

О.В. Витушко, канд. техн. наук  
(ООО «ШАХТСТРОЙМОНТАЖ»),

Н.А. Никифорова, канд. техн. наук (НМетАУ),

Н.А. Шмелев, науч. сотр. (ИГТМ НАН Украины)

## **МЕТОД РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ ГИДРОТРАНСПОРТА ПОЛИДИСПЕРСНЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИ АКТИВНЫХ ВЕЩЕСТВ**

Запропоновано універсальний метод розрахунку гідравлічного ухилу та критичної швидкості при гідротранспорті полідисперсних твердих матеріалів, який дозволяє підвищити точність розрахунків за рахунок урахування залежності від коефіцієнта гідравлічного опору додаткового гідравлічного ухилу, обумовленого присутністю в пульпі дрібних частинок, та критичної швидкості течії пульпи

## **THE CALCULATION METHOD OF HYDROTRANSPORT PARAMETERS OF POLYDISPERSE MATERIALS USING OF DRAG REDUCING AGENTS**

The universal method of hydraulic gradient and critical velocity calculation during hydrotransport of polydisperse solid materials is offered, which allows calculations accuracy rise at the expense of accounting of dependence of complementary hydraulic gradient stipulated by fine particles presence in pulp and pulp flow critical velocity on drag coefficient

### **1. Актуальность темы.**

Гидротранспорт является исключительно важной составной частью технологий переработки минерального сырья и на россыпных месторождениях используется для доставки исходных песков из карьера на обогатительное производство, для перемещения различных продуктов обогащения внутри обогатительной фабрики, а также для отвода отходов обогащения. Однако применение гидротранспорта требует высоких затрат электроэнергии и больших объемов потребления воды, и значительная доля затрат в себестоимости товарных концентратов приходится на гидротранспорт. Энергоемкость выбранных режимов работы гидротранспортных установок напрямую зависит от точности расчетов параметров гидротранспорта. Существует большое количество методик таких расчетов [1 – 6], однако их применение, как правило, ограничено условиями экспериментов, на основании которых они разрабатывались. Одной из наиболее используемых на территории стран СНГ методик расчета параметров гидротранспорта является методика А.Е. Смолдырева, позволяющая учитывать полидисперсность транспортируемого материала. Однако существенным недостатком этой методики является значительный интервал изменения эмпирических констант, для выбора значений которых однозначные рекомендации отсутствуют. При расчете потерь напора, обусловленных наличием частиц крупностью от 0.16 до 2 мм, такая неопределенность может приводить к относительной погрешности до 50%. Кроме того, эта методика не позволяет учитывать изменение гидравлического уклона и критической скорости при изменении гидравлического сопротивления магистрали за счет использования гидродинамически активных веществ [7 – 11].

## 2. Цель работы.

Целью статьи является усовершенствование методики А.Е. Смолдырева в области расчета гидравлического уклона и критической скорости гидротранспортирования.

## 3. Решаемая научная задача.

При этом требуется повысить точность существующей методики расчета и адаптировать ее для случая использования гидродинамически активных веществ.

Гидравлический уклон и критическая скорость гидротранспортирования являются важными расчетными параметрами при выборе режимов работы гидротранспортных установок, транспортирующих твердые материалы. Для расчета этих параметров при гидротранспорте полидисперсных материалов одной плотности, не превышающей 2650 кг/м<sup>3</sup>, А.Е. Смолдырев [2, 3] рекомендует следующие формулы:

$$i = \frac{\lambda V^2}{2gD} + \alpha \left( R_1 \frac{\lambda V^2}{2gD} + c_0 R_2 \frac{w}{V} \sqrt{\frac{D}{d_{cp}}} + f R_3 \right) S; \quad (1)$$

$$V_{kp} = c_1 \sqrt{gD} \sqrt[3]{\alpha S \frac{w R_2}{\sqrt{d_{cp}}}} + c_2 \sqrt{fgDR_3 \alpha S}; \quad (2)$$

$$\alpha = \frac{Ar(1 - S_1)}{1 + ArS_1}; \quad Ar = \frac{\rho_s - \rho_0}{\rho_0}; \quad w = w_0(1 - S_1)^n; \quad w_0 = Ar \left( \frac{d_p}{1,47} + \frac{t}{52} - 0,5 \right);$$
$$n = 5 - \lg \left( \frac{d_p w_0}{v_0} \right); \quad d_{cp} = \sum d_i q_i,$$

где  $i$  – гидравлический уклон при течении гидросмеси, м вод. ст./м;  $c_0$  – безразмерная эмпирическая константа, изменяющаяся от 0,3 до 0,45;  $c_1$  – безразмерная эмпирическая константа, изменяющаяся от 1,8 до 2,1;  $c_2$  – безразмерная эмпирическая константа, изменяющаяся от 6,0 до 7,0;  $V$  – средняя расходная скорость потока пульпы, м/с;  $V_{kp}$  – критическая скорость гидротранспортирования, м/с;  $D$  – диаметр трубопровода, м;  $d_{cp}$  – средневзвешенный диаметр частиц мелкой фракции, м;  $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;  $w$  – скорость стесненного падения частиц мелкой фракции, м/с;  $w_0$  – скорость свободного падения частиц мелкой фракции, м/с;  $t$  – температура пульпы, °С;  $d_i$  – средняя крупность  $i$ -й фракции в составе мелких частиц, м;  $q_i$  – массовая доля  $i$ -й фракции в составе мелких частиц, доли ед;  $R_1, R_2, R_3$  – массовые доли в транспортируемом материале соответственно тонких (с крупностью менее 0.16 мм), мелких (с крупностью от 0.16 до 2 мм) и кусковых фракций (с крупностью от 0.16 до 2 мм);  $S$  – объемная концентрация пульпы;  $f$  – обобщенный коэффициент трения частиц о нижнюю стенку трубы;  $Ar$  – параметр Архимеда транспортируемого материала;  $\rho_s$  – плотность транспортируемого материала, кг/м<sup>3</sup>;

$\rho_0$  – плотность воды, кг/м<sup>3</sup>;  $\nu_0$  – кинематический коэффициент вязкости воды, м<sup>2</sup>/с.

В формуле (1) гидравлический уклон при течении гидросмеси представляет собой сумму гидравлического уклона при течении воды и дополнительных гидравлических уклонов, обусловленных присутствием в пульпе частиц различных классов крупности, что не противоречит принципам гидравлики и гидромеханики гетерогенных сред. Критическая скорость в формуле (2) выражена суммой двух слагаемых. Первое слагаемое представляет собой критическую скорость при транспортировании частиц мелких классов крупности, второе – критическую скорость при транспортировании частиц кусковых классов крупности. Однако использование принципа суперпозиции при расчете критической скорости вызывает обоснованные возражения. Строгие математические выкладки приводят к иной формуле для расчета критической скорости гидротранспортирования полидисперсных материалов.

В рамках методики А.Е. Смолдырева [2, 3] в основу определения критической скорости положен принцип М.А. Великанова, который в виде формулы может быть записан так [1 – 3]:

$$\frac{i_{kp} - i_{kp}^0}{i_{kp}} = K, \quad (3)$$

где  $i_{kp}$  – гидравлический уклон при течении пульпы с критической скоростью, м. вод. ст./м;  $i_{kp}^0$  – гидравлический уклон при течении воды с критической скоростью, м. вод. ст./м;  $K$  – константа М.А. Великанова [1].

После подстановки в формулу (3) выражения (1) для гидравлического уклона и приведения подобных членов получается нелинейное относительно критической скорости уравнение, которое не решается аналитически независимо от выбранного вида зависимости коэффициента гидравлического сопротивления от критерия Рейнольдса. Формулу (2) из рассматриваемого уравнения невозможно получить даже при условии, что коэффициент гидравлического сопротивления не зависит от критерия Рейнольдса. Таким образом, при разработке формулы (2) А.Е. Смолдырев изменил вид функциональной зависимости, пренебрег в ней влиянием критерия Рейнольдса на коэффициент гидравлического сопротивления и попытался учесть влияние этих факторов набором из трех экспериментальных коэффициентов с широким диапазоном возможных значений.

Анализ экспериментальных данных А.Е. Смолдырева а также рекомендаций относительно выбора значения  $c_0$  [2, 4] показал, что в его методике не раскрыта зависимость эмпирического коэффициента  $c_0$  от скорости пульпы и диаметра трубопровода, то есть, от критерия Рейнольдса. Кроме того, результаты исследований, приведенные в работах [1, 6], указывают, что при транспортировании частиц крупностью от 0.2 до 2 мм величина дополнительного гидравлического уклона определяется отношением гидравлической крупности частиц к амплитуде

вертикальных турбулентных пульсаций, которая пропорциональна коэффициенту гидравлического сопротивления [5, 6]. Уточнение величины коэффициента  $c_0$  по экспериментальным данным А.Е. Смолдырева позволило выявить зависимость величины  $c_0$  от коэффициента гидравлического сопротивления и предложить новую формулу для расчета гидравлического уклона при течении пульпы, содержащих полидисперсные материалы [9 – 11],

$$i = \frac{\lambda V^2}{2gD} + \alpha \left( R_1 \frac{\lambda V^2}{2gD} + \frac{0.71}{\sqrt{\lambda}} R_2 \frac{w}{V} \sqrt{\frac{D}{d_{cp}}} + fR_3 \right) S. \quad (4)$$

В формуле (4) значение эмпирического коэффициента практически не зависит от гранулометрического состава материала и скорости пульпы. За счет этого разница между максимальным и минимальным абсолютными значениями эмпирической константы уменьшилась в 14 раз, а если рассматривать величины, отнесенные к средним значениям, то в 1,75 раза.

С учетом выявленной зависимости дополнительного гидравлического уклона, обусловленного наличием в гидросмеси мелких частиц, от коэффициента гидравлических сопротивлений была усовершенствована формула для расчета критической скорости гидротранспортирования. После подстановки в формулу (3) предложенного выражения для гидравлического уклона (4) и приведения подобных членов получается уравнение третьей степени относительно безразмерного комплекса, в физическом смысле представляющего собой корень квадратный из гидравлического уклона. Решение этого уравнения методом Кордана [12] дает две формулы для расчета физически реальных корней. С использованием этих решений и степенной зависимости коэффициента гидравлических сопротивлений от критерия Рейнольдса была получена аналитическая зависимость для расчета критической скорости гидротранспортирования полидисперсных материалов

$$V_{kp} = \begin{cases} 2^{-n} \sqrt{\left( \frac{0,71\beta w}{\sqrt{gd_{cp}}} \right)^{2/3} \frac{gD^{1+n}}{m\nu^n} \left( \sqrt[3]{1+\sqrt{1-q}} + \sqrt[3]{1-\sqrt{1-q}} \right)^{2/3}}, & q \leq 1 \\ 2^{-n} \sqrt{2,67 f\beta \frac{gD^{1+n}}{m\nu^n} \cos^{2-n} \left( \frac{1}{3} \arccos \left( \frac{1}{\sqrt{q}} \right) \right)}, & 1 \leq q \end{cases}; \quad (5)$$

$$\beta = \frac{\alpha(1-SR_1)}{\chi - \alpha SR_1}; \quad q = \frac{(\chi - \alpha SR_1)gd_{cp}f^3R_3^3}{1,704\alpha SR_1 w^2 R_1 R_2^2}; \quad \chi = \frac{K}{1-K}; \quad \lambda = \frac{m\nu^n}{D^n V^n},$$

где  $n, m$  – эмпирические коэффициенты степенной зависимости коэффициента гидравлических сопротивлений  $\lambda$  от критерия Рейнольдса;  $\nu$  – кинематический коэффициент вязкости воды.

При отсутствии в транспортируемом материале частиц тонких классов ( $R_1 = 0$ ) параметр  $q$  рассчитывается по формуле

$$q = \frac{\chi g d_{cp} f^3 R_3^3}{1,704 A r w^2 R_2^2}. \quad (6)$$

Из формулы (5) следует, что при расчете критической скорости гидротранспортирования полидисперсных материалов принцип суперпозиции критических скоростей соответствующих классов крупности неприменим. В этом случае в зависимости от величины  $q$  формула для расчета критической скорости гидротранспортирования может быть сведена к виду, соответствующему наличию частиц либо только кусковых ( $1 \leq q$ ), либо только мелких ( $q \leq 1$ ) классов крупности, в которых влияние частиц остальных классов крупности учитывается последним множителем (см. рис. 1 и 2).

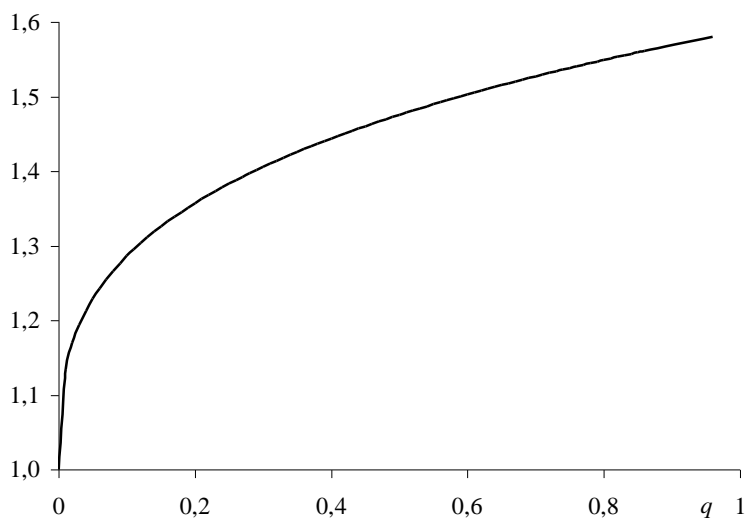


Рис. 1 – Зависимость множителя, учитывающего влияние частиц тонких и мелких классов крупности, от параметра  $q$  при  $1 \leq q$ .

#### 4. Выводы, отражающие решение научной задачи.

Использование формул (4) и (5), так же как и формул (1) и (2), дает возможность аналитических исследований режимов работы гидротранспортных систем и обоснования эффективной скорости и концентрации пульпы. Однако, в отличие от формул (1) и (2), в формулах (4) и (5) учтена зависимость критической скорости течения пульпы от коэффициента гидравлического сопротивления, что позволяет не только повысить точность расчетов параметров гидротранспорта, но и расширить область применения метода расчета, распространив его гидротранспорт в присутствии гидродинамически активных веществ.

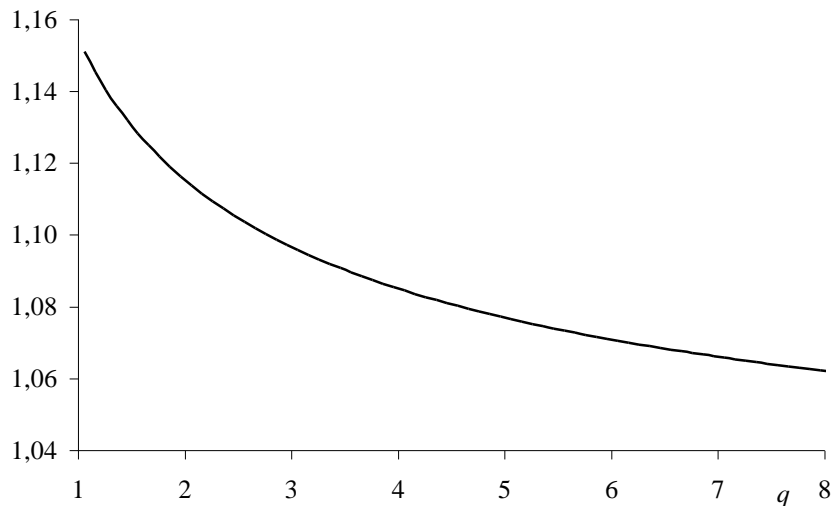


Рис. 2 – Зависимость множителя, учитывающего влияние частиц тонких и кусковых классов крупности, от параметра  $q$  при  $q \leq 1$ .

Использование формул (4) – (6) осложняется тем, что имеющиеся данные для определения параметра  $\chi$ , характеризующего соотношение основного и дополнительного гидравлических уклонов в критическом режиме течения, достаточно противоречивы [1, 4, 8, 13 – 15]. Решение этой задачи требует дополнительных исследований и является направлением дальнейших научных поисков.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Обоснование параметров и режимов работы систем гидротранспорта горных предприятий // Ю.Д. Баранов, Б.А. Блюсс, Е.В. Семенов, В.Д. Шурыгин – Днепропетровск: «Новая идеология», 2006. – 416 с.
2. Смолдырев А.Е. Трубопроводный транспорт. – М.: Недра, 1980. – 390 с.
3. Смолдырев А.Е. Гидро- и пневмотранспорт в металлургии. – М.: Металлургия, 1985. – 383 с.
4. Силин Н.А., Витошкин Ю.К. Гидротранспорт угля по трубам и методы его расчета. – К.: Из-во АН УССР, 1964 – 88 с.
5. Медников Е.П. Турбулентный перенос и осаждение аэрозолей. – М.: Наука, 1981. – 175 с.
6. Надежность и долговечность напорных гидротранспортных систем / Махарадзе Л.И., Гочиташвили Т.Ш., Сулаберидзе Д.Г., Алехин Л.А. – М.: Недра, 1984. – 119 с.
7. Применение гидродинамически активных добавок полимеров и поверхностно-активных веществ в энергосберегающих технологиях / А.В. Ступин и др. // Прикладна гідромеханіка. – 2001. – Т. 3 (75), № 1. – С. 74 – 81.
8. Покровская В.Н. Трубопроводный транспорт в горной промышленности. – М.: Недра, 1985. – 191 с.
9. B. Blyuss, Eu. Semenenko, N. Nykyforova. The calculation procedure of hydrotransport parameters of bulk solids using hydrodynamically active additives solutions // Papers presented at the 14<sup>th</sup> International Conference on Transport and Sedimentation of Solid Particles, June 23 – 27, 2008, Saint Petersburg, Russia. – Pp. 41 – 48.
10. Семенов Е.В., Никифорова Н.А. Влияние гидродинамически активных добавок на параметры гидротранспорта // Гірничя електромеханіка та автоматика: Науково-технічний збірник / Національний гірничий університет. – Дніпропетровськ, 2007. – Вип. 79. – С. 111-116.
11. Семенов Е.В., Бобров В.Б., Никифорова Н.А. Влияние гидродинамически активных добавок на предельные параметры системы гидротранспорта отходов // Научно-технический сборник «Разработка рудных месторождений». – Кривой Рог. – Вып. 92. – 2008. – С. 115 – 119.
12. Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. Справочник по математике для инженеров и учащихся ВТУЗОВ. – М.: Глав. ред. физ.-мат. лит. изд-ва «Наука», 1981. – 720 с.
13. П 59-72/ Инструкция по гидравлическому расчету систем напорного гидротранспорта грунтов. – Л.: Энергия, 1972. – 24 с.
14. Карасик В.М., Асауленко И.А., Витошкин Ю.К. Интенсификация гидротранспорта продуктов и отходов обогащения горно-обогатительных комбинатов. – К.: Наук. думка, 1976. – 156 с.
15. Коберник С.Г., Войтенко В.И. Напорный гидротранспорт хвостов горно-обогатительных комбинатов. – К.: Наук. думка, 1967. – 140 с.