

МЕТОДИКА РАСЧЕТА РЕЖИМОВ РАБОТЫ МОДЕРНИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ НАПОРНОГО ТРУБОПРОВОДНОГО ТРАНСПОРТА

Е.В. Семененко, С.Н. Киричко, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова НАН Украины

Н.А. Никифорова, Национальная металлургическая академия Украины

Л.Г. Татарко, Украинский государственный химико-технологический университет

Предлагается усовершенствованная методика расчета режимов и параметров гидротранспорта по горизонтальным и наклонным трубопроводам, изготовленным из различных материалов, а также в присутствии гидродинамически активных веществ в широком диапазоне концентраций гидросмеси. Использование степенного закона для описания зависимости коэффициента гидравлического трения от числа Рейнольдса при аппроксимации расходно-напорной характеристик насосов позволило получить уравнения для определения рабочей точки гидротранспортной системы, имеющие аналитическое решение.

В современных условиях наиболее перспективными методами снижения энергоемкости систем напорного гидротранспорта на горных предприятиях являются замена стальных труб на полиэтиленовые, введение в жидкую фазу гидросмеси слабых растворов гидродинамически активных веществ или сгущение гидросмеси до состояния пасты. Эффективность этих методов обоснована теоретически, однако их использование в условиях горных предприятий ограничивается отсутствием методов определения параметров и режимов работы гидротранспорта. Специалистами ИГТМ НАН Украины на основе анализа более 20 методик расчета критической скорости и гидравлического уклона при течении суспензий различной концентрации для повышения достоверности расчетов были модернизированы две методики, реализующие монофракционный и полифракционный подходы к описанию свойств транспортируемого материала для гидросмесей низкой и средней концентрации, а также выполнены исследования режимов напорного гидротранспорта по полиэтиленовым трубам, гидротранспорта в присутствии гидродинамически активных веществ и гидротранспорта суспензий высокой концентрации. 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 применяемые 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, в широком диапазоне концентраций, 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, преодолеваются за счет специально разработанной аппроксимации расходно-напорной характеристики (РНХ) 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, изготовленным из различных материалов, а также гидротранспорта в присутствии гидродинамически активных веществ, в рамках монофракционного подхода гидравлический уклон в наклонных и горизонтальных трубопроводах при течении гидросмесей низкой и средней концентраций предлагается рассчитывать по следующим формулам:

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

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

где i – гидравлический уклон гидросмеси, м вод. ст. /м; $\bar{\rho}$ – относительная плотность гидросмеси; i_0 – 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, $0 < p < 2$; V – фактическая скорость гидросмеси, м/с; V_{kp} – критическая скорость гидротранспортирования, м/с; N – коэффициент пропорциональности в зависимости коэффициента гидравлического трения от числа Рейнольдса; v – кинематический коэффициент вязкости жидкой фазы, м²/с; g – ускорение свободного падения, м/с²; D – диаметр трубопровода, м; d – средневзвешенный диаметр частиц твердой фазы, м; φ – угол наклона трубопровода.

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

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

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

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.

Уравнение (2) является существенно нелинейным, и его решение может быть найдено только численным методом. При этом нелинейность уравнения (2) обусловлена слагаемым со степенью, содержащей p . Если для аппроксимации РНХ насосов использовать параболу дробного 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 РНХ насосов.

Уравнение (3) также существенно нелинейно, однако специальным выбором величины q

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

его можно свести каноническому виду для кубического уравнения

$$(1 + \sigma_\alpha)k^{3-p} - \sigma_0 k + \sigma = 0, \quad (5)$$

а затем заменой переменных преобразовать к уравнению с двумя параметрами

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

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

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

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

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

где θ_* – минимальное значение величины θ ; X_* – значение величины X , при котором достигается минимум θ .

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 три фракции (содержащие тонкие, мелкие и кусковые частицы соответственно), для частиц каждой из которых характерны разные 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 при течении гидросмесей низкой и средней концентраций гидравлический уклон в наклонных и горизонтальных трубопроводах предлагается рассчитывать по следующим формулам:

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

$$J_A = (1 + ER_1)j_0, \quad J_B = \frac{R_2}{\sqrt{j_0}} \frac{0,35w_2 E}{\sqrt{2gd_2}}, \quad C = fER_3, \quad E = \frac{(\bar{\rho} - 1)(1 - SR_1)}{1 + (\bar{\rho} - 1)SR_1} S,$$

где S – объемная концентрация гидросмеси, доли ед.; R_1 – массовая доля в транспортируемом материале частиц тонких фракций (диаметром менее 0,15 мм), доли ед.; R_2 – массовая доля в транспортируемом материале частиц мелких фракций (диаметром более 0,15 мм и менее 2 мм), доли ед.; R_3 – массовая доля в транспортируемом материале

частиц кусковых фракций (диаметром более 2 мм), доли ед.; w_2 – гидравлическая крупность частиц мелких фракций, м/с; d_2 – средневзвешенный диаметр крупность частиц мелких фракций, м; f – обобщенный коэффициент трения частиц кусковых фракций о стенку трубопровода.

При использовании выражения (9) и условия (4) уравнение (5) преобразуется к следующему виду:

$$(J_A + J_Q)k^{3\left(1-\frac{p}{2}\right)} - J_0k^{1-\frac{p}{2}} + J_B = 0,$$

а после подстановки

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

приводится к кубическому уравнению канонического вида

$$x^3 - \Omega x + 1 = 0, \quad (10)$$

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

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

$$\Omega > \sqrt[3]{\frac{27}{4}}. \quad (11)$$

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

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

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

Если транспортируемый материал не содержит частиц мелкого класса, то существует один вещественный положительный корень

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

При гидротранспортировании суспензий высокой концентрации в турбулентном режиме течения гидравлический уклон рекомендуется рассчитывать по формуле

$$i = \theta \varphi^{\frac{15}{8}},$$

подстановка которой в уравнение для определения рабочей точки системы при выборе показателя степени в аппроксимации РНХ насосов в виде

$$q = \frac{15}{8},$$

позволяет получить следующее нелинейное уравнение:

$$(k_z L \theta + \theta_Q) \wp^{\frac{15}{8}} - (\gamma - \bar{\rho} Z) = 0, \quad (14)$$

$$\theta = \frac{0,0105}{\rho_0 g} \left(\frac{\tilde{\rho}^7 D^6 \tilde{\tau}_0^{15}}{\tilde{\eta}^{14}} \right)^{\frac{1}{8}}, \quad \theta_Q = \alpha \left(\frac{5\pi D^3 \tilde{\tau}_0}{4\tilde{\eta}} \right)^{\frac{15}{8}}, \quad \wp = \frac{\tilde{\eta} V D}{5\tilde{\tau}_0},$$

$$\tilde{\rho} = \beta \rho, \quad \tilde{\eta} = \beta \eta, \quad \tilde{\tau}_0 = \alpha \tau_0,$$

где ρ_0 – плотность жидкой фазы гидросмеси кг/м³; ρ – плотность гидросмеси, кг/м³; β , α – коэффициенты аппроксимации решения полного уравнения Букингама; η – динамический коэффициент вязкости гидросмеси, Па·с; τ_0 – начальное касательное напряжение, Па.

Уравнение (14) нелинейно, однако его единственный вещественный положительный корень аналитически определяется по формуле

$$\wp = \left(\frac{\gamma - \bar{\rho} Z}{k_z L \theta + \theta_Q} \right)^{\frac{8}{15}}. \quad (15)$$

Таким образом, из формул (8), (12), (13) и (15) видно, что предлагаемый метод аппроксимации РНХ насосов с учетом показателя степени в зависимости коэффициента гидравлического сопротивления трения от числа Рейнольдса

$$H = \gamma - \alpha Q^{2-p}, \quad (16)$$

позволяет получить аналитическое решение нелинейных уравнений, которые до этого решались только численно. Строгое обоснование этого метода требует оценки точности предлагаемой аппроксимации хотя бы по сравнению с традиционной аппроксимацией параболой второго порядка. Для примера была выполнена аппроксимация РНХ насоса GIW WBC 54 (HD) при частоте вращения рабочего колеса 550 об/мин по данным для различных значений величины P с использованием формулы (16) 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 удовлетворяет требованиям к точности гидравлических расчетов для систем трубопроводного транспорта горных предприятий.

Анализ значений коэффициентов аппроксимации из формулы (16) 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:

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

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

где γ_p – фиктивный напор при нулевой подаче для произвольного значения P , м вод. ст.; G – поправочный коэффициент фиктивного напора при нулевой подаче; γ_0 – фиктивный напор при нулевой подаче для $p=0$, м вод. ст.; α_p – коэффициент снижения напора для

произвольного значения p ; U – поправочный коэффициент для величины α_p ; α_0 – коэффициент снижения напора для $p = 0$.

Таблица 1 – Результаты аппроксимации РНХ насоса GIW WBC 54 (HD) при частоте вращения рабочего колеса 550 об/мин

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

Зависимость величин поправочных коэффициентов G и U от параметра p показана на рис. 1.

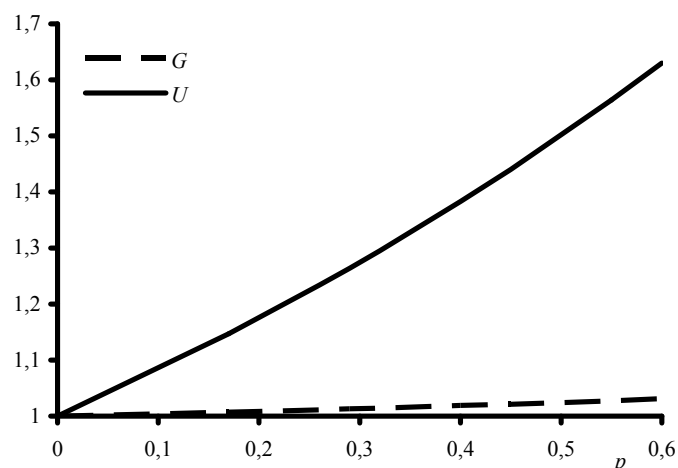


Рис. 1 – Зависимость величин поправочных коэффициентов G и U от параметра p

Выводы

1. Предложенная аппроксимация расходно-напорной характеристики насосов параболой с дробным показателем степени с использованием показателя степени в зависимости коэффициента гидравлического трения от числа Рейнольдса позволила получить канонические кубические уравнения для определения рабочей точки гидротранспортной системы, имеющие аналитические решения.

2. Предложенная усовершенствованная методика позволяет производить расчеты режимов и параметров гидротранспорта по горизонтальным и наклонным трубопроводам, изготовленным из различных материалов, в присутствии гидродинамически активных веществ и без них в широком диапазоне концентраций.

3. Предложенная методика без потери точности расчетов может быть использована для аналитических исследований параметров и режимов работы современных систем гидротранспорта на горных предприятиях.

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

Список литературы

1 Булат, А.Ф. Модели элементов гидротехнических систем горных предприятий / А.Ф. Булат, О.В. Витушко, Е.В. Семененко. – Днепропетровск: Герда, 2010. – 216 с.

2 Семененко, Е.В. Научные основы технологий гидромеханизации открытой разработки титан-цирконовых россыпей / Е.В. Семененко. – К.: Наукова думка, 2011. – 231 с.

3 Обоснование параметров и режимов работы систем гидротранспорта горных предприятий / Ю.Д. Баранов, Б.А. Блюсс, Е.В. Семененко, В.Д. Шурыгин. – Д.: Новая идеология, 2006. – 416 с.

4 Шурыгин, В.Д. Анализ способов повышения эффективности работы гидротранспортного комплекса / В.Д. Шурыгин, Е.В. Семененко, Н.А. Никифорова // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2005. – № 6. – С. 70 – 74.

5 Семененко, Е.В. Расчет параметров гидротранспорта при использовании полиэтиленовых трубопроводов / Е.В. Семененко, Л.Г. Татарко // *Геотехническая механика: Межвед. сб. науч. тр. // ИГТМ НАН Украины*. – Днепропетровск, 2012. – Вып. 107. – С. 233 – 244.

6 Швабауэр, В. Расчет гидравлических потерь давления в трубопроводе из пластмасс / В. Швабауэр, И. Гвоздев, М. Горилловский // *Полимерные трубы. Украина*. – 2006. – №1(1). – С. 46 – 52.

7 Добромыслов, А.Я. Таблицы для гидравлических расчетов трубопроводов из полимерных материалов / А.Я. Добромыслов. – М.: Изд-во ВНИИМП, 2004. – 209 с.

8 Семененко Е.В. Реологические параметры высококонцентрированных отходов обогащения ЦГОКа // Е.В. Семененко, С.Н. Киричко, А.Б. Ртищев // *Матеріали міжнародної конференції «Форум гірників – 2014»*. – Т. 1. – С. 177 – 183.

ЗАВИСИМОСТЬ РЕОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СТРУКТУРИРОВАННЫХ СУСПЕНЗИЙ ОТ СВОЙСТВ ЖИДКОЙ ФАЗЫ

*Е.В. Семененко, Т.Д. Демченко, С.А. Рыжова, Институт геотехнической механики
им. Н.С. Полякова НАН Украины*

Проанализированы известные формулы, описывающие влияние основных свойств жидкой фазы на эффективную вязкость и начальное касательное напряжение угольных структурированных суспензий. Впервые предложена формула для пересчета эффективной вязкости структурированных суспензий при изменении водородного показателя жидкой фазы. Показано, что влияние на начальное касательное напряжение структурированных суспензий концентрации и зольности твердой фазы является не существенным по сравнению с влиянием водородного показателя жидкой фазы.

Внедрение технологий переработки минерального сырья, основанных на применении структурированных суспензии (СС), считаются одним из перспективных направлений развития геотехнологических систем. Использование СС позволяет существенно снизить удельное водопотребление и энергоемкость технологий переработки первичного и техногенного