

Е.В. Семененко, Н.А. Никифорова, Л.Г. Татарко

**РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ГИДРОТРАНСПОРТА
МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ ТВЕРДЫХ МАТЕРИАЛОВ
С СУЩЕСТВЕННЫМ РАЗЛИЧИЕМ В ПЛОТНОСТИ ЧАСТИЦ
В ПРИСУТСТВИИ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИ АКТИВНЫХ
ВЕЩЕСТВ**

Аннотация. На основании анализа экспериментальных данных ряда авторов и существующих методик расчета параметров гидротранспорта предложены новые зависимости для определения гидравлического уклона и критической скорости гидротранспортирования многокомпонентных материалов с существенным различием в плотности частиц в присутствии гидродинамически активных веществ. Предложено разбиение частиц на фракции не по геометрическому размеру, а по их гидравлической крупности.

Ключевые слова: гидротранспорт, гидравлический уклон, критическая скорость, различие в плотности, гидравлическая крупность

Существующие методики расчета параметров гидротранспорта 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 вместе с частицами глины и суглинка с относительной плотностью 2,7 содержатся частицы концентратов с относительной плотностью 5,6 [1 – 3]. В результате известны случаи аккумуляции концентрата на дне трубопровода при транспортировании россыпей со скоростью выше рассчитанной критической, что приводит к нарушению стабильности процесса гидротранспортирования и режима работы обогатительного оборудования.

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 его устранения [1, 2, 4 – 9]. Большая часть методик расчета параметров гидротранспорта разрабатывалась для однородных по плотности материалов, что обеспечивало адекватность расчетных формул при разбиении 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. В случае многокомпонентного материала, содержащего частицы с существенным различием в плотности, 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, которая не превышает 2650 кг/м³. А.Е. Смолдыревым [6, 7] также предложена классификация материалов на классы крупности (содержащие частицы тонких, мелких и кусковых фракций), в рамках которой для определения гидравлических сопротивлений и критических скоростей получены соответствующие формулы. Однако существующими методиками расчета параметров гидротранспорта не учитывается использование в технологиях переработки минерального сырья флокулянтов, изменяющих параметры несущей среды и транспортируемого материала, а также труб, изготовленных из полимерных материалов. Применение гидродинамически активных веществ (ГДАВ), которые снижают гидравлическое сопротивление трубопроводов напорным потокам гидросмеси и одновременно могут быть флокулянтами для отдельных частиц, является одним из путей снижения энергоемкости процесса гидротранспортирования. Обобщение известных формул с учетом результатов наших исследований [11 – 15] позволило получить универсальные зависимости параметров гидротранспорта для гидросмесей, образованных из полидисперсных мате-

риалов, в присутствии ГДАВ или при использовании труб, изготовленных из полимерных материалов,

$$i = i_0 + P \left(i_0 R_1 + \wp \frac{0,71}{\sqrt{\lambda}} R_2 \frac{w}{V} \sqrt{\frac{D}{d_{cp}}} + \wp R_3 \right), \quad i_0 = \frac{\lambda V^2}{2gD}; \quad (1)$$

$$V_{kp} = C \sqrt{gD} \sigma^N (R_3 \wp)^M \left(\frac{w R_2}{\sqrt{g d_{cp}}} \right)^E; \quad (2)$$

$$P_j = \frac{(\rho_{sj} - 1)(1 - SR_1)}{(1 + (\rho_{s1} - 1)SR_1)} S; \quad \sigma = \frac{\wp P_2}{\chi - P_1 R_1}; \quad \wp = 1 + \sqrt{\frac{d_{cp}}{d_\Phi}} \frac{R_\Phi}{R_2} (1 + k_\phi \theta),$$

$$w = w_0 (1 - S)^{n_w}; \quad w_0 = (\rho_{s2} - 1) \left(0,68 d_{cp} + \frac{t}{52} - 0,5 \right); \quad n_w = \lg \left(\frac{\nu_0 10^5}{d_{cp} w_0} \right);$$

$$C = \begin{cases} 8,14, & q \leq 1; \\ 8,80, & 1 < q; \end{cases} \quad N = \begin{cases} 0,42, & q \leq 1; \\ 0,45, & 1 < q; \end{cases}$$

$$M = \begin{cases} 0,25, & q \leq 1; \\ 0,36, & 1 < q; \end{cases} \quad E = \begin{cases} 0,17, & q \leq 1; \\ 0,09, & 1 < q; \end{cases}$$

$$\chi = \frac{\varepsilon K}{1 - \varepsilon K}; \quad q = \frac{0,29 \wp^3 f^3 R_3^3}{\sigma Fr_w^2 R_1^2 R_2^2}; \quad K = \varepsilon Fr_w^{0,47} \left(\frac{gD}{0,973} \right)^{0,7}, \quad Fr_w = \frac{w}{\sqrt{2g d_{cp}}}, \quad (3)$$

где V_{kp} – критическая скорость гидротранспортирования, м/с; c_0, c_1 – эмпирические коэффициенты, учитывающие влияние на критическую скорость мелких и кусковых фракций; D – диаметр трубопровода, м; g – ускорение свободного падения, м/с²; 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; $\rho_s^{(j)}$ – относительная плотность частиц j -го материала; R_1 – массовая доля в транспортируемом материале тонких фракций ($d < 0,15$ мм); R_2 – массовая доля в транспортируемом материале мелких фракций ($0,15$ мм $< d < 2$ мм); R_3 – массовая доля в транспортируемом материале кусковых фракций ($d > 2$ 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; λ – коэффициент гидравлического сопротивления трения; V – средняя расходная скорость гидро-смеси, м/с; t – температура пульпы, °С; n_w – показатель степени; V_0 – кинематический коэффициент вязкости несущей жидкости, м²/с; ϕ – коэффициент, учитывающий снижение трения частиц кусковых фракций о дно трубы в случае применения гидродинамически активных веществ или труб, изготовленных из полимерных материалов; θ – массовая доля гидродинамически активного вещества в гидросмеси; k_ϕ – эмпирический коэффициент; d_ϕ – диаметр флокул; K – константа М.А. Великанова; ε – коэффициент, учитывающий изменение константы М.А. Великанова в случае применения гидродинамически активных веществ или труб, изготовленных из полимерных материалов.

Характер перемещения жидкостью твердых частиц каждого класса крупности учитывается в формуле для расчета гидравлического уклона [4, 6, 7]: пропорциональность квадрату скорости для тонких фракций, обратная пропорциональность средней скорости для мелких частиц и независимость от скорости потока для кусковых частиц. 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. Эти формулы достаточно хорошо описывают зависимость параметров гидротранспорта в случае однородных по плотности материалов, когда различия между плотностями частиц, образующих тонкие, мелкие и кусковые фракции, незначительны. В случае же разнородных материалов, к которым относятся исходные пески россыпных месторождений, когда плотность ценных компонентов в два или три раза превышает плотность 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 с расчетными скоростями, сверхкритическими для россыпи. Анализ показал, что одной из основных причин этих погрешностей является жесткое разбиение транспор-

тируемого материала на тонкие, мелкие и кусковые фракции. При сравнении граничных диаметров для частиц этих фракций с диаметрами, приведенными в таблицах для определения гидравлической крупности твердых частиц, предложенных В.Н. Гончаровым [4, 9], нетрудно убедиться, что это разбиение 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 [4, 16, 17]

$$w_0 = \frac{gd^2}{\nu_0} \frac{Ar}{18} (1 + k_\phi \theta). \quad (4)$$

Мелкие фракции соответствуют частицам с диаметром более 0,15 и менее 2 мм, для которых гидравлическая крупность рассчитывается по формуле

$$w_0 = Ar_2 \left(0.68d_{cp} + \frac{t}{52} - 0.5 \right) \quad (5)$$

Кусковые фракции соответствуют частицам с диаметром больше 2 мм, для которых гидравлическая крупность рассчитывается по формуле Реттингера [4, 16, 17]

$$w_0 = 1,634 \sqrt{gdAr}. \quad (6)$$

Эта 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 условием [4, 16, 17]

$$Re = \frac{w_0 d}{\nu_0} \leq 1. \quad (7)$$

Используя формулы (4) и (7), можно 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 с увеличением плотности частиц тонкой фракции значение критерия Рейнольдса может превысить единицу, и условие полного увлечения частиц твердого жидкостью, при соблюде-

нии которого гидросмесь может рассматриваться как однородная жидкость, будет нарушено.

Определить граничное значение параметра Архимеда, при котором нарушается условие (7), можно, подставив формулу (4) в неравенство (7) и после несложных преобразований получив ограничения на параметр Архимеда частиц тонких фракций, для которых режим обтекания еще будет стоксовским (рис. 3)

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

$$Ar' = \frac{1}{1 + k_{\phi}\theta} \frac{18\nu_0^2}{gd^3}. \quad (9)$$

Из рис. 3 видно, что обтекание частиц тонких фракций с относительной плотностью более 4 происходит в режиме, который уже не позволяет рассматривать их смесь с водой как однородную жидкость более высокой плотности. Поэтому 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. Таким образом, частицы крупностью менее 0,15 мм, для которых выполняется условие (8), необходимо относить к тонким фракциям, а частицы, для которых это условие не выполняется, относить к гидравлически мелким фракциям. За счет этого корректируются массовые доли тонких и мелких фракций в транспортируемом материале, пересчитывается относительная плотность несущей жидкости, а также частиц тонкой и мелкой фракций, уточняется гидравлическая крупность частиц мелких фракций, что в итоге способствует повышению точности расчетов параметров гидротранспорта многокомпонентных материалов с существенным различием в плотности частиц.

Этот вывод подтверждается экспериментальными результатами других авторов [6 – 9, 18], исследовавших процессы гидротранспортирования концентратов железных и медных руд. Для этих материалов потери напора состоят из потерь напора на перемещение несущей жидкости, которые определяются так же, как при течении чистой воды, и дополнительных потерь напора, которые вычисляются по формулам, аналогичным формулам для частиц мелких фракций.

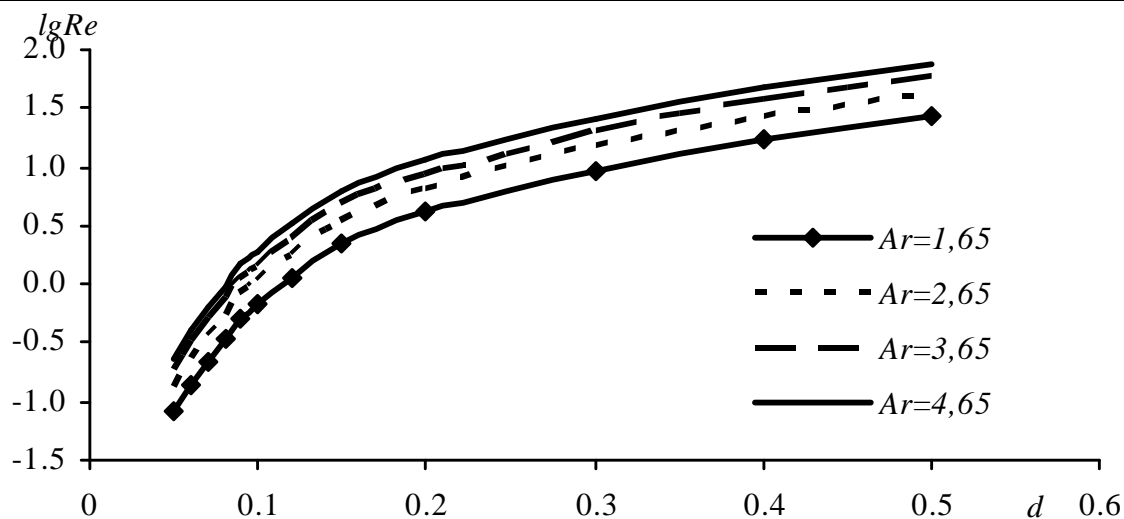


Рисунок 1 – Зависимость логарифма критерия Рейнольдса от диаметра частиц при различных значениях параметра Архимеда

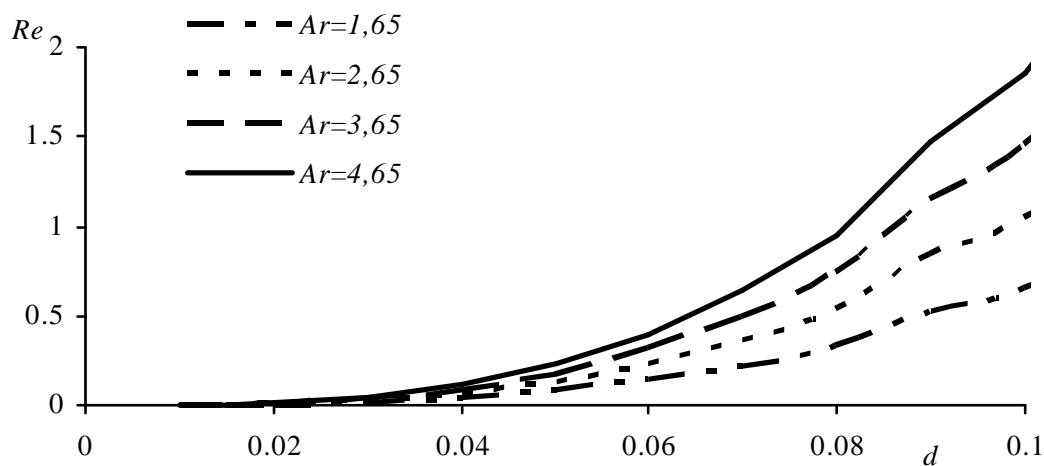


Рисунок 2 – Зависимость значения критерия Рейнольдса от диаметра частиц тонкой фракции при различных значениях параметра Архимеда

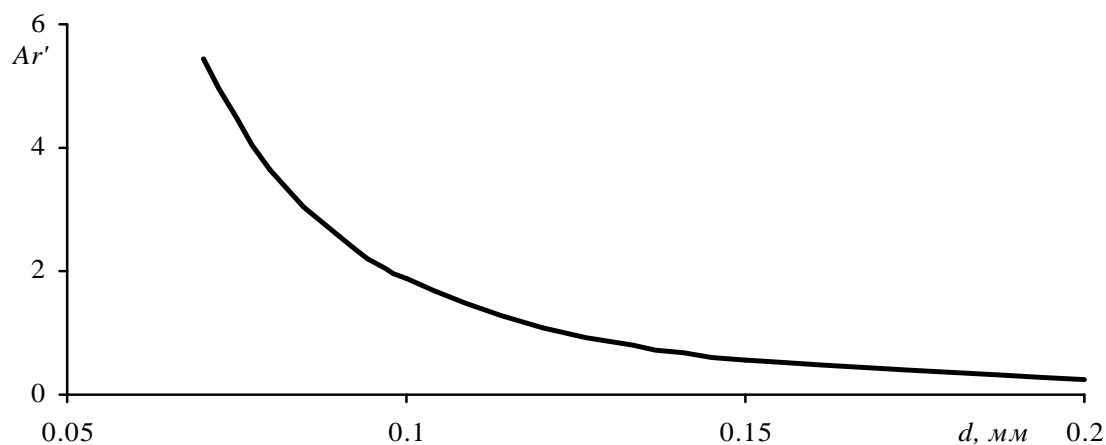


Рисунок 3 – Зависимость граничного значения параметра Архимеда от диаметра частиц тонкой фракции при $\theta=0$

В присутствии гидродинамически активного вещества кривые будут располагаться в области ниже кривой, приведенной на рис. 3, однако в результате процесса флокуляции часть тонких фракций переходит в мелкие не по причине иного режима обтекания их жидкостью, а из-за образования флокул.

Сопоставление расчетных значений критической скорости и гидравлического уклона по предлагаемой методике с экспериментальными данными [1, 3, 19 – 21] показывает, что среднее относительное отклонение расчетных значений от опытных для гидравлического уклона составляет 8,3, а для критической скорости – 3,9 %.

Выводы

1. На основе анализа экспериментальных данных ряда авторов и соответствующих методик расчета предлагается при определении параметров гидротранспорта многокомпонентных материалов с существенным различием в плотности частиц производить разбиение частиц материала на тонкие и мелкие фракции не по геометрическому размеру, а по их гидравлической крупности.

2. Получено ограничение на параметр Архимеда частиц тонких фракций, позволяющее разделить геометрически тонкие фракции на тонкие и гидравлически мелкие.

3. Предложены зависимости для расчета гидравлического уклона и критической скорости гидротранспортирования многокомпонентных полидисперсных материалов с существенным различием в плотности частиц в присутствии гидродинамически активных веществ, обеспечивающие повышение точности расчетов параметров гидротранспорта.

ЛИТЕРАТУРА

1. Семененко 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. Семененко, 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.:Наук.думка,1990.–160 с.
- 10.Курганов А.М., Федоров Н.Ф. Гидравлические расчеты систем водоснабжения и водоотведения. – Л.: Стройиздат, 1986. – 440 с.
- 11.В. Blyuss, Eu. Semenenko, N. Nykyforova. The calculation procedure of hydrotransport parameters of bulk solids using hydrodynamically active additives solutions // Papers presented at the 14th International Conference on Transport and Sedimentation of Solid Particles, June 23 – 27, 2008, Saint Petersburg, Russia. – Pp. 41 – 48.
- 12.Семененко Е.В., Никифорова Н.А. Расчет параметров взвесенесущих потоков в присутствии гидродинамически активных добавок // Вісник Дніпропетровського університету: Науковий журнал – Дніпропетровськ, 2008. – Т. 16, № 5. – Серія Механіка. – Вип. 11, т. 1. – С. 83 – 91.
- 13.Витушко О.В., Никифорова Н.А., Семененко Е.В. Усовершенствование методики расчета гидравлического уклона пульпы при гидротранспорте отходов обогащения // Горное оборудование и электромеханика: Научно-аналитический и производственный журнал. – Москва: "Новые технологии", 2009. – № 10. – С. 41 – 44.
- 14.Витушко О.В., Никифорова Н.А., Семененко Е.В. Усовершенствование методики расчета критической скорости при гидротранспорте отходов обогащения // Горное оборудование и электромеханика: Научно-аналитический и производственный журнал, 2009. – № 11. – Москва: "Новые технологии". – С. 46 – 51.
- 15.Витушко О.В., Никифорова Н.А., Шмелев Н.А. Метод расчета параметров гидротранспорта полидисперсных материалов при использовании гидродинамически активных веществ // Геотехнічна механіка: Міжвід. зб. наукових праць / Ін-т геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України. – Дніпропетровськ, 2010. – Вип. 85. – С. 186 – 191.
- 16.Кизевальтер Б.В. Теоретические основы гравитационных процессов обогащения /. – М.: Недра, 1979. – 295 с.
- 17.Шохин В.Н., Лопатин А.Г. Гравитационные методы обогащения. – М.: Недра, 1980. – 400 с.
- 18.Коберник С.Г., Войтенко В.И. Напорный гидротранспорт хвостов горно-обогатительных комбинатов. – К.: Наук. думка, 1967. – 140 с.
- 19.Buckingham A.C. Siekhaus W.J. Interactions in multidimensional two fluid computations in turbulent flow // AIAA Pap. – 1981. – № 346. – P. 15.
- 20.Кривенко Ю.Н. Исследование высококонцентрированных потоков, содержащих крупнозернистый материал: дисс. ... канд. техн. наук: 278. – К.: 1968. – 107 с.
- 21.Силин Н.А., Коберник С.Г. Режимы работы крупных землесосных снарядов и трубопроводов. – К.: Изд-во АН УССР, 1962. – 215 с.