

## РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ГИДРОТРАНСПОРТА ПРИ СУЩЕСТВЕННОМ РАЗЛИЧИИ ПЛОТНОСТИ ТРАНСПОРТИРУЕМЫХ ЧАСТИЦ

*Е.В. Семененко, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова НАН Украины  
Н.А. Никифорова, Национальная металлургическая академия Украины  
Л.Г. Татарко, Украинский государственный химико-технологический университет*

На основе анализа экспериментальных данных ряда авторов и анализа соответствующих методик расчета параметров гидротранспорта предложено разбиение на фракции частиц одного класса крупности с существенно различающимися плотностями с учетом их гидравлической крупности, что обеспечивает адекватность зависимостей для определения критической скорости и гидравлического уклона и позволяет повысить точность расчетов.

Опыт эксплуатации гидротранспортных комплексов Вольногорского горно-металлургического комбината, Иршанского, Центрального и Южного горно-обогатительных комбинатов свидетельствует, что существующие методики расчета неадекватно описывают зависимости критической скорости и гидравлического уклона при наличии в транспортируемом материале частиц крупностью менее 0,15 мм с существенной разницей в плотности. Примерами таких материалов могут служить исходные россыпи Вольногорского горно-металлургического комбината и Иршанского горно-обогатительного комбината, в тонких классах которых одновременно с частицами глины и суглинка с относительной плотностью 2,7 содержатся частицы ценных компонентов с относительной плотностью 5,6 (табл. 1) [1 – 3]. В результате известны случаи аккумуляции ценных компонентов на дне трубопровода с периодическими срывами образовавшейся постели, что приводит к нарушению стабильности процесса гидротранспортирования и режима работы обогатительного оборудования.

Таблица 1 – Гранулометрический состав и плотности материалов в россыпи Восточного участка Малышевского месторождения [1, 2]

Класс крупности, мкм	Содержание материалов в россыпи, %				Массовая доля класса, %
	2700 кг/м <sup>3</sup>	2720 кг/м <sup>3</sup>	2750 кг/м <sup>3</sup>	4590 кг/м <sup>3</sup>	
менее 63	0,00	9,00	7,50	1,22	17,72
от 63 до 100	0,75	0,60	1,00	2,81	5,16
от 100 до 160	5,98	0,30	1,30	0,96	8,53
от 160 до 200	16,43	0,10	0,20	0,27	17,00
от 200 до 315	46,31	0,00	0,00	0,05	46,36
от 315 до 400	4,48	0,00	0,00	0,00	4,48
от 400 до 3000	0,75	0,00	0,00	0,00	0,75
Массовая доля материала, %	74,69	10,00	10,00	5,31	

На основе анализа более 20 методик расчета критической скорости и гидравлического уклона при течении пульп была установлена причина несоответствия результатов расчетов по существующим методикам практически получаемым величинам, а также обоснованы пути ее устранения [1, 2, 4 – 9]. Большая часть методик расчета параметров гидротранспорта разрабатывалась для однородных по плотности материалов, что обеспечивало адекватность расчетных формул при разделении транспортируемого материала на классы крупности, каждому из которых соответствует свой тип перемещения частиц напорным потоком. Каждому классу крупности в формулах для расчета критической скорости гидротранспортирования и гидравлического уклона соответствует свое слагаемое, пропорциональное массовой доле

этого класса в транспортируемом материале. Однако при существенном различии плотностей частиц одного класса крупности адекватность такого подхода нарушается, поскольку частицам большей плотности и частицам меньшей плотности одного класса крупности могут соответствовать различные типы перемещения. Этот эффект особенно сильно проявляется для частиц крупностью менее 0,15 мм, которые полностью увлекаются жидкостью и за счет этого повышают плотность несущей среды.

Известные зависимости [5 – 7, 10] позволяют производить расчет параметров гидротранспорта для полидисперсных материалов одной плотности, не превышающей 2650 кг/м<sup>3</sup>. Здесь также предложена классификация материалов на фракции, в рамках которой для определения гидравлических сопротивлений и критических скоростей получены соответствующие формулы, обобщением которых являются универсальные зависимости, рекомендованные для полидисперсных гидросмесей, образованных из материалов различных классов крупности транспортируемого материала,

$$i = i_0(1 + A_1SR_1) + cA_2SR_2 \frac{w_0(1-S)^{n_w}}{V} \sqrt{\frac{D}{d_{cp}}} + fA_3SR_3; \quad (1)$$

$$V_{kp} = c_0 \sqrt{gD} \sqrt[3]{\frac{A_2SR_2w_0(1-S)^{n_w}}{\sqrt{gd_{cp}}}} + c_1 \sqrt{fgDA_3SR_3}; \quad (2)$$

$$A_j = \frac{Ar_j(1 - SR_1)}{(1 + Ar_1SR_1)}; \quad Ar_1 = \rho_{sj} - 1; \quad i_0 = \frac{\lambda V^2}{2gD}; \quad n_w = \lg\left(\frac{v_0 10^5}{d_{cp} w_0}\right);$$

$$w_0 = Ar_2 \left(0.68d_{cp} + \frac{t}{52} - 0.5\right); \quad (3)$$

где  $V_{kp}$  – критическая скорость гидротранспортирования, м/с;  $c_0, c_1$  – эмпирические константы, учитывающие влияние на критическую скорость мелких и кусковых фракций;  $D$  – диаметр трубопровода, м;  $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;  $w$  – скорость стесненного падения частиц мелкой фракции, м/с;  $S$  – объемная концентрация частиц тонкой фракции, д. ед.;  $d_{cp}$  – средневзвешенный диаметр частиц мелкой фракции, м;  $Ar_i$  – параметр Архимеда для частиц  $i$ -й фракции;  $\rho_{sj}$  – относительная плотность частиц  $j$ -го материала;  $R_1$  – массовая доля в транспортируемом материале тонких фракций (меньше 0,15 мм);  $R_2$  – массовая доля в транспортируемом материале мелких фракций (более 0,15 и меньше 2 мм);  $R_3$  – массовая доля в транспортируемом материале кусковых фракций (больше 2 мм);  $f$  – обобщенный коэффициент трения частиц кусковой фракции о нижнюю стенку трубы [6, 7];  $i$  – гидравлический уклон пульпы, м вод. ст. / м;  $i_0$  – гидравлический уклон воды, м вод. ст. / м;  $c$  – эмпирическая константа, учитывающая влияние на гидравлический уклон мелких фракций;  $\lambda$  – коэффициент гидравлического сопротивления трения;  $V$  – средняя расходная скорость гидросмеси, м/с;  $t$  – температура пульпы, °С;  $n_w$  – показатель степени;  $v_0$  – кинематический коэффициент вязкости несущей жидкости, м<sup>2</sup>/с.

При обосновании выбранного разделения частиц транспортируемого материала на тонкие, мелкие и кусковые фракции А.Е. Смолдырев указывает, что [6, 7]:

- частицы тонких фракций образуют с жидкостью стабильные и нестабильные гидросмеси, при транспортировании турбулентными потоками полностью увлекаются жидкостью, взвешиваются и равномерно распределяются по поперечному сечению потока, образуя, таким образом, однородную жидкость с плотностью, большей, чем плотность воды;

- частицы мелких фракций в напорных потоках воды перемещаются с относительно большим пребыванием во взвешенном состоянии, неравномерно распределяются по поперечному сечению потока, концентрируются в нижней трети сечения трубопровода;

- частицы кусковых фракций в напорных потоках жидкости перемещаются по нижней стенке трубы скольжением, перекачиванием или скачкообразно в нижней части потока с относительно малым периодом пребывания во взвешенном состоянии.

Характер перемещения в потоке твердых частиц каждой фракции учитывается в формуле для расчета гидравлического уклона [4, 6, 7]: для тонких фракций он пропорционален квадрату скорости, для мелких – обратно пропорционален средней скорости и для кусковых – не зависит от скорости потока. При этом влияние концентрации тонких фракций на плотность транспортируемой жидкости учитывается дополнительным множителем.

Однако опыт применения формул (1) – (3) выявил ряд погрешностей, которые проявляются тем сильнее, чем больше разнородность материала по плотности и гранулометрическому составу. Зависимости (1) – (3) достаточно хорошо описывают зависимость параметров гидротранспорта в случае однородных по плотности материалов, когда различие в плотности частиц, образующих тонкие, мелкие и кусковые фракции, незначительно. В случае же разнородных материалов, к которым относятся исходные пески россыпных месторождений (табл. 1), и для которых характерно двух- или трехкратное превышение плотности ценных компонентов над плотностью вмещающих пород, адекватность зависимостей (1) – (3) нарушается. В частности, наблюдаются завышенные по сравнению с расчетными потери напора, а также имеет место заиливание нижней стенки трубопровода частицами ценного минерала при течении со сверхкритическими (по расчету) скоростями.

Анализ применения формул (1) – (3) показал, что одной из основных причин этих погрешностей является жесткое разбиение транспортируемого материала на тонкие, мелкие и кусковые фракции. Из сравнения граничных диаметров для частиц этих фракций с таблицами для определения гидравлической крупности твердых частиц, предложенными В.Н. Гончаровым [4, 9], нетрудно убедиться, что это разделение материала соответствует трем различным зависимостям для расчета скорости свободного падения частиц в неподвижной и безграничной жидкости.

Тонкие фракции соответствуют частицам с диаметром меньше 0,15 мм, для которых гидравлическая крупность рассчитывается по формуле Стокса с учетом границ ее применимости [4, 11, 12]

$$w_0 = \frac{gd^2}{\nu_0} \frac{Ar}{18} \quad (4)$$

Мелкие фракции соответствуют частицам с диаметром более 0,15 и менее 2 мм, для которых гидравлическая крупность рассчитывается по формуле (3). Кусковые фракции соответствуют частицам с диаметром больше 2 мм, для которых гидравлическая крупность рассчитывается по формуле Реттингера [4, 11, 12]

$$w_0 = 1,634 \sqrt{gdAr} \quad (5)$$

Данная классификация была введена В.Н. Гончаровым для зерен минералов при падении в неподвижной жидкости, а затем перенесена А.Е. Смолдыревым на транспортирование твердых частиц напорными турбулентными потоками без учета того, что стоксовский режим обтекания частиц, для которого справедлива формула (4), ограничивается следующим условием [4, 11, 12]:

$$Re \leq 1; \quad (6)$$

$$Re = \frac{w_0 d}{\nu_0} \quad (7)$$

С учетом формул (4) и (7) нетрудно оценить диапазон изменения значений числа Рейнольдса  $Re$  для характерных диапазонов изменения диаметра и плотности частиц тонких

фракций (рис. 1, 2). Из рис. 1 и 2 видно, что при увеличении плотности частиц тонкой фракции критерий Рейнольдса может превысить единицу, и условие полного увлечения частиц твердого жидкостью, при соблюдении которого гидросмесь может рассматриваться как однородная жидкость, будет нарушено.

Определить граничное значение параметра Архимеда, при котором нарушается условие (6), можно, подставив формулу (4) в неравенство (6) и после несложных преобразований получив ограничения на параметр Архимеда частиц тонких фракций, для которых режим обтекания еще будет стоксовским (рис. 3),

$$Ar < Ar'; \quad (8)$$

$$Ar' = \frac{18v_0^2}{gd^3} \quad (9)$$

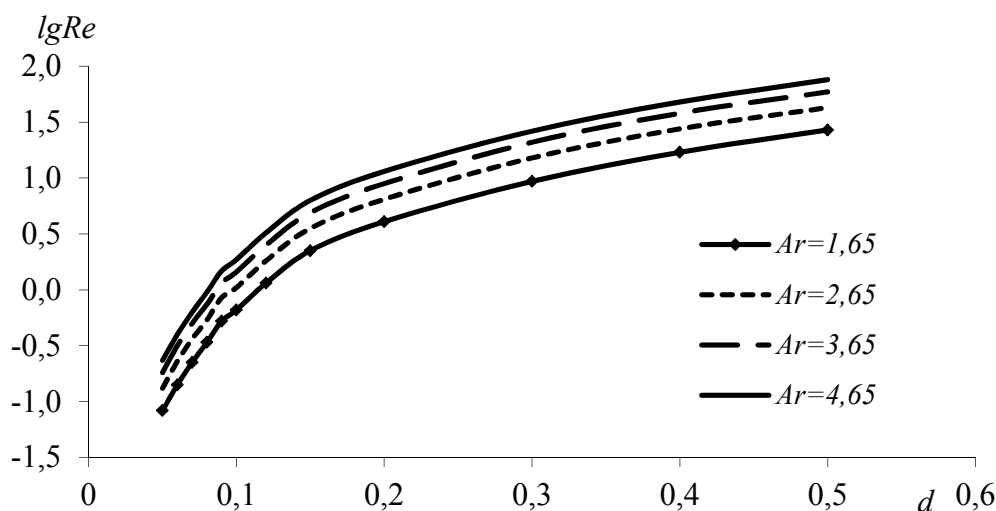


Рис. 1. Зависимость логарифма критерия Рейнольдса от диаметра частиц при различных значениях параметра Архимеда

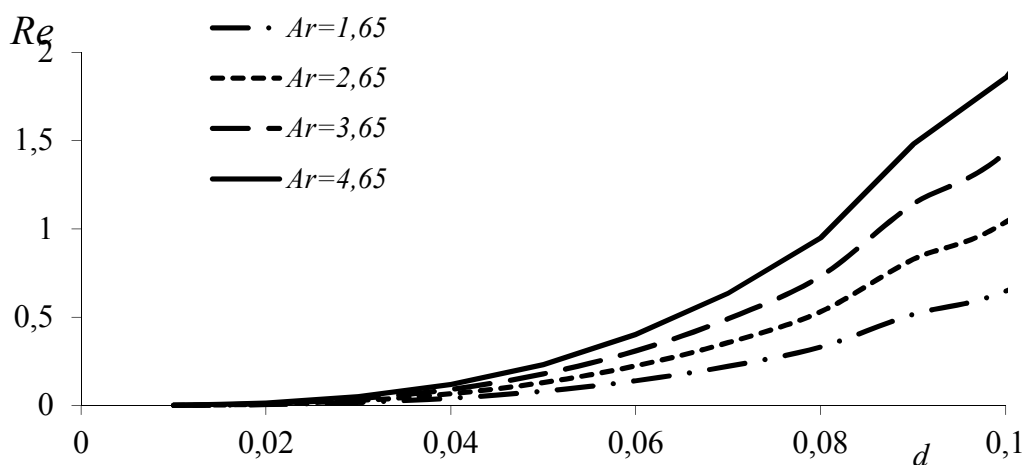


Рис. 2. Зависимость значений критерия Рейнольдса от диаметра частиц тонкой фракции при различных значениях параметра Архимеда

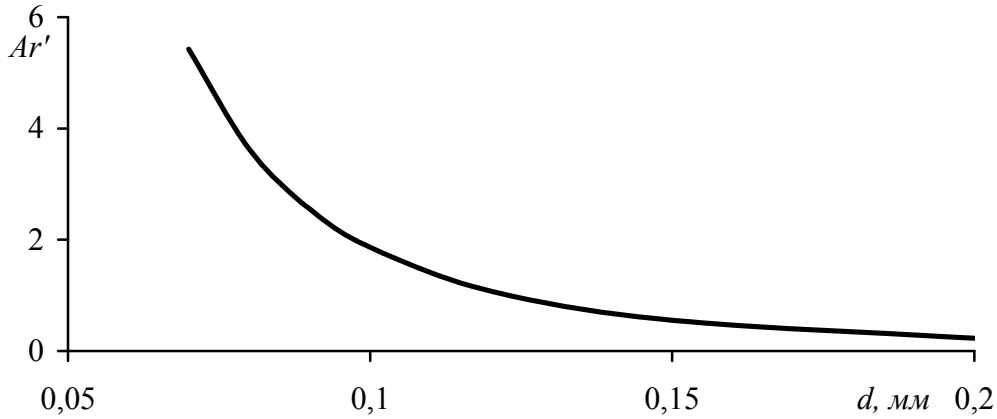


Рис. 3. Зависимость граничного значения параметра Архимеда от диаметра частиц тонкой фракции

Из рис. 3 видно, что частицы тонких фракций, имеющие относительную плотность более 4, обтекаются в режиме, который не позволяет рассматривать их смесь с водой как однородную жидкость с более высокой плотностью. То есть, потери напора, обусловленные наличием таких частиц в жидкости, должны быть пропорциональны не их относительной плотности и квадрату скорости, а соотношению их гидравлической крупности и средней скорости гидросмеси, как это имеет место для частиц мелких фракций. Будем относить эти частицы к гидравлически мелким фракциям.

Этот вывод подтверждается результатами других авторов [6 – 9, 13], исследовавших процессы гидротранспортирования концентратов железных и медных руд. Для этих материалов потери напора состоят из потерь напора на перемещение несущей жидкости, которые определяются как для случая течения чистой воды, и дополнительных потерь напора, которые вычисляются по формулам аналогичным формулам для частиц мелких фракций:

$$i = i_0(1 + A_1SR_1) + cS A_2R_2 \frac{w}{V} \sqrt{\frac{D}{d_{cp}}} \Theta + fA_3SR_3 ; \quad (10)$$

$$V_{kp} = c_0 \sqrt{gD} \sqrt[3]{\Theta \frac{A_2SR_2w}{\sqrt{gd_{cp}}}} + c_1 \sqrt{fgDA_3SR_3} ; \quad R_1 + R_2 + R_3 + R' = 1 ; \quad (11)$$

$$\Theta = 1 + ra\psi ; \quad r = \Delta \frac{R_1}{R_2} ; \quad a = \left( \frac{Ar'}{Ar_2} \right)^2 ; \quad \psi = \frac{\psi'}{\psi_2} ; \quad \Delta = \frac{R'}{R_1} ,$$

где  $\Theta$  – коэффициент, учитывающий влияние частиц гидравлически мелких фракций;  $\psi'$  – коэффициент транспортабельности частиц гидравлически мелких фракций;  $\psi_2$  – коэффициент транспортабельности частиц мелких фракций;  $R'$  – массовая доля частиц гидравлически мелких фракций.

Входящие в коэффициент  $\Theta$  величины изменяются в различных пределах (рис. 4, 5, 6), однако величина их произведения не превышает 32, что обеспечивает повышение критической скорости, обусловленной наличием частиц мелких фракций, в 3 раза, а соответствующего гидравлического уклона в 30 раз. Кроме того, коэффициенты  $A_1$ ,  $A_2$  и  $A_3$  в формулах (10) и (11) отличаются от коэффициентов в формулах (1) и (2) (рис. 7, 8). Отношение новых значений этих коэффициентов к старым значениям нетрудно представить в следующем виде:

$$\alpha = \frac{1 - \frac{\beta}{1 - \beta} \Delta}{1 - \frac{\beta}{1 + A_1 \beta} \Delta}; \quad \alpha' = \alpha \gamma; \quad \beta = S R_1; \quad \gamma = 1 + \Delta \frac{R_1}{R_2},$$

где  $\alpha$  – отношение значений коэффициента  $A_1$  или  $A_3$  в формуле (10) к значению в формуле (1);  $\alpha'$  – отношение значений коэффициента  $A_2 R_2$  в формуле (11) к значению в формуле (2).

Из рис. 7 видно, что величина  $\alpha$  меняется незначительно, постоянно убывает с ростом  $\Delta$  и  $\beta$  и во всем диапазоне изменения параметров не превышает единицу. То есть, отнесение частиц гидравлически мелких фракций к тонким завышало взвешивающую способность потока. Влияние гидравлически мелких частиц гораздо более существенно сказывается на гидравлическом уклоне, обусловленном частицами мелких фракций (рис. 8), значение которого может увеличиваться в 2 раза.

Таким образом, на основе анализа экспериментальных данных ряда авторов и анализа соответствующих методик расчета с учетом зависимости (9) предлагается разделение на тонкие и мелкие фракции при определении параметров гидротранспорта производить не по геометрическому размеру, а по их гидравлической крупности. При этом частицы крупностью менее 0,15 мм, для которых выполняется условие (8), необходимо относить к тонким фракциям, а те для которых это условие нарушается, – к мелким фракциям. За счет этого корректируются массовые доли в транспортируемом материале тонких и мелких фракций, пересчитывается относительная плотность несущей жидкости, а также частиц тонкой и мелкой фракций, уточняется гидравлическая крупность частиц мелких фракций.

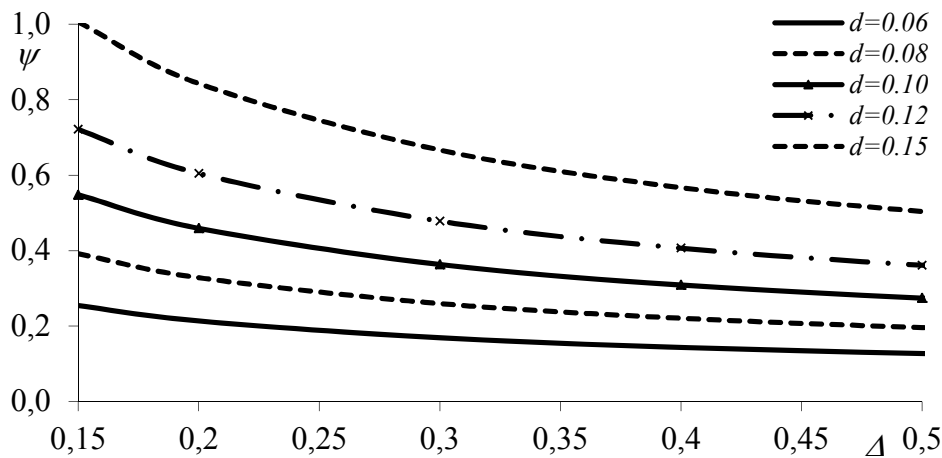


Рис. 4. Зависимость величины  $\psi$  от значения  $\Delta$  при различных диаметрах частиц гидравлически мелких фракций

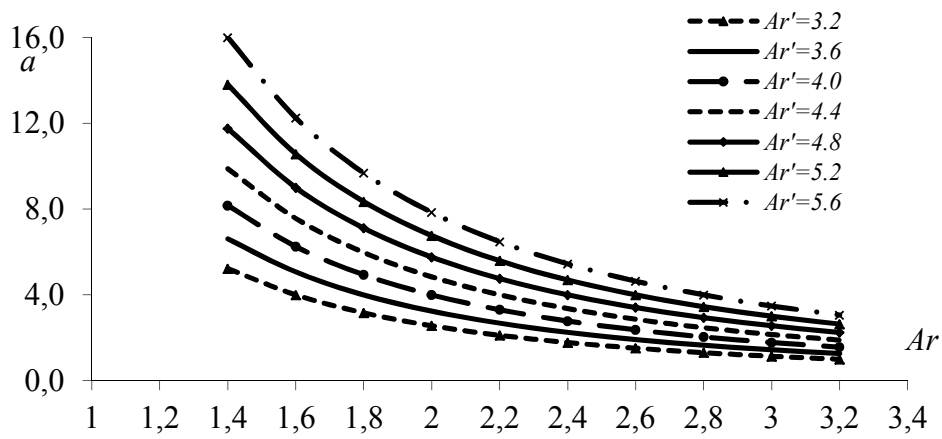


Рис. 5. Зависимость величины  $a$  от параметра Архимеда частиц мелких фракций при различных значениях параметра Архимеда частиц гидравлически мелких фракций

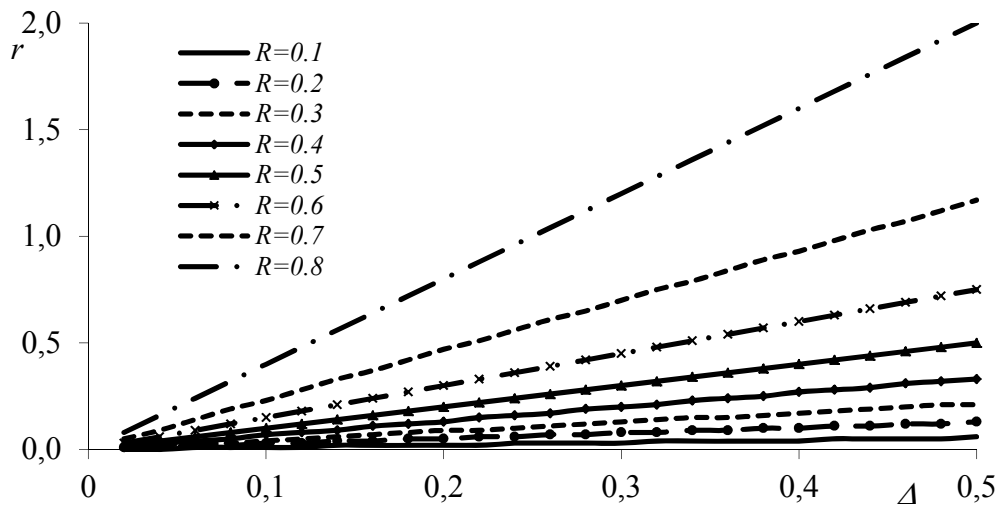
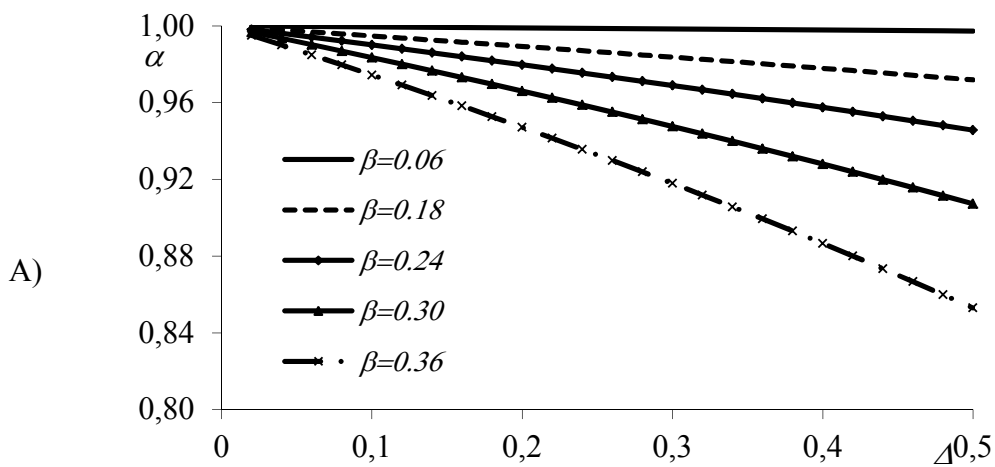


Рис. 6. Зависимость величины  $r$  от значений  $\Delta$  при различной массовой доле частиц тонких фракций



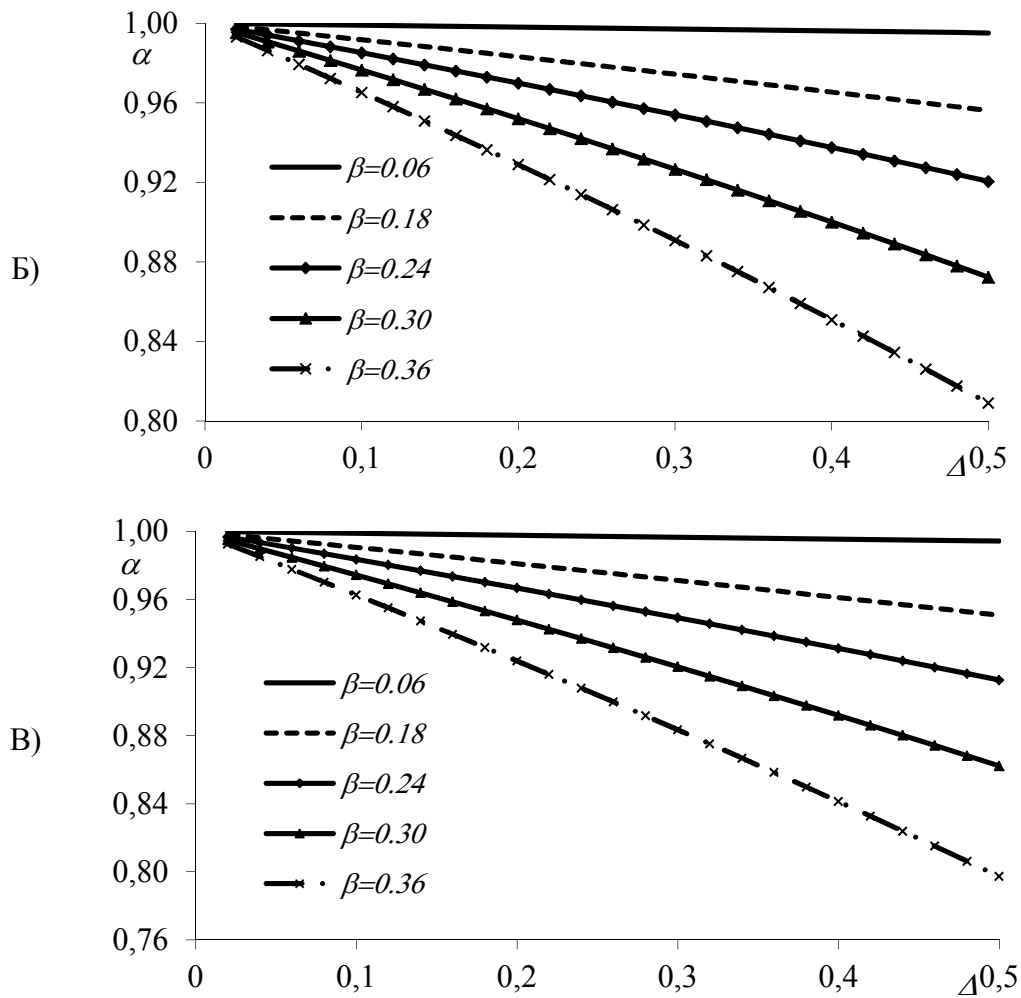


Рис. 7. Зависимость величины  $\alpha$  от значений  $\Delta$  при различных значениях  $\beta$ :  
 А) –  $Ar_1 = 0,4$ ; Б) –  $Ar_1 = 1,7$ ; В) –  $Ar_1 = 2,4$ .

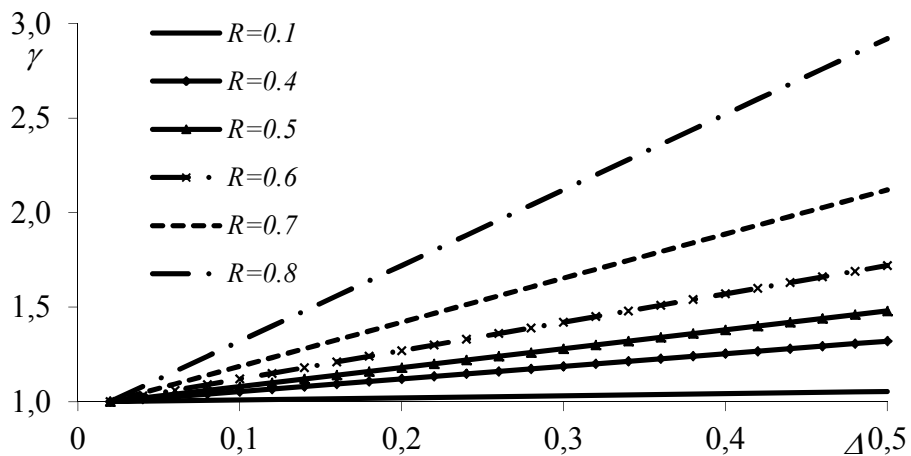


Рис. 8. Зависимость величины  $\gamma$  от значений  $\Delta$  при различной массовой доле частиц тонких фракций

Для проверки достоверности расчетов по предлагаемой методике были использованы экспериментальные данные, представленные в табл. 2 [8, 9, 15, 16].



Таблица 2 – Характеристики твердых материалов и труб, для которых получены экспериментальные данные

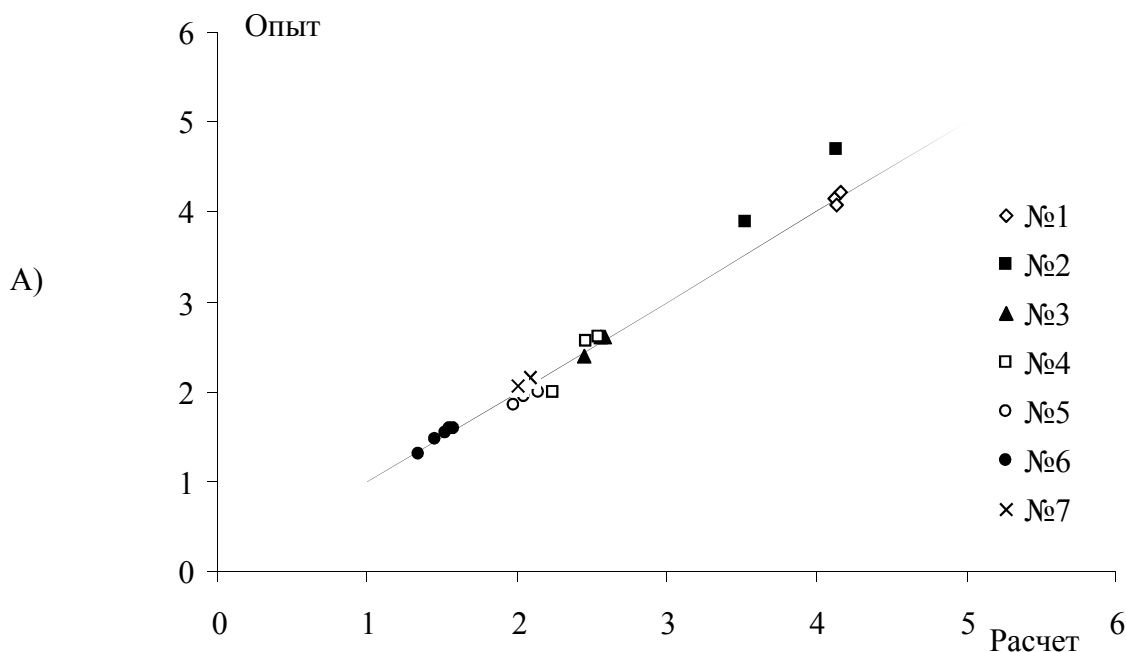
Материал №	$\bar{\rho}_s$	$d_{cp}, \text{ м}$	$D, \text{ м}$	$w_s, \text{ м/с}$	Источник
1	2,65	0,000330	0,8000	0,0400	[8]
2	2,65	0,000292	0,6140	0,0300	[8]
3	2,65	0,000263	0,2020	0,2700	[9]
4	3,36	0,000338	0,1030	0,0515	[9]
5	2,65	0,000423	0,1030	0,0450	[8]
6	2,65	0,000290	0,0504	0,0310	[16]
7	2,65	0,000930	0,1106	0,1100	[15]

Результаты сопоставления расчетных значений критической скорости и гидравлического уклона с экспериментальными данными представлены на рис. 9. Из рисунка видно, что среднее относительное отклонение расчетных значений от экспериментальных для гидравлического уклона составляет 8,3 %, а для критической скорости – 3,9 %. Таким образом, предлагаемая методика адекватно описывает зависимости критической скорости и гидравлического уклона от концентрации пульпы для материалов с различным гранулометрическим составом и является вполне достоверной.

#### Выводы

1. При значительных различиях в плотности твердых частиц с геометрическими размерами менее 0,15 мм, традиционно относимых к тонким фракциям, предложенное дополнительное их разбиение на тонкие и гидравлически мелкие фракции в соответствии с гидравлической крупностью позволяет существенно повысить точность расчетов гидравлического уклона и критической скорости при гидротранспортировании разнородных по плотности полидисперсных твердых материалов.

2. Предложенное дополнительное разбиение частиц на тонкие и гидравлически мелкие фракции впервые позволяет объяснить выпадение на дно трубопровода частиц ценных компонентов с геометрическими размерами менее 0,15 мм при гидротранспортировании россыпи с рассчитанной по существующим методикам сверхкритической скоростью и предотвратить это явление путем более точного расчета параметров гидротранспорта.



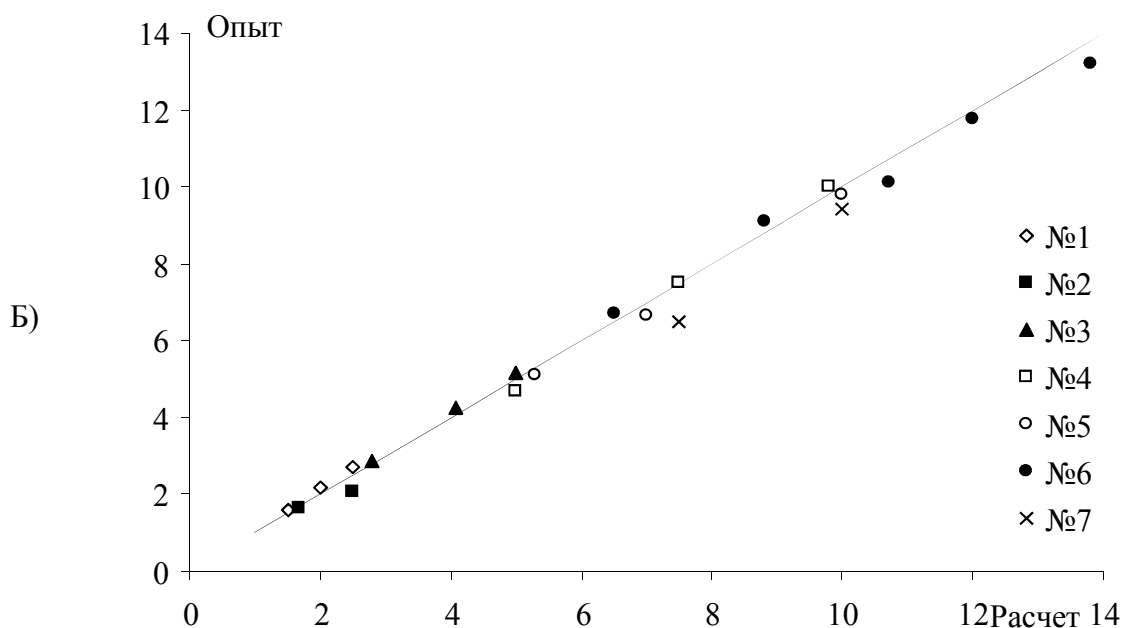


Рис. 9. Сопоставление значений величин, рассчитанных по разработанной методике, с экспериментальными данными в соответствии с табл. 2.  
А) критическая скорость; Б) гидравлический уклон.

#### Список литературы

1. Семенов Е.В. Научные основы технологий гидромеханизации открытой разработки титан-цирконовых россыпей. – 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. Шурыгин. – Д.: Новая идеология, 2006. – 416 с.
3. Силин Н.А., Витошкин Ю.К. Гидротранспорт угля по трубам. – К.: Наукова думка, 1964. – 88 с.
4. Дмитриев Г.П., Махарадзе Л.И., Гочиташвили Т.Ш. Напорные гидротранспортные системы. – М.: Недра, 1991. – 304 с.
5. Нурок Г.А. Процессы и технологии гидромеханизации открытых горных работ. – М.: Недра, 1985. – 583 с.
6. Смолдырев А.Е. Расчет рудничного трубопроводного транспорта. – М.: Изд. литературы по горному делу, 1961.
7. Смолдырев А.Е. Трубопроводный транспорт. – М.: Недра, 1980. – 390 с.
8. Карасик В.М., Асауленко И.А., Витошкин Ю.К. Интенсификация гидротранспорта продуктов и отходов обогащения горно-обогатительных комбинатов. – К.: Наук. думка, 1976. – 156 с.
9. Криль С.И. Напорные взвесенесущие потоки. – К.: Наукова думка, 1990. – 170 с.
10. Курганов А.М., Федоров Н.Ф. Гидравлические расчеты систем водоснабжения и водоотведения. – Л.: Стройиздат, 1986. – 440 с.
11. Кизевальтер Б.В. Теоретические основы гравитационных процессов обогащения. – М.: Недра, 1979. – 295 с.
12. Шохин В.Н., Лопатин А.Г. Гравитационные методы обогащения. – М.: Недра, 1980. – 400 с.
13. Коберник С.Г., Войтенко В.И. Напорный гидротранспорт хвостов горно-обогатительных комбинатов. – К.: Наук. думка, 1967. – 140 с.
14. Buckingham A.C., Siekhaus W.J. Interactions in multidimensional two fluid computations in turbulent flow // AIAA Pap. – 1981. – № 346. – P. 15.
15. Кривенко Ю.Н. Исследование высококонцентрированных потоков, содержащих крупнозернистый материал: дисс. ... канд. техн. наук: – К., 1968. – 107 с.
16. Силин Н.А., Коберник С.Г. Режимы работы крупных землесосных снарядов и трубопроводов. – К.: Изд-во АН УССР, 1962. – 215 с.