которые используются сейчас, а также установки поршневых насосов, вместо центробежных, которые получили наибольшее распространение. Другой проблемой является реализация процесса течения ПКП непосредственно в емкости ХО, поскольку в этом случае не применимы расчетные методы известные для пульп низкой концентрации. Пульпа низкой концентрации при течении по пляжу осветляется, твердые частицы из потока жидкости оседают на поверхность пляжа и формируют тело упорной призмы. Подобных процессов нет при течении ПКП по емкости ХО. При сбросе ПКП через отводы из трубопровода или же через торцевой выпуск в центр отсека ХО нужно знать как далеко от места сброса по плоской горизонтальной поверхности растечется образуемый слой, и какова будет его толщина. При выпуске ПКП на склон дамбы ХО по его периметру нужно ответить на аналогичные вопросы, но при безнапорном течении слоя ПКП по наклонной поверхности. В этом случае устойчивость и надежность тела призмы определяют уже не процессы осаждения и сегрегации твердых частиц, а эффективная вязкость (ВЭ) и начальное касательное напряжение (НКН) ПКП.

С учетом этого, а также ориентируясь на существенный срок эксплуатации ХО ГОКов Кривбасса и их разветвленную трубопроводную сеть, обеспечивающую отведение отходов, наиболее рациональной будет следующее

технологическое решение (рис. 1). В качестве базового сгустительного оборудования предлагается использовать пастовый сгуститель 55СГ или другой сгуститель диаметром до 12 м работающий в режиме противоточной декантации, который устанавливается на верхней полке дамбы обвалования. Отходы обогащения от обогатительного производства в виде пульпы низкой концентрации доставляются к сгустителю по магистралям существующей системы гидротранспорта отходов обогащения, при помощи центробежных насосов. После сгущения ПКП от сгустителя доставляется к месту сброса поршневым насосом по короткому горизонтальному трубопроводу, оканчивающемуся насадкой Вентури или распределительным контуром (РК) с системой таких насадок.



**Рис. 1 – К расчету дальности полета струи ПКП при складировании ее на поверхность пляжа намыва с верхней площадки дамбы обвалования**

Истечение ПКП из насадок Вентури под заданным давлением обеспечивает равномерное распределение суспензии по поверхности внутреннего откоса неподвижным тонким слоем с толщиной:

$$\delta_0 = \frac{1,0539\tau_0}{\rho g \sin\beta},$$



где  $\delta_0$  – высота неподвижного слоя пульпы;  $\rho$  – плотность суспензии;

Таким образом, за счет геометрических размеров насадка и величины давления, достигается равномерное распределение отходов по поверхности пляжа, устойчивость слоя и быстрое высыхание, а за счет размещения сгустителя на борту ХО – снижение энергоемкости отведения отходов и экономию капитальных затрат на переоборудование системы складирования отходов.

Отличительной особенностью рассматриваемой технологии является наличие в конце магистрали распределительного контура с отходящими от основного трубопровода отводами меньшего диаметра. Предполагая, что реологические характеристики ПКП из отходов обогащения медных, никелевых и железных руд, сгущаемых до концентрации пасты, наиболее точно описываются законом Бингама-Шведова, и рассматривая распределенную раздачу по длине, после несложных преобразований получим следующие выражения для гидравлических характеристик контура:

$$\frac{p}{\rho g} = \frac{p_0}{\rho g} + \alpha_q Q_0^2 \left( 1 - \left( 1 - \frac{q}{Q_0} l \right)^2 \right) - \frac{\tau_0}{\Lambda_\tau} l, \quad \frac{p_E}{\rho g} = \frac{p_0}{\rho g} + \alpha_q Q_0^2 - \frac{\tau_0}{\Lambda_\tau} \frac{Q_0}{q},$$

$$\frac{p_{\min}}{\rho g} = \frac{p_E}{\rho g} - \frac{1}{q^2} \left( \frac{\tau_0}{2\Lambda_\tau} - \frac{1}{\alpha_q} \right) \frac{\tau_0}{2\Lambda_\tau},$$

$$l_* = \left( 1 - \frac{\tau_0}{2\alpha_q q Q_0 \Lambda_\tau} \right) L, \quad \alpha_q = \frac{\alpha_0}{g F^2} - \frac{1}{2q \Lambda_Q}, \quad L_q = \frac{Q_0}{q}, \quad \Lambda_\tau = \frac{\rho_w g D}{c_0}; \quad \Lambda_Q = \frac{\rho_w g \pi D^4}{c v},$$

где  $p$  – давление ПКП в текущем сечении РК;  $p_0$  – давление ПКП в начальном сечении РК;  $p_E$  – давление потока на дальнем торце РК;  $Q_0$  – расход ПКП, поступающий на РК;  $q$  – интенсивность отбора ПКП из РК;  $l$  – длина трубопровода от начального до текущего сечения;  $l_*$  – длина трубопровода до сечения, в котором величина давления ПКП будет минимальным;  $p_{\min}$  – минимальное давление ПКП в РК;  $L_q$  – длина РК;  $\alpha_0$  – коэффициент кинетической энергии, учитывающий неравномерность распределения



скоростей по теченню потоку;  $F$  – площа поперечного сечення трубопровода;  $\Lambda_\tau$  – модуль НКН;  $\Lambda_Q$  – модуль расхода;  $c_0, c$  – уточнюючі константи.

При известных параметрах системы гидротранспорта для выбора параметров системы складирования необходимо определить дальность полета струи и максимальную высоту ее подъема с учетом размещения выпускного трубопровода на дамбе обвалования (рис. 1). Рассматривая совместно уравнение траектории струи, выпущенной с верха дамбы, и уравнение поверхности пляжа намыва, нетрудно получить уравнение траектории струи, необходимую скорость истечения ПКП из насадки, минимальный перепад давления в трубопроводе РК, а также допустимую длину насадка обеспечивающую течение в структурном режиме:

$$s_0 = \frac{U^2}{g} (tg\alpha_0 + tg\beta) \left( 1 + \sqrt{1 + \frac{2gh}{U^2 (tg\alpha_0 + tg\beta)^2}} \right), \quad [U] = \sqrt{\frac{0,5gh}{1 + \frac{s_0}{h} (tg\alpha_0 + tg\beta)}} \frac{s_0}{h},$$

$$\frac{\Delta p_{\min}}{\rho g} = \frac{p_0 - p_a}{\rho g} + \alpha_q Q_0^2 - \frac{\tau_0^2}{4q^2 \Lambda_\tau^2} + \left( \frac{1}{2\alpha_q q Q_0} - 1 \right) \frac{\tau_0}{\Lambda_\tau} \frac{Q_0}{q}, \quad L_D < \left( \frac{p_0 - p_a}{4,6\rho g} + \frac{\alpha_q Q_0^2}{4,6} - 0,054 \left( \frac{\tau_0}{q\Lambda_\tau} \right)^2 + \frac{1 - 2\alpha_q q Q_0}{9,2\alpha_q q^2} \frac{\tau_0}{\Lambda_\tau} \right) \frac{1,0539}{\sin\beta}$$

где  $s_0$  – дальности полета струи ПКП, выпущенной с верха дамбы на поверхность пляжа намыва;  $\beta$  – угол наклона поверхности пляжа к горизонту;  $U$  – скорость истечения ПКП из насадок;  $h$  – высота дамбы обвалования;  $[U]$  – необходима скорость истечения ПКП из насадок;  $\Delta p_0$  – превышение давления ПКП в начале распределительного участка над атмосферным;  $L_D$  – длина насадка;  $d$  – диаметр насадка.

В рамках гидравлики процесс истечения ПКП из магистрального трубопровода через отводы в карту хранилища отходов может быть characterized как процесс истечения из отверстия или насадка. В общем



случае процесс течения в таком отводе аналогичен процессу истечения через насадку Вентури. Течение ПКП через насадку Вентури по сравнению с течением ньютоновской жидкости характеризуется двумя особенностями: коэффициент расхода ПКП через насадку отличается от аналогичной величины для однородной жидкости и при вычислении его необходимо учитывать реологические характеристики ПКП; для ПКП течение через насадку начинается только после того как действующий на нем перепад давления превысит внутренние напряжения, обусловленные НКН.

Коэффициент местных гидравлических сопротивлений насадка при истечении ПКП состоит из соответствующего коэффициента при течении воды и слагаемого, обратно пропорционального числу Рейнольдса:

$$q = \mu F \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}}, \quad \mu = \frac{\mu_0}{\sqrt{1 + \frac{A}{\text{Re}}}},$$

$$A = \frac{KC^m}{0,017} \left( 1 - \frac{1-C}{\left(1 + \frac{2,33}{Ar+1}\right)C} \right)^m, \quad K = \begin{cases} 0,982e^{-0,782\xi_0}, & \frac{4\tau_0 l}{\Delta P} < 0,1 \\ 1, & \frac{4\tau_0 l}{\Delta P} > 0,1 \end{cases}, \quad l = \frac{2L_D}{\sqrt{\pi F}}, \quad \text{Re} = \frac{2q}{\sqrt{\pi F} \nu},$$

где  $\mu_0$  – коэффициент расхода через насадку при истечении воды;  $c$  – объемная концентрация суспензии;  $m$  – эмпирическая константа ( $0,85 \leq m \leq 1,13$ );  $K$  – коэффициент, учитывающий влияние НКН;  $\nu$  – кинематический коэффициент вязкости ПКП.

Влияние НКН на РНХ насадка Вентури при течении ПКП проявляется не только в виде дополнительного слагаемого в формуле для  $\mu$ , но и в том, что течение через насадку начинается только после того как действующий перепад давления превысит перепад давления, обусловленные НКН, при этом расхода ПКП через насадку ограничивается неравенством



$$q > q_{кр}, \quad q_{кр} = \frac{A}{4} \sqrt{\pi F} v \left( \sqrt{1 + 59,72 \left( \frac{\mu_0}{A} \right)^2 l \frac{\tau_0 D^2}{\rho v^2}} - 1 \right),$$

где  $q_{кр}$  – нижний граничный расход ПКП через насадок.

Специалистами ИГТМ НАН Украины был создан специальный мобильный стенд для исследований реологических характеристик ПКП, оснащенный компрессором, цилиндром с поршнем, шиберной задвижкой и съемным трубопроводом, а также специальными измерительными приборами. Принцип работы стенда заключается в том, что ПКП помещенное в напорный цилиндр с поршнем, вытесняется из него через напорный трубопровод в приемную емкость за счет подачи под давлением сжатого воздуха из ресивера компрессора. Регистрируя время, за которое поршень выдавит известный объем ПКП из цилиндра, а также давление воздуха на входе в цилиндр за поршнем, можно по методике, разработанной в ИГТМ НАН Украины, определить реологические характеристики исследуемой ПКП – ВЭ и НКН. Были разработаны методики экспериментальных исследований и определения реологических характеристик, а также произведена апробация стенда и методического обеспечения исследований, проводимых на нем, в лабораторных условиях ИГТМ НАН Украины с ПКП, образованной из отходов обогащения Центрального ГОКа (ЦГОК). Экспериментальные исследования на мобильном стенде проводились в трех направлениях: апробация метода оценки реологических характеристик ПКП на мобильном стенде в промышленных условиях; внедрение разрабатываемого метода оценки реологических характеристик ПКП; исследование РНХ насадок Вентури при истечении ПКП. Проведенные исследования по истечению из насадки Вентури внутренним диаметром  $\frac{1}{2}$  струй ПКП, показали, что образующийся после падения на землю слой имеет форму сильно вытянутой трапеции с высотой не менее 4,5 м, большим основанием не более 0,26 м, и меньшим основанием не менее 0,026 м.



*Міжнародна науково-технічна конференція "Гідроаеромеханіка в інженерній практиці"  
Секція I  
"Технічна гідромеханіка"*

В ходе исследований ось насадки Вентури был направлен горизонтально, а высота ее расположения над землей не превышала 0,05 м.

Апробации и внедрения метода оценки реологических характеристик пульп с концентрацией пасты проводилась специалистами ИГТМ НАН Украины в производственных условиях ОАО «Проснянский» ГОК, в период с июля по октябрь 2014 г., и с сотрудниками Приднепровской лаборатории ОП «УкрНИИУглеобогащение» ГП «НТЦ «Углеинновация» в условиях углеобогатительных фабрик ЦОФ «Павлоградская» и ЦОФ «Октябрьская», в период с мая по август 2014 г. Результаты выполненных исследований и последующее внедрение доказывают возможность применения разработанных специалистами ИГТМ НАН Украины метода для оценки реологических характеристик угольных шламов и отходов обогащения руд с концентрацией пасты, а также соответствующего мобильного лабораторного стенда для его реализации.