УДК 622.649

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ ГИДРОТРАНСПОРТА ЛИМОНИТОВОЙ РУДЫ ДЛЯ УСЛОВИЙ КОМБИНАТА ИМЕНИ ПЕДРО СОТО АЛЬБА

РАУЛЬ ИСКЬЕРДО ПУПО [1], АЛЬБЕРТО ТУРРО БРЕФФ [2]
[1] *Горно-металлургический институт, Моа, Республика Куба*
[2] *Университет Гуантанамо, Гуантанамо, Республика Куба*

В статье исследуются основные закономерности течения высококонцентрированной лимонитовой гидросмеси при значительном содержании мельчайших фракций. Разработаны инженерные методики расчета основных параметров гидротранспорта лимонитовой руды в турбулентных и структурных режимах. Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций обоснована теоретическими исследованиями, выводами аналитических зависимостей, результатами лабораторных и опытно-промышленных экспериментов. Установлены практические закономерности изменения коэффициента гидравлических сопротивлений в зависимости от плотности пульпы в интервале 35-45 % при движении потока гидросмеси в структурном режиме, а также закономерности потерь напора при движении в турбулентном режиме по горизонтальному и наклонному трубопроводам.

***Ключевые слова*:** гидротранспорт, режимы течения, лимонитовая руда, гидросмесь, реологические свойства

***Как цитировать эту статью*:** Рауль Искьердо Пупо. Исследование режимов гидротранспорта лимонитовой руды для условий комбината имени Педро Сото Альба / Рауль Искьердо Пупо, Альберто Турро Брефф // Записки Горного института. 2017. Т. 224. С. 240-246. DOI: 10.18454/PMI.2017.2.240

Введение. Увеличение выпуска никеля и кобальта за счет ввода в эксплуатацию новых никелевых предприятий в Пунта Горда и Лас Камариокас и дальнейшее совершенствование технологических процессов и аппаратов, применяемых на действующих заводах, является одной из основных задач развития никель-кобальтовой промышленности Республики Куба. В течении 50 лет транспортирование лимонитовой руды с карьера до комбината имени Педро Сото Альба осуществляется гидротранспортом. Однако запасы этого карьера будут отработаны к 2025 г. Поэтому сейчас делаются проектные разработки различных вариантов транспорта с нового месторождения Моа-Восток. Разница геодезических высот (65 м) между месторождением и точкой подачи гидросмеси в существующие сгустители является важным условием, которое подчеркивает возможность использования самотечного транспорта, так как не требует расхода энергии.

Комбинат имени Педро Сото Альба является единственным на Кубе, где используется гидротранспорт лимонитовой руды. Лимонитовая руда в цехе подготовки пульпы размывается потоком воды до массовой концентрации, равной 25-30 %. При этом частицы крупностью –0,833 мм транспортируются самотеком в сгуститель по бетонному и чугунному трубопроводам диаметром 610 мм и длиной 5129 м. Трубопровод разделен на 54 участка, между которыми находятся колодцы, в которых скорость гидросмеси снижается. Скорость потока меняется в пределах 1-1,4 м/с. Результаты экспериментов показали, что скорость осаждения гидросмеси при выходе ее из цеха подготовки пульпы больше, чем скорость осаждения ее при входе в сгуститель.

Для гидротранспортирования сгущенной пульпы после сгустителей (45-48 % твердого по массе) применяются центробежные насосы, трубопровод имеет длину 460 м и диаметр 508 мм, средняя скорость движения гидросмеси колеблется от 0,3 до 0,57 м/с. Вместе с лимонитовой рудой в пульпу попадает твердая серпентинитовая фракция (до 5 %), которая осаждается на дне трубы, вследствие чего уменьшается живое сечение трубопровода и увеличиваются потери напора в трубопроводе. Поэтому необходимо при проектировании нового цеха подготовки пульпы предусмотреть технологические мероприятия, исключающие попадание серпентиновой фракции в сгустители.

Предварительные исследования и опытные данные других авторов выявили существование вязкопластичных свойств в лимонитовой гидросмеси.

Анализ литературных источников и работы гидротранспортных установок показал, что, несмотря на широкое применение гидравлического транспорта и наличие большого количества проведенных экспериментальных исследований, отсутствует теория и аналитическая модель, объясняющие структуру потока вязкопластичной гидросмеси. Чрезвычайно большое разнообра-

DOI: 10.18454/PMI.2017.2.240

зие физико-механических свойств и условий гидротранспортирования вязкопластичных гидросмесей ограничивает область применения предложенных расчетных формул, поэтому в большинстве случаев не представляется возможным определить параметры транспортирования с достаточной для практических целей точностью. Эффективность гидротранспорта определяется скоростью потока, концентрацией и потерей напора. Предложенные методы расчета этих параметров на основе закона вязкопластичного течения Шведова – Бингама, для вывода которого использовалась механика сплошных сред, требуют внесения соответствующих корректив, основанных на экспериментальных исследованиях течения конкретной гидросмеси.

Методика исследований включала в себя анализ литературных источников, опыта эксплуатации гидротранспортных установок лимонитовой гидросмеси на Кубе и научное обобщение работ по изучению тонкодисперсных взвесенесущих потоков; теоретические и экспериментальные исследования реологических свойств и параметров транспортирования лимонитовых гидросмесей; планирование экспериментов и обработку экспериментальных данных методами математической статистики и регрессионного анализа. Разработана методика расчета параметров гидротранспортной установки лимонитовой гидросмеси в структурном и турбулентном режимах [5].

Разработаны рекомендации для проектирования новой гидротранспортной линии Моа-Восток на комбинате имени Педро Сото Альба. На рис.1 изображены распределение скорости и напряжения потока в трубе, а на рис.2 – обобщенная реологическая кривая лимонитовой пульпы [5, 9].

Результаты предварительных исследований реологических свойств лимонитовой гидросмеси, выполненные на капиллярном вискозиметре, показывают, что реологические кривые описываются известной моделью Балкли – Гершеля [5]

$$\tau = \tau_0 + k\gamma^n. \qquad (1)$$

Для описания деформационного поведения концентрированных суспензий, проявляющих аномалию вязкости, Ю.К.Сафоновым была предложена следующая зависимость [6]:

$$\frac{\varphi}{\varphi_m} = k\left(\frac{\tau - \tau_0}{\tau_k - \tau_0}\right)^n, \qquad (2)$$

где τ_0 – предел текучести; τ_k – напряжения, соответствующие полному разрушению структуры; n – индекс течения; k – показатель концентрации; φ – текучесть.

Учитывая, что

$$\varphi = \frac{1}{\eta},$$

получим

$$dr = \frac{2l}{\Delta P} d\tau. \qquad (3)$$

Подставляя в уравнение Ньютона выражения (2) и (3), получим

$$\tau = -\eta^{\gamma} = -\eta\frac{dU}{dr}. \qquad (4)$$

Отсюда можно сделать следующие выводы:

1. При напряжении $\tau_0 < \tau < \tau_a$ течение в структурном режиме с практически неразрушенной структурой.

2. В интервале напряжений от τ_a до τ_k течение в переходном режиме с непрерывно разрушающейся структурой.

3. При напряжениях $\tau > \tau_k$ течение в турбулентном режиме,

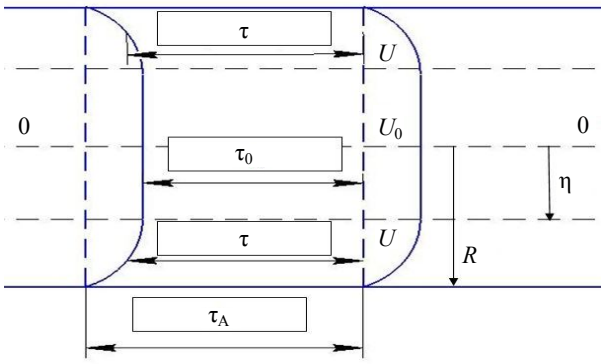


Рис.1. Распределение скорости и напряжения потока в трубе

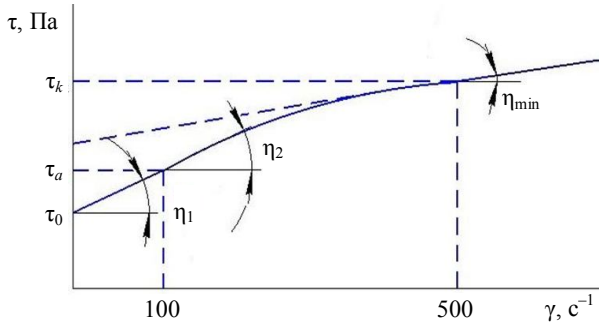


Рис.2. Обобщенная реологическая кривая лимонитовой пульпы

$$dU = \frac{k\varphi_m}{(\tau_k - \tau_0)^n (n+1)}\left[R(\tau_R - \tau_0)^{n+1} - r(\tau - \tau_0)^{n+1}\right]; \quad (5)$$

$$U = \frac{k\varphi_m}{(\tau_k - \tau)^n (n+1)}\left[R(\tau_R - \tau_0)^{n+1} - r(\tau - \tau_0)^{n+1}\right]. \quad (6)$$

Уравнение (6) справедливо при значениях $r_0 < R_0$, $r = r_0$, $\tau = \tau_0$, $U = U_0$. Скорость ядра потока равна:

$$U_0 = \frac{k\varphi_m}{(\tau_k - \tau_0)^n (n+1)} R(\tau_R - \tau_0)^{n+1}. \quad (7)$$

Расход гидросмеси выразится как сумма расходов потока и расхода:

$$Q = Q_1 + Q_0, \quad (8)$$

$$Q_0 = \pi r_0^2 U_0, \quad (9)$$

$$dQ_1 = 2\pi r U dr. \quad (10)$$

Подставляя в уравнение (10) значение скорости, определенное по формуле (6), и интегрируя, получим уравнение расхода для кольцевой зоны Q_1. Отсюда полный расход равен:

$$Q = \frac{4\pi l k(\Delta P - \tau_0)^{n+2}}{\Delta P \eta m(\tau_k - \tau_0)^n (n+1)}\left[Rr_0 + Rl(\Delta P - \tau_0)^{n+1} - \frac{r_0^2}{n+2}\frac{2r_0 l(\Delta P - \tau_0)^{n+1}}{\Delta P(n+3)} - \frac{\Delta l^2(\Delta P - \tau_0)^{n+2}}{\Delta P^2(n+4)}\right] +$$

$$+ \frac{\pi r_0^2 kR(\Delta P - \tau_0)^{n+1}}{\eta m(\tau_k - \tau_0)^n (n+1)}. \quad (11)$$

По полученному уравнению (11) можно определить расход лимонитовой гидросмеси в трубопроводе в зависимости от реологических свойств пульпы и гидравлических параметров потока, определяемых экспериментально.

Выполненные исследования геологических свойств лионитовой гидросмеси показали, что, когда градиент деформации больше 500 $с^{-1}$, существует прямо пропорциональная зависимость между касательными напряжениями и градиентом скорости. Эксперименты, выполненные на капиллярном вискозиметре, показали, что при значениях градиента скорости меньше 100 $с^{-1}$ опытная зависимость графически представляется прямой.

На основании выполненного анализа предложено описывать течение лимонитовой гидросмеси реологической кривой, состоящий из трех зон [4, 5].

В соответствии с предлагаемой моделью течение лимонитовой гидросмеси описывается системой уравнений:

$$\tau = \tau_0 + \eta\gamma; \quad \tau \in [\tau_0, \tau_a], n = 1;$$

$$\tau = \tau_0 + k\gamma^n; \quad \tau \in [\tau_a, \tau_k]; \quad (12)$$

$$\tau = \eta_{\min\gamma}; \quad \tau > \tau_k, n = 1.$$

Потери напора при движении гидросмеси можно представить зависимостью

$$i = F_1\left(\mathrm{Re}, \mathrm{И}, \frac{\Delta}{D}\right) + F_2\left(F_1, \frac{\Delta}{D}, \pi\right). \quad (13)$$

В первой функции F_1 выражения (13) представлены силы вязкости, а во второй F_2 – гравитационные.

При движении вязкопластичных суспензий решающее значение имеют силы вязкости. Поэтому для обработки результатов экспериментов в качестве критерия подобия используется критерий Рейнольдса (Re) и Илюшина (И) для структурного режима (функция Δ/D). В случае турбу-

лентного движения силы вязкости имеют второстепенное значение, и иногда в качестве критерия подобия используется безразмерный комплекс π (функция F_2) [2].

Большинство исследователей (В.В.Трайнис, А.Б.Смолдырев, Ю.К.Сафонов, В.Б.Филатов и др.) для расчетов потерь напора при движении вязкопластичных гидросмесей в трубах используют упрощенное уравнение Букингама. Из этого уравнения после ряда преобразований З.Ланжинов и В.Б.Филатов получили следующее выражение для определения коэффициента гидравлического сопротивления:

$$\lambda = \frac{64\left(I + \frac{И}{N}\right)}{\mathrm{Re}}, \qquad (14)$$

где $N = 8$. При определении λ для движения лимонитовой гидросмеси необходимо определить экспериментально значение числа N.

Потери напора при движении взвесенесущего потока в турбулентном режиме найдем из выражения

$$i_r = i_0(l + ack_i), \qquad (15)$$

где a, c, k – соответственно плотность воды, твердой фазы и гидросмеси; i_0 – удельные потери напора при движении воды.

При транспорте гидросмеси по наклонным трубопроводам гидравлический уклон определяется по формуле

$$i_н = i_r\,(i_r - i_0)\cos\alpha k_2, \qquad (16)$$

где α – угол наклона трубы.

Значение коэффициентов k_1 и k_2 при движении лимонитовой гидросмеси следует также определить экспериментальным путем.

Анализ гранулометрического состава лимонитовой руды показал, что она состоит в основном из мелких классов (–0,045 мм, 86,87 %), среднее значение плотности твердого минерала – 3400 кг/м^3.

Для измерения реологических параметров гидросмеси используется ротационный вискозиметр РВ [4-6, 9]. Методика обработки опытных данных представлена в виде зависимости среднего градиента скорости в зазоре γ от напряжения сдвига τ. Экспериментальные реологические кривые, приведенные на рис.3, описываются уравнением Шведова – Бингама:

$$\tau = \tau_0 + \eta_{ст}\gamma, \qquad (17)$$

где τ_0 – начальное значение напряжения сдвига.

Рассмотрение зависимостей $\tau = F\gamma$ показывает, что лимонитовые гидросмеси с концентрацией $S > 30$ % образуют пространственные структуры [7].

Результаты обработки экспериментальных данных:

Концентрации	0,30	0,35	0,40	0,45
Уравнение регрессии	$\tau = 0{,}131\gamma$	$\tau = 0{,}58 + 0{,}152\gamma$	$\tau = 2 + 0{,}170\gamma$	$\tau = 5{,}57 + 0{,}194\gamma$

Исследование параметров гидротранспорта лимонитовой гидросмеси было сделано для концентраций 25; 30; 35; 40; 45 % твердого по массе. После обработки данных получены зависимости $i(U)$ при движении гидросмесей по трубам диаметром 100 и 150 мм (рис.4).

Из графиков на рис.4 видно, что при гидротранспорте лимонитовой гидросмеси и зависимости от концентрации и скорости движения существуют три режима движения: структурный, переходный и турбулентный. Следовательно, экспериментальные данные подтверждают результаты ранее проведенных исследований на вискозиметрах и предложенную физико-математическую модель.

Выполненные экспериментальные исследования позволили установить численные значения коэффициентов k_1, k_2 и числа N: $k_1 = 3{,}31$; $k_2 = 4{,}53$; $N = 2{,}3$.

На основании выполненных теоретических и экспериментальных исследований разработана методика расчета параметров гидротранспорта лимонитовой пульпы. Сущность инженерного

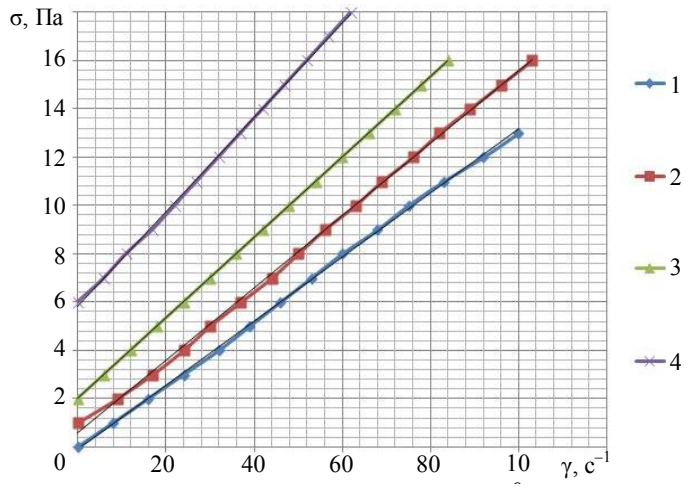


Рис.3. Реологические кривые лимонитовой гидросмеси для концентраций по массе 30 % (1); 35 (2); 40 (3); 45 (4)

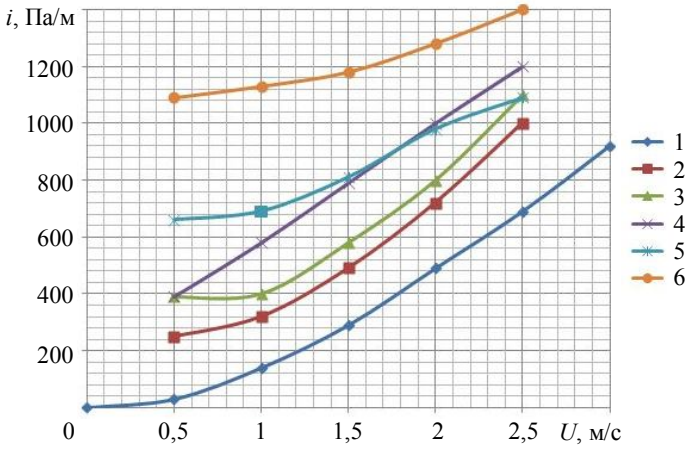


Рис.4. Зависимость $i(U)$ при движении лимонитовой гидросмеси в трубе диаметром 100 мм с концентрацией по массе
1 – вода; 2 – 25 %; 3 – 30; 4 – 35; 5 – 40; 6 – 45

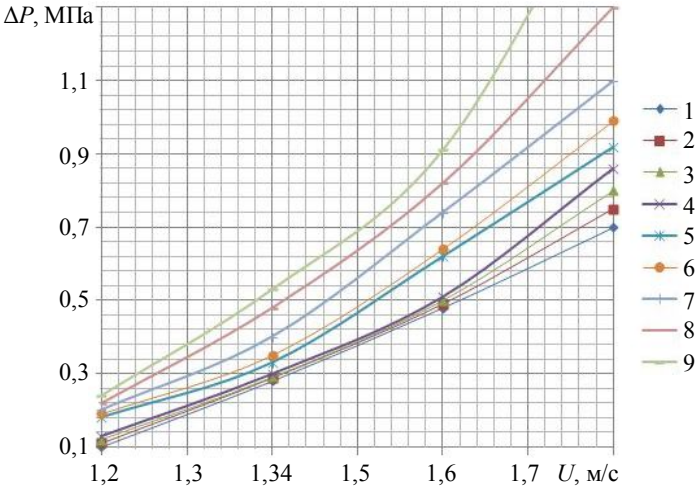


Рис.5. Потери напора в трубопроводах в зависимости от скорости, диаметра (D = 0,438; 0,415; 0,366; 0,317; 0,266 м) и концентрации гидросмеси (25 % – кривые 1-5; 30 % – 6-9)

расчета параметров транспортирования тонкодисперсной лимонитовой гидросмеси с учетом исходных данных пульпы (производительность, длина транспортирования, плотность) заключается в установлении рабочих характеристик трубопровода и насосов, при которых обеспечивается транспортирование требуемых объемов твердого материала с минимальными экономическими затратами с устойчивой работой технологической системы [3].

Порядок расчета следующий. Определяется режим транспортирования лимонитовой гидросмеси, обусловленный особенностями технологического процесса на комбинате имени Педро Сото Альба и зависящий от концентрации твердой руды, содержание которой определяется технологией обогащения лимонитовой руды и изменяется от 25 до 48 % по массе [5].

В зависимости от значений концентрации твердого пульпа от цеха обогащения руды до завода транспортируется в структурном или турбулентном режимах.

В структурном режиме удельные потери напора при движении лимонитовой гидросмеси определяются по зависимости

$$i = \frac{\lambda U^2 \rho_{ст}}{2D}, \qquad (19)$$

где λ – коэффициент гидравлического сопротивления; U – скорость потока гидросмеси; $\rho_{ст}$ – плотность пульпы; D – диаметр трубопровода.

Коэффициент гидравлического сопротивления λ рассчитывается по формуле (14) в зависимости от критериев Re и И

$$\mathrm{Re} = \frac{UD\rho_{ст}}{\eta_{ст}}; \quad \mathrm{И} = \frac{\tau_0 D}{\eta_{ст} U}. \qquad (20)$$

Реологические параметры τ_0 и $\eta_{ст}$, полученные на ротационном вискозиметре, находятся по графику, представленному на рис.5.

В турбулентном режиме гидравлические сопротивления вычисляются по формулам (15) и (16) с учетом значений коэффициентов k_1 и k_2, определенных экспериментально.

DOI: 10.18454/PMI.2017.2.240

По определенным удельным потерям напора рассчитывается потребный напор насоса и выбирается его тип, обеспечивающий заданные параметры. Определяется расчетный расход гидросмеси и сравнивается с заданными [1, 8].

Для реализации расчета составлена программа, по которой рассчитаны потери напора ΔP для разных значений диаметров трубопровода и концентраций для проектируемой гидротранспортной линии Моа-Восток. Результаты расчета представлены на рис.3. Графики на рис.3 позволяют определять производительность установки по твердому материалу в зависимости от скорости потока, диаметра трубопровода и концентрации твердого по массе.

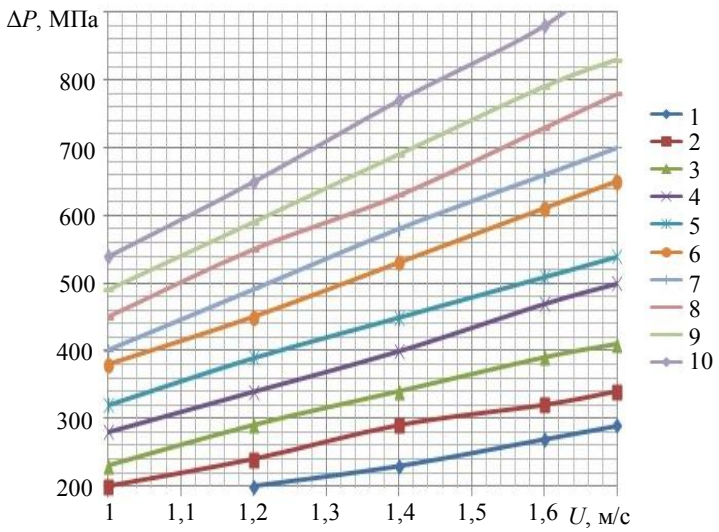


Рис.6. Производительность установки по твердому в зависимости от скорости, диаметра и концентрации гидросмеси: (25 % – кривые 1-5; 30 % – 6-10)

В качестве альтернативного варианта в данной работе предлагается самотечно-напорная схема гидротранспорта, в которой пульпа на конечную отметку трассы (58 м) подается за счет перепада высоты [4, 5]. Таким образом, пункт питания должен быть на 32 м (2 м для запаса) выше конца трубопровода, т.е. на отметке 90 м. На начальном участке трассы длиной 300 м и перепадом высоты 33 м необходимо применить каскадную систему [1]. Угол наклона желобов не должен превышать 1,5 %.

Выводы

В настоящее время нет общепринятой и в достаточной степени обоснованной и подтвержденной экспериментально единой методики расчета гидравлических сопротивлений, возникающих при движении вязкопластичных гидросмесей.

Предложенный метод расчета на основе реологического уравнения Шведова – Бингама требует внесения соответствующих корректив, основанных на экспериментальных исследованиях.

Основной прием для определения гидравлического сопротивления заключается в замене истинного реологического закона течения эмпирической формулой, близкой к экспериментальной кривой течения конкретной гидросмеси.

На основании приведенных исследований реологических свойств лимонитовой гидросмеси выдвинута рабочая гипотеза, заключающаяся в том, что в зависимости от концентрации и скорости в потоке можно выделить три зоны со следующими режимами движения: структурный, переходной и турбулентный. На основе этой гипотезы разработана физическая модель процесса движения лимонитовой тонкодисперсной гидросмеси и дано ее математическое описание.

Выполненные исследования позволили:

• получить зависимость для определения коэффициента гидравлических сопротивлений при движении потока гидросмеси в структурном режиме;

• получить формулы для определения потерь напора при движения вязкопластичной гидросмеси в турбулентном режиме по горизонтальному трубопроводам;

• определить наибольший угол наклона пульпопроводов, транспортирующих лимонитовую гидросмесь, который равен 25 град.

Практические рекомендации заключаются в разработанных методиках расчета параметров гидротранспортной установки лимонитовой гидросмеси в турбулентном и структурном режимах, которые позволяют получить более обоснованные и точные результаты.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Дмитриев Г.П.* Напорные гидротранспортные системы / Г.П.Дмитриев, Л.И.Махарадзе, Т.Ш.Гогиташвили. М.: Недра, 1991. 304 с.

2. *Джунусов И.* Исследование процессов перемешивания и гидротранспорта структурированных гидросмесей хвостов обогащения: Автореф. дис…канд. техн. наук / СПГГУ. СПб, 2001. 20 с.

3. *Докукин В.П.* Повышение эффективности эксплуатации систем трубопроводного транспорта / СПГГИ (ТУ). СПб, 2005. 84 с.

4. *Мануэль Вега Альмагер*. Обоснование технологической схемы и параметров комплекса для транспортирования высококонцентрированной гидросмеси на латеритовых карьерах (Республика Куба): Автореф. дис…канд. техн. наук / СПГГИ (ТУ). СПб, 2006. 220 с.

5. *Рауль Искьердо Пупо*. Исследование параметров и разработка рациональных режимов гидротранспорта латеритов применительно к условиям комбината им. Педро Сото Альба: Автореф. дис…канд. техн. наук / Ленинградский горный институт им Г.В.Плеханова. Л., 1989. 18 с.

6. *Смолдырев А.Е.* Трубопроводный транспорт концентрированных гидросмесей / А.Б.Смолдырев, Ю.К.Сафонов. М.: Машиностроение, 1989. 255 с.

7. *Фрисман М.Л.* Реология щелоко-сульфатных смесей. М.: Наука, 1980. 182 с.

8. *Ялтанец И.М*. Гидромеханизация / И.М.Ялтанец, В.К.Егоров. М.: Изд-во МГУ, 1999. 335 с.

9. *Jzquiedo P.R*. Comportamiento geologico de la pulpa lateritica a bajos gradients de velocidad // Revista. Mineria y Geologia. 1989. N 2. P.5-20.

Авторы: **Рауль Искьердо Пупо,** *доктор*, *профессор*, *radoizq@gmail.com* (*Горно-металлургический институт*, *Моа*, *Республика Куба*), **Альберто Турро Брефф,** *доктор*, *профессор*, *ректор*, *aturrob@cug.co.cu* (*Университет Гуантанамо*, *Гуантанамо*, *Республика Куба*).

Статья принята к публикации 29.11.2016.