

УДК [622:531/533:65.011.8].001.3

Семененко Е.В., д-р техн. наук, ст. науч. сотр.
(ИГТМ НАН Украины)

Никифорова Н.А., канд. техн. наук, доцент
(НМетАУ МОН Украины)

Татарко Л.Г., канд. техн. наук
(УГХТУ МОН Украины)

Скосырев В.Г., канд. техн. наук, доцент
(ПГТУ МОН Украины)

ВЫБОР ОПТИМАЛЬНОЙ ФУНКЦИИ ДЛЯ АППРОКСИМАЦИИ РАСХОДНО-НАПОРНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЦЕНТРОБЕЖНЫХ НАСОСОВ ГИДРОТРАНСПОРТНЫХ КОМПЛЕКСОВ

Семененко Є.В., д-р техн. наук, ст. наук. співр.
(ІГТМ НАН України)

Никифорова Н.А., канд. техн. наук, доцент
(НМетАУ МОН України)

Татарко Л.Г., канд. техн. наук
(УДХТУ МОН України)

Скосирєв В.Г., канд. техн. наук, доцент
(ПДТУ МОН України)

ВИБІР ОПТИМАЛЬНОЇ ФУНКЦІЇ ДЛЯ АПРОКСИМАЦІЇ ВИТРАТНО- НАПІРНОЇ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВІДЦЕНТРОВИХ НАСОСІВ ГІДРОТРАНСПОРТНИХ КОМПЛЕКСІВ

Semenenko Ye.V., D.Sc. (Tech.), Senior Researcher
(IGTM NAS of Ukraine)

Nikiforova N.A., Ph.D (Tech.), Associate Professor
(NMetAU MES of Ukraine)

Tatarko L. G., Ph.D (Tech.), M.S (Tech.)
(USUCT MES of Ukraine)

Skosyrev V.G., Ph.D (Tech.), Associate Professor
(PSTU MES of Ukraine)

CHOOSING OF OPTIMAL FUNCTION FOR APPROXIMATION OF DISCHARGE-HEAD CHARACTERISTIC OF CENTRIFUGAL PUMPS FOR HYDROTRANSPORT COMPLEXES

Аннотация. В работе предложен усовершенствованный метод расчета параметров гидротранспорта, обобщенный на случаи гидротранспортирования по трубам, изготовленным из различных материалов, а также гидротранспорта в присутствии гидродинамически активных веществ. Эти методы считаются наиболее перспективными для снижения гидравлического сопротивления трения и обеспечения за счет этого повышения рабочих концентраций гидросмеси или удлинения трубопровода гидротранспортного комплекса без установки дополнительных насосов.

Этот метод без потери точности расчетов может использоваться для аналитических исследований параметров и режимов работы гидротранспорта. Традиционные трудности определения рабочей точки системы устраняются в предлагаемом методе расчета за счет специально разработанной аппроксимации расходно-напорной характеристики насосов центробежного типа, что позволяет получить аналитическую оценку искомого решения.

Ключевые слова: параметры гидротранспорта, полимерные трубы, гидродинамически активные вещества, центробежные насосы, расходно-напорная характеристика.

Замена стальных труб на полиэтиленовые или введение в жидкую фазу гидросмеси гидродинамически активных веществ в современных условиях являются наиболее перспективными методами снижения энергоемкости систем напорного гидротранспорта горных предприятий [1-4]. Оба эти метода позволяют снизить гидравлическое сопротивление трения и за счет этого обеспечить повышение рабочих концентраций гидросмеси или удлинение трубопровода гидротранспортной системы без установки дополнительных насосов. Однако оба метода имеют ограниченный опыт использования в условиях горных предприятий, что в первую очередь обусловлено отсутствием методов определения параметров и режимов гидротранспорта. Специалистами ИГТМ им. Н.С. Полякова НАН Украины на основе анализа более 20 методик расчета критической скорости и гидравлического уклона при течении суспензий были модернизированы две методики, реализующие монофракционный и полифракционный подходы к описанию свойств транспортируемого материала. Были также выполнены исследования режимов напорного гидротранспорта по полиэтиленовым трубам и гидротранспорту в присутствии гидродинамически активных веществ [5-7]. Это позволило повысить достоверность расчетов. Однако расчеты по вновь предложенным методикам усложнились, поскольку степенной закон, использованный при разработке метода для описания зависимости коэффициента гидравлического трения от числа Рейнольдса, ограничивает прикладное использование методик, так как значения показателя степени и коэффициента пропорциональности для него не всегда приводятся в справочной литературе. Этот же закон сделал существенно нелинейным уравнение для определения рабочей точки системы при работе насосов на сеть, что в ряде случаев не позволяет использовать ранее применявшиеся расчетные методики. Данное препятствие отчасти преодолимо при поверочных и оценочных расчетах, однако вызывает значительные затруднения при аналитических исследованиях режимов работы гидротранспортных систем и обосновании эффективных скоростей и концентраций пульпы.

Опыт этих исследований позволил в данной работе предложить усовершенствованную методику расчета параметров гидротранспорта, обобщенную на случаи гидротранспорта по трубам, изготовленным из различных материалов, а также гидротранспорта в присутствии гидродинамически активных веществ. Эта методика без потери точности расчетов может использоваться для аналитических исследований параметров и режимов работы гидротранспорта. При этом трудности, существовавшие при определении рабочей точки системы, устраняются за счет специально разработанной аппроксимации расходно-

напорной характеристики насосов центробежного типа, что позволяет получить аналитическую оценку искомого решения.

При монофракционном подходе транспортируемый материал рассматривается как состоящий из частиц одинаковой крупности и плотности. В качестве значений этих параметров принимаются средневзвешенные значения соответствующих величин. Обобщая случаи гидротранспорта по трубам, изготовленных из различных материалов, а также гидротранспорта в присутствии гидродинамически активных веществ, в рамках монофракционного подхода гидравлический уклон в наклонных и горизонтальных трубопроводах предлагается рассчитывать по следующим формулам:

$$\frac{i}{\bar{\rho} i_0^{kp}} = k^{2-p} + \frac{\sigma}{k}, \quad (1)$$

$$k = \frac{V}{V_{kp}}, \quad i_0^{kp} = \frac{N \nu^p}{2gD^{1+p}} V_{kp}^{2-p}, \quad \sigma = \bar{\rho}^{1.5} \left(1 + 150 \frac{d}{D} \right) \cos \varphi,$$

$$V_{kp} = 10,1 \sqrt[3]{g \nu} \sqrt[4]{\frac{w}{\sqrt{gd}}} \Phi - 0,4 \sqrt[3]{\frac{D}{\Delta}} \cos \varphi,$$

где i – гидравлический уклон гидросмеси, м вод. ст./м; $\bar{\rho}$ – относительная плотность гидросмеси; i_0^{kp} – гидравлический уклон воды при течении в критическом режиме м вод. ст./м; k – коэффициент гидротранспортирования, $1 < k < 3$; σ – коэффициент, учитывающий угол наклона трубопровода; p – показатель степени в зависимости коэффициента гидравлического трения от числа Рейнольдса, $0 < p < 2$ [2 – 4]; V – скорость гидросмеси м/с; V_{kp} – критическая скорость потока, м/с [2, 6, 7]; N – коэффициент пропорциональности в зависимости коэффициента гидравлического трения от числа Рейнольдса [4 – 7]; ν – кинематический коэффициент вязкости воды, м²/с; g – ускорение свободного падения, м/с²; D – диаметр трубопровода, м; d – средневзвешенный диаметр частиц твердой фазы м; φ – угол наклона трубопровода; Δ – шероховатость внутренней стенки трубопровода, м; w – средневзвешенная гидравлическая крупность частиц твердой фазы, м/с.

Подставив выражение (1) в формулу для расчета расходно-напорной характеристики магистрали, и приравняв его расходно-напорной характеристике используемых насосов, получим уравнение для расчета рабочей точки рассматриваемой системы. Если расходно-напорную характеристику насосов аппроксимируют квадратичной параболой, не содержащей линейного слагаемого, то уравнение для расчета рабочей точки имеет следующий вид:

$$\sigma_{\alpha} k^3 + k^{3-p} - \sigma_0 k + \sigma = 0, \quad (2)$$

$$\sigma_0 = \frac{\gamma - \bar{\rho}Z}{\bar{\rho}k_z Li_0^{kp}}, \quad \sigma'_{\alpha} = \frac{\alpha Q_{kp}^2}{\bar{\rho}k_z Li_0^{kp}}, \quad Q_{kp} = \frac{\pi D_H^2}{4} V_{kp},$$

где γ – фиктивный напор насоса при нулевой подаче, м вод. ст.; Z – геодезический перепад высот начала и конца магистрали, м; k_z – коэффициент, учитывающий местные гидравлические сопротивления; L – длина магистрали, м; α – коэффициент снижения напора насоса; Q_{kp} – подача насоса, через напорный патрубок в критическом режиме течения м³/с; D_H – диаметр напорного патрубка насоса, м.

Как нетрудно видеть, уравнение (2) является существенно нелинейным, и его решение может быть найдено только численно. При этом нелинейность уравнения (2) обусловлена слагаемым со степенью p . Если для аппроксимации расходно-напорной характеристики насосов использовать параболу более высокого порядка, сохранив при этом отсутствие линейного слагаемого, то вместо уравнения (2) получим

$$k^{3-p} + \sigma_{\alpha} k^{q+1} - \sigma_0 k + \sigma = 0, \quad (3)$$

$$\sigma_{\alpha} = \frac{\alpha Q_{kp}^q}{\bar{\rho}k_z Li_0^{kp}},$$

где q – показатель степени в функции для аппроксимации расходно-напорной характеристики насосов.

Уравнение (3) также является существенно нелинейным, однако выбором величины q

$$q = 2 - p, \quad (4)$$

его можно свести к каноническому виду для кубического уравнения

$$X + \sigma_{\alpha} \bar{k}^{3-p} - \sigma_0 k + \sigma = 0, \quad (5)$$

которое заменой переменных преобразуется к уравнению с двумя параметрами

$$X^{3-p} - \theta X + 1 = 0, \quad (6)$$

$$X = \sqrt[3-p]{\frac{1 + \sigma_{\alpha} k}{\sigma}}, \quad \theta = \frac{\sigma_0}{\sqrt[3-p]{1 + \sigma_{\alpha} \sigma^z}}, \quad z = \frac{2-p}{3-p}.$$

Вещественные корни уравнения (6) существуют при выполнении следующего ограничения на величину θ :

$$\theta \geq \theta_*, \quad (7)$$

$$\theta_* = \frac{3-p}{2-p}, \quad X_* = 2^{-p} \sqrt{\frac{\theta}{3-p}},$$

где θ_* – минимально допустимое значение величины θ ; X_* – значение величины X , при котором достигается минимум выражения (6).

При выполнении условия (7) вещественные корни уравнения (6) можно определить так:

$$\frac{X}{X_*} = \begin{cases} 0,849 \left(\frac{\theta_*}{\theta} \right)^{1,658} & X < X_*, \\ 1,217 \left(\frac{\theta}{\theta_*} \right)^{0,147} & X > X_*. \end{cases} \quad (8)$$

При полифракционном подходе транспортируемый материал разбивается на несколько фракций, для частиц каждой из которых характерны различные способы перемещения по трубопроводу. Фракции рассматриваются как состоящие из частиц одинаковой крупности и плотности, в качестве которых принимаются усредненные по фракции значения соответствующих величин. Обобщая случаи гидротранспорта по трубам, изготовленным из различных материалов, а также гидротранспорта в присутствии гидродинамически активных веществ, в рамках полифракционного подхода гидравлический уклон в наклонных и горизонтальных трубопроводах предлагается рассчитывать по следующим формулам:

$$i = J_A k^{2-p} + J_B k^{-\left(1-\frac{p}{2}\right)} + C, \quad (9)$$

$$J_A = i_0^{kp} A, \quad J_B = \frac{B}{\sqrt{i_0^{kp}}}, \quad A = 1 + ER_1,$$

$$B = \frac{0,35 w_2 E}{\sqrt{2 g d_2}} R_2 \cos \varphi, \quad C = f E R_3 \cos \varphi, \quad E = \frac{\varphi - 1}{1 + \varphi - 1} \frac{SR_1}{SR_1} S,$$

$$V_{kp} = 4,43 \sqrt{B} + 1,47 \sqrt{C} \sqrt{g D \cos \varphi},$$

где S – объемная концентрация гидросмеси, доли единицы; R_1 – массовая доля частиц диаметром менее 0,15 мм в транспортируемом материале; R_2 – массовая доля частиц диаметром более 0,15 мм но менее 2 мм в транспортируемом материале; R_3 – массовая доля частиц диаметром более 2 мм в транспортируемом материале; d_2 – средневзвешенная крупность частиц диаметром более 0,15 мм, но менее 2 мм, м; w_2 – гидравлическая крупность частиц диаметром более 0,15 мм но менее 2 мм, м/с; f – обобщенный коэффициент трения частиц диаметром более 2 мм.

При использовании выражения (9) и условия (4) уравнение (5) преобразуется к уравнению

$$J_A + J_Q k^{-3\left(1-\frac{p}{2}\right)} - J_0 k^{1-\frac{p}{2}} + J_B = 0,$$

которое после подстановки

$$k = \left(\frac{J_B}{J_A + J_Q} \right)^{\frac{2}{3\left(1-\frac{p}{2}\right)}} x^{\frac{2}{2-p}}$$

приводится к кубическому уравнению канонического вида

$$x^3 - \Omega x + 1 = 0, \tag{10}$$

$$\Omega = \frac{J_0}{\sqrt[3]{J_A + J_Q} \sqrt[3]{J_B^2}}, \quad J_0 = \frac{\gamma - \bar{\rho}Z}{k_z L} - C, \quad J_Q = \frac{\alpha Q_{kp}^q}{k_z L}.$$

Решение уравнения (10) может быть получено аналитически с использованием формулы Кардано. При этом нетрудно показать, что вещественные корни рассматриваемого уравнения существуют только при отрицательных значениях дискриминанта, когда выполняется условие

$$\Omega > 3\sqrt{\frac{27}{4}}. \tag{11}$$

При выполнении условия (11) уравнение (10) имеет два вещественных положительных корня, которые определяются по следующим формулам:

$$k = \left(\frac{4}{3} \frac{J_0}{\sqrt[3]{J_A + J_Q} \sqrt[3]{J_B^2}} \right)^{\frac{1}{2-p}} \mu'^{\frac{2}{2-p}} \Omega^{-1}, \tag{12}$$

$$\mu' \Omega \equiv \begin{cases} \frac{\sqrt{3}}{2} \sin \frac{\beta}{3} - \frac{1}{2} \cos \frac{\beta}{3} \\ \cos \frac{\beta}{3} \end{cases}, \quad \beta = \arccos \left(-\sqrt{\frac{27}{4\Omega^3}} \right).$$

Если транспортируемый материал не содержит частиц мелкого класса, то вместо формулы (12) необходимо использовать следующее выражение:

$$k = 2^{-p} \sqrt{\frac{J_0}{J_A + J_Q}}. \quad (13)$$

Таким образом, из формул (8), (12) и (13) видно, что предлагаемый метод аппроксимации расходно-напорной характеристики насосов с учетом показателя степени в зависимости коэффициента гидравлического сопротивления трения от числа Рейнольдса

$$H = \gamma - \alpha Q^{2-p} \quad (14)$$

позволяет получить аналитическое решение нелинейных уравнений, которые до этого решались только численно. Для строгого обоснования этого метода необходимо оценить точность предлагаемой аппроксимации хотя бы по сравнению с традиционной аппроксимацией параболой второго порядка. Для примера была выполнена аппроксимация расходно-напорной характеристики насоса GIW WBC 54 (HD) при частоте вращения рабочего колеса 550 об/мин [1, 5] для различных значений величины p по формуле (14) методом наименьших квадратов (табл. 1).

Из анализа результатов расчетов (табл. 1) видно, что максимальная относительная разность напоров при различных значениях величины p не превышает 2%. Это вполне удовлетворительная точность гидравлических расчетов для систем трубопроводного транспорта горных предприятий.

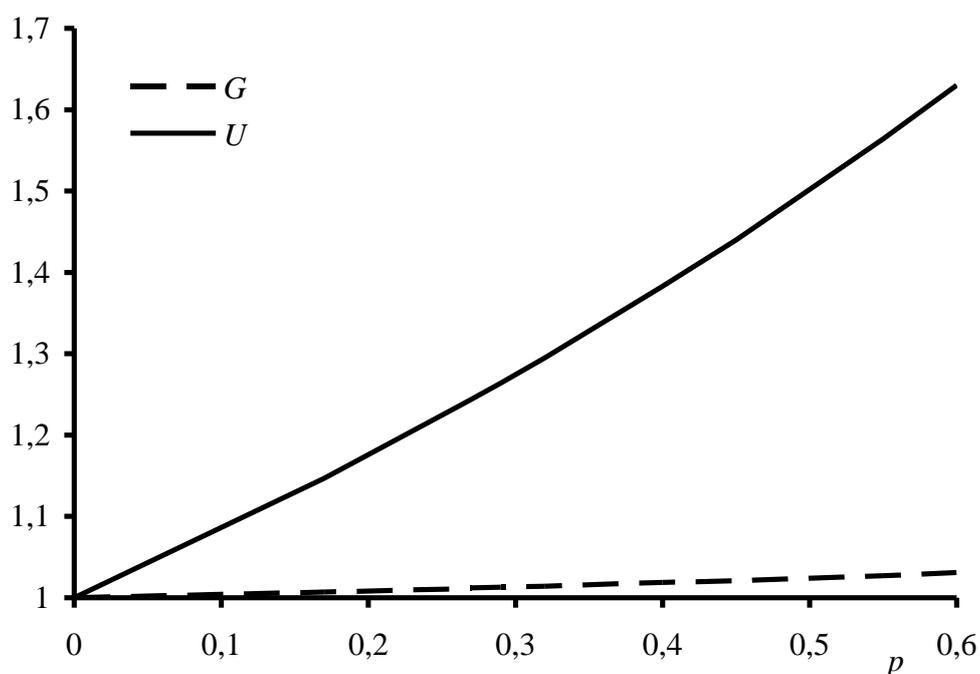
Анализ значений коэффициентов аппроксимации из формулы (14) при различных значениях величины p указывает на слабую зависимость от этой величины фиктивного напора при нулевой подаче и более сильную зависимость коэффициента снижения напора. Для рассматриваемых расчетов удобным является представление зависимости этих величин от значений p и их значений при $p = 0$ в следующем виде (рис. 1):

$$\gamma_p = G\gamma_0, \quad \alpha_p = U\alpha_0,$$

$$G = 1 + 0,0381p + 0,0215p^2, \quad U = 1 + 0,7781p + 0,4477p^2,$$

Таблиця 1 – Аппроксимация расходно-напорной характеристики насоса GIW WBC 54 (HD) при частоте вращения рабочего колеса 550 об/мин

Подача, м ³ /с	Напор, м в. ст.	Значения величины p								
		0	0,17	0,26	0,27	0,29	0,32	0,40	0,55	0,60
0,000	107,2	104,3	105,1	105,5	105,6	105,7	105,8	106,3	107,2	107,5
0,139	106,4	104,2	104,8	105,2	105,3	105,3	105,5	105,8	106,5	106,7
0,278	104,8	103,7	104,2	104,5	104,5	104,6	104,7	104,9	105,3	105,4
0,417	103,2	103,0	103,3	103,4	103,4	103,4	103,5	103,6	103,7	103,8
0,556	101,6	101,9	102,0	102,0	102,0	102,0	102,0	102,0	101,9	101,9
0,694	100,8	100,5	100,4	100,4	100,3	100,3	100,3	100,2	99,9	99,8
0,833	97,6	98,8	98,6	98,4	98,4	98,4	98,3	98,1	97,7	97,6
0,972	95,2	96,9	96,5	96,2	96,2	96,2	96,1	95,8	95,3	95,2
1,111	92,8	94,6	94,1	93,8	93,8	93,7	93,6	93,3	92,8	92,6
1,250	90,4	92,0	91,5	91,2	91,1	91,0	90,9	90,7	90,1	89,9
1,389	88,0	89,1	88,6	88,3	88,2	88,2	88,1	87,8	87,3	87,1
1,528	84,8	85,9	85,4	85,1	85,1	85,1	85,0	84,8	84,4	84,2
1,667	81,6	82,4	82,0	81,8	81,8	81,8	81,7	81,5	81,3	81,2
1,806	78,4	78,6	78,4	78,3	78,3	78,2	78,2	78,2	78,1	78,1
1,944	74,4	74,5	74,5	74,5	74,5	74,5	74,6	74,6	74,8	74,9
2,083	71,2	70,0	70,4	70,6	70,6	70,6	70,7	70,9	71,4	71,5
2,222	67,2	65,3	66,0	66,4	66,4	66,5	66,7	67,1	67,9	68,1

Рисунок 1 – Зависимость величин поправочных коэффициентов G и U от параметра p

где γ_p – фиктивный напор при нулевой подаче для произвольного значения p ; G – поправочный коэффициент фиктивного напора при нулевой подаче; γ_0 – фиктивный напор при нулевой подаче для $p = 0$; α_p – коэффициент снижения напора для произвольного значения p ; U – поправочный коэффициент для величины α_p ; α_0 – коэффициент снижения напора при $p = 0$.

Поскольку степенная зависимость коэффициента гидравлического сопротивления трения от числа Рейнольдса справедлива и для трубопроводных систем, транспортирующих воду или однородные жидкости другого типа, то предлагаемая методика имеет перспективу использования не только для гидротранспортных систем горных предприятий.

Выводы: Впервые предложен универсальный метод расчета параметров гидротранспорта, обобщенный на случаи гидротранспорта по трубам, изготовленным из различных материалов, а также гидротранспорта в присутствии гидродинамически активных веществ. Этот метод без потери точности расчетов может использоваться для аналитических исследований параметров и режимов работы гидротранспорта. Традиционные трудности, существовавшие при определении рабочей точки системы, в предлагаемом методе обходятся за счет специально разработанной аппроксимации расходно-напорной характеристики насосов центробежного типа, что позволяет получить аналитическую оценку искомого решения для наиболее перспективных путей снижения гидравлического сопротивления трения трубопровода магистрали.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Обоснование параметров и режимов работы систем гидротранспорта горных предприятий / Ю.Д. Баранов, Б.А. Блюсс, Е.В. Семененко, В.Д. Шурьгин. – Д.: Новая идеология, 2006. – 416 с.
2. Семененко, Е.В. Научные основы технологий гидромеханизации открытой разработки титанцирконовых россыпей. – К.: Наукова думка, 2011. – 231 с.
3. Никифорова, Н.А. Обоснование параметров процесса гидротранспортирования минерального сырья с использованием гидродинамически активных веществ: дис. ... канд. техн. наук: 05.15.09: защищена 17.10.08, утв. 03.12.08 / Никифорова, Н.А. – Днепропетровск: ИГТМ НАНУ, 2008. – 306 с.
4. Швабауэр, В. Расчет гидравлических потерь давления в трубопроводе из пластмасс / В. Швабауэр, И. Гвоздев, М. Гориловский // Полимерные трубы. Украина. – 2006. – №1(1). – С. 46 – 52.
5. Semenenko, Ye. An improved procedure of hydrotransport parameters' calculation for flows in polyethylene pipes and with friction reducing agents / Ye. Semenenko, N. Nykyforova, L. Tatarko // 17th International Conference on Transport and Sedimentation of Solid Particles, September, 22 – 25, 2015. – Delft, The Netherlands: Sieca Repro. – P. 300 – 308.
6. Семененко, Е.В. Расчет режимов работы гидротранспортных комплексов с магистралями, состоящими из участков полиэтиленовых и стальных труб / Е.В. Семененко, Н.А. Никифорова, Л.Г. Татарко // Геотехническая механика. – Днепропетровск, 2013. – Вып. 111. – С. 140 – 152.
7. Татарко, Л.Г. Обґрунтування параметрів процесу гідротранспортування мінеральної сировини по магістралях із сталевих і полімерних труб: дис. ... канд. техн. наук: 05.15.09: захищена 16.12.16, затв. 28.02.17 / Татарко, Л.Г. – Дніпро: ІГТМ НАН України, 2016. – 172 с.

REFERENCES

1. Baranov, Yu.D., Blyuss, B.A., Semenenko, Eu.V. and Shuryigin, V.D. (2006) *Obosnovanie parametrov i rezhimov raboty sistem gidrotransporta gornyih predpriyatiy* [Substantiation of Parameters and Operating Regimes of Hydrotransport Systems of Delfts], Novaya ideologiya, Dnepropetrovsk, Ukraine.
2. Semenenko, Ye.V. (2011), *Nauchnyye osnovy tehnologiy gidromehanizatsii otkrytoy razrabotki titan-*

tsirkonoviyh rossypey [Scientific foundation of hydromechanization technologies of quarry operation of titanium-zirconium placers], Naukova dumka, Kiev, Ukraine.

3. Nikiforova, N.A. (2008), Substantiation of parameters of hydrotransportation process of minerals with using of drag reducing agents, Ph.D. Thesis, Geotechnical and mining mechanics, M.S. Poljakov Institute of Geotechnical Mechanics under NAS of Ukraine, Dnepropetrovsk, Ukraine.

4. Shvabauer, V., Gvozdev, I. and Gorilovskiy, M. (2006) "Calculation of hydraulic pressure loss in plastic pipeline", *Polimernyye trubyy. Ukraina*, no 1(1), pp. 46 – 52.

5. Semenenko, E., Nykyforova, N. and Tatarko, L. (2015), "An improved procedure of hydrotransport parameters' calculation for flows in polyethylene pipes and with friction reducing agents", 17th International Conference on Transport and Sedimentation of Solid Particles, Delft University of Technology, Delft, The Netherlands, pp. 300 – 308.

6. Semenenko, Eu.V., Nykyforova, N.A., Tatarko, L.G. (2013), "Calculation of operating modes of hydrotransport complexes with main pipelines composed of polyethylene and steel pipes sections", *Geo-Technical Mechanics*, no. 111, pp. 140-152.

7. Tatarko, L.G. (2016), Substantiation of parameters of mineral raw materials hydrotransportation process through pipelines from steel and polymeric pipes, Ph.D. Thesis, Geotechnical and mining mechanics, M.S. Poljakov Institute of Geotechnical Mechanics under NAS of Ukraine, Dnipro, Ukraine.

Об авторах

Семененко Евгений Владимирович, доктор технических наук, старший научный сотрудник, заведующий отделом проблем шахтных энергетических комплексов, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова Национальной академии наук Украины (ИГТМ им. Н.С. Полякова НАН Украины), Днепр, Украина, evs_post@meta.ua

Никифорова Нина Анатольевна, кандидат технических наук, доцент, доцент на кафедре теории металлургических процессов и химии, Национальная металлургическая академия (НМетАУ) Министерства образования и науки Украины, Днепр, Украина, e-mail. ninanik@ua.fm

Татарко Лариса Гавриловна, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры физики, Украинский государственный химико-технологический университет (УГХТУ) Министерства образования и науки Украины, Днепр, Украина, larisa.tatarko@gmail.com

Скосырев Виктор Георгиевич, кандидат технических наук, доцент на кафедре электрификации промышленных предприятий, Приазовский государственный технический университет (ПГТУ) Министерства образования и науки Украины, Мариуполь, Украина, evs_post@meta.ua

About the authors

Semenenko Yevgeniy Vladimirovich, Doctor of Technical Sciences (D. Sc), Senior Researcher, Head of the Department of Mine Energy Complexes, M.S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics under the National Academy of Science of Ukraine (N.S. Polyakov IGTM NASU), Dnepr, e-mail. evs_post@meta.ua

Nikiforova Nina Anatolyevna, Candidate of Technical Sciences (Ph.D.), Associate Professor, Associate Professor in the Department of Theory of Metallurgical Processes and Chemistry, National Metallurgical Academy of Ukraine (NMetAU) under the Ministry of Education and Science of Ukraine, Dnepr, Ukraine, e-mail. ninanik@ua.fm

Tatarko Larisa Gavrilovna, Candidate of Technical Sciences (Ph.D.), Senior Lecturer in the Department of Physics, Ukrainian State University of Chemical Technology (USUCT) under the Ministry of Education and Science of Ukraine, Dnepr, Ukraine, larisa.tatarko@gmail.com

Skosyrev Viktor Georgiyevich, Candidate of Technical Sciences (Ph.D.), Associate Professor in the Department of Electrification of Industrial Enterprises, Priazovsky State Technical University (PSTU) under the Ministry of Education and Science of Ukraine, Mariupol, Ukraine, e-mail. evs_post@meta.ua

Анотація. У роботі запропоновано вдосконалений метод розрахунку параметрів гідротранспорту, узагальнений на випадки гідротранспорту по трубах, виготовлених з різних матеріалів, а також гідротранспорту в присутності гідродинамічно активних речовин. Ці методи вважаються найбільш перспективними для зниження гідравлічного опору тертя і забезпечення за рахунок цього підвищення робочих концентрацій гідросуміші або подовження трубопроводу гідротранспортного комплексу без установки додаткових насосів. Цей метод без втрати точності розрахунків може використовуватися для аналітичних

досліджень параметрів і режимів роботи гідротранспорту. Традиційні труднощі визначення робочої точки системи усуваються в пропонованому методі розрахунку за рахунок спеціально розробленої апроксимації витратно-напірної характеристики насосів відцентрового типу, що дозволяє отримати аналітичну оцінку шуканого розв'язку.

Ключові слова: параметри гідротранспорту, полімерні труби, гідродинамічно активні речовини, відцентрові насоси, витратно-напірна характеристика.

Annotation. The improved method of calculation of hydrotransport parameters is suggested, which is generalized for the tubular hydrotransport with pipes made of different materials and hydrotransport with friction reducing agents. Both methods are considered as the most promising for hydraulic resistance reduction and make slurry thickening or plant pipeline elongation possible without installation of additional pumps. This method without loss of calculation accuracy can be used in analytical research of parameters and operating modes of the hydrotransport. With this method, traditional difficulties in determining the system operating point can be avoid due to specially elaborated approximation of discharge-head characteristic of centrifugal pumps, and it is possible to get analytical estimation of desired solution.

Keywords: hydrotransport parameters, polymeric pipes, friction reducing agents, centrifugal pumps, discharge-head characteristic.

Стаття поступила в редакцію 30.11.2017

Рекомендовано к печати д-ром техн. наук В.П. Надутым