

РЕОЛОГИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ВЫСОКОКОНЦЕНТРИРОВАННЫХ ОТХОДОВ ОБОГАЩЕНИЯ ЦГОКА

*Е.В. Семененко, С.Н. Киричко, ИГТМ НАН Украины, Украина
А.Б. Ртищев, ОАО «ЦГОК», Украина*

В статье приводится математическая модель процесса, описание стенда для лабораторных исследований, методика обработки и результаты экспериментов для паст, полученных из отходов обогащения Центрального горно-обогатительного комбината. Проведенные испытания показали, что реологическая характеристика паст из рассматриваемых отходов обогащения железной руды описывается законом Бингама-Шведова, для которого впервые получены зависимости начального напряжения сдвига и структурной вязкости от концентрации пульпы.

Одним из перспективных путей повышения эффективности гидротранспортных систем горно-обогатительных комбинатов (ГОКов) является внедрение технологий сгущения пульп до концентрации пасты (ПКП), что позволяет существенно снизить объемы транспортируемой воды и потребляемой электроэнергии, а также снизить диаметр магистралей и объем отходов, поступающих в хранилище. Однако внедрение данной технологии во многих случаях требует значительных капитальных затрат, поскольку связано с принципиальным переоборудованием и заменой основного насосного парка. В этих условиях актуальной является предварительная оценка возможности внедрения таких технологий и обоснование экономической эффективности их использования, что невозможно без определения реологического закона для пульп конкретного ГОКа, на котором предполагается внедрение технологий пастового сгущения. Стандартные методы оценки реологической зависимости известны только для однородных жидкостей, и эти методы не применимы для двухфазных гетерогенных сред, которым являются пульпы из отходов обогащения железорудных ГОКов.

Целью работы является разработка и апробация в промышленных условиях методики исследования реологических параметров ПКП, а также лабораторного переносного стенда для проведения экспериментов.

Анализ возможных режимов работы показывает, что формулу для определения объемного расхода пульпы, обеспечиваемого гидротранспортной установкой, можно представить в следующем виде [6]:

$$Q = MG(1 - \omega), \quad (1)$$
$$M = \frac{\mu}{1 + \tilde{\beta}\mu}, \quad G = \tilde{\alpha} - \frac{\rho}{k} i_Z, \quad \omega = \frac{4k_\tau \tau_0}{\rho_0 g D G}, \quad \tilde{\alpha} = \frac{\alpha \chi}{kL}, \quad \tilde{\beta} = \frac{\chi \beta}{kL}, \quad \mu = \frac{\rho_0 g \pi D^4}{k_\eta 32 \eta},$$

где Q – подача насоса при перекачивании ПКП; M – модуль расхода гидротранспортного комплекса; G – коэффициент расхода гидротранспортного комплекса; ω – коэффициент, учитывающий влияние на подачу пульпы начального напряжения сдвига; χ – коэффициент пересчета расходно-напорной характеристики (РНХ) насоса с воды на ПКП; α – фиктивный напор насоса при нулевой подаче, коэффициент аппроксимации паспортной РНХ насоса; β – коэффициент снижения напора, коэффициент аппроксимации паспортной РНХ насоса; k – коэффициент, учитывающий местные гидравлические сопротивления; D – диаметр трубопровода; ρ – относительная плотность суспензии; i_Z – геодезический уклон магистрали; k_τ, k_η – коэффициенты аппроксимации; τ_0 – напряжение при начальном сдвиге; η – эффективная вязкость; ρ_0 – плотность жидкой фазы суспензии.

Из формулы (1) видно, что режим работы гидротранспортной системы, транспортирующей ПКП, существенно зависит от точности определения параметров реологической зависимости, то есть от величин τ_0 и η . Специалистами института имени Г.В. Плеханова (технический университет) СПГИ(ТУ) и Института «Механобр» в рамках Федеральной целевой

программы развития рудно-сырьевой базы металлургической промышленности Российской Федерации на 1997 – 2005 годы (ФЦП "Руда") по направлению "Производственные энерго-сберегающие технологии трубопроводного транспорта руды и продуктов ее переработки" были проведены исследования реологических свойств отходов обогащения различных руд с высоким содержанием мельчайших частиц (табл. 1 – 3) [1 – 5, 7, 10]. Этими экспериментами показано, что течение отходов обогащения медных руд при концентрациях твердых частиц больше 62 %, а для отходов медно-свинцовых и никелевых руд больше 52,9 % по массе является структурным и описывается законом Бингама-Шведова (табл. 1 – 3) [1 – 5, 7, 10].

Таблица 1 – Реологические параметры гидросмесей из отходов обогащения медной руды с плотностью 2400 кг/м³ [2]

Объемная концентрация гидросмеси, %	Начальное напряжение сдвига, Па	Эффективная вязкость гидросмеси, Па·с
36,7	9,5	0,04651
39,6	11,5	0,07217
44,0	15,0	0,10060
49,2	20,0	0,13481

Таблица 2 – Реологические параметры гидросмесей из отходов обогащения медно-цинковой руды [1]

Массовая концентрация, %	Начальное напряжение сдвига, Па	Эффективная вязкость гидросмеси, Па·с
40	6,1	0,168
50	8,1	0,186
60	11,1	0,208
70	17,7	0,231

Таблица 3 – Реологические параметры гидросмесей из отходов обогащения никелевых руд [10]

Массовая концентрация, %	Начальное напряжение сдвига, Па	Эффективная вязкость гидросмеси, Па·с
32,0	0,12	0,145
36,9	0,58	0,151
39,5	2,00	0,170
45,7	5,57	0,194
49,0	9,87	1,190
54,6	15,02	1,410
59,6	19,92	1,630
65,6	24,12	1,850
76,0	29,32	1,970

Установлена обобщенная для отходов обогащения руд экспоненциальная зависимость структурной вязкости ПКП от объемной концентрации твердой фазы [10]

$$\eta = K_{\eta} e^{pC},$$

где η – структурная вязкость ПКП; K_{η} – коэффициент пропорциональности; p – показатель степени; C – объемная концентрация гидросмеси; e – основание натурального логарифма.

Обобщая результаты исследований Санкт-Петербургской научной школы напорного гидротранспорта в области течения ПКП [1 – 5, 7, 10], можно сделать следующие выводы:

– в соответствии с существующими классификациями ПКП, полученные на основе отходов обогащения различных руд, следует отнести к классу неоднородных с псевдоравномерным распределением твердого и концентрации по сечению потока, проявляющих свойства неньютоновских жидкостей в области высоких концентраций, с реологической характеристикой в виде закона Бингама-Шведова;

– реологические характеристики ПКП существенно зависят от физико-химических свойств частиц твердой фазы, их дисперсности, состояния поверхности, а также многих других факторов, что не позволяет использовать результаты экспериментов с одним материалом для расчетов параметров течения ПКП, образованных другими частицами;

– если течение исследуемой системы описывается известной реологической моделью, для вычисления реологических параметров все равно необходимо проведение экспериментальных исследований физико-механических свойств и снятие экспериментальных кривых течения конкретной системы.

Для исследования параметров реологических характеристик был разработан стенд (рис. 1), оснащенный компрессором СО-7А, цилиндром с поршнем, шиберной задвижкой и съемным трубопроводом, а также специальными измерительными приборами. Принцип работы стенда заключается в том, что ПКП, помещенная в напорный цилиндр с поршнем, вытесняется из него через напорный трубопровод в приемную емкость за счет подачи под постоянным давлением сжатого воздуха из ресивера компрессора.



Рис. 1. Общий вид стенда для исследования напорного течения ПКП

При этом уравнение, описывающее изменение объема ПКП в напорном цилиндре, аналогично уравнению истечения жидкости из бака при постоянном напоре. При описании реологических свойств рассматриваемых ПКП будем использовать закон Бингама-Шведова, что следует из обобщения опыта транспортирования ПКП из отходов обогащения цветных и полиметаллических руд. С учетом этого нетрудно показать, что из закона сохранения массы ПКП в напорном цилиндре получается следующее дифференциальное уравнение для описания рассматриваемого процесса:

$$\frac{dx}{d\theta} = \frac{\frac{\tau_0}{\mu}(1+ax) - i}{1+bx}, \quad x(t=0)=1, \quad (2)$$

$$\theta = \frac{\lambda t}{\pi R_c^2 L_c}, \quad i = \frac{\Delta P}{\rho_0 g L_T}, \quad \lambda = \frac{\rho_0 g R_T}{\alpha}, \quad \mu = \frac{\rho_0 g \pi R_T^4}{\beta \eta}, \quad a = \frac{L_c R_T}{L_T R_c}, \quad b = \frac{L_c}{L_T} \left(\frac{R_T}{R_c} \right)^4, \quad x = \frac{l}{L_c},$$

где i – гидравлический уклон; a , b – коэффициенты, характеризующие соотношение геометрических размеров напорного цилиндра и трубопровода; x – доля объема цилиндра, заполненная ПКП; ΔP – действующий перепад давления; ρ_0 – плотность воды; L_T – длина напорного трубопровода; R_T – радиус напорного трубопровода; α , β – уточняющие константы; θ – безразмерное время процесса; R_c – радиус напорного цилиндра; l – длина части цилиндра, заполненной ПКП; t – время; L_c – длина напорного цилиндра.

Решение уравнения (2) с учетом начального условия, а также длительности процесса можно получить в квадратурах в следующем виде:

$$(1 + bc) \ln \left| \frac{c-x}{c-1} \right| - bx = \frac{a \tau_0}{\lambda} \theta, \quad c = \frac{\lambda i - \tau_0}{a \tau_0}, \quad \theta_* = \lambda \frac{1+bc}{a \tau_0} \ln \left| \frac{c}{c-1} \right|. \quad (3)$$

Для анализа влияния величин a и b на зависимость гидравлического уклона от объемного расхода пульпы формулу (3) рационально переписать в следующем виде:

$$\Omega = (1 + bc) \ln \left| \frac{c}{c-1} \right|, \quad \Omega = e \frac{\alpha \tau_0 t_*}{\beta \eta}, \quad e = \frac{R_T R_T^3}{L_T R_c^3},$$

где Ω – безразмерная длительность процесса.

Результаты численных исследований показывают, что зависимость величины Ω от относительного гидравлического уклона слабо зависит от величины b (рис. 2).

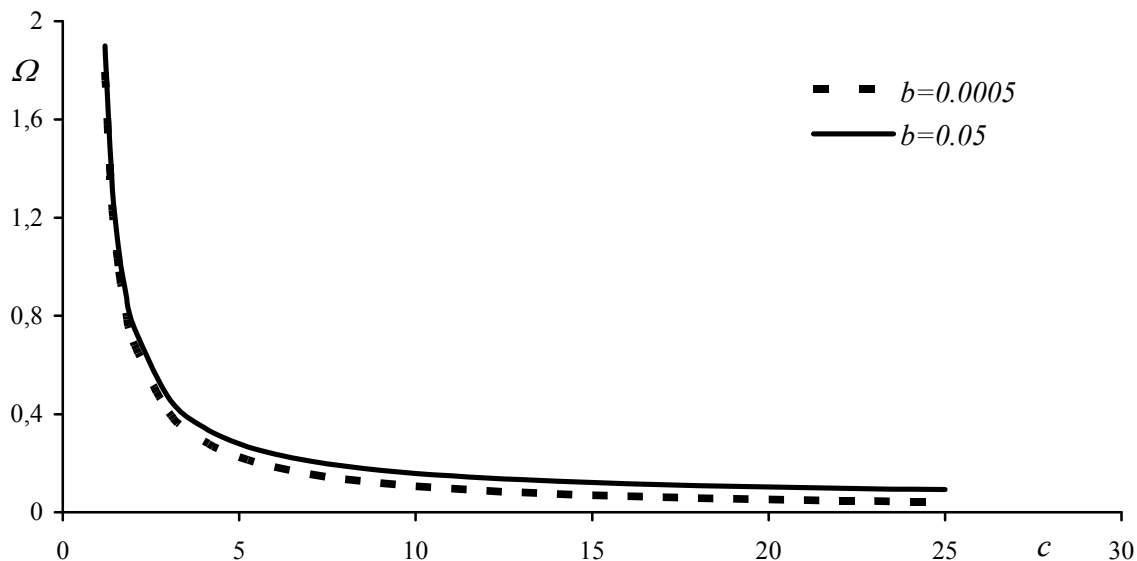


Рис. 2. Зависимость величины Ω от параметра c при различных значениях константы b

При этом рассматриваемая зависимость с инженерной точностью может быть аппроксимирована функцией следующего вида:

$$\Omega = \frac{0,78B}{c^B}, \quad B = 1,1145e^{-5,8188b},$$

что позволяет представить формулу (3) в виде явной зависимости относительно гидравлического уклона

$$i = \frac{\tau_0}{\lambda} + \sqrt[B]{0,78B} \left(\frac{a \tau_0}{\lambda} \right)^{\frac{B-1}{B}} \sqrt[B]{\frac{Q_*}{\mu}}, \quad Q_* = \frac{\pi R_c^2 L_c}{t_*}, \quad (4)$$

где t_* – длительность процесса истечения ПКП из напорного трубопровода, регистрируемая

во время экспериментов.

Учитывая, что величина B в рассматриваемом диапазоне изменения величины b изменяется незначительно, и, используя осредненные значения комплексов, зависящих от величины B , вместо формулы (4) можно рекомендовать следующее выражение:

$$i = \frac{\tau_0}{\lambda} + 0,86 \left(\frac{a\tau_0}{\lambda} \right)^{0,08} \left(\frac{Q_*}{\mu} \right)^{0,92} \quad (5)$$

В общем случае решение, полученное в виде формул (2) – (5), использовать для определения реологических характеристик ПКП затруднительно. Однако надо учитывать величины входящих в него коэффициентов, которые для лабораторного стенда ИГТМ НАН Украины составляют: $a = 0,3175$ и $b = 0,00496$. С учетом этого формулу (3) можно записать в виде, позволяющем аналитически разрешить ее относительно величины c ,

$$\theta_* = \frac{\lambda}{a\tau_0} \ln \left| \frac{c}{c-1} \right|, \quad c = \frac{1}{1 - e^{-\frac{a\tau_0\theta_*}{\lambda}}}$$

Раскладывая экспоненту в знаменателе последней формулы в степенной ряд с сохранением линейных членов и учитывая формулу (3), после несложных преобразований получим выражение для определения гидравлического уклона в следующем виде:

$$i = \frac{\tau_0}{\lambda} + \frac{Q_*}{\mu} \quad (6)$$

Таким образом, обработка результатов экспериментов осуществляется в два этапа по следующему алгоритму. На первом этапе по зарегистрированным в ходе экспериментов значениям давления перед напорным цилиндром и длительности истечения ПКП из напорного трубопровода по формуле (4) рассчитывают величины гидравлического уклона и усредненного объемного расхода ПКП. На втором этапе полученные в ходе первого этапа зависимости аппроксимируют методом наименьших квадратов функциями вида (5). Коэффициенты аппроксимации, свободный и линейный члены будут соответствовать начальному напряжению сдвига и эффективной вязкости ПКП. На разработанном стенде были проведены экспериментальные исследования напорных течений ПКП, приготовленных из отходов обогащения Центрального ГОКа с насыпной пористостью 0,46 и плотностью 3000 кг/м³. Численная обработка результатов экспериментов (табл. 4) показывает, что зависимости реологических характеристик ПКП из отходов обогащения ЦГОК от объемной концентрации гидросмеси с инженерной точностью (рис. 3, 4) можно аппроксимировать следующими функциями:

$$\tau_0 = 9,21 \ln(746C), \quad \eta = 0,035e^{4,49C}$$

Таблица 4 – Результаты экспериментальных исследований

Группа опытов	Концентрация ПКП, д.ед.	Относительная плотность ПКП	Начальное напряжение сдвига, Па	Эффективная вязкость, Па·с
№1	0,497	1,995	0,3353	0,1951
№2	0,543	2,086	0,3954	0,9697
№3	0,598	2,195	0,5245	3,2671

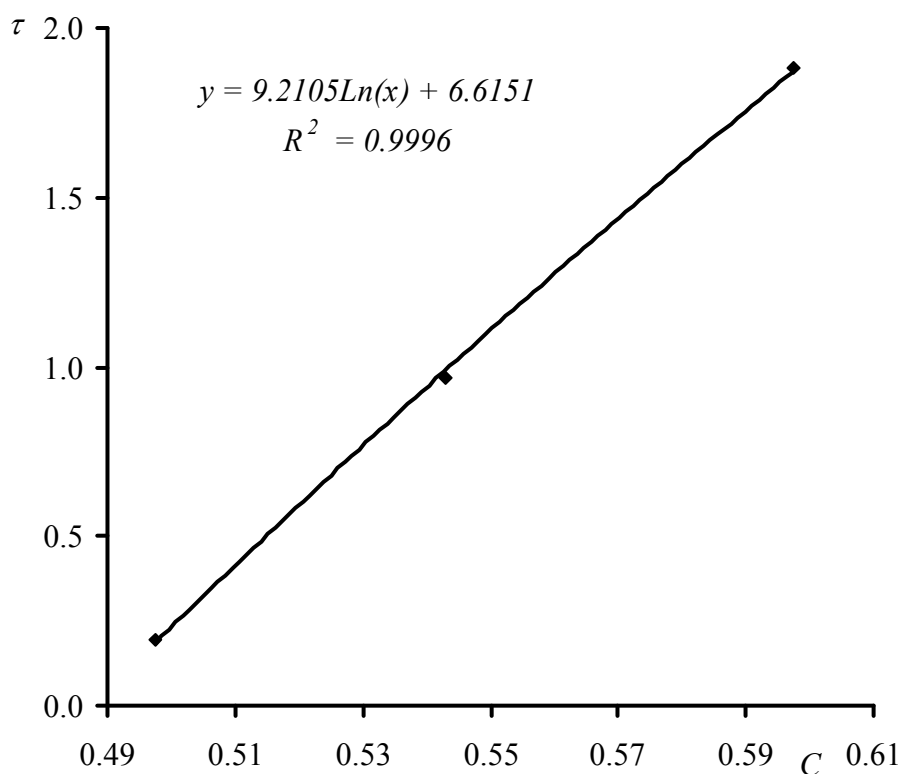


Рис. 3. Зависимость величины начального напряжения сдвига от объемной концентрации ПКП

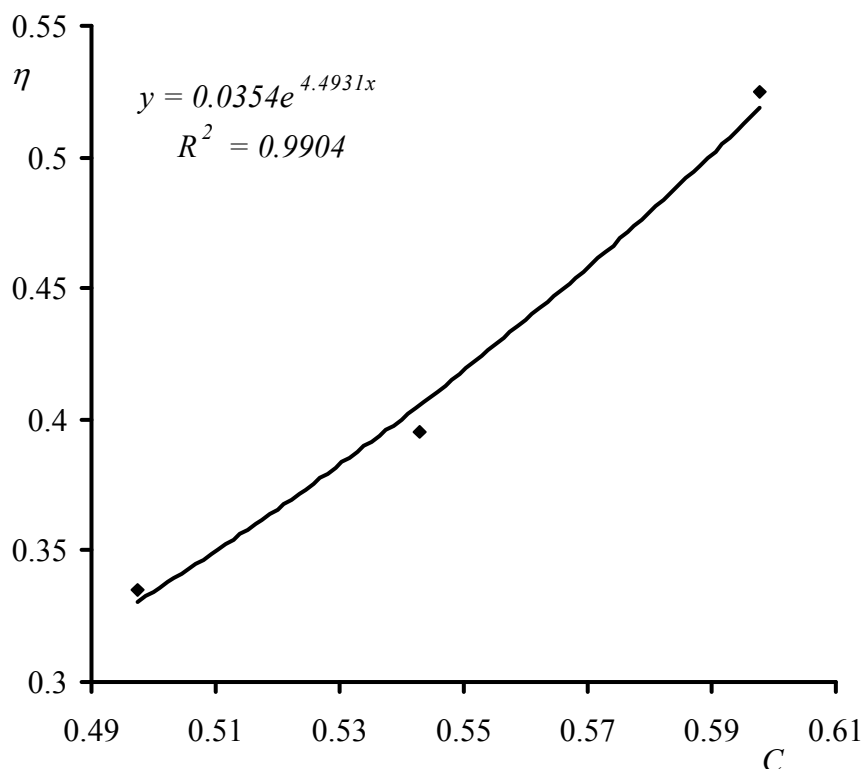


Рис. 4. Зависимость величины эффективной вязкости ПКП от объемной концентрации

Выводы. Проведенные экспериментальные исследования реологических характеристик пульп с концентрацией пасты, полученных из отходов обогащения ЦГОКа, а также последующая обработка и анализ полученных результатов позволяют утверждать, что:

– доказана возможность использования в условиях ЦГОКа технологий сгущения отходов обогащения до концентрации пасты с их последующим напорным гидротранспортированием;

- возможно повышение концентрации отходов обогащения ЦГОКа в 9,4 раза по сравнению с существующей;
- повышение концентрации отводимых отходов обогащения позволит снизить удельное потребление воды в 2,2 раза;
- реологическая характеристика ПКП из отходов обогащения ЦГОКа описывается законом Бингама-Шведова.

Список литературы

1. Авксентьев С.Ю. Определение рациональных режимов гидротранспорта пастообразных хвостов обогащения медно-цинковой руды: Дис. ... канд. техн. наук: 05.05.06. – Санкт-Петербург, 2009. – 129 с.
2. Александров В.И. Методы снижения энергозатрат при гидравлическом транспортировании смесей высокой концентрации. – Санкт-Петербург: СПГГИ (ТУ), 2000. – 117 с.
3. Воронов В.А. Снижение энергоемкости гидротранспортирования хвостов обогащения горных предприятий оптимизацией режимов работы грунтовых насосов и гравитационных сгустителей: Дис. ... канд. техн. наук: 05.05.06. – Санкт-Петербург, 2007. – 190 с.
4. Головачев Н.В. Обоснование технического обслуживания и ремонта оборудования для повышения эффективности эксплуатации системы гидротранспорта на горных предприятиях: Дис. ... канд. техн. наук: 05.05.06. – Санкт-Петербург, 2010. – 136 с.
5. Влияние мелких фракций полидисперсного твердого материала на параметры его транспортирования турбулентным потоком / Криль С.И., Карасик В.М., Витошкин Ю.К., Очеретько В.Ф. // Труды конференции. Ин-т гидродинамики ЧССР. - Прага, 1983. – С. 88 – 90.
6. Дмитриев Г.П., Махарадзе Л.И., Гочиташвили Т.Ш. Напорные гидротранспортные системы. – М.: Недра, 1991. – 304 с.
7. Докукин В.П. Повышение эффективности эксплуатации систем трубопроводного гидротранспорта. – Санкт-Петербург: СПГГИ(ТУ), 2005. – 105 с.
8. Каненков В.В. Снижение энергоемкости гидравлического транспортирования полидисперсных гидросмесей на предприятиях горной промышленности: Дис. ... канд. техн. наук: 05.05.06. – Санкт-Петербург, 2006. – 150 с.
9. Киричко С.Н. Расчет параметров гидротранспорта высококонцентрированных гидросмесей в условиях предприятий Кривбасса // Геотехническая механика: Межвед. сб. научн. трудов / ИГТМ НАН Украины. – Днепропетровск, 2012. – Вып. 103. – С. 101 – 106.
10. Мануэль, В.А. Обоснование технологической схемы и параметров комплекса для транспортирования высококонцентрированной гидросмеси на латеритовых карьерах (республика Куба): Дис. ... канд. техн. наук: 05.05.06. – Санкт-Петербург, 2006. – 140 с.