

РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ГИДРОТРАНСПОРТА ОТХОДОВ ОБОГАЩЕНИЯ В ПОЛИЭТИЛЕНОВЫХ ТРУБАХ

¹Семененко Е.В., ²Криль С.И., ³Татарко Л.Г.

¹Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова НАН Украины, ²Институт гидромеханики НАН Украины, ³ГВУЗ «Украинский государственный химико-технологический университет»

РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ ГІДРОТРАНСПОРТУ ВІДХОДІВ ЗБАГАЧЕННЯ В ПОЛІЕТИЛЕНОВИХ ТРУБАХ

¹Семененко Є.В., ²Криль С.І., ³Татарко Л.Г.

¹Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України, ²Інститут гідромеханіки НАН України, ³ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет»

CALCULATION OF THE PARAMETERS OF THE HYDRAULIC TRANSPORT OF ENRICHMENT WASTE IN POLY-ETHYLENE PIPES

¹Semenenko Ye.V., ²Kril S.I., ³Tatarko L.G.

¹Institute of Geotechnical Mechanics by M.S. Poliakov NAS of Ukraine, ²Institute of Hydromechanics of NAS of Ukraine, ³SHEI "Ukrainian State University of Chemical Technology"

Аннотация. В статье обоснован метод расчета гидравлического уклона и критической скорости гидротранспортирования отходов обогащения железных руд в полиэтиленовых трубопроводах основанный на «Методике расчета гидротранспортных установок для транспорта и намыва хвостов железорудных ГОКов», которая была утверждена Госстроем УССР во «Временных указаниях по технологии возведения намывных хвостохранилищ горно-обогатительных комбинатов» и использовалась при проектировании всех хранилищ отходов Криворожских горно-обогатительных комбинатов. Показано, что экспериментальный множитель в формуле для расчета критической скорости гидротранспортирования и учитывающий условия проводимых экспериментов, содержит зависимость от диаметра трубопровода, ускорения свободного падения, кинематического коэффициента вязкости воды и абсолютной шероховатости внутренней поверхности трубы. Учет этих факторов сделал эмпирическую константу в рассматриваемой формуле безразмерной и близкой по величине к среднему значению констант из формул, предлагаемых в других сходных методиках. Доказано, что в рассматриваемой методике экспериментальная константа в формуле для расчета критической скорости гидротранспортирования обратно пропорциональна корню кубическому из шероховатости внутренней поверхности трубопровода, при этом коэффициент пропорциональности является универсальной константой, не зависящей от свойств материала трубопровода и равной 10,1. Таким образом, при определении критической скорости гидротранспортирования в полимерных трубах по данной методике необходимо значения критической скорости для стальной трубы аналогичного диаметра умножить на корень кубический из соотношения шероховатостей внутренних поверхностей стального и полимерного трубопровода. Показано, что величина гидравлического уклона существенно зависит от режимного коэффициента, показывающего во сколько раз коэффициент гидравлического сопротивления трения в полиэтиленовой трубе при сверхкритическом режиме течения превосходит аналогичное значение в критическом режиме для этой же трубы. Это позволило через величину абсолютной шероховатости внутренней поверхности трубопровода предложить формулы пересчета гидравлического уклона и критической скорости гидротранспортирования отходов обогащения железных руд в полиэтиленовых трубопроводах на основе зависимостей, полученных для стальных труб.

Ключевые слова: отходы обогащения железных руд, гидравлический уклон, критическая скорость гидротранспортирования, полиэтиленовые трубопроводы, метод расчета.

Дальнейшее повышение эффективности горно-обогатительных комбинатов (ГОК) Криворожского железорудного бассейна (Кривбасса) невозможно без замены части трубопроводов гидротранспортных установок на полиэтиленовые (ПЭ), с перспективой полного отказа от стальных труб.

Трубопроводы из полиэтилена по сравнению с трубами из стали более легкие, более износостойкие, долговечные, устойчивы к воздействию гидроудара, не подвержены коррозии, обладают меньшим гидравлическим сопротивлением и экологически безопасны. Ценовой фактор, в существующих экономических условиях, не является сдерживающим, поскольку в большинстве случаев цена стальной и полиэтиленовой трубы практически одинакова. Однако отсутствуют методы расчета гидравлического уклона и критической скорости гидротранспортирования отходов обогащения железных руд по полиэтиленовым трубопроводам, что сдерживает полномасштабное внедрение этих трубопроводов. Ряд отечественных ГОКов практиковали применение полиэтиленовых труб для гидротранспортных систем [1–6]. Так Вольногорский горно-металлургический комбинат (ВГМК) применяет эти трубы для доставки исходных песков из карьеров на обогатительную фабрику [1–5], а ООО «ВЕЛТА» использует их в установках гидротранспорта для отвода отходов обогащения [6]. Однако оба эти предприятия используют полиэтиленовые трубы для гидротранспорта материалов, гранулометрический состав и плотность которых, существенно отличаются от отходов обогащения железных руд. Для таких материалов характерно использование методики А.Е. Смолдырева, для которых методы расчета параметров гидротранспорта в полиэтиленовых трубах уже существуют [1, 4], в то время как для отходов железорудных ГОКов характерно использование «Методики расчета гидротранспортных установок для транспорта и намыва хвостов железорудных ГОКов», разработанной С.Г. Коберником и В.И. Войтенко и приведенной во «Временных указаниях по технологии возведения намывных хвостохранилищ горно-обогатительных комбинатов», утвержденных Госстроем СССР [7–11]. Для этой методики рекомендации относительно пересчета параметров гидротранспорта на случай применения полиэтиленовых труб отсутствуют.

Целью статьи является обоснование метода расчета параметров гидротранспорта отходов обогащения железных руд в полиэтиленовых трубах на основе методических рекомендаций С.Г. Коберника и В.И. Войтенко.

В отличие от методики А.Е. Смолдырева, разработанной для рядовых углей и в последующем адаптированной для рудных россыпей, в методике С.Г. Коберника и В.И. Войтенко для расчета критической скорости гидротранспортирования рекомендует использовать уточненную формулу А.П. Юфина, в которой множитель «15» является экспериментальной константой:

$$V_{kp} = \begin{cases} 15 \sqrt[3]{D} \sqrt[4]{w} \left(\frac{\rho}{\rho_0} - 0,4 \right), & \frac{\rho}{\rho_0} < 1,25 \\ 12,75 \sqrt[4]{w} \sqrt[3]{\frac{D}{C} \frac{1250 - \rho_0}{\rho_T - \rho_0} \frac{\rho_T}{1250}}, & \frac{\rho}{\rho_0} \geq 1,25 \end{cases}, \quad i = i_0 \left(1 + \frac{\lambda'_{kp}}{\lambda'_0} \sigma \frac{V_{kp}^3}{V^3} \right), \quad (1)$$

$$i_0 = \frac{\lambda_0 V^2}{2gD}, \quad \sigma = \left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^{1,5} \left(1 + 150 \frac{d_{cp}}{D} \right) - 1, \quad \rho = \frac{1}{\frac{1-C}{\rho_0} + \frac{C}{\rho_T}}, \quad (2)$$

где $V_{кр}$ – критическая скорость гидротранспортирования, м/с; C – массовая концентрация, д. ед.; ρ_T – плотность транспортируемого материала, кг/м³; w – гидравлическая крупность, м/с; λ_0 – коэффициент гидравлического сопротивления при движении жидкости; V – средняя расходная скорость гидросмеси; D – диаметр трубопровода, м.

Результаты анализа схожих формул для расчета критической скорости [8 – 14], полученных эмпирическим путем (табл. 1), показывают, что рассматриваемая экспериментальная константа зависит от относительной шероховатости трубопровода. При этом, как можно заключить из табл. 1, значение экспериментальной константы обратно пропорционально кубическому корню из рассматриваемой величины, а следовательно при переходе на полиэтиленовые трубы, которые характеризуются меньшей шероховатостью, чем стальные, критическая скорость должна увеличиваться.

Таблица 1 – Формулы для расчета критической скорости, полученные экспериментально

Метод получения	Зависимость	Источник
Транспортирование однородных материалов крупностью от 0.5 до 10 мм	$V_{кр} = 9,8 \sqrt[3]{D} \sqrt[4]{w} \left(\frac{\rho}{\rho_0} - 0,4 \right)$	[9, 12–14]
Анализ в безразмерных величинах экспериментальных исследований разных авторов	$V_{кр} = 9 \sqrt[3]{\left(\frac{\rho_T}{\rho_0} - 1 \right)} g v \sqrt[6]{\frac{wC}{\sqrt{gd_{cp}}}} \sqrt[3]{\frac{D}{\Delta}}$	[12]
Анализ графических зависимостей критической скорости от диаметра трубопровода и свойств твердых частиц	$V_{кр} = 11 \sqrt[3]{g v} \frac{\sqrt[6]{C}}{\sqrt[10]{\delta}} \sqrt[4]{\frac{w}{\sqrt{gd_{cp}}}} \sqrt[3]{\frac{D}{\Delta}}$	[11]
Численная обработка результатов лабораторных экспериментов	$V_{кр} = 15 \sqrt[3]{D} \sqrt[4]{w} \left(\frac{\rho}{\rho_0} - 0,4 \right)$	[8, 10]

Примечание. В таблице использованы следующие обозначения: Δ – абсолютная шероховатость внутренней поверхности трубы, м; v – кинематический коэффициент вязкости воды; δ – коэффициент неоднородности гранулометрического состава.

Анализ размерностей величин, входящих в формулы из табл. 1, показывает, что в формулах А.П. Юфина, С.Г. Коберника и В.И. Войтенко эмпирическая константа имеет размерность. Это означает, что в ее значении содержится множитель, учитывающий условия проводимых экспериментов. Можно предположить, что диаметр трубопровода под корнем третьей степени умножался на ускорение свободного падения и на кинематический коэффициент вязкости воды и делился на абсолютную шероховатость внутренней поверхности трубы. Кроме этого, гидравлическая крупность транспортируемого материала, стоящая под корнем четвертой степени, была поделена на корень квадратный из произведения ускорения свободного падения и диаметра твердых частиц. После учета этих предположений эмпирические константы в рассматриваемых формулах становятся безразмерными и близкими по значению к среднему значению констант из оставшихся формул (табл. 2).

Таблица 2 – Истинные значения эмпирических констант в формуле для расчета критической скорости

Автор и источник	Абсолютная шероховатость трубопровода, мкм	Эмпирическая константа
А.П. Юфин [9, 13 – 15]	20	10,149
Коберник-Войтенко [8, 10]	30	10,243
ИГМ НАН Украины [11, 12]	150	10,000
Среднее значение		10,131
Стандартное отклонение		0,123
Коэффициент вариации, %		1,21

Полученные таким образом значения эмпирических констант являются истинными значениями, поскольку не зависят от условий проводимых экспериментов. Учитывая низкий коэффициент вариации для полученной выборки эмпирических констант, можно рекомендовать их среднее значение к использованию в формулах для расчета критической скорости (табл. 3).

Таблица 3 – Уточненные формулы для расчета критической скорости, полученные экспериментально

Зависимость	Источник
$V_{кр} = 10,1 \sqrt[3]{g\nu} \sqrt[4]{\frac{w}{\sqrt{gd_{cp}}}} \left(\frac{\rho}{\rho_0} - 0,4 \right) \sqrt[3]{\frac{D}{\Delta}}$	[9, 13–15]
$V_{кр} = 10,1 \sqrt[3]{\left(\frac{\rho_T}{\rho_0} - 1 \right) g\nu} \sqrt[6]{\frac{wC}{\sqrt{gd_{cp}}}} \sqrt[3]{\frac{D}{\Delta}}$	[12]
$V_{кр} = 10,1 \sqrt[3]{g\nu} \frac{\sqrt[6]{C}}{\sqrt[10]{\delta}} \sqrt[4]{\frac{w}{\sqrt{gd_{cp}}}} \sqrt[3]{\frac{D}{\Delta}}$	[11]
$V_{кр} = 10,1 \sqrt[3]{g\nu} \sqrt[4]{\frac{w}{\sqrt{gd_{cp}}}} \left(\frac{\rho}{\rho_0} - 0,4 \right) \sqrt[3]{\frac{D}{\Delta}}$	[8, 10]

Таким образом, при использовании методик расчета однотипных с методикой Коберника-Войтенко для определения параметров гидротранспорта в полиэтиленовых трубах, можно рекомендовать следующие зависимости:

$$i = i_0 \left(1 + q' \sigma \frac{V_{кр}^3}{V^3} \frac{\Delta}{\Delta'} \right), \quad V'_{кр} = V_{кр} \sqrt[3]{\frac{\Delta}{\Delta'}}, \quad q' = \frac{\lambda'_{кр}}{\lambda'_0}, \quad (3)$$

где $V'_{кр}$ – критическая скорость в полиэтиленовой трубе, м/с; $V_{кр}$ – критическая скорость в стальной трубе по данной методике, м/с; q' – режимный коэффициент; Δ – абсолютная шероховатость внутренней поверхности стальной трубы, м; Δ' – абсолютная шероховатость внутренней поверхности полиэтиленовой трубы, м.

Из приведенных формул видно, что окончательный вид зависимостей для определения параметров гидротранспорта в полиэтиленовых трубах зависит от

соотношения коэффициентов гидравлических сопротивлений в стальных и полиэтиленовых трубах, а также от выбранного закона зависимости коэффициента гидравлического сопротивления трения для полиэтиленовых труб от числа Рейнольдса. В методике Коберника-Войтенко это учитывает режимный коэффициент (3), равный отношению коэффициента гидравлического сопротивления трения в полиэтиленовых трубах при критическом режиме к коэффициенту гидравлического сопротивления трения в этих же трубах при сверхкритическом режиме течения.

Согласно рекомендациям ISO TR 10501 [15 – 17] при гидравлических расчетах полиэтиленовых труб для вычисления λ'_w используют логарифмический или степенной законы:

$$\lambda = \frac{a}{(\lg \text{Re} - b_{\Delta})^2}, \quad \lambda = \frac{A}{\text{Re}^B}, \quad (4)$$

где λ – коэффициент гидравлического сопротивления; A , B – коэффициент и показатель степени; a – константа; Re – число Рейнольдса; b_{Δ} – коэффициент, зависящий от абсолютной шероховатости внутренней поверхности трубопровода.

Этот подход применим и для стальных трубопроводов, однако не получил широкого распространения при гидравлических расчетах параметров гидротранспорта [1, 2, 7, 18–20]. Результаты численного анализа, показывают, что рассматриваемую зависимость режимного соотношения от Рейнольдса независимо от параметров закона сопротивления можно с инженерной точностью аппроксимировать следующей функцией:

$$q = \frac{36,742}{\ln\left(\frac{8,528 \cdot 10^{12}}{\text{Re}}\right)}. \quad (5)$$

Второй подход используется в СНиП 2.04.02-85, СП 40-102-2000 [15 – 17] и основан на определении параметров логарифмического закона зависимости коэффициента гидравлического трения от числа Рейнольдса для полиэтиленовых труб. Поскольку для стальных труб обоснована зависимость (4), в которой величина b_{Δ} определяется абсолютной шероховатостью внутренней поверхности трубопровода, то, установив эту зависимость и измерив шероховатость внутренней поверхности полиэтиленовых труб, можно получить логарифмическую зависимость для этих труб в следующем виде:

$$\lambda' = \frac{a}{(\lg \text{Re} - \beta b_{\Delta})^2}, \quad (6)$$

где β – коэффициент, учитывающий снижение шероховатости в полиэтиленовых трубах по сравнению со стальными, $0 \leq \beta \leq 1$.

Таким образом, сочетая в различных вариантах два имеющихся подхода, получим три возможных метода оценки диапазонов изменения величины режимного соотношения (табл. 4).

Таблица 4 – Возможные методы оценки диапазонов изменения величины режимного соотношения

Метод оценки	Тип закона для зависимости λ от Re	
	для стальных труб	для ПЭ труб
Смешанный	Логарифмический	Степенной
Степенной	Степенной	Степенной
Логарифмический	Логарифмический	Логарифмический

При использовании смешанного метода оценки, с учетом рекомендованных специалистами ИГМ НАН Украины величин параметров a и b , можно получить следующее выражение для определения режимного соотношения

$$q = \frac{0,3864 Re^B}{A \lg^2(0,1 Re)}, \quad (7)$$

которое позволяет оценить интервалы изменения параметра q в соответствующем диапазоне чисел Рейнольдса (табл. 5, 6).

Таблица 5 – Значения режимного соотношения, вычисленного по формуле (7), при различных параметрах зависимости от Re

lg Re	Значения q при различных параметрах			
	$A = 0,226,$ $B = 0,271$	$A = 0,24,$ $B = 0,273$	$A = 0,2,$ $B = 0,171$	$A = 0,25,$ $B = 0,316$
1	2	3	4	5
3,48	1,948	1,864	0,988	2,525
3,68	1,890	1,810	0,915	2,501
3,88	1,854	1,777	0,857	2,505
4,08	1,836	1,762	0,811	2,533
4,28	1,834	1,762	0,774	2,584
4,48	1,846	1,775	0,744	2,655
4,68	1,870	1,800	0,719	2,746
4,88	1,906	1,836	0,700	2,857
5,08	1,953	1,883	0,685	2,989
5,28	2,011	1,940	0,674	3,141
5,48	2,079	2,008	0,665	3,316
5,68	2,158	2,086	0,659	3,515
5,88	2,249	2,176	0,656	3,739
6,08	2,351	2,277	0,655	3,991
6,28	2,466	2,390	0,656	4,273
6,48	2,593	2,516	0,659	4,588
6,68	2,735	2,656	0,664	4,940
6,88	2,891	2,810	0,670	5,331

Продолжение табл. 5

1	2	3	4	5
7,08	3,063	2,980	0,678	5,767
Среднее значение	2,240	2,166	0,692	3,685
Стандартное отклонение	0,403	0,399	0,047	1,033
Коэффициент вариации, %	17,98	18,43	6,77	28,02

Таблица 6 – Значения коэффициентов, используемых для гидравлического расчета полимерных труб по различным методикам

№	Методика	Величина режимного соотношения		
		Средняя	Минимальная	Максимальная
1	СНиП 2.04.02-85	1.260	1.127	1.619
2	ISO TR 10501	1.218	1.110	1.508
3	ISO TR 10501	1.189	1.122	1.400
4	ИГТМ НАНУ	1.191	1.065	1.530

Применение логарифмического метода позволяет получить следующее выражение для режимного соотношения (рис. 1, табл. 7):

$$q = \left[1 + \frac{1 - \beta}{\lg(0,1Re)} \right]^2 \quad (8)$$

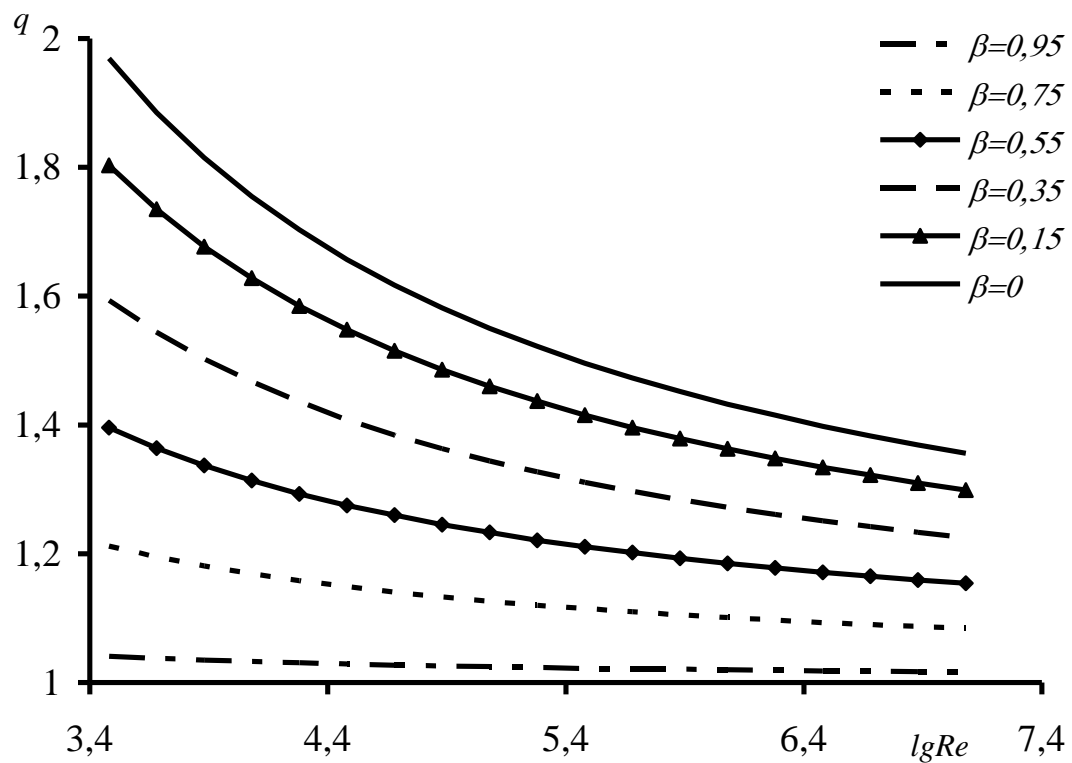


Рисунок 1 – Зависимость режимного соотношения, вычисленного по формуле (8), от логарифма числа Рейнольдса при различном значении β

Таблица 7 – Характеристика распределения величины q , вычисленной по формуле (8), в зависимости от β

Значение β	Среднее значение	Стандартное отклонение	Коэффициент вариации, %
0,950	1,023	0,005	0,49
0,85	1,070	0,015	1,45
0,75	1,117	0,026	2,36
0,65	1,166	0,038	3,24
0,55	1,216	0,049	4,09
0,45	1,267	0,062	4,89
0,35	1,319	0,075	5,68
0,25	1,372	0,088	6,43
0,15	1,427	0,102	7,15
0,05	1,482	0,116	7,85
0,00	1,510	0,124	8,19
Среднее значение	1,27		
Стандартное отклонение	0,167		
Коэффициент вариации, %	13,13		

Величина режимного коэффициента показывает во сколько раз коэффициент гидравлического сопротивления трения в полиэтиленовой трубе при сверхкритическом режиме течения превосходит аналогичное значение в критическом режиме для этой же трубы. С учетом этого для оценки диапазонов изменения режимного коэффициента недопустим смешанный метод, поэтому следует рассматривать степенной и логарифмический методы (табл. 4).

При степенном методе оценки, можно показать, что режимный коэффициент будет определяться по следующей формуле:

$$q' = \left(\frac{V}{V_{кр}} \right)^B \left(\frac{\Delta'}{\Delta} \right)^{\frac{B}{3}},$$

что позволяет уточнить зависимость для расчета гидравлического уклона при течении гидросмеси в полиэтиленовых трубах:

$$i' = i'_0 \left[1 + \sigma \left(\frac{\Delta}{\Delta'} \right)^{1-\frac{B}{3}} \left(\frac{V_{кр}}{V} \right)^{3-B} \right]. \quad (9)$$

При логарифмическом методе оценки, для расчета режимного коэффициента будем иметь:

$$q' = \left(\frac{\lg \text{Re} - \beta}{\lg \text{Re}_{кр} - \beta} \right)^2. \quad (10)$$

Представив число Рейнольдса в сверхкритическом режиме как произведение критического числа Рейнольдса на параметр гидротранспортирования [1, 2]

$$Re = k_V Re_{kp},$$

а также предполагая, что допустима следующая оценка критического числа Рейнольдса [14, 21]

$$Re_{kp} = 10^m,$$

выражение (10) можно преобразовать к следующему виду:

$$q' = \left(1 + \frac{\lg k_V}{m - \beta} \right)^2, \quad (11)$$

где k_V – параметр гидротранспортирования, показывающий во сколько раз фактическая скорость превышает критическое значение [1,2]; m – положительное число превосходящее 3,48.

Значение параметра гидротранспортирования изменяется от 1 до 3, поскольку при больших величинах процесс гидротранспортирования становится энергетически невыгодным. Анализ результатов расчетов по формуле (11) в характерных диапазонах изменения величин k_V , m и β указывает на слабую зависимость режимного коэффициента от параметра β (рис. 2).

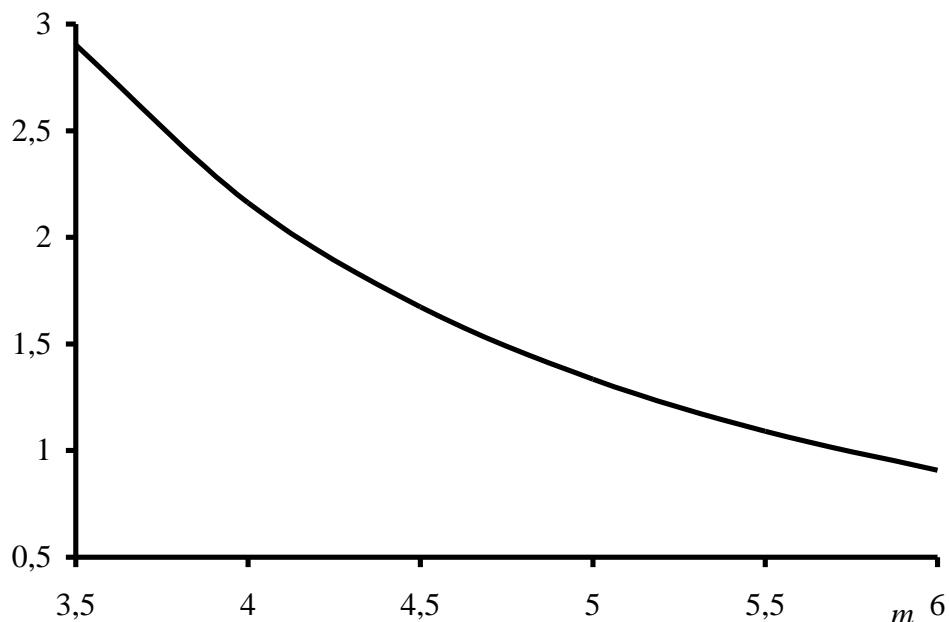


Рисунок 2 – Изменение коэффициента вариации величины q' , усредненного по параметру β , от порядка критического числа Рейнольдса

Зависимостью от этого параметра можно пренебречь при расчетах режимного параметра с точностью, не превышающей 3 %. Таким образом, величину q' можно рассматривать как функцией двух параметров – k_V и m (рис. 3):

$$q' = \frac{1,384}{m^{1,18}} \ln(0,987k_v).$$

При этом, зависимость величины q' от параметров k_v и m становится несущественной при проведении расчетов с инженерной точностью (рис. 4). Так, численная обработка результатов расчетов показывает, что с коэффициентом вариации 7,59 % в расчетах можно использовать следующее среднее значение режимного параметра $q' = 1,143 \pm 0,0868$, что позволяет уточнить зависимость для расчета гидравлического уклона при течении гидросмеси в полиэтиленовых трубах:

$$i' = i'_0 \left(1 + 1,15\sigma \frac{\Delta V_{kp}^3}{\Delta' V^3} \right). \tag{12}$$

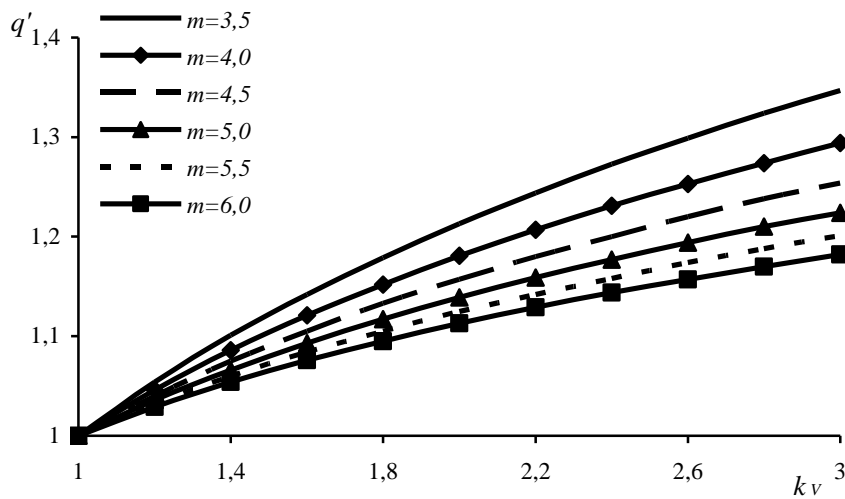


Рисунок 3 – Зависимость величины q' , усредненной по β , от k_v при различном порядке критического числа Рейнольдса

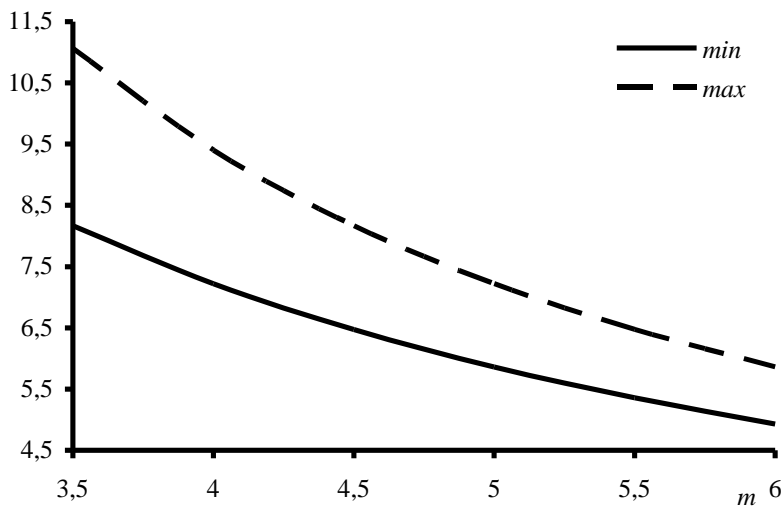


Рисунок 4 – Интервалы изменения коэффициента вариации величины q' , усредненной по параметру k_v , от порядка критического числа Рейнольдса

Выводы. Из представленного материала по теоретическому исследованию параметров гидротранспорта минерального сырья по полиэтиленовым трубам можно сделать следующие выводы.

В методиках А.П. Юфина, ИГМ НАН Украины и НИИСП ГОССТРОЯ УССР экспериментальная константа в формуле для расчета критической скорости гидротранспортирования обратно пропорциональна корню кубическому из шероховатости внутренней поверхности трубопровода, при этом коэффициент пропорциональности является универсальной константой, не зависящей от свойств материала трубопровода и равной 10,1.

При определении критической скорости гидротранспортирования в полимерных трубах по методикам А.П. Юфина, ИГМ НАН Украины и НИИСП необходимо значения критической скорости для стальной трубы аналогичного диаметра умножить на корень кубический из соотношения шероховатостей внутренних поверхностей стального и полимерного трубопровода.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Семененко Е.В. Научные основы технологий гидромеханизации открытой разработки титан-цирконовых россыпей. Киев: Наукова думка, 2011. 232 с.
2. Обоснование параметров и режимов работы систем гидротранспорта горных предприятий / Баранов Ю.Д., Блюсс Б.А., Семененко Е.В. и др. Днепропетровск: Новая идеология, 2006. 416 с.
3. Шурыгин В.Д., Семененко Е.В., Никифорова Н.А. Анализ способов повышения эффективности работы гидротранспортного комплекса. / *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2005. №6. С. 70 – 74.
4. Шурыгин В.Д., Семененко Е.В. Расчет параметров гидротранспортного комплекса при использовании полиэтиленовых труб. / *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2007. №2. С. 71 – 74.
5. Шурыгин В.Д., Семененко Е.В. Износ полиэтиленовых труб при гидротранспорте исходных песков Малышевского месторождения. / *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2007. №6. С. 90 – 93.
6. Татарко Л.Г. Обґрунтування параметрів процесу гідротранспортування мінеральної сировини по магістралях із сталевих і полімерних труб: Дис... кандидата технічних наук / Спец. 05.15.09; затв. 28.02.2017. ІГТМ НАНУ, 2016. 264 с.
7. Силин Н.А., Коберник С.Г. Режимы работы крупных землесосных снарядов и трубопроводов. К.: АН УССР, 1962. 138 с.
8. Коберник С.Г., Войтенко В.И. Напорный гидротранспорт хвостов горно-обогатительных комбинатов. К.: Наук. думка, 1967. 140 с.
9. Юфин, А.П. Гидромеханизация. М.: Стройиздат, 1965. 496 с.
10. Методика расчета гидротранспортных установок для транспорта и намыва хвостов железорудных ГОКов. К.: НИИСП Госстроя УССР, 1970. 64 с.
11. Войтенко В.И. Исследование параметров напорного гидротранспорта отходов и продуктов обогащения железорудных горно-обогатительных комбинатов: Автореф. дис. ... канд. техн. наук, К.: ИГМ АН УССР, 1967. 35 с.
12. Карасик В.М., Асауленко И.А. Напорный гидротранспорт песчаных материалов. К.: Наук. думка, 1966. 106 с.
13. Юфин А.П. Напорный гидротранспорт. М.: Госэнергоиздат, 1950. 136 с.
14. Михайлов К.А., Богомолов А.И. Гидравлика. Гидрология. Гидрометрия. М.: ГУШОСДОР МВД СССР, 1950. 288 с.
15. СНиП 2.04.01-85. Внутренний водопровод и канализация зданий. Госстрой СССР. Москва, 1985. 67 с.
16. СНиП 2.04.02-84. Водоснабжение. Наружные сети и сооружения. Госстрой СССР. Москва, 1984. 176 с.
17. Швабауэр В., Гвоздев И., Горилловский М. Расчет гидравлических потерь давления в трубопроводе из пластмасс./Полимерные трубы. 2006. №1(1). С. 46 – 52.
18. Гидротранспорт (вопросы гидравлики)/ Силин Н.А., Витошкин Ю.К., Карасик В.М. и др. К.: Наук. думка, 1971. 158 с.
19. Силин Н.А., Витошкин Ю.К. Гидротранспорт угля по трубам. К.: Наук. думка, 1964. 88 с.
20. Силин Н.А., Карасик В.М., Асауленко И.А. Проблема интенсификации гидротранспорта. К.: Наукова думка, 1973. 25с.
21. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. М.: Наука, 1978. 736 с.

REFERENCES

1. Semenenko, E.V. (2011), *Nauchnye osnovy tehnologiy gidromehanizatsii otkrytoy razrabotki titan-tsirkonovyh rossypey* [Scientific basis for the technology of hydromechanization of open development of titanium-zircon alluvial deposits], Naukova Dumka, Kyiv, Ukraine.
2. Baranov, Yu.D., Blyuss, B.A., Semenenko, E.V. and Shurygin, V.D. (2006), *Obosnovanie parametrov i rezhimov raboty sistem gidrotransporta gornyh predpriyatij* [Justification of the parameters and modes of operation of the systems of hydrotransport

mining], New Ideology, Dnipropetrovsk, Ukraine.

3 Shuryigin, V.D., Semenenko, E.V. and Nikiforova, N.A. (2005), «Analysis of ways to improve the efficiency of the hydrotransportation complex», *Metallurgical and mining industry*, no. 6, pp. 70-74

4 Shuryigin V.D. and Semenenko E.V. (2007), «Calculation of the parameters of the hydrotransportation complex using polyethylene pipes», *Metallurgical and mining industry*, no. 2, pp. 71-74

5 Shuryigin, V.D. and Semenenko, E.V. (2007), «Wear of polyethylene pipes during hydrotransport of the original sands of the Malyshevskoye field», *Metallurgical and mining industry*, no. 6, pp. 90-93

6 Tatarko, L.G. (2016). Obgruntuvannya parametriv protsesu gidrotransportuvannya mineralnoyi sirovini po magistralyah iz stalevih i pollmernih trub , Ph.D. dissertation, Geotechnical and mining mechanics, M.S. Poliakov Institute of Geotechnical Mechanics under the NAS of Ukraine, Dnipro, Ukraine.

7 Silin, N.A. and Kobernik, S.G. (1962), *Rezhimy raboty krupnykh zemlesosnykh snaryadov i truboprovodov* [Modes of operation of large dredgers and pipelines], Academy of Sciences of the Ukrainian SSR, Kyiv, SU.

8 Kobernik, S.G., Voytenko, V.I. (1967), *Napornyy gidrotransport hvostov gorno-obogatitelnykh kombinatov* [Pressure hydrotransportation of tailings of mining and processing plants], Naukova Dumka, Kyiv, SU.

9 Yufin, A.P. (1967), *Gidromehanizatsiya* [Hydromechanization], Gosenergoizdat, Moscow, SU.

10 NIISP Gosstroy Ukrainian SSR (1970), *Metodika rascheta gidrotransportnykh ustanovok dlya transporta i namyiva hvostov zhelezorudnykh GOKov* [Methodology for calculating hydrotransportation units for transport and reclamation of tailings of iron ore mining and processing enterprises], NIISP Gosstroy Ukrainian SSR, Kiev, SU.

11 Voytenko, V.I. (1967), *Issledovanie parametrov napornogo gidrotransporta othodov i produktov obogascheniya zhelezorudnykh gorno-obogatitelnykh kombinatov* [Investigation of the parameters of pressure hydrotransport of wastes and products of concentration of iron ore mining and processing plants], IGM AS , Ukrainian SSR, Kiev, SU.

12 Karasik, V.M. and Asaulenko, I.A. (1966), *Napornyy gidrotransport peschanykh materialov* [Pressure hydrotransport of sandy materials], Naukova Dumka, Kyiv, SU

13 Yufin, A.P. (1950), *Napornyy gidrotransport* [Pressure hydrotransport], Gosenergoizdat, Moscow, SU.

14 Mihaylov, K.A., Bogomolov, A.I. (1950), *Gidravlika. Gidrologiya. Gidrometriya* [Hydraulics. Hydrology. Hydrometry], GUSHOSDOR Ministry of Internal Affairs of the USSR, SU.

15 Gosstroy of the USSR (1985), SNiP 2.04.01-85: *Vnutrenniy vodoprovod i kanalizatsiya zdaniy* [Internal water supply and sewerage of buildings], Gosstroy of the USSR, Moscow, SU.

16 Gosstroy of the USSR (1984), SNiP 2.04.01-84: *Vodosnabzhenie. Naruzhnyie seti i sooruzheniya* [Water supply. External networks and facilities], Gosstroy of the USSR, Moscow, USSR.

17 Shvabauer, V., Gvozdev, I. and Gorilovskiy, M. (2006), "Calculation of hydraulic pressure losses in a plastic pipeline", *Polymer pipes*, no. 1(1). C. 46 – 52.

18 Silin, N.A., Vitoshkin, Yu.K., Karasik, V.M. and Ocheretko, V.F. (1971), *Gidrotransport (voprosy gidravliki)* [Hydrotransport (hydraulic issues)], Naukova Dumka, Kyiv, SU.

19 Silin, N.A. and Vitoshkin, Yu.K. (1964), *Gidrotransport uglya po trubam* [Hydrotransport of coal through pipes], Naukova Dumka, Kyiv, SU.

20 Silin, N.A., Karasik, V.M. and Asaulenko, I.A. (1973), *Problema intensifikatsii gidrotransporta* [The problem of intensification of hydrotransport], Naukova Dumka, Kyiv, SU.

21 Loytsyansky, L.G. (1987), *Mekhanika zhidkosti i gaza* [Mechanics of liquid and gas], Nauka, Moscow, SU.

Об авторах

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

Криль Степан Иванович, доктор технических наук, профессор, заведующий отделом гидродинамики гидротехнических сооружений Института гидромеханики Национальной академии наук (ИГМ НАН Украины), Киев, Украина, evs_igtm@i.ua

Татарко Лариса Гавриловна, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры энергетики ГВУЗ «Украинский государственный химико-технологический университет» (ГВУЗ «УГХТУ») Министерства образования и науки Украины, Днепр, Украина, larisa.tatarko@gmail.com

About the authors

Semenenko Yevhen Volodymyrovych, Doctor of Technical Sciences (D.Sc), Senior Researcher, Head of the Department of Problems of Mine Power Complexes, Institute of Geotechnical Mechanics by M.S. Poliakov under the National Academy of Sciences of Ukraine (IGTM, NAS of Ukraine), Dnipro, Ukraine, evs_igtm@i.ua

Kril Stepan Ivanovych, Doctor of Technical Sciences (D.Sc), Professor, Head of the Department of hydrodynamics waterworks, Institute of Hydromechanics of NAS Ukraine (IGM NAS of Ukraine), Kyiv, Ukraine, evs_igtm@i.ua

Tatarko Larysa Gavrylyvna, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Physics, Associate Professor of the Department of Energy, SHEI "Ukrainian State University of Chemical Technology" MES of Ukraine, Dnipro, Ukraine, larisa.tatarko@gmail.com.

Анотація. У статті обґрунтовано метод розрахунку гідравлічного ухилу і критичної швидкості гідротранспортування відходів збагачення залізних руд в поліетиленових трубопроводах, що заснований на «Методиці розрахунку гідротранспортних установок для транспорту і намиву хвостів залізородних ГЗК», яка була затверджена Держбудом УРСР у «Тимчасових вказівках щодо технології зведення намивних хвостосховищ гірничо-збагачувальних комбінатів » і використовувалася при проектуванні всіх сховищ відходів Криворізьких гірничо-збагачувальних комбінатів. Показано, що експериментальний множник у формулі для розрахунку критичної швидкості гідротранспортування, що враховує умови проведених експериментів, містить залежність від діаметра трубопроводу, прискорення вільного падіння, кінематичного коефіцієнта в'язкості води і абсолютної шорсткості внутрішньої поверхні труби. Урахування цих факторів робить емпіричну константу в розглянутій формулі безрозмірною і близькою за величиною до середнього значення констант з формул, що пропонуються в інших подібних методиках. Доведено, що в даній методиці експериментальна константа у формулі для розрахунку критичної швидкості гідротранспортування обернено пропорційна кореню кубічному з шорсткості внутрішньої поверхні трубопроводу, при цьому коефіцієнт пропорційності є універсальною константою, яка не залежить від властивостей матеріалу трубопроводу і дорівнює 10,1. Таким чином, при визначенні критичної швидкості гідротранспортування в полімерних трубах за даною методикою необхідно значення критичної швидкості для сталеві труби аналогічного діаметру помножити на корінь кубічний з співвідношення шорсткостей внутрішніх поверхонь сталевого і полімерного трубопроводу. Показано, що величина гідравлічного ухилу істотно залежить від режимного коефіцієнта, що показує у скільки разів коефіцієнт гідравлічного опору тертя в поліетиленовій трубі при зверх критичному режимі течії перевершує аналогічне значення в критичному режимі для цієї ж труби. Це дозволило через величину абсолютної шорсткості внутрішньої поверхні трубопроводу запропонувати формули перерахунку гідравлічного ухилу і критичної швидкості гідротранспортування відходів збагачення залізних руд в поліетиленових трубопроводах на основі залежностей, отриманих для сталевих труб.

Ключові слова: відходи збагачення залізних руд, гідравлічний ухил, критична швидкість гідротранспортування, поліетиленові трубопроводи, метод розрахунку

Annotation. In the article, a new method is presented for calculating hydraulic slope and critical speed of cleaning reject hydrotransportation through the polyethylene pipelines, which is based on the Methodology for Calculating Hydrotransport Plants for Tailings Transporting and Inwashing at the Iron Ore Mining and Processing Enterprises. This methodology was approved by the State Construction Committee of the Ukrainian SSR in its Temporary Instructions on Technology of the Tailing Dump Arrangement and was used in the design of all of the waste storage facilities in the Krivyy Rih ore-dressing and processing enterprises.

For the conditions of the experiments, it was shown that experimental multiplier in the formula for calculating critical speed of hydrotransportation was depended on the pipeline diameter, free fall acceleration, kinematic coefficient of water viscosity and absolute roughness of the pipe inner surface. The acknowledgement of these factors made an empirical constant in the considered formula dimensionless and close to average value of the constants in the formulas obtained by other similar methods. With the considered method, it is proved that experimental constant in the formula for calculating critical speed of hydrotransportation is inversely proportional to the cubic root of the roughness of the pipeline inner surface, while coefficient of proportionality is a universal constant, which does not depend on the properties of the pipeline material and is equal to 10.1. Therefore, for determining critical speed of hydrotransportation through the polymer pipes by using this method, it is necessary to multiply critical speed for steel pipe with a similar diameter by the cubic root of ratio of roughness of the inner surfaces of the steel and polymer pipelines. It is further shown that value of hydraulic slope significantly depends on the operating coefficient, which shows by how many times coefficient of friction hydraulic resistance in the polyethylene pipe operating in supercritical flow regime exceeds the same value in case of critical flow regime for the same pipe. The research results allowed finding formulas for calculating hydraulic slope and critical speed of the iron-ore cleaning reject hydrotransportation through the polyethylene pipelines, which are based on the dependencies obtained for the steel pipes and value of absolute roughness of the pipeline inner surface.

Key words: cleaning rejects, hydraulic slope, critical speed of hydrotransportation, polyethylene pipelines, calculation method.

Стаття надійшла до редакції 18.09. 2020

Рекомендовано до друку д-ром техн. наук В.П. Надутим