

УДК 622.648.01

Киричко С.Н., аспирант
(ИГТМ НАН Украины)**ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ СИСТЕМ
ГИДРОТРАНСПОРТА ПАСТ НА ОСНОВЕ ЛАБОРАТОРНОЙ ОЦЕНКИ
РЕОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ****Киричко С.М.**, аспірант
(ИГТМ НАН України)**ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ СИСТЕМ
ГІДРОТРАНСПОРТУ ПАСТ НА ОСНОВІ ЛАБОРАТОРНОЇ ОЦІНКИ
РЕОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ****Kirichko S.N.**, Doctoral Student
(IGTM NAS of Ukraine)**OPERATING EFFICIENCY OF THE PASTE TRANSPORTING
HYDROSYSTEMS ENSURED BY LABORATORY ESTIMATED RHEO-
LOGICAL PARAMETERS**

Аннотация. Предметом исследования является моделирование напорного истечения пульпы с концентрацией пасты через трубопровод при вытеснении ее из цилиндра поршнем. Исследования выполнены с целью разработки метода оценки реологических параметров пасты, образованной из отходов обогащения конкретного горно-обогатительного комбината, позволяющего в лабораторных условиях оценить зависимость гидравлического уклона от скорости и концентрации пульпы. 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.

Ключевые слова: пульпа с концентрацией пасты, закон Бингама-Шведова.

Введение. Одним из перспективных путей повышение 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. Анализ возможных режимов работы показывает, что формулу для определения объемного расхода пульпы, обеспечиваемого гидротранспортной установкой, можно представить в следующем виде [6]:

$$Q = MG(1 - \omega), \quad (1)$$

$$M = \frac{\mu}{1 + \tilde{\beta}\mu}, \quad G = \tilde{\alpha} - \frac{\rho}{k} i_Z, \quad \omega = \frac{4k_\tau \tau_0}{\rho_0 g DG},$$

$$\tilde{\alpha} = \frac{\alpha\chi}{kL}, \quad \tilde{\beta} = \frac{\chi\beta}{kL}, \quad \mu = \frac{\rho_0 g \pi D^4}{k_\eta 32\eta},$$

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 гидротранспортных систем, транспортирующих ПКП, существенно зависит от точности определения параметров реологической зависимости, то есть от величин τ_0 и η . Обобщая результаты исследований Санкт-Петербургской научной школы напорного гидротранспорта в области течения ПКП [1–5, 7], можно сделать 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;

– в том случае, когда 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.

Целью работы является разработка метода оценки реологических параметров ПКП, образованной из отходов обогащения конкретного ГОКа, позволяющих в лабораторных условиях оценить зависимость гидравлического уклона от скорости и концентрации пульпы.

Для исследования параметров реологических характеристик специалистами Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова НАН Украины (ИГТМ

НАН України) 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, 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.

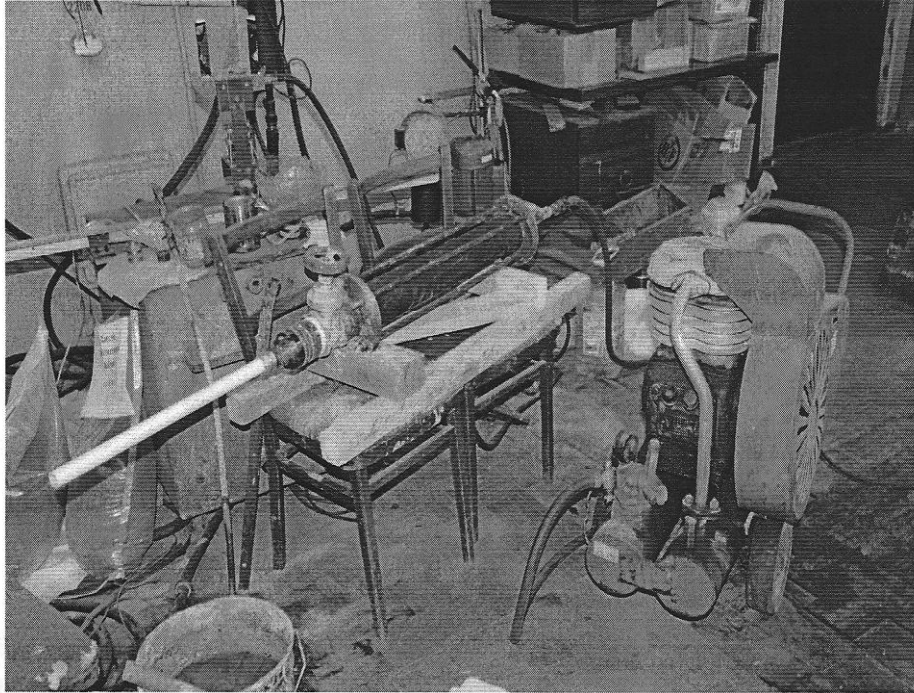


Рисунок 1 - Общий вид стенда для исследований напорного течения ПКП

Модель действующего стенда предполагает истечение ПКП через напорный трубопровод под постоянным давлением при ее вытеснении из напорного цилиндра поршнем. При этом уравнение, описывающее изменение объема ПКП в напорном цилиндре, аналогично уравнению истечения жидкости из бака при постоянном напоре. На основании обобщения опыта транспортирования ПКП из отходов обогащения цветных и полиметаллических руд, при описании реологических свойств рассматриваемых ПКП будем использовать закон Бингама-Шведова. С учетом этого, нетрудно показать, что из закона сохранения массы ПКП в напорном цилиндре, получается следующее дифференциальное уравнение для описания рассматриваемого процесса:

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

$$\theta = \frac{\lambda t}{\pi R_c^2 L_c}, \quad i = \frac{\Delta P}{\rho_0 g L_T}, \quad \mu = \frac{\rho_0 g R_T}{\alpha}, \quad \lambda = \frac{\rho_0 g \pi R_T^4}{\beta \eta},$$

$$a = \frac{L_c}{L_T} \frac{R_T}{R_c}, \quad b = \frac{L_c}{L_T} \left(\frac{R_T}{R_c} \right)^4, \quad x = \frac{l}{L_c},$$

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, заполненная 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:

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

$$c = \frac{\mu i - \tau_0}{a\tau_0}, \quad \theta_* = \mu \frac{1+bc}{a\tau_0} \ln\left|\frac{c}{c-1}\right|.$$

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

$$\Omega = (1+bc)\ln\left|\frac{c}{c-1}\right|,$$

$$\Omega = e \frac{\alpha}{\beta} \frac{\tau_0 t_*}{\eta}, \quad e = \frac{R_T}{L_T} \frac{R_T^3}{R_c^3},$$

где Ω – безразмерная длительность процесса.

Результаты численных исследований показывают, что зависимость величины Ω от относительного гидравлического уклона слабо зависит от величины b (рис. 2). 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 формулу (3) представить в виде явной зависимости относительно гидравлического уклона:

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

$$Q_* = \frac{\pi R_c^2 L_c}{t_*},$$

где t_* – длительность процесса истечения ПКП из напорного трубопровода, которая регистрируется во время экспериментов.

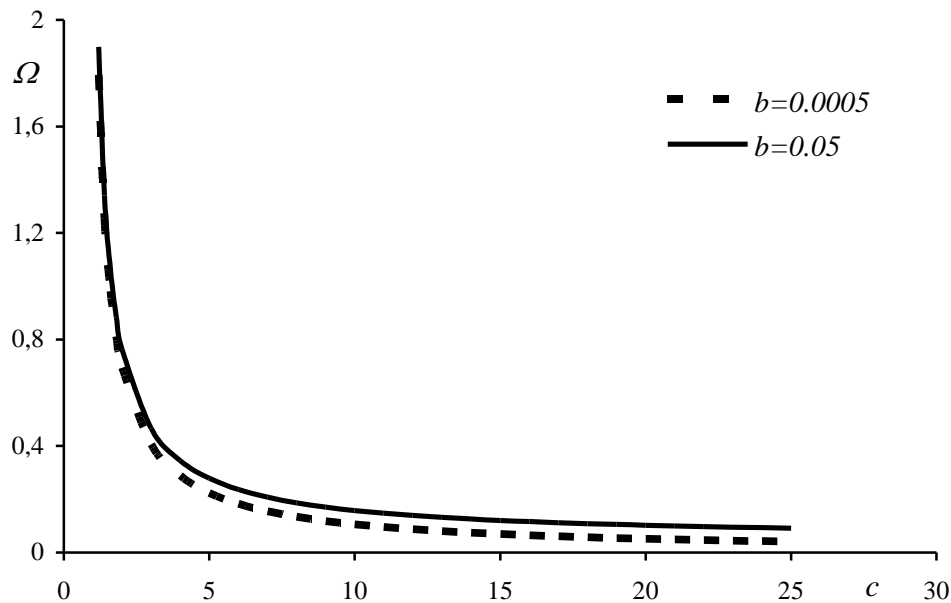


Рисунок 2 – Зависимость величины Ω от параметра c при различных значениях константы b

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

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

В общем случае, полученное решение в виде формул (2) – (5), затруднительно использовать для определения реологических характеристик ПКП. 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, который позволяет аналитически разрешить ее относительно величины c :

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

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

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

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, посредством формулы (4) рассчитывают величины гидравлического уклона и усредненного объемного расхода ПКП. На втором этапе зависимости, полученные в ходе первого этапа, аппроксимируют методом наименьших квадратов функциями вида (5). Коэффициенты аппроксимации, свободный и линейный члены, будут соответствовать начальному напряжению сдвига и структурной вязкости ПКП. Специалистами ИГТМ НАН Украины были проведены экспериментальные исследования напорных течений ПКП, приготовленных из отходов обогащения Центрального ГОКа с насыпной пористостью 0,46 и плотностью 3000 кг/м³ (табл. 1).

Таблица 1 – 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	0,3954	0,9697
№2	0,543	2,086	0,3353	0,1951
№3	0,598	2,195	0,5245	3,2671
№4	0,633	2,267	1,3350	1,8827

Выводы. Разработаны и опробованы методика и стенд для экспериментальных исследований реологических характеристик ПКП в лабораторных условиях. Стенд позволяет определять параметры реологической характеристики ПКП в полевых и лабораторных условиях. На разработанном стенде выполнены исследования реологических характеристик ПКП из отходов обогащения ЦГОКа. Проведенные испытания показали, что реологическая характеристика ПКП из отходов обогащения железной руды Кривбасса описывается законом Бингама-Шведова. Это позволяет после уточнения реологических параметров данных пульп использовать научные результаты, полученные для технологий гидро-транспорта и складирования ПКП из отходов полиметаллических руд и руд цветных металлов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Авксентьев, С.Ю. Определение рациональных режимов гидротранспорта пастообразных хвостов обогащения медно-цинковой руды: дисс. ... канд. техн. наук: 05.05.06 / С.Ю. Авксентьев. – Санкт-Петербург, 2009. – 129 с.
2. Александров, В.И. Методы снижения энергозатрат при гидравлическом транспортировании смесей высокой концентрации / В.И. Александров. – Санкт-Петербург: СПГИ (ГУ), 2000. – 117 с.
3. Воронов, В.А. Снижение энергоемкости гидротранспортирования хвостов обогащения горных предприятий оптимизацией режимов работы грунтовых насосов и гравитационных сгустителей: дисс. ... канд. техн. наук: 05.05.06 / В.А. Воронов. – Санкт-Петербург, 2007. – 190 с.
4. Головачев, Н.В. Обоснование технического обслуживания и ремонта оборудования для повышения эффективности эксплуатации системы гидротранспорта на горных предприятиях: дисс. ...

канд. техн. наук: 05.05.06 / Н.В. Головачев. – 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. Напорные гидротранспортные системы / Г.П. Дмитриев, Л.И. Махарадзе, Т.Ш. Гочиташвили. – М.: Недра, 1991. – 304 с.

7. Докукин, В.П. Повышение эффективности эксплуатации систем трубопроводного гидротранспорта / В.П. Докукин. – Санкт-Петербург: СПГГИ(ТУ), 2005. – 105 с.

8. Каненков, В.В. Снижение энергоемкости гидравлического транспортирования полидисперсных гидросмесей на предприятиях горной промышленности: дисс. ... канд. техн. наук: 05.05.06 / В.В. Каненков. – Санкт-Петербург, 2006. – 150 с.

9. Киричко, С.Н. Расчет параметров гидротранспорта высококонцентрированных гидросмесей в условиях предприятий Кривбасса / С.Н. Киричко // 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): дисс. ... канд. техн. наук: 05.05.06 / В.А. Мануэль. – Санкт-Петербург, 2006. – 140 с.

REFERENCES

1. Avksentev, S.Yu. (2009), «Definition of rational modes hydrotransport paste tailings copper-zinc ore», Ph.D. Thesis, 05.15.06, St. Petersburg, RU.

2. Aleksandrov, V.I. (2000) *Metodyi snizheniya energozatrat pri gidravlicheskom transportirovanii smesey vyisokoy kontsentratsii* [Methods of reducing energy consumption in hydraulic transportation of mixtures of high concentration], SPGGI (TU), St. Petersburg, Russia.

3. Voronov, V.A. (2007), «Reduction of energy consumption hydrotransportation tailings mining enterprises to optimize operation of groundwater pumps and gravity thickeners», Ph.D. Thesis, 05.05.06, St. Petersburg, RU.

4. Golovachev, N.V. (2010), «Rationale for maintenance and repair of equipment to improve the operational efficiency of the system hydraulic transport in mines», Ph.D. Thesis, 05.05.06, St. Petersburg, RU.

5. Krill, S.I., Karasik, V.M., Vitoshkin, Yu.K. and Ocheretko, V.F. (1983), «Influence of small fractions of a polydisperse firm material on parameters of its transportation by a turbulent stream», *Conference works. Institute of hydrodynamics of ChSSR*, Praha, CSSR, pp. 88-90.

6. Dmitriev, G.P., Maharadze, L.I. and Gochitashvili, T.Sh. (1991), *Napornyye gidrotransportnyye sistemy* [Pressure head hydrotransport systems], Nedra, Moscow, Russia.

7. Dokukin, V.P. (2005), *Povyushenie effektivnosti ekspluatatsii system truboprovodnogo gidrotransporta*, [Increase of efficiency of operation of systems of pipeline hydrotransport], SPGGI(TU), St. Petersburg, Russia.

8. Kanenkov, V.V. (2006) «Reduction of energy consumption of hydraulic transportation polydisperse slurries of Mining», 05.05.06, Ph.D. Thesis, St. Petersburg, RU.

9. Kirichko, S.N. (2012) «Calculation of parameters hydrotransport highly slurries under enterprises Kryvbass», *Geo-Technical Mechanics*, no 103, pp. 101 – 106.

10. Manuel, V.A. (2006) «Justification technological scheme and complex parameters for transporting highly concentrated slurry on laterite quarries», Ph.D. Thesis, 05.05.06, St. Petersburg, RU.

Об авторе

Киричко Сергей Николаевич, аспирант, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова Национальной академии наук Украины (ИГТМ НАН Украины), Днепропетровск, Украина, igtmnanu@yandex.ru

About the author

Kirichko Sergey Nikolayevich, Doctoral Student, M.S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics under the National Academy of Sciences of Ukraine (IGTM, NASU), Dnepropetrovsk, Ukraine, igtmnanu@yandex.ru

Анотація. Предметом дослідження є моделювання напірного витікання пульпи з концентрацією пасти через трубопровід при витісненні її із циліндра поршнем. Дослідження виконані з метою розробки методу оцінки реологічних параметрів пасти, які утворені з відходів

збагачення конкретного гірничо-збагачувального комбінату, що дозволяє в лабораторних умовах оцінити залежність гідравлічного ухилу від швидкості і концентрації пульпи. У статті приводиться математична модель процесу, опис стенда для лабораторних досліджень, методика обробки та результати експериментів для паст, отриманих з відходів збагачення Центрального гірничо-збагачувального комбінату. Проведені випробування показали, що реологічна характеристика паст з розглянутих відходів збагачення залізної руди описується законом Бінгама-Шведова, для якого вперше отримані залежності початкової напруги зсуву та структурної в'язкості від концентрації пульпи.

Ключові слова: пульпа з концентрацією пасти, закон Бінгама-Шведова.

Abstract. Subject of the research was simulation of pasty-pulp pressure flowing out from the pipeline when the pulp is forced out from the cylinder by a piston. Purpose of the research was to elaborate a method for estimating rheological parameters of the paste produced of cleaning rejects in the concrete ore-dressing and processing enterprise and, with the help of this method, to estimate dependence between hydraulic gradient and rate of the pulp velocity and concentration in the laboratory conditions. The paper describes a mathematical model of the process, a test bench for laboratory research, processing procedure and experimental results for the pastes produced from iron ore cleaning rejects at the Central Ore-Dressing and Processing Enterprise. The tests showed that rheological characteristic of these pastes was described by Bingham-Shvedov law. For this law, dependences of initial shear stress and structural viscosity on the pulp concentration were first ever obtained.

Keywords: pulp with paste concentration, Bingham-Shvedov law.

Стаття поступила в редакцію 5.11.2014

Стаття рекомендована к печати д-ром техн. наук Е.В. Семененко