

---

---

УДК 622.648.01 – 9:621.643.29

**Семененко Е.В.**, д-р техн. наук, с.н.с.  
(ИГТМ НАН Украины)

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

**Татарко Л.Г.**, ст. преп.  
(УГХТУ МОН Украины)

**РАСЧЕТ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ГИДРОТРАНСПОРТНЫХ КОМПЛЕКСОВ  
С МАГИСТРАЛЯМИ, СОСТОЯЩИМИ ИЗ УЧАСТКОВ  
ПОЛИЭТИЛЕНОВЫХ И СТАЛЬНЫХ ТРУБ**

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

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

**Татарко Л.Г.**, ст. викл.  
(УДХТУ МОН України)

**РОЗРАХУНОК РЕЖИМІВ РОБОТИ ГИДРОТРАНСПОРТНИХ КОМПЛЕКСІВ  
З МАГІСТРАЛЯМИ, ЩО МІСТЯТЬ ЛАНКИ ПОЛІЕТИЛЕНОВИХ І  
СТАЛЄВИХ ТРУБ**

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

**Nykyforova N.A.**, Ph.D. (Tech), Assistant Professor  
(NMetAU of MES of Ukraine)

**Tatarko L. G.**, Senior Teacher  
(USU of Chemical Technology of MES of Ukraine)

**CALCULATION OF OPERATING MODES FOR HYDROTRANSPORT  
COMPLEXES WITH MAIN PIPELINES CONSISTING OF  
POLYETHYLENE AND STEEL PIPE SECTIONS**

**Аннотация.** Статья посвящена созданию методического обеспечения расчетов гидротранспортных систем с магистралями, состоящими из участков полиэтиленовых и стальных труб, которое позволяло бы определять не только расход пульпы, но и допустимую длину участка полиэтиленовой трубы, выдерживающей заданное давление. Целью статьи является разработка методики расчета параметров гидротранспорта и режимов работы установки, магистраль которой состоит из участков полиэтиленовых и стальных труб. Рассматриваемая методика расчета гидравлического уклона и критической скорости гидротранспортирования по полиэтиленовым трубам является адаптированным вариантом разработанной специалистами ИГТМ методики расчета параметров гидротранспорта полидисперсных материалов с различной плотностью частиц, которая впервые учитывает различие в законах сопротивления труб из разных материалов, а также наличие внутренних бортиков на швах полимерных труб. Режимы работы таких гидротранспортных установок предлагается определять из ре-

шения системы нелинейных уравнений, полученных с использованием уравнения Бернулли, одно из которых определяет рабочую точку системы, а второе – допустимую длину участка полиэтиленовой трубы. Предложены зависимости для расчета гидравлического уклона и критической скорости в стальных и полиэтиленовых трубах, учитывающие характеристики гидро-смеси, материал трубопровода, а также наличие на стыках полиэтиленовых труб внутренних бортиков сварных швов. С использованием этих зависимостей разработан метод расчета режимов работы гидротранспортных систем с магистралями, состоящими из участков полиэтиленовых и стальных труб, впервые позволяющий определять не только расход пульпы, но и допустимую длину участка полимерной трубы, выдерживающей заданное допустимое давление. Полученные научные результаты позволяют обосновать параметры магистрали и режимы работы гидротранспортных комплексов при их модернизации путем применения полиэтиленовых труб для монтажа всасывающих трубопроводов с целью повышения давления на входе в насос, а также для монтажа крайних участков напорного трубопровода с целью снижения суммарных потерь напора.

**Ключевые слова:** гидротранспорт, полиэтиленовые трубы, гидравлический уклон, критическая скорость

Успешная и эффективная эксплуатация гидротранспортных комплексов на горно-обогатительных комбинатах (ГОК) во многом обеспечивается своевременным ремонтом и техническим обслуживанием их магистралей, что подразумевает устранение прорывов, свищей, замену изношенных участков, а также периодический поворот участков труб вокруг продольной оси. До 2006 г. на отечественных ГОКах для монтажа магистралей гидротранспортных комплексов использовались исключительно стальные трубы [1, 2]. Эти трубопроводные сети оставались единственным сектором, в котором практически не применялись трубы, изготовленные из поливинилхлорида (ПВХ) и полиэтилена (ПЭ), несмотря на широкое и успешное их применение в водо- и газоснабжении. Ситуация изменилась после положительного опыта применения на гидротранспортном комплексе Вольногорского горно-металлургического комбината (ВГМК) ПЭ труб [1, 2]. Положительный опыт эксплуатации ПЭ труб на одном из отечественных ГОКов, а также их привлекательные экономические показатели сделали актуальной разработку методов расчета параметров гидротранспортных систем с трубопроводами, состоящими из участков ПЭ и стальных труб. Сейчас специалисты ГОКов охотно соглашались на использование этого типа труб, однако даже после внедрения ПЭ труб на нескольких ГОКах вопрос выбора их рациональных параметров остается нерешенным.

Рентабельность применения ПЭ труб в общем случае определяется двумя факторами – соотношением стоимости стальных и ПЭ труб, а также соотношением толщины стенок стальной и ПЭ труб, выдерживающих одинаковое давление. ПЭ трубы по сравнению со стальными трубами, рассчитанными на такое же рабочее давление, имеют большую толщину стенки. При увеличении рабочего давления увеличивается толщина стенки и, соответственно, стоимость ПЭ трубы. Кроме того, увеличение толщины стенки приводит к уменьшению внутреннего диаметра трубопровода и, как следствие, к возрастанию гидравлических сопротивлений.

Целесообразность перехода на ПЭ трубы при гидротранспорте рудных пес-

ков в условиях ВГМК была доказана для участков с рабочим давлением меньше 6 атм. С учетом этого ограничения на рабочее давление ПЭ трубы начали использовать для монтажа всасывающих трубопроводов, чтобы повысить давление на входе в насос, а также для монтажа крайних участков напорного трубопровода, чтобы снизить суммарные потери напора. Такая модернизация магистрали гидротранспортного комплекса не требовала расчетов по обоснованию режима ее работы. При увеличении длины участков с ПЭ трубами возникла необходимость в создании методического обеспечения расчетов гидротранспортных систем с магистралями, состоящими из участков ПЭ и стальных труб, которое позволяло бы определять не только расход пульпы, но и допустимую длину участка ПЭ трубы, выдерживающей заданное допустимое давление.

Целью статьи является разработка методики расчета параметров гидротранспорта и режимов работы установки, магистраль которой состоит из участков ПЭ и стальных труб.

В отличие от гидротранспортных установок, магистрали которых полностью состоят из стальных труб, для рассматриваемых установок кроме алгоритма определения гидравлических уклонов и критических скоростей необходим метод определения возможной длины участка из ПЭ труб, которая зависит от давления потока и в начале расчета является неизвестной величиной.

Предположим, что все насосы гидротранспортного комплекса размещены на участке магистрали со стальными трубами. Если известно требуемое значение избыточного давления в конце этого участка, то подачу пульпы и необходимую длину участка из стальных труб можно определить из решения следующей системы уравнений [1 – 11]

$$\gamma H = (i - i')L_C + i'L + h_0 + \rho \Delta Z; \quad [P] = \gamma H - (i + \rho i_g)L_C - h_0, \quad (1)$$

где  $\gamma$  – коэффициент, учитывающий снижение напора насоса при перекачивании пульпы [1 – 11];  $H$  – суммарный напор насосов при работе на воде;  $i, i'$  – гидравлический уклон при течении пульпы по участкам стальных и ПЭ труб;  $L_C$  – длина участка стальных труб;  $L$  – общая длина магистрали;  $\rho$  – эффективная относительная плотность пульпы [1, 2, 9];  $\Delta Z$  – перепад геодезических высот начала и конца магистрали;  $Q$  – подача пульпы;  $[P]$  – допустимое по требованиям прочности ПЭ труб избыточное давление в конце участка стальных труб, м вод. ст.;  $h_0$  – потери напора во всасывающем трубопроводе первого насоса;  $i_g$  – геодезический уклон участка стальных труб.

Вид системы уравнений (1) существенно зависит от соотношения величин  $[P]$  и  $H$ . Если для этих величин выполняется одно из следующих условий

$$\gamma H \leq [P]; \quad \gamma H \approx [P],$$

то стальные трубы не нужны, и система (1) преобразуется в одно уравнение

$$L' = 0; \quad \gamma H = i'L + h_0 + \rho \Delta Z. \quad (2)$$

В этом случае вся магистраль гидротранспортной установки может быть выполнена из ПЭ труб, или же с учетом характеристик существующих центробежных насосов (табл. 1) потребуется небольшая вставка стальной трубы после напорного патрубка.

Если для величин  $[P]$  и  $H$  справедливо неравенство

$$\gamma H > [P],$$

то требуется участок стальной трубы, и система (1) преобразуется к виду

$$\Gamma \gamma H + (1 - \Gamma)[P] = i'L + \rho \Delta Z + K_H h_0; \quad L' = \frac{\gamma H - [P] - h_0}{i + \rho i_g}; \quad (3)$$

$$\Gamma = \frac{q + \alpha}{1 + \alpha}; \quad \alpha = \frac{\rho i_g}{i}; \quad q = \frac{i'}{i}.$$

Таблица 1 – Интервалы изменения напора центробежных насосов, используемых в гидротранспортных системах ГОКов при номинальной частоте вращения рабочего колеса

Наименование	Диаметр рабочего колеса, мм	Напор при работе на воде, м вод. ст.	
		Минимум	Максимум
ГрТ 4000/71	1390	59	72
20P-11M	1250	55	65
GIW LSA 18×20-54	1143	38	58
GIW WBC 18×20-54	1372	58	90
GIW LHD 24×26-76	1260	40	73
GIW HHD 24×26-76	1930	75	110
Warman 20×18	1440	67	95
Warman 650 LP	1490	50	78
Warman 28×24 G	1667	45	72

Из первого уравнения (3) определяется подача пульпы, которая будет реализована в рассматриваемой системе, а затем из второго уравнения – необходимая

длина стального участка трубопровода. После этого необходимо произвести расчет давления в трубопроводе в начале участка труб из полиэтилена в случае гидравлического удара. Система (3) решается численно, при этом в случае различных соотношений гидравлического и геодезического уклонов стального трубопровода для определения величины  $\Gamma$  могут использоваться упрощенные формулы

$$\Gamma = \begin{cases} q & \alpha \ll 1; \\ 0,5(1+q) & \alpha \approx 1; \\ 1 & \alpha \gg 1. \end{cases}$$

В общем случае гидравлический уклон при течении гидросмеси в ПЭ трубах с внутренними выступами сварных швов с учетом того, что вместо части сварных швов для соединения секций будут использованы фланцы, согласно рекомендациям, предложенным в работах [1, 2, 9], а также при ограничении крупности транспортируемых частиц  $d/D \leq 0.004$  можно вычислять по формулам

$$i = \rho \lambda (1 + \wp) (1 + \psi)^2 i_w; \quad (4)$$

$$i_w = \lambda_w \frac{u_w^2}{2gD}; \quad \rho = \frac{C^2 + \bar{\rho}_s (1-C)^2 \psi^2}{(1-C)^2 C^2 (1+\psi)^3}; \quad \wp = \frac{n-1}{n} \left(\frac{\delta}{D}\right)^{1.391} \left(\frac{D}{L_*}\right)^{0.404} \frac{Re_w^{0.226}}{0.225};$$

$$C \left[ 1 - 0.45 f_p \left( 1 - \frac{3.33C}{2 - n_{0.1}} \right)^{2.16} \right] = \frac{\psi}{1 + \psi}; \quad \psi = \frac{G_s}{\rho_s Q_w}; \quad u_w = \frac{4Q_w}{\pi D^2};$$

$$f_p = 1 + \text{sign} \left[ \lg \left( \frac{Re_s}{7.586} \right) \right] \text{th} \left[ 0.967 \left| \lg \left( \frac{Re_s}{7.586} \right) \right|^{0.6} \right]; \quad Re_s = \frac{wd}{\nu_w};$$

$$\lambda = \left[ 1 + 0.52 \lg^{1.65} Re_s \text{th} \left( \frac{\psi^{0.86}}{0.088} \right) \right] \left( 1 - 0.468 \left[ 1 - \frac{u_w^{kp}}{u_w} \right]^{0.59} \right); \quad \bar{\rho}_s = \frac{\rho_s}{\rho_w},$$

где  $Re_w$  – число Рейнольдса для потока воды;  $D$  – внутренний диаметр трубопровода;  $\nu_w$  – кинематический коэффициент вязкости воды;  $Q_w$  – объемный

расход жидкой фазы;  $i_w$  – удельные потери напора на трение в соответствующем потоке чистой (без твердых частиц) жидкости;  $\bar{\rho}_s$  – безразмерная плотность частиц твердой фазы;  $G_s$  – массовый расход твердого материала;  $\psi$  – относительная объемная расходная концентрация твердых частиц [1, 2, 9];  $Re_s$  – число Рейнольдса, выраженное через гидравлическую крупность твердой частицы  $w$ , средний диаметр  $d$ ;  $n_{0,1}$  – доля частиц диаметром менее 0,1 мм в транспортируемом материале [1, 2, 9];  $L_*$  – длина секции труб, м;  $\delta$  – толщина внутреннего выступа шва трубы, м;  $\wp$  – коэффициент, учитывающий гидравлическое сопротивление сварных швов, при их отсутствии равен нулю;  $n$  – количество секций труб между фланцевыми соединениями;  $u_w^{kp}$  – скорость жидкой фазы пульпы в критическом режиме, м/с.

Для расчета величины  $u_w^{kp}$  в ПЭ трубах с внутренними выступами сварных швов рекомендуется усовершенствованная методика ИГТМ НАН Украины [1, 2, 9], учитывающая изменение коэффициента трения твердой и жидкой фаз о стенку трубы, а также выступающие кромки швов

$$\left[ 1 + 0,52(\lg Re_s)^{1,65} \operatorname{th} \left( \frac{\psi_{kp}^{0,86}}{0,088} \right) \right] \frac{(1 + \psi_{kp})^2 \rho_{kp} \lambda_w^{kp} u_w^{kp2}}{\sigma (\bar{\rho}_s - 1) 2gD} = \left( \frac{d}{D} \right)^{0,6} \operatorname{th} \left( \frac{\psi_{kp}^{0,433}}{0,42} \right); \quad (5)$$

$$\sigma = \frac{2,166K}{1 + \wp_{kp}} \left[ 0,655 + 0,345 \cos \left( \frac{90n_{0,01}C}{1 - (1 - n_{0,01})C} \right) \right],$$

где  $n_{0,01}$  – доля частиц диаметром менее 0,01 мм в транспортируемом материале [1, 2, 9];  $K$  – коэффициент, учитывающий снижение коэффициента трения твердой фазы пульпы о стенку ПЭ трубы в критическом режиме по сравнению со стальной трубой.

Соотношение между гидравлическими потерями, обусловленными сварными швами и трением о стенки трубы, характеризуется числом Рейнольдса, начиная с которого гидравлические потери от сварных швов будут составлять  $\varepsilon$  от потерь напора на трение

$$Re_\varepsilon \leq 0.0013 \left( \frac{n\varepsilon}{1-n} \right)^{4.425} \left( \frac{D}{\delta} \right)^{6.1522} \left( \frac{L_*}{D} \right)^{1.7854}, \quad (6)$$

где  $Re_\varepsilon$  – число Рейнольдса, начиная с которого гидравлические потери от сварных швов будут составлять  $\varepsilon$  от потерь напора на трение.

Расчеты, проведенные по формуле (6) для труб с  $SDR$  26, 21, 17 и 13.6 с длиной секции 13 м для случая, когда  $\varepsilon=0.1$  и  $k=0.5$ , для удобства анализа представлены в виде величины  $R$ , показывающей отношение логарифмов  $Re_{0.1}$  и числа Рейнольдса, соответствующего переходу ламинарного режима течения в турбулентный (рис. 1). Из рис. 1 видно, что гидравлические сопротивления от сварных швов будут составлять 10% от потерь напора на трение уже при ламинарном течении. Следовательно, пренебрегать гидравлическими сопротивлениями от сварных швов в сверхкритических режимах недопустимо.

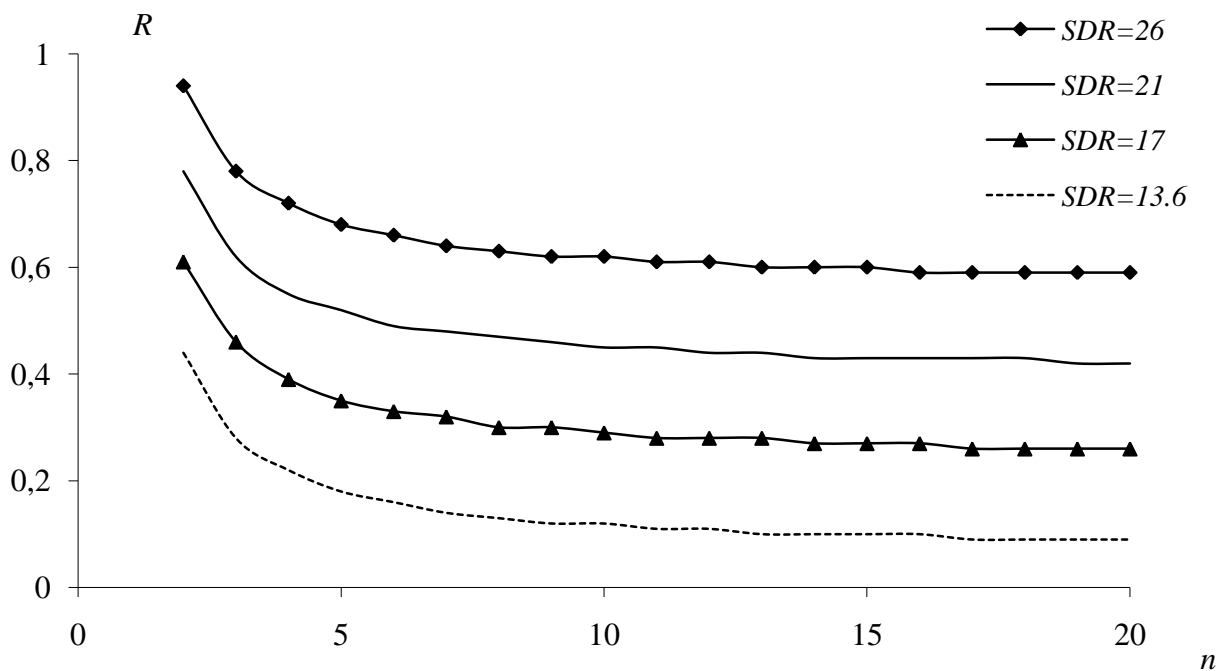


Рис. 1 – Зависимость величины  $R = \frac{\lg(Re_{0.1})}{3.48}$  от параметра  $n$

Формулы (4) и (5) пригодны для расчета параметров гидротранспорта как в стальных, так и в ПЭ трубах. При расчетах параметров течения в стальных трубах величины  $K = 1$ ,  $\varphi = 0$ , а для определения значения  $\lambda_w$  используется формула, рекомендованная специалистами ИГТМ НАН Украины [1, 2, 9],

$$\lambda_w = \frac{a}{\lg^2(b Re_w)}, \quad (6)$$

где  $b$  – параметр, характеризующий степень шероховатости внутренней по-

верхности данной трубы и определяемый на основе данных гидравлических испытаний труб [1, 4, 11, 12].

При расчетах по формулам (4) и (5) для ПЭ труб величины  $K < 1$ ,  $\wp$  определяются по вышеприведенной формуле, а для вычисления  $\lambda_w$  используют формулу, полученную специалистами ИГТМ НАН Украины на основе рекомендаций ISO TR 10501, СНиП 2.04.02-84, СП 40-102-2000 [1, 4, 11, 12],

$$\lambda'_w = \frac{A}{Re_w^B}, \quad (7)$$

где  $A$ ,  $B$  – коэффициент и показатель степени (табл. 2).

Таблица 2 – Значения коэффициентов, используемых для расчета параметров ПЭ труб по разным методикам

№	Методика	$A$	$B$
1	СНиП 2.04.02-85	0,226	0,271
2	ISO TR 10501	0,240	0,273
3	ISO TR 10501	0,200	0,171
4	ИГТМ НАНУ	0,250	0,316

С использованием формул (4) – (6) нетрудно получить зависимость для расчета величины  $q$ , входящей в формулу для определения параметра  $\Gamma$  (рис. 2),

$$q = (1 + \wp) \frac{A \lg^2(b Re_w)}{a Re_w^B}. \quad (8)$$

Из рис. 2 видно, что, начиная со значений  $Re_w = 10^4$  величина  $q$  близка к нулю и пренебрежимо мала в сравнении с единицей. При этом зависимость (8) с инженерной точностью аппроксимируется степенной функцией

$$q = \frac{10^{11}}{Re_w^{3,269}}.$$

Данная особенность поведения величины  $q$  предопределяет характер изме-



нения величин  $\Gamma$  и  $1-\Gamma$  в зависимости от числа Рейнольдса – начиная со значений  $Re_w = 10^4$  их величины определяются значением  $\alpha$  (рис. 3).

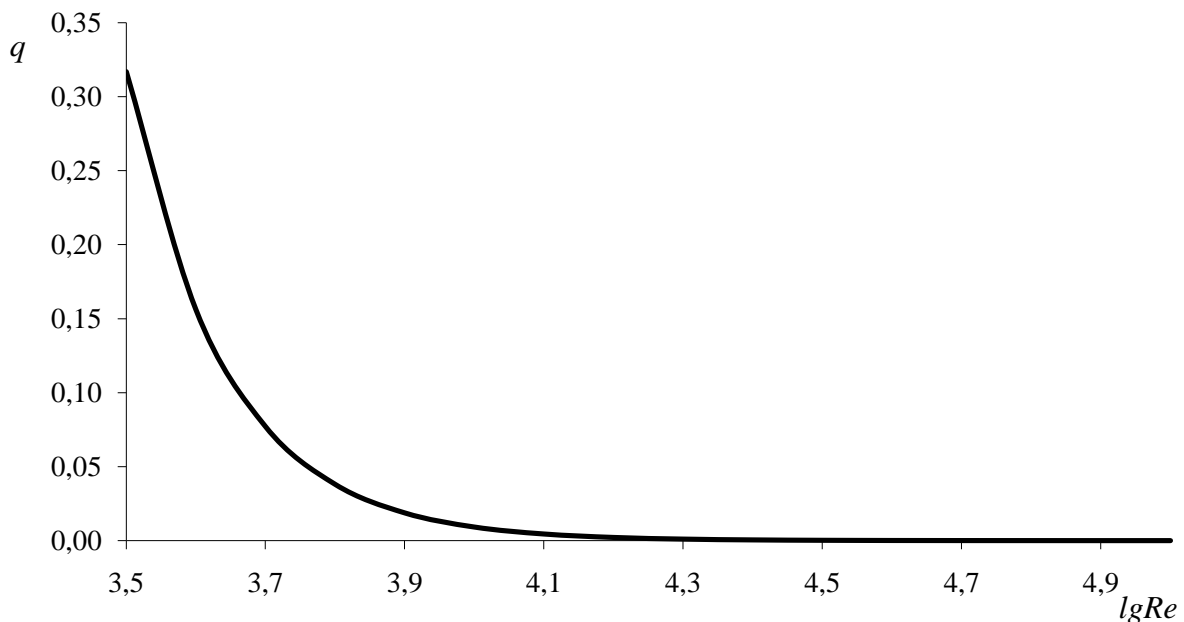


Рис. 2 – Зависимость величины  $q$  от числа  $Re_w$

Анализ результатов расчетов, приведенных на рис. 3, показывает, что зависимость асимптотического значения величин  $\Gamma$  от  $\alpha$  с достаточной точностью может быть аппроксимирована следующей функцией (рис. 4):

$$\Gamma = 0,2235 \ln(9,5869\alpha).$$

Таким образом, в статье предложены зависимости для расчета гидравлического уклона и критической скорости в стальных и полиэтиленовых трубах, учитывающие характеристики гидросмеси, материал трубопровода, а также наличие на стыках полиэтиленовых труб внутренних бортиков сварных швов. С использованием этих зависимостей предложен метод расчета режимов работы гидротранспортных систем с магистралями, состоящими из участков полиэтиленовых и стальных труб, который впервые позволяет определять не только расход пульпы, но и допустимую длину участка полимерной трубы, выдерживающей заданное допустимое давление.

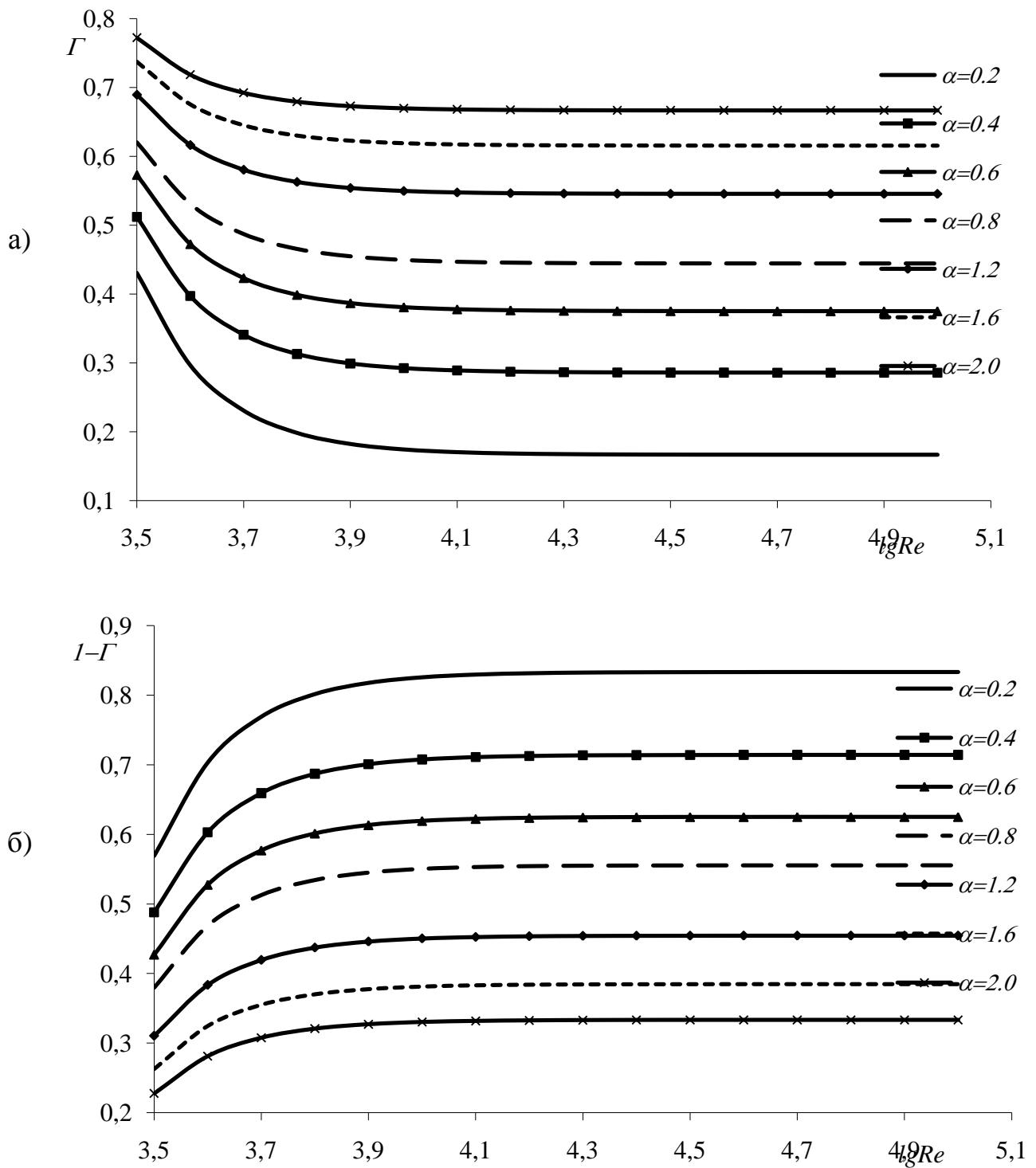


Рис. 3 – Зависимость величин  $\Gamma$  и  $1-\Gamma$  от числа Рейнольдса

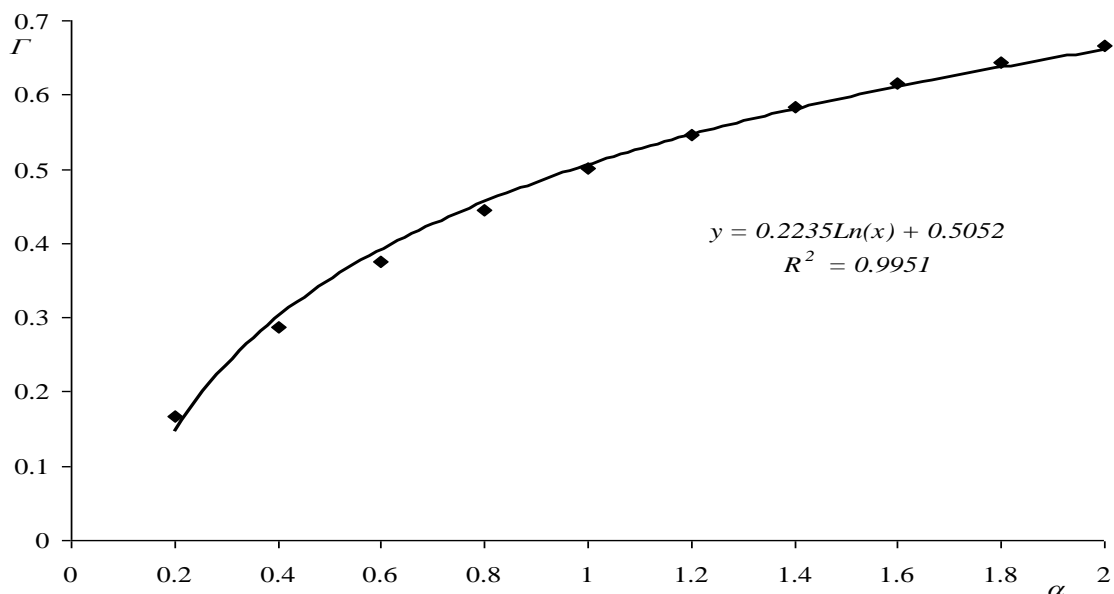


Рис. 4 – Зависимость асимптотического значения величины  $\Gamma$  от  $\alpha$  при числах Рейнольдса, больших  $10^4$

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Семенов, Е.В. Научные основы технологий гидромеханизации открытой разработки титанциркониевых россыпей / Е.В. Семенов. – К.: Наукова думка, 2011. – 231 с.
2. Обоснование параметров и режимов работы систем гидротранспорта горных предприятий / Ю.Д. Баранов, Б.А. Блюсс, Е.В. Семенов, В.Д. Шурьгин. – Д.: Новая идеология, 2006. – 416 с.
3. Силин, Н.А. Гидротранспорт угля по трубам / Н.А. Силин, Ю.К. Витошкин. – К.: Наукова думка, 1964. – 88 с.
4. Дмитриев, Г.П. Напорные гидротранспортные системы / Г.П. Дмитриев, Л.И. Махарадзе, Т.Ш. Гочиташвили. – М.: Недра, 1991. – 304 с.
5. Нурок, Г.А. Процессы и технологии гидромеханизации открытых горных работ / Г.А. Нурок. – М.: Недра, 1985. – 583 с.
6. Смолдырев, А.Е. Расчет рудничного трубопроводного транспорта / А.Е. Смолдырев. – М.: Изд. литературы по горному делу, 1961.
7. Смолдырев, А.Е. Трубопроводный транспорт / А.Е. Смолдырев. – М.: Недра, 1980. – 390 с.
8. Карасик, В.М. Интенсификация гидротранспорта продуктов и отходов обогащения горнообогатительных комбинатов / В.М. Карасик, И.А. Асауленко, Ю.К. Витошкин. – К.: Наук. думка, 1976. – 156 с.
9. Криль, С.И. Напорные взвесенесущие потоки / С.И. Криль. – К.: Наукова думка, 1990. – 170 с.
10. Курганов, А.М. Гидравлические расчеты систем водоснабжения и водоотведения / А.М. Курганов, Н.Ф. Федоров. – Л.: Стройиздат, 1986. – 440 с.
11. Коберник, С.Г. Напорный гидротранспорт хвостов горно-обогатительных комбинатов / С.Г. Коберник, В.И. Войтенко. – К.: Наук. думка, 1967. – 140 с.
12. Силин, Н.А., Коберник С.Г. Режимы работы крупных землесосных снарядов и трубопроводов / Н.А. Силин, С.Г. Коберник. – К.: Изд-во АН УССР, 1962. – 215 с.

#### REFERENCES

1. Semenenko, E.V. (2011), *Nauchnye osnovy technologii gidromekhanizatsii otkrytoy razrabotki titan-tirkonievyykh rossypey* [Scientific foundation of hydromechanization technologies of quarry operation of titanium-zirconium placers], Naukova dumka, Kiev, Ukraine.
2. Baranov, Y.D., Blyuss, B.A., Semenenko, E.V. and Shurigin, V.D. (2006), *Obosnovanie parametrov i rezhimov raboty sistem gidrotransporta gornyykh predpriyatiy* [Substantiation of parameters and operating regimes of hydrotransport systems of delfts], Novaya ideologia, Dnepropetrovsk, Ukraine.
3. Silin, N.A. and Vitoshkin, Y.K. (1964), *Gidrotransport uglya po trubam* [The coal hydrotransport by

pipes], Naukova dumka, Kiev, Ukraine.

4. Dmitriev, G.P., Maharadze, L.I. and Gochitashvili, T.S. (1991), *Napornye gidrotransportnye sistemy* [The pressurized hydrotransport systems], Nedra, Moscow, Russia.

5. Nurok, G.A. (1985), *Protsessy i technologii gidromekhanizatsii otkrytykh gornyykh rabot* [Processes and technologies of hydromechanization of open pit mining], Nedra, Moscow, Russia.

6. Smoldyrev, A.E. (1961), *Raschet rudnichnogo truboprovodnogo transporta* [Calculation of mine pipeline transport], Literature on Mining, Moscow, Russia.

7. Smoldyrev, A.E. (1980), *Truboprovodnyi transport* [Pipeline transport], Nedra, Moscow, Russia.

8. Karasik, V.M., Asaulenko, I.A. and Vitoshkin, J.K. (1976), *Intensifikatsiya gidrotransporta produktov i otkhodov obogashcheniya gornoobogatitelnykh kombinatov* [The intensification of hydrotransport of products and cleaning rejects of ore mining and processing enterprises], Naukova dumka, Kiev, Ukraine.

9. Krill, S.I. (1990), *Napornye vzvesenesushchie potoki* [The pressurized suspension carrying flows], Naukova dumka, Kiev, Ukraine.

10. Kurganov, A.M. and Fedorov, N.F., (1986), *Gidravlicheskie potoki sistem vodosnabzheniya i vodoootvedeniya* [The hydraulic calculations of water supply and drain systems], Stoyizdat, St.Petersburg, Russia.

11. Kobernik, S.G. and Voytenko, V.I. (1967), *Napornyi gidrotransport khvostov gorno-obogatitelnykh kombinatov* [The pressurized hydrotransport of tailing of mining and processing enterprises], Naukova dumka, Kiev, Ukraine.

12. Silin, N.A. and Kobernik S.G. (1962), *Rezhimy raboty krupnykh zemlesosnykh snaryadov i truboprovodov* [Modes of operation of large dredges and pipelines], Edition of AS of USSR, Kiev, Ukraine.

---

#### Об авторах

**Семененко Евгений Владимирович**, доктор технических наук, старший научный сотрудник Института геотехнической механики им. Н.С. Полякова, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова Национальной академии наук Украины (ИГТМ НАН Украины), Днепропетровск, Украина, [igtmnanu@yandex.ru](mailto:igtmnanu@yandex.ru).

**Никифорова Нина Анатольевна**, кандидат технических наук, доцент Национальной металлургической академии Украины, Государственное высшее учебное заведение «Национальная металлургическая академия Украины» (ГВУЗ «НМетАУ»), Днепропетровск, Украина, [dmeti@dmeti.dp.ua](mailto:dmeti@dmeti.dp.ua).

**Татарко Лариса Гавриловна**, старший преподаватель кафедры физики, Государственное высшее учебное заведение «Украинский государственный химико-технологический университет» (ГВУЗ «УГХТУ»), Днепропетровск, Украина, [ughtu@dicht.dp.ua](mailto:ughtu@dicht.dp.ua).

#### About the authors

**Semenenko Eugeny Vladimirovich**, Doctor of Technical Sciences (D.Sc), Senior Researcher at the Institute of Geotechnical Mechanics, M.S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics under the National Academy of Sciences of Ukraine (IGTM, NASU), Dnepropetrovsk, Ukraine, [igtmnanu@yandex.ru](mailto:igtmnanu@yandex.ru).

**Nykyforova Nina Anatoliyevna**, Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor at the National Metallurgical Academy of Ukraine, State Higher Educational Institution “National Metallurgical Academy of Ukraine” (SHEI “NMetAU”), Dnepropetrovsk, Ukraine, [dmeti@dmeti.dp.ua](mailto:dmeti@dmeti.dp.ua).

**Tatarko Larisa Gavrilovna**, Senior Teacher of Physics, State Higher Educational Institution “Ukrainian State University of Chemical Technology” (SHEI “USUCT”), Dnepropetrovsk, Ukraine, [ughtu@dicht.dp.ua](mailto:ughtu@dicht.dp.ua).

---

**Анотація.** Статтю присвячено створенню методичного забезпечення розрахунків гідротранспортних систем з магістралями, що складаються з ділянок поліетиленових та сталевих труб, яке дозволяло б визначати не тільки витрату пульпи, а й можливу довжину ділянки поліетиленової труби, яка витримує потрібний допустимий тиск. Метою статті є розробка методики розрахунку параметрів гідротранспорту та режимів роботи установки, магістраль якої складається з ділянок поліетиленових та сталевих труб. Методика розрахунку гідравлічного ухилу та критичної швидкості гідротранспортування по поліетиленових трубах, що розглядається, є адаптованим варіантом розробленої фахівцями ІГТМ методики розрахунку параметрів гідротранспорту полідисперсних матеріалів з різною густиною частинок, яка вперше враховує відмінність у законах опору труб з різних матеріалів, а також наявність внутрішніх бортиків на швах полімерних труб. Режими роботи таких гідротранспортних установок пропо-

нується визначати, виходячи з розв'язку системи нелінійних рівнянь, отриманих з використанням рівняння Бернуллі, одне з яких визначає робочу точку системи, а друге – допустиму довжину ділянки поліетиленової труби. Запропоновано залежності для розрахунку гідравлічного ухилу та критичної швидкості в сталевих та поліетиленових трубах, які враховують характеристики гідросуміші, матеріал трубопроводу, а також наявність на стиках поліетиленових труб внутрішніх бортиків зварювальних швів. З використанням цих залежностей розроблено метод розрахунку режимів роботи гідротранспортних систем з магістралями, що складаються з ділянок поліетиленових та сталевих труб, який вперше дозволяє визначати не тільки витрату пульпи, а й допустиму довжину ділянки полімерної труби, яка витримує заданий допустимий тиск. Отримані наукові результати дозволяють обґрунтовувати параметри магістралі й режими роботи гідротранспортних комплексів при їхній модернізації шляхом застосування поліетиленових труб для монтажу всмоктуючих трубопроводів з метою підвищення тиску на вході в насос, а також для монтажу кінцевих ділянок напірного трубопроводу з метою зниження сумарних втрат напору.

**Ключові слова:** гідротранспорт, поліетиленові труби, гідравлічний ухил, критична швидкість.

**Abstract.** The paper is devoted to creation of methodical support for hydrotransport system calculations with main pipelines consisting of polyethylene and steel pipe sections, which allows determining not only a slurry discharge, but also acceptable length of polyethylene pipe section, which can stand to given pressure. Purpose of this paper is to elaborate a procedure for calculating hydrotransport parameters and operating modes of the plant with main pipeline consisted of polyethylene and steel pipes sections.

The concerned calculation procedure of hydraulic gradient and critical velocity of hydrotransportation by polyethylene pipes is an adapted variant of a calculation procedure of hydrotransport parameters for polydisperse materials with particles of different density elaborated by the IGTM scientists. It is the first calculation procedure which takes into account differences in resistance laws for pipes made of various materials as well as availability of inner welts on the weld seams of polymeric pipes. It is offered to calculate operating modes for such hydrotransport plants by solving nonlinear equation set obtained by using of the Bernoulli equation. One of these equations determines a working point of the system and the second determines acceptable length of the polyethylene pipe section. Dependences are offered for calculating hydraulic gradient and critical velocity in steel and polyethylene pipes, which take into account characteristics of slurry, pipeline material and availability of inner welts on the weld seams between polyethylene pipes. With the help of these dependences a calculation method was elaborated for operating modes of hydrotransport systems with main pipelines consisting of polyethylene and steel pipes sections, which is the first which allows determination not only slurry discharge, but also acceptable polymeric pipe section length, which can stand to given permissible pressure. Obtained scientific results allow to ground main pipeline parameters and operating modes for hydrotransport complexes in process of their modernization by using polyethylene pipes for suction pipelines installation in order to rise pressure at the input to the pump as well as for mounting the end sections of pressure pipe in order to decrease total pressure loss.

**Keywords:** hydrotransport, polyethylene pipes, hydraulic gradient, critical velocity.

*Стаття поступила в редакцію 30.09.2013  
Рекомендовано к публікації д.т.н., проф. Б.А. Блюссом*