

**Выводы.** Последние два рисунка демонстрируют важные зависимости, возникающие при вдуве газа в расплавленный металл. Последний рисунок показывает, что при наклонном вдуве размеры образующихся пузырей несколько меньше, чем при вертикальном вдуве. Приведенные на рис. 5 кривые, как об этом говорилось выше, не учитывают мелких пузырей, которые образуются в большом количестве при больших расходах. При этом необходимо отметить, что при вдуве под углом их больше. Таким образом, для интенсификации массообменного процесса в ванне необходимо предпочтительно отдавать вдуву газа, направленному под углом к вертикальной прямой.

### Библиографические ссылки

1. Явойский В. И. Теория продувки сталеплавильной ванны / В. И. Явойский, Г. А. Дорофеев, И. Л. Повх. – М., 1974. – 496 с.
2. Охотский В. Б. Физико-химическая механика сталеплавильных процессов / В. Б. Охотский. – М., 1993. – 151 с.
3. Елисеев В. И. Динамика поверхности жидкости при подаче газового потока через вертикальную заглубленную фурму // В.И. Елисеев, А.П. Толстомят, Л.А. Флеер, и др. – Вісник Дніпропетр. ун - ту. Серія «Механіка». – 2011. – Вип.15, т. 1. – С. 112 – 119.
4. Робертсон Д. Дж. К. Изучение на модели процесса вдувания твердых частиц в жидкий металл / Д. Дж. К. Робертсон, Д. С. Коночи, А. Г. Кастильес. // Инжекционная металлургия 80. Тр. конф. Лулеа. Швеция, 1980. – М., 1982. – С. 43 – 65.
5. Гутри Р. И. Л. Физико-химические и гидродинамические аспекты легирования расплавов методом вдувания порошков / Р. И. Л. Гутри. // Инжекционная металлургия 80. Тр. конф. Лулеа. Швеция, 1980. – М., 1982. – С. 75 – 92.
6. Дон Б. Исследования образования пузырьков и процесса проникновения расплава в сопло при инъекции газа с порошком или без него / Б. Дон, В. Поланшюц, Х. Хиблер. // Инжекционная металлургия 80. Тр. конф. Лулеа. Швеция, 1980. – М., 1982. – С. 33 – 43.
7. Иронз Г. А. Двумерный жидкосвинцовый аналог для изучения вдувания порошкообразных материалов в жидкие чугун и сталь / Г. А. Иронз, Б.-Х. Ту. // Инжекционная металлургия 80. Тр. конф. Лулеа. Швеция, 1980. – М., 1982. – С. 146 – 166.

*Надійшла до редколегії 26.11.2012.*

УДК 622.648.01 – 9:621.643.29

**Е. В. Семененко\*, Н. А. Никифорова\*\***

*\*Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова НАН Украины*

*\*\*Национальная металлургическая академия Украины*

### УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДИКИ РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ ГИДРОТРАНСПОРТА А. Е. СМОЛДЫРЕВА

Запропоновано інженерну методику розрахунку параметрів гідротранспорту полідисперсних матеріалів, яка базується на логарифмічному законі для опису залежності коефіцієнта гідралічного опору від числа Рейнольдса і може бути використана для аналітичного дослідження режимів роботи гідротранспортних систем. Формули запропонованої методики не містять коефіцієнтів, які треба визначати експериментально, і вперше показують мультиплікативну залежність критичної швидкості від властивостей тонких, дрібних і кускових фракцій.

© Е. В. Семененко, Н. А. Никифорова, 2013

**Ключові слова:** гідротранспорт полідисперсних матеріалів, гідравлічний опір, критична швидкість.

Предлагается инженерная методика расчета параметров гидротранспорта полидисперсных материалов, которая базируется на логарифмическом законе зависимости коэффициента гидравлического сопротивления от числа Рейнольдса и может быть использована для аналитического исследования режимов работы гидротранспортных систем. Формулы предложенной методики не содержат коэффициентов, которые нужно определять экспериментально, и впервые дают мультипликативную зависимость критической скорости от свойств тонких, дробных и кусочных фракций.

**Ключевые слова:** гидротранспорт полидисперсных материалов, гидравлическое сопротивление, критическая скорость.

The engineering methodic for calculation of parameters of the polydispersed material's hydrotransport is , that based on logarithmic law with hydraulic resistance coefficient – Reynold's number relation, is proposed and can be used in the analytical investigation of hydrotransport system's work regimes. Formulas without experimental coefficients are presented in the methodic and in first time giving multiplicative relation critical velocity – characteristics of thin, fractional and sectional fraction.

**Keywords:** polydispersed material's hydrotransport, hydraulic resistance, critical velocity.

Напорный гидротранспорт угля получил широкое распространение на угледобывающих и углеобогащающих предприятиях Украины. Однако, несмотря на более чем полувековой опыт его использования для указанных технологий, достоверное определение параметров гидротранспорта угля – критической скорости и гидравлического уклона [1 – 5] – является актуальным, поскольку доставка материала возможна только в сверхкритических режимах, а величина гидравлического уклона определяет мощность насосной станции и водопотребление технологической операции. На основе анализа более 20 методик расчета критической скорости и гидравлического уклона при течении пульпы была выбрана методика А.Е. Смолдырева [6 – 8], удобная в применении и позволяющая учитывать полидисперсность транспортируемого материала. Однако существенным недостатком этой методики является значительный интервал изменения эмпирических констант, для выбора значений которых однозначные рекомендации отсутствуют. Для повышения достоверности расчетов эта методика была модернизирована, что позволило расширить область применения метода расчета, распространив его на гидротранспорт по трубам, изготовленным из различных материалов, а также гидротранспорт в присутствии гидродинамически активных веществ. При этом расчеты по вновь предложенной методике усложнились ввиду отказа от использования необоснованного принципа суперпозиции вкладов мелких и кусковых фракций при определении критической скорости гидротранспортирования. Более сложная, нелинейная функциональная зависимость критической скорости от характеристик мелких и кусковых фракций позволила исключить неопределенность при выборе значений эмпирических коэффициентов, однако требует разветвленного алгоритма расчетов [6 – 8]. Это препятствие преодолимо при проверочных и оценочных расчетах, однако вызывает значительные затруднения при аналитических исследованиях режимов работы гидротранспортных систем и обосновании эффективных скоростей и концентраций пульпы. Помимо того, степенной закон зависимости коэффициента гидравлического трения от числа Рейнольдса, использованный при разработке метода, ограничивает прикладное использование методики, так как значения показателя степени и коэффициента пропорциональности для него не всегда приводятся в справочной литературе. Эти значения известны, как правило, для новых труб, изготовленных из полиэтилена или поливинилхлорида, однако для

стальных труб и бывших в употреблении труб из других материалов чаще используется логарифмический закон, и в литературе приводятся соответствующие ему коэффициенты [9 – 13].

Таким образом, разработка такой инженерной методики расчета параметров гидротранспорта угля, которая могла бы без потери точности расчетов использоваться для аналитических исследований параметров и режимов работы гидротранспортных систем, а также основывалась на логарифмическом законе для описания зависимости коэффициента гидравлического трения от числа Рейнольдса, является актуальной.

Известные зависимости А.Е. Смолдырева [1–3] позволяют проводить расчет параметров гидротранспорта для полидисперсных материалов одной плотности, не превышающей  $2650 \text{ кг/м}^3$ . Им также предложена классификация материалов на тонкие, мелкие и кусковые классы, в рамках которой для определения гидравлических сопротивлений и критических скоростей получены соответствующие формулы. Обобщением этих формул являются универсальные зависимости, рекомендованные для полидисперсных гидросмесей, образованных из материала, содержащего различные классы крупности [1 – 3]:

$$V_{kp} = c_0 \sqrt{gD} \sqrt[3]{\frac{wR_2}{\sqrt{d_{cp}}}} P + c_1 \sqrt{fgDPR_3}; \quad P = \frac{(\rho_s - 1)(1 - SR_1)}{(1 + (\rho_s - 1)SR_1)} S; \quad (1)$$

$$i = i_0 + P \left( R_1 i_0 + cR_2 \frac{w}{V} \sqrt{\frac{D}{d_{cp}}} + fR_3 \right); \quad i_0 = \frac{\lambda V^2}{2gD}, \quad (2)$$

где  $V_{kp}$  – критическая скорость гидротранспортирования, м/с;  $c_0, c_1, c$  – эмпирические константы ( $3,0 \leq c_0 \leq 3,2$ ;  $3,4 \leq c_1 \leq 5,5$ ;  $0,3 \leq c \leq 3,0$ );  $D$  – диаметр трубопровода, м;  $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;  $R_1, R_2, R_3$  – массовые доли в транспортируемом материале тонких ( $d < 0,15$  мм), мелких ( $0,15 \text{ мм} < d < 2 \text{ мм}$ ) и кусковых ( $d > 2 \text{ мм}$ ) фракций;  $w$  – скорость стесненного падения частиц мелкой фракции, м/с;  $S$  – объемная концентрация пульпы, в долях единицы;  $d_{cp}$  – средневзвешенный диаметр частиц мелкой фракции, м;  $\rho_s$  – относительная средневзвешенная плотность транспортируемого материала;  $f$  – обобщенный коэффициент трения частиц кусковой фракции о нижнюю стенку трубы;  $i$  – гидравлический уклон пульпы, м. вод. ст. / м;  $i_0$  – гидравлический уклон воды, м. вод. ст. / м;  $\lambda$  – коэффициент гидравлического сопротивления трения;  $V$  – средняя расходная скорость гидросмеси, м/с.

Однако опыт применения формул (1) и (2) выявил ряд погрешностей, которые проявляются тем сильнее, чем больше разнородность материала по плотности и гранулометрическому составу. Анализ применения этих формул показал, что основными причинами погрешностей являются неопределенность при выборе значений эмпирических коэффициентов  $c_0, c_1$  и  $c$ , а также необоснованное использование при расчете критической скорости гидротранспортирования принципа суперпозиции вкладов мелких и кусковых фракций.

Формулы А. Е. Смолдырева, послужившие основой для обобщенных зависимостей, предназначались для расчета критической скорости и гидравлического уклона для монодисперсных материалов, то есть материалов, состоящих только либо из частиц тонких, либо мелких, либо кусковых фракций. Поэтому все зависимости для расчета критической скорости содержали одно слагаемое. Такой вид функциональных зависимостей соответствовал результатам экспериментальных исследований, а также

подтверждался фундаментальными выводами специалистов ИГМ НАН Украины [4; 11 – 13] о том, что зависимость гидравлического уклона от скорости в относительных координатах описывается функцией следующего универсального вида:

$$\frac{i}{i_{kp}} = C_0 \left( \frac{V}{V_{kp}} \right)^2 + C_1 \frac{V_{kp}}{V}, \quad (3)$$

где  $i_{kp}$  – гидравлический уклон в критическом режиме;  $C_0, C_1$  – константы, зависящие от состояния внутренней стенки трубопровода.

При переходе к полидисперсным материалам для расчета гидравлического уклона был использован принцип суперпозиции гидравлических сопротивлений, который является общепризнанным и базовым в гидравлике и не нарушает существующих фундаментальных закономерностей, что позволило добавлять в формулу для расчета гидравлического уклона слагаемые, соответствующие тем или иным классам крупности. Одновременно этот же принцип был использован и для критической скорости, при этом расхождения между экспериментальными и теоретическими данными сглаживались введением экспериментальных констант  $C_0, C_1$  и  $C$ . Такой подход позволяет хорошо описывать зависимость критической скорости и гидравлического уклона от концентрации гидросмеси только при удачном выборе коэффициентов и только для некоторых видов полидисперсного материала. В частных случаях, когда транспортируемый материал состоит из частиц двух классов крупности, например, тонких и кусковых, или тонких и мелких, обобщенные формулы преобразуются в такие формулы, в которых критическая скорость рассчитывается по зависимостям с одним слагаемым. В любом из этих случаев принцип суперпозиции при расчете критической скорости не используется, и фундаментальная зависимость (3) не нарушается. Однако в случаях, когда транспортируемый материал представлен всеми тремя фракциями, или когда в нем отсутствуют тонкие частицы, критическая скорость определяется по формуле, состоящей из двух слагаемых, и тогда нарушается фундаментальная зависимость (3).

Критическая скорость в формуле (1) 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 строгие математические выкладки приводят к формуле для расчета критической скорости гидротранспортирования полидисперсных материалов, отличающейся от формулы (1).

В рамках методики А.Е. Смолдырева критическая скорость определяется на основе принципа М.А. Великанова, который в виде формулы может быть записан так [1 – 3]:

$$\frac{i_{kp} - i_{kp}^0}{i_{kp}} = K, \quad (4)$$

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.

Легко убедиться в том, что после подстановки в формулу (4) выражения (2) 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 (1) из рассматриваемого уравнения невозможно получить даже при условии, что коэффициент гидравлического сопротивления не зависит от

критерия Рейнольдса, поскольку при этом сумма соответствующих слагаемых будет находиться под корнем третьей степени. Таким образом, при разработке формулы (1) 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. Очевидно, это было сделано для облегчения расчетов по его методике, поскольку на момент ее создания технический уровень и широта внедрения вычислительной техники оставляли желать лучшего.

Методика А.Е. Смолдырева была модернизирована специалистами ИГТМ НАН Украины [2, 6 – 8]. В частности, была обоснована зависимость величины  $C$  от коэффициента гидравлического сопротивления, что позволило существенно повысить точность расчетов для случая разнородного по плотности и крупности материала и получить формулу для расчета гидравлического уклона

$$i = i_0 + P \left( i_0 R_1 + \frac{0,71}{\sqrt{\lambda}} R_2 \frac{w}{V} \sqrt{\frac{D}{d_{cp}}} + f R_3 \right), \quad (5)$$

в которой, в отличие от формулы (2), отсутствуют эмпирические коэффициенты.

Использование формулы (5) позволяет уточнить зависимости для расчета критической скорости в случае полидисперсного материала, представленного всеми тремя фракциями, или при отсутствии в нем тонких частиц, так как после подстановки выражения (5) в формулу (4) получаем кубическое уравнение относительно безразмерного комплекса, зависящего от критерия Фруда в критическом режиме,

$$x_{kp}^3 - f \sigma R_3 x_{kp} - 0,71 \sigma R_2 Fr_w = 0; \quad (6)$$

$$x_{kp} = \sqrt{\lambda_{kp}} Fr_{kp}; \quad \sigma = \frac{P}{\chi - P R_1}; \quad \chi = \frac{K}{1 - K}; \quad Fr_w = \frac{w}{\sqrt{2 g d_{cp}}}.$$

Значение единственного положительного корня уравнения (6) определяется из выражения [6 – 8; 14]

$$x_{kp} = \begin{cases} \sqrt[3]{0,71 \sigma R_2 Fr_w} z(q), & q \leq 1 \\ \sqrt{f \sigma R_3} z(q), & q > 1 \end{cases} \quad (7)$$

$$z(q) = \begin{cases} \frac{\sqrt[3]{1 + \sqrt{1 - q}} + \sqrt[3]{1 - \sqrt{1 - q}}}{\sqrt[3]{2}}; & q \leq 1 \\ \frac{2}{\sqrt{3}} \cos \left( \frac{1}{3} \arccos \left( \frac{1}{\sqrt{q}} \right) \right); & q > 1 \end{cases} \quad q = \frac{0,29 f^3 R_3^3}{\sigma Fr_w^2 R_1^2 R_2^2}. \quad (8)$$

Из формулы (7) следует, что в случае полидисперсного материала, содержащего частицы мелких и кусковых классов крупности, решение уравнения (6) в зависимости от величины  $q$  может быть сведено к виду, соответствующему наличию частиц либо только кусковых ( $q > 1$ ), либо только мелких ( $q \leq 1$ ) классов крупности. Параметр  $z$  учитывает изменение значения  $x_{kp}$  за счет присутствия частиц кусковых классов крупности при  $q \leq 1$  и присутствия частиц мелких классов крупности, если  $q > 1$ . При этом численный анализ зависимости  $z(q)$  показывает (рис. 1),

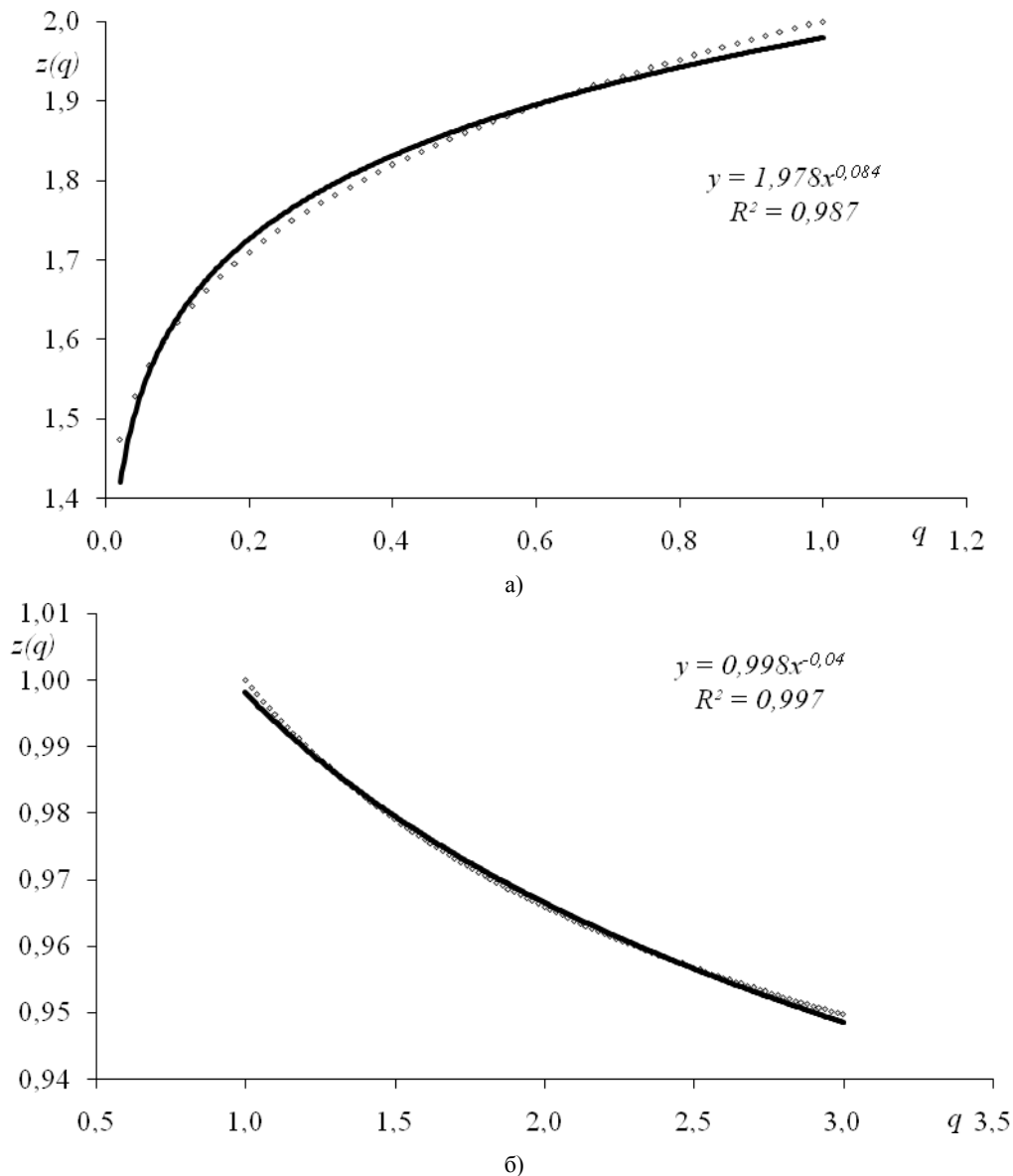


Рис.1. График зависимости  $z(q)$  в разных интервалах значений  $q$

что вместо сложных функций (8) можно с достаточной степенью точности использовать их аппроксимацию степенными функциями

$$z(q) = \begin{cases} 1,9756 q^{0,0827}, & q \leq 1 \\ \frac{0,9981}{q^{0,0463}}, & 1 \leq q \end{cases}. \quad (9)$$

В рассматриваемом случае уравнение для расчета критической скорости гидротранспортирования имеет вид  $\sqrt{\lambda_{kp}} V_{kp} = x_{kp} \sqrt{2gD}$ , и для его решения необходимо знать зависимость величины  $\lambda_{kp}$  от средней расходной скорости потока

пульпы. Анализ известных формул для расчета коэффициента гидравлического сопротивления в зависимости от скорости пульпы показывает, что для гидротранспортных систем используются два вида этой функциональной зависимости

$$\lambda = \frac{a}{\lg^2(bV)}; \quad \lambda = \frac{mV^n}{D^n V^n};$$

$$b = \frac{D}{b'v},$$

где  $a$ ,  $b'$ ,  $n$ ,  $m$  – эмпирические коэффициенты зависимости  $\lambda$  от числа Рейнольдса (логарифмический и степенной закон), для конкретных случаев приводимые в справочной и учебной литературе [9];  $v$  – кинематический коэффициент вязкости пульпы.

Подстановка в рассматриваемое выражение степенной зависимости позволяет аналитически получить формулу для расчета критической скорости гидротранспортирования полидисперсных материалов [1; 6 – 8], тогда как использование логарифмического закона приводит к нелинейному уравнению, решение которого можно получить только численными методами [6 – 8]:

$$V_{kp} = 2^{-n} \sqrt{\frac{2gD^{1+n}}{m v^n}} x_{kp}^{\frac{2}{2-n}}; \quad \frac{V_{kp}}{\lg(bV_{kp})} = x_{kp} \sqrt{\frac{2}{a} gD}.$$

С использованием полученных формул и степенной зависимости коэффициента гидравлических сопротивлений от критерия Рейнольдса параметры гидротранспорта могут быть определены по формуле (5) и следующему выражению

$$V_{kp} = \begin{cases} 2^{-n} \sqrt{\frac{2gD^{1+n}}{m v^n}} (0,71 \sigma R_2 Fr_w)^{2/3} z^2(q); & q \leq 1 \\ 2^{-n} \sqrt{\frac{2gD^{1+n}}{m v^n}} f \sigma R_3 z^2(q); & q > 1 \end{cases} \quad (10)$$

При использовании логарифмического закона с учетом порядка величин числа Рейнольдса, соответствующих критическому режиму течения гидросмеси, возможно следующее разложение в степенной ряд [14]:

$$\frac{\lg(bV_{kp})}{bV_{kp}} \approx 0,43429 \frac{bV_{kp} - 1}{(bV_{kp})^2} + \dots$$

после чего рассматриваемое нелинейное уравнение сводится к квадратному, решение которого в окончательном виде может быть записано так:

$$V_{kp} = \begin{cases} 2,84 \sqrt{\frac{gD}{a}} \sqrt[3]{\sigma R_2 Fr_w} z(q), & q \leq 1 \\ 4,63 \sqrt{\frac{gD}{a}} \sqrt{\sigma R_3} z(q), & 1 < q \end{cases}$$

С учетом зависимостей (9) последнее выражение можно преобразовать в следующую формулу для расчета критической скорости гидротранспортирования:

$$V_{kp} = C \sqrt{gD} \sigma^N (R_3 f)^M \left( \frac{w R_2}{\sqrt{g d_{cp}}} \right)^K; \quad (11)$$

$$C = \begin{cases} 8,14, & q \leq 1; \\ 8,80, & 1 < q \end{cases}; \quad N = \begin{cases} 0,42, & q \leq 1; \\ 0,45, & 1 < q \end{cases}; \quad M = \begin{cases} 0,25, & q \leq 1; \\ 0,36, & 1 < q \end{cases}; \quad K = \begin{cases} 0,17, & q \leq 1; \\ 0,09, & 1 < q \end{cases}.$$

Отметим, что зависимости (10) и (11), в отличие от (1), не нарушают фундаментальную закономерность (3) и не содержат коэффициентов, которые должны определяться экспериментально. Кроме того, формула (11), в отличие от (1) и (10), впервые выражает мультипликативную зависимость критической скорости от свойств тонкой, мелкой и кусковой фракций, которая только корректируется в зависимости от соотношения параметров частиц фракций. При этом частицам каждой фракции соответствует свой множитель:  $\sigma$  – частицам тонких фракций;  $R_2 F_{r_w}$  – частицам мелких фракций;  $R_3 f$  – частицам кусковых фракций. За счет этого формулы (5), (10) и (11) очень удобны для аналитического исследования зависимости критической скорости на экстремумы, что необходимо при выборе рациональных режимов работы гидротранспортных систем и обосновании эффективных скоростей и концентраций пульпы.

Для проверки достоверности полученных зависимостей (5), (10) и (11) были разбиты на две группы и обработаны в соответствии с этими формулами результаты экспериментальных исследований параметров гидротранспорта угля и кварцевого песка, после чего было проведено сравнение результатов экспериментов с результатами расчетов по предлагаемым формулам (рис. 2, 3; табл. 1).

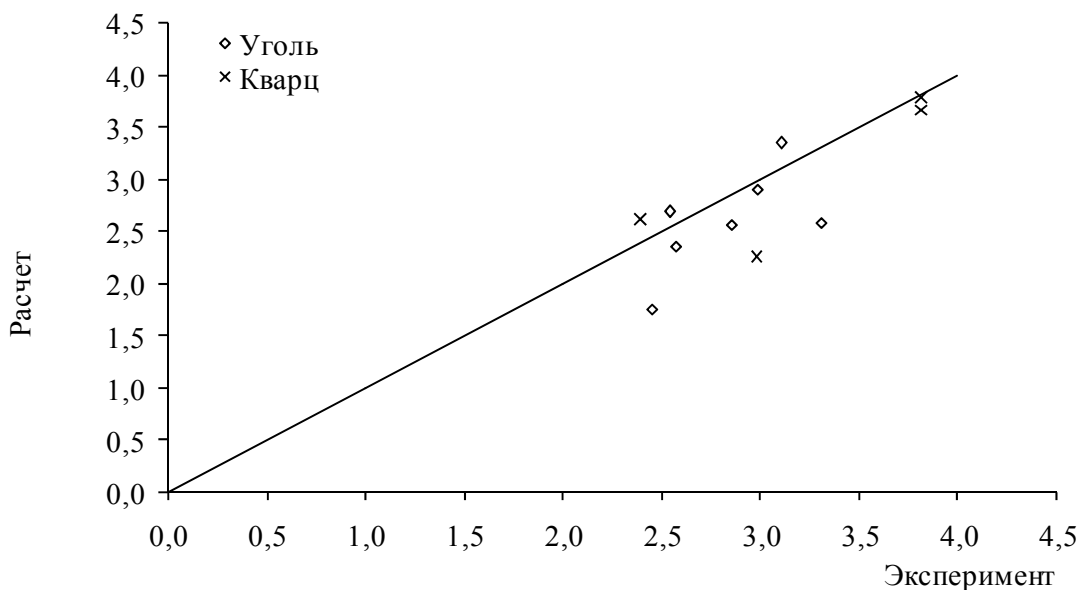
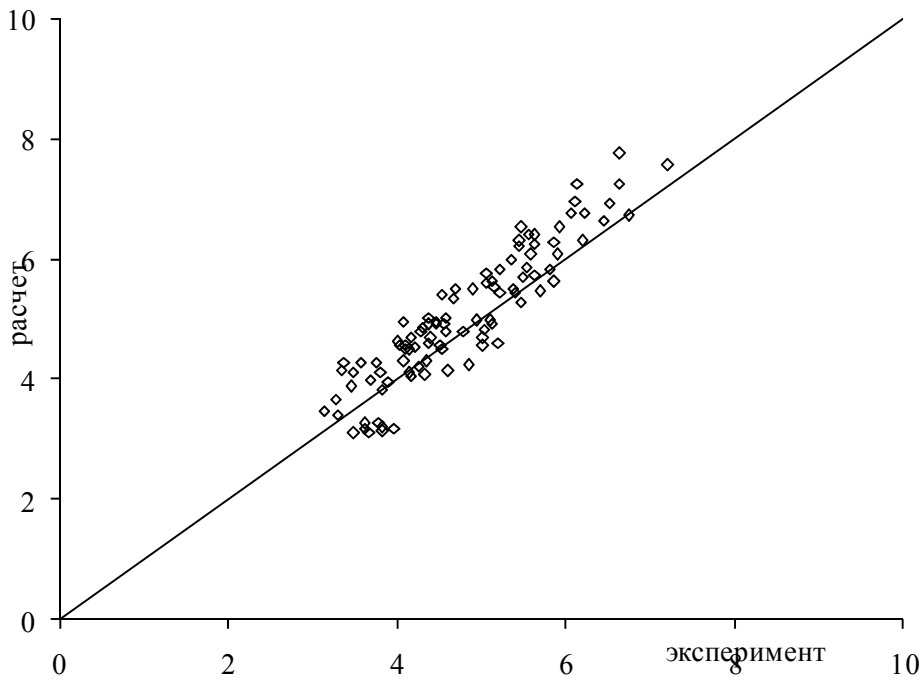
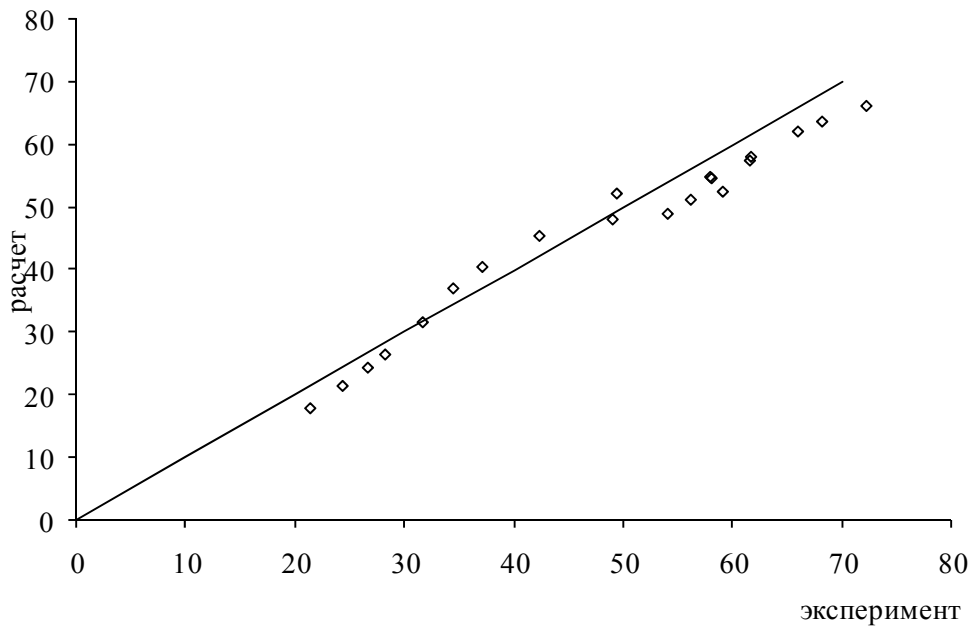


Рис.2. Сравнение результатов теоретических расчетов с экспериментальными данными по определению критической скорости гидротранспортирования угля и песка





а)



б)

**Рис.3. Сравнение результатов теоретических расчетов с экспериментальными данными по определению гидравлического уклона при гидротранспорте: а – уголь; б – песок**

Таблиця 1

## Сравнение результатов теоретических расчетов с экспериментальными данными

При расчете	Погрешность расчетов, %
Критической скорости гидротранспортирования	11,3
Гидравлического уклона при гидротранспорте угля	9,48
Гидравлического уклона при гидротранспорте песка	7,47

К первой группе были отнесены результаты экспериментов по гидротранспорту угля, в котором доля тонких частиц составляла от 0,04 до 0,08; мелких частиц – от 0,34 до 0,53; кусковых – от 0,39 до 0,62 в трубопроводах диаметром 409 и 357 мм с концентрацией пульпы 0,125 и 0,2. Ко второй – результаты экспериментов по гидротранспорту песка с долей частиц крупностью 0,87 мм 76 % и более 2 мм – 24 % в трубе диаметром 150 мм с концентрацией пульпы 8 и 12 %. Из таблицы 1 и рис. 2 и 3 следует вывод о возможности использования формул (5), (10) и (11) для расчета критической скорости гидротранспортирования и гидравлического уклона с точностью, достаточной для инженерных расчетов, поскольку погрешность расчетов критической скорости гидротранспортирования не превышала 12 %.

Поскольку зависимости (10) и (11) получены в явном виде, то это позволяет производить аналитические исследования режимов работы гидротранспортных систем и обосновывать эффективные скорости и концентрации пульпы. Кроме того, в формулах (10) и (11) учтена зависимость критической скорости течения пульпы от коэффициента гидравлического сопротивления, что существенно повышает точность расчетов параметров гидротранспорта и расширяет область применения метода расчета, распространяя его на гидротранспорт по трубам, изготовленным из различных материалов, а также гидротранспорт в присутствии гидродинамически активных веществ. Таким образом, предложенные методы расчета параметров гидротранспортирования актуальны, так как в гидротранспортных системах горных предприятий вместо стальных труб все чаще используются трубы, изготовленные из полиэтилена или поливинилхлорида, имеющие меньшую стоимость и отличающиеся простотой укладки и низким коэффициентом гидравлического трения. Кроме того, использование полимеров как флокулянтов в технологиях сгущения пульп или в качестве гидродинамически активных веществ также приводит к снижению гидравлического сопротивления магистралей [1; 2; 6 – 8].

**Выводы.**

1. Полученные формулы для расчета гидравлического уклона и критической скорости не содержат коэффициентов, которые должны определяться экспериментально, и поэтому применимы для гидротранспортирования любых материалов одной плотности по трубам, изготовленным из различных материалов, а также для гидротранспорта в присутствии гидродинамически активных веществ с существенным повышением точности расчетов.

2. Зависимости для критической скорости получены в явном виде и поэтому удобны для аналитического исследования при выборе рациональных режимов

работы гидротранспортных систем и обосновании эффективной скорости и концентрации гидросмеси.

3. Разработанная методика расчета впервые выражает мультипликативную зависимость критической скорости от свойств тонкой, мелкой и кусковой фракций, которая только корректируется в зависимости от соотношения параметров частиц фракций. При этом без дополнительных ограничений учитывается снижение критической скорости при увеличении концентрации гидросмеси в случае полидисперсного материала, снижение гидравлического уклона при наличии в материале тонких частиц и его увеличение для материалов из частиц мелких и кусковых фракций.

### Бibliографические ссылки

1. **Баранов Ю. Д.** Обоснование параметров и режимов работы систем гидротранспорта горных предприятий / Ю. Д. Баранов, Б. А. Блюсс, Е. В. Семенов, В. Д. Шурыгин. – Днепропетровск, 2006. – 416 с.
2. **Дмитриев Г. П.** Напорные гидротранспортные системы / Г. П. Дмитриев, Л. И. Махарадзе, Т. Ш. Гочиташвили. – М., 1991. – 304 с.
3. **Смолдырев А.Е.** Трубопроводный транспорт. / А. Е. Смолдырев. – М., 1980. – 390 с.
4. **Криль С. И.** Напорные взвесенесущие потоки. / С. И. Криль. – Киев, 1990. – 160 с.
5. **Булат А. Ф.** Модели элементов гидротехнических систем горных. / А. Ф. Булат, О. В. Витушко, Е. В. Семенов. – Днепропетровск, 2010. – 216 с.
6. **Витушко О. В.** Усовершенствование методики расчета гидравлического уклона пульпы при гидротранспорте отходов обогащения / О. В. Витушко, Н. А. Никифорова, Е. В. Семенов // Науч.-аналит. и произв. журнал “Горное оборудование и электромеханика”. – 2009. – № 10. – С. 41 – 44.
7. **Витушко О. В.** Усовершенствование методики расчета критической скорости при гидротранспорте отходов обогащения / О. В. Витушко, Н. А. Никифорова, Е. В. Семенов // Науч.-аналит. и произв. журнал “Горное оборудование и электромеханика”. – 2009. – № 11. – С. 46 – 51.
8. **Витушко О. В.** Усовершенствование метода расчета параметров гидротранспорта полидисперсных материалов / О. В. Витушко, Н. А. Никифорова, Е. В. Семенов // Науч. - техн. и произв. журнал «Металлургическая и горнорудная промышленность». – 2009. – № 6. – С. 66 – 69.
9. **Курганов А.М.** Гидравлические расчеты систем водоснабжения и водоотведения. / А. М. Курганов, Н. Ф. Федоров. – Л., 1986. – 440 с.
10. П 59-72/ Инструкция по гидравлическому расчету систем напорного гидротранспорта грунтов. – Л.: Энергия, 1972. – 24 с.
11. **Силин Н. А.** Гидротранспорт (вопросы гидравлики) / Н. А. Силин, Ю. К. Витошкин, В. М. Карасик, В. Ф. Очеретько. – К., 1971. – 158 с.
12. **Карасик В. М.** Интенсификация гидротранспорта продуктов и отходов обогащения горно-обогатительных комбинатов. / В. М. Карасик, И. А. Асауленко, Ю. К. Витошкин. – К., 1976. – 156 с.
13. **Силин Н. А.** Гидротранспорт угля по трубам и методы его расчета. / Н. А. Силин, Ю. К. Витошкин. – К., 1964 – 88 с.
14. **Двайт Г. Б.** Таблицы интегралов и другие математические формулы. / Г. Б. Двайт. – М., 1983. – 172 с.

*Надійшла до редколегії 01.11.2013.*