

**НОВАЯ МЕТОДИКА РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ ГИДРОТРАНСПОРТА**

Пропонується методика розрахунку критичних швидкостей та гідравлічних ухилів під час надкритичних режимів течії в круглих трубах, яка вперше враховує вплив гранулометричного та густинного складу матеріалу, що транспортується, а також діаметра трубопроводу та концентрації гідросуміші. Наводиться порівняння результатів розрахунків за даною методикою з експериментальними даними Інституту гідромеханіки НАН України щодо гідротранспорту водо-піщаних сумішей.

**THE NEW CALCULATION PROCEDURE  
OF HYDROTRANSPORT PARAMETERS**

The procedure of calculation of critical velocities and hydraulic slopes during overcritical flow conditions in round pipes, which first takes into account the influence of granulometric and density composition of transporting material, of the pipeline diameter and of hydraulic liquid concentration is offered.

Трубопроводный гидротранспорт является наиболее перспективным для доставки исходных россыпей к месту обогащения при разработке россыпных месторождений, незаменим при отводе и складировании отходов обогащения черных и цветных руд, угля, отходов металлургических и химических предприятий, а также при повторной переработке техногенных месторождений, которые в большинстве случаев представлены гидроотвалами. Большая часть материалов, перемещаемых существующими гидротранспортными комплексами горных предприятий, является не только полидисперсными, но и разноплотностными [1, 2]. Однако на сегодняшний момент неизвестны методики расчета критической скорости гидротранспортирования и гидравлических уклонов для таких материалов. Большая часть зависимостей предназначена для монодисперсных или полидисперсных материалов одной плотности [3-8]. Использование этих зависимостей для расчета параметров гидротранспорта россыпей от мест добычи к месту переработки или внутрифабричных гидротранспортных установок приводит к существенным погрешностям, поскольку плотности руды и породы могут различаться в несколько раз [9]. Такие погрешности при эксплуатации гидротранспортных комплексов приводят или к необоснованно завышенному потреблению главного экологического ресурса – воды, или к нестабильной работе установки, высокому потреблению электроэнергии и срыву плановых показателей производства.

В Украине наибольшее распространение получили две научные концепции описания параметров гидротранспортирования – Московской научной школы профессора А.Е. Смолдырева [7, 8] и Киевской научной школы профессора С.И. Криля [3-6].

Первая концепция рассматривает особенности движения частиц различной гидравлической крупности и соответствующие им зависимости для критиче-

ских скоростей и гидравлических сопротивлений. При этом параметры гидротранспортирования для смеси частиц предлагается определять на основе принципа суперпозиции соответствующих величин [7, 8]. Отличительной особенностью этой методики является возможность расчета для частиц крупностью более 3 мм, однако для частиц меньшего диаметра точное значение экспериментальных констант не обосновано.

Вторая концепция основана на использовании вероятностного осреднения при построении уравнений течения гетерогенных сред с использованием аппарата обобщенных функций [3]. При этом для определения гидравлических сопротивлений используется уравнение Бернулли для потока гидросмеси, а критические скорости определяются из условия равенства турбулентных касательных напряжений на нижней стенке потока при течении гидросмеси и при течении чистой воды. Отличительной чертой этой методики является определение величины критической скорости с учетом асимметрии потока пульпы, однако расчеты по этой методике возможны для частиц крупностью менее 2 мм.

Отметим, что при этом ни одна из этих концепций не учитывает различие плотностей транспортируемых частиц.

Целью статьи является разработка методики расчета критических скоростей и гидравлических уклонов в круглых трубах при транспортировании разноплотностных полидисперсных материалов с частицами крупностью более 3 мм.

Для расчета гидравлических сопротивлений при течении гидросмеси в сверхкритических режимах использовано уравнение Бернулли для потока гидросмеси [3], а критическая скорость гидротранспортирования определялась из условия равенства касательных напряжений на нижней стенке трубы и напряжений силы трения скольжения твердого материала о дно трубы [3]. Влияние частиц крупностью более 3 мм в уравнении для определения критической скорости и в формуле для расчета гидравлического уклона учитывается введением дополнительного слагаемого, которое отражает гидравлический уклон от кусковых частиц в методике А.Е. Смолдыдева [7].

Предполагается, что транспортируемый материал представляет собой совокупность  $n$  различных твердых материалов, каждый из которых характеризуется своими плотностью  $\bar{\rho}_s^i$ , средним диаметром частиц  $d_i$ , гранулометрическим составом и массовой долей  $\theta_i$  в смеси твердых материалов ( $i = 1, 2 \dots n$ ). При этом средний диаметр частиц каждого компонента подчиняется условию

$$d/D \leq 0.004; \quad (1)$$

$$d = \sum_{i=1}^n \theta_i d_i, \quad (2)$$

где  $D$  – внутренний диаметр трубопровода;  $d$  – средний диаметр частиц

транспортируемого материала.

В формулах (1) и (2) индексом «*i*» отмечены параметры твердых частиц соответствующих *i*-му компоненту твердого материала в гранулометрическом или фракционном составе.

Расчет критической скорости предлагается производить по следующим формулам:

$$u_{kp} = (1 + \psi_{kp}) Fr_{kp} \sqrt{gD}; \quad (3)$$

$$\frac{Fr_{kp}}{\lg Fr_{kp} - f_3} = 1,742 \sqrt{\rho_s - 1} \Gamma_{kp}; \quad (4)$$

$$\Gamma_{kp} = \sqrt{\frac{1.42 \left(\frac{d}{D}\right)^{0,3} \left[ 1 + 0,527 \cos\left(\frac{90 n_{0,01} C_{kp}}{1 - (1 - n_{0,01}) C_{kp}}\right) \right] th(2,38 \psi_{kp}^{0,433}) - f_3 k \sqrt{\rho_s - 1}}{\left[ \frac{1}{1 + \psi_{kp}} \frac{1}{(1 - C_{kp})^2} + R_{kp} \left(\frac{\psi_{kp}}{C_{kp}}\right)^2 \right] (1 + f_2 th(11,41 \psi_{kp}^{0,86}))}}; \quad (5)$$

$$f_3 = \frac{b_D}{1,8} + \lg\left(\frac{\sqrt{gD^3}}{\nu}\right); \quad f_2 = 0,52 (\lg Re_s)^{1,65}; \quad Re_s^i = \frac{w_s^i d_i}{\nu_w}; \quad Re_s = \sum_{i=1}^n \theta_i Re_s^i;$$

$$\rho_s = \sum_{i=1}^n \theta_i \rho_s^i; \quad \psi_{kp}^i = \frac{G_s}{\rho_w Q_w^{kp}} \frac{\theta_i}{\rho_s^i}; \quad \psi_{kp} = \frac{G_s}{\rho_w Q_w^{kp}} \sum_{i=1}^n \frac{\theta_i}{\rho_s^i};$$

$$C_{kp} = \sum_{i=1}^n C_{kp}^i; \quad R_{kp} = \sum_{i=1}^n \frac{\rho_s^i \psi_{kp}^i}{1 + \psi_{kp}^i};$$

$$C_{kp}^i \left[ 1 - 0,45 f_p^i \left( 1 - \frac{C_{kp}^i}{0,3(2 - n_{0,1}^i)} \right)^{2,16} \right] = \frac{\psi_{kp}^i}{1 + \psi_{kp}^i}; \quad n_{0,01} = \sum_{i=1}^n \theta_i n_{0,01}^i; \quad (5)$$

$$f_p^i = 1 + sign \left[ \lg\left(\frac{Re_s^i}{7,586}\right) \right] th \left[ 0,967 \left| \lg\left(\frac{Re_s^i}{7,586}\right) \right|^{0,6} \right]; \quad n_{0,1} = \sum_{i=1}^n \theta_i n_{0,1}^i,$$

где  $u_{kp}$  – критическая скорость гидротранспортирования;  $Fr_{kp}$  – критерий Фруда;  $Q_w$  – объемные расходы жидкой фазы;  $b_D$  – параметр, характеризующий степень шероховатости внутренней поверхности данной трубы и определяемый на основе данных гидравлических испытаний труб [4 – 6];  $u_w$  – средняя по расходу скорость движения жидкости;  $\rho_s$  – безразмерная плотность частиц твердой фазы;  $G_s$  – массовый расход твердого материала;  $\psi$  – относительная объемная расходная концентрация твердых частиц [3];  $Re_s$  – число

Рейнольдса, выраженное через гидравлическую крупность твердой частицы  $w$  и средний диаметр  $d$ ;  $C_{\max}$  – предельно возможная объемная концентрация гидросмеси;  $n_{0,1}$  – доля частиц диаметром менее 0,1 мм в транспортируемом материале [3];  $C_p$  – средняя по площади поперечного сечения трубы объемная расходная концентрация твердой фазы;  $C$  – средняя по площади истинная объемная концентрация твердой фазы;  $\rho_s, \rho_w$  – плотность твердых частиц и несущей жидкости;  $g$  – ускорение силы тяжести;  $V_w$  – кинематический коэффициент вязкости воды;  $\theta_i$  – массовая доля частиц  $i$ -го компонента в смеси твердых материалов ( $i = 1, 2 \dots n$ ).

В формулах (3) – (5) индексом «кр» отмечены значения величин в критическом режиме гидротранспортирования.

Значение критерия Фруда в критическом режиме определяется из решения нелинейного уравнения (4), в процессе решения которого значение средней по площади истинной объемной концентрации  $i$ -го компонента твердой фазы рассчитывается из решения алгебраического уравнения (5).

Зная величины критической скорости, а также значение относительной объемной расходной концентрации твердых частиц и критерия Фруда в критическом режиме, величину гидравлического уклона предлагается рассчитывать по следующим зависимостям:

$$i = \wp \left[ 1 - 0,468 \left( 1 - Fr_{kp} \frac{\sqrt{gD}}{u_w} \right)^{0,59} \right] \lambda_w \frac{u_w^2}{2gD} + fS_k (\rho_s - 1); \quad (6)$$

$$\wp = \left[ 1 + f_2 th \left( 11,41 \psi_{kp}^{0,86} \right) \right] \left( \frac{1}{1 + \psi} \frac{1}{(1 - C)^2} + R \left( \frac{\psi}{C} \right)^2 \right) u_w = \frac{4Q_w}{\pi D^2}; \quad Re_w = \frac{u_w D}{\nu_w};$$

$$\lambda_w = \frac{1}{(1,81 \lg Re_w - b_D)^2}; \quad R = \sum_{i=1}^n \frac{\bar{\rho}_s^i \psi^i}{1 + \psi^i}; \quad \psi^i = \psi_0 \frac{\theta_i}{\rho_s^i}; \quad \psi = \psi_0 \sum_{i=1}^n \frac{\theta_i}{\rho_s^i}; \quad C = \sum_{i=1}^n C^i;$$

$$C^i \left[ 1 - 0,45 f_p^i \left( 1 - \frac{C^i}{0,3(2 - n_{0,1}^i)} \right)^{2,16} \right] = \frac{\psi^i}{1 + \psi^i}; \quad (7)$$

$$f_p^i = 1 + sign \left[ \lg \left( \frac{Re_s^i}{7,586} \right) \right] th \left[ 0,967 \left| \lg \left( \frac{Re_s^i}{7,586} \right) \right|^{0,6} \right]; \quad \psi_0 = \frac{G_s}{\rho_w Q_w},$$

где  $Re_w$  – число Рейнольдса для потока воды;  $\lambda_w$  – коэффициент гидравлического сопротивления трения.

При расчете по формуле (6) значение средней по площади истинной объемной концентрации  $i$ -го компонента твердой фазы рассчитывается из решения алгебраического уравнения (7).

Для проверки достоверности расчетов по предлагаемой методике были

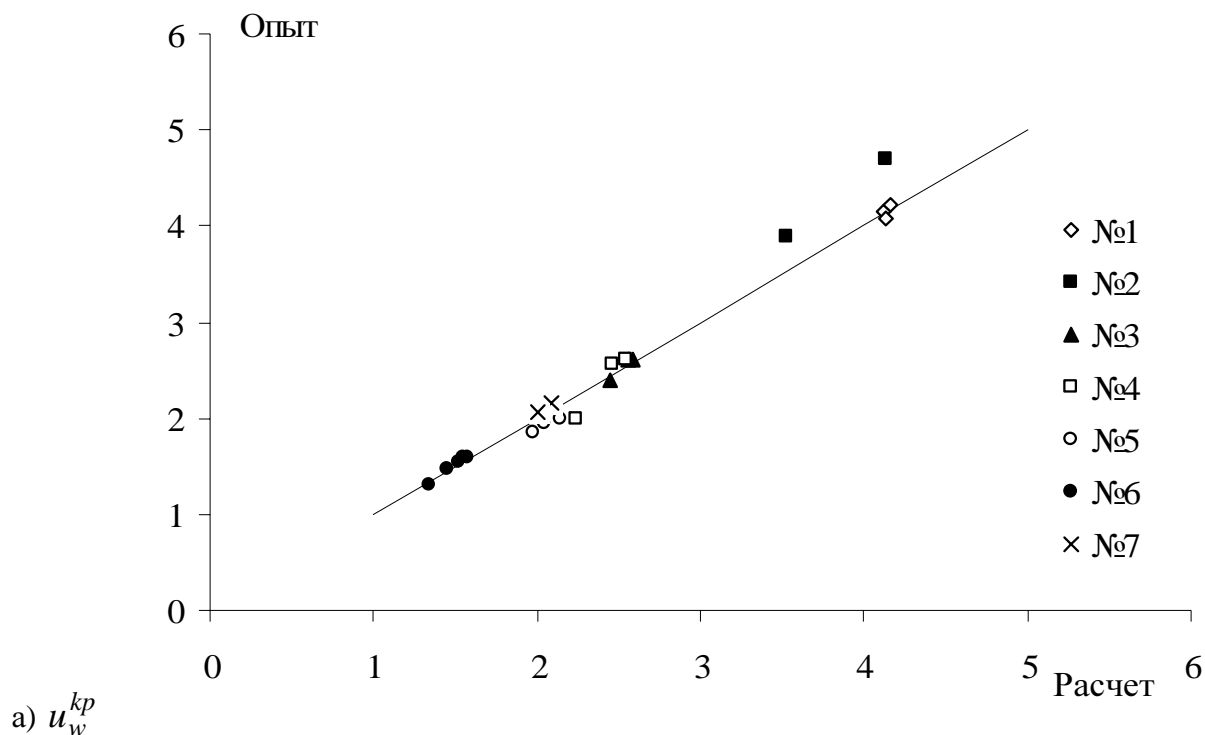
использованы данные измерений критических скоростей и соответствующих им гидравлических сопротивлений при гидротранспорте различных твердых материалов в горизонтальных трубах разных диаметров (см. табл. 1) [46, 10]. Результаты сопоставления расчетных значений  $100i_{kp}$  и  $u_{kp}$ , полученных по предлагаемой методике, с экспериментальными данными (см. табл. 1) показаны на рис. 1.

Таблица 1 – Характеристики твердых материалов и труб, для которых заимствованы опытные данные

Частицы	$\rho_s$	$d$ , мм	$D$ , м	$b_D$	Источник
песок	2,65	0,33	0,800	1,70	[4]
песок	2,65	0,292	0,614	2,80	[4]
песок	2,65	0,263	0,202	2,22	[5]
отходы	3,36	0,338	0,103	1,80	[5]
песок	2,65	0,423	0,103	2,65	[4]
песок	2,65	0,290	0,504	1,52	[6]
гравий	2,65	0,930	0,111	1,86	[10]

Из рисунка видно, что среднее относительное отклонение расчетных значений от опытных для  $i_{kp}$  составляет 8,3 %, а для  $u_{kp}$  – 3,9 %.

Таким образом, разработанная методика расчета параметров гидротранспорта для неоднородных по плотности твердых дисперсных материалов является вполне достоверной.



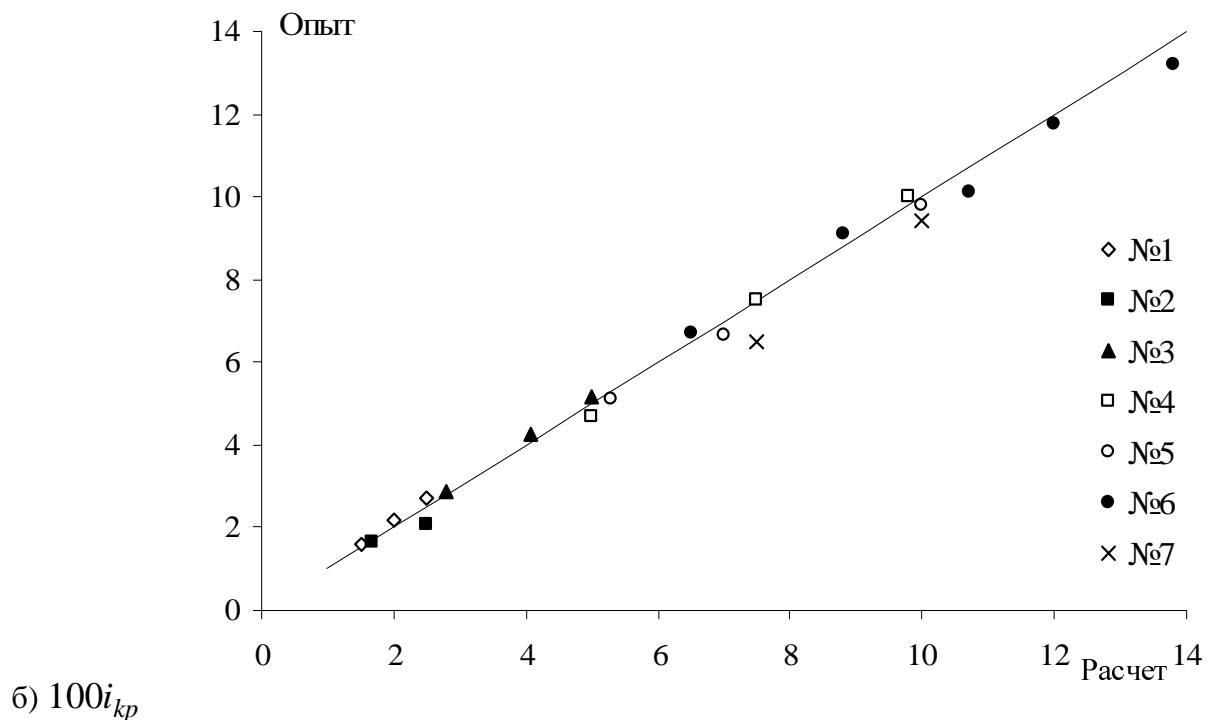


Рис. 1 – Сопоставление результатов расчетов параметров гидротранспорта по разработанной методике с результатами экспериментов Института гидромеханики НАН Украины по гидротранспорту песка

Результаты теоретических исследований в течение 2005 года апробированы в условиях карьерного гидротранспортного комплекса и обогатительной фабрики Вольногорского горно-металлургического комбината, где перерабатываются россыпи Восточного участка Малышевского месторождения. В течение первого полугодия 2006 года предлагаемая методика была опробована при расчетах параметров и режимов работы гидротранспортных комплексов Южного и Центрального горно-обогатительных комбинатов при отводе отходов обогащения и при подаче техногенных песков на повторную переработку.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Совершенствование режимов работы гидротранспортных установок технологий углеобогащения / Е.Л. Звягильский, Б.А. Блюсс, Е.И. Назимко, Е.В. Семененко. – Севастополь: «Вебер», 2002. – 247 с.
2. Проблемы разработки россыпных месторождений / И.Л. Гуменик, А.М. Сокил, Е.В. Семененко, В.Д. Шурыгин. – Днепропетровск: Січ, 2001. – 224 с.
3. Криль С.И. Напорные взвесенесущие потоки. – К.: Наук. думка, 1990. – 160 с.
4. Силин Н.А., Коберник С.Г. Режимы работы крупных землесосных снарядов и трубопроводов. – К.: Изд-во АН УССР, 1962. – 215 с.
5. Коберник С.Г., Войтенко В.И. Напорный гидротранспорт хвостов горнообогатительных комбинатов. – К.: Наук. думка, 1967. – 140 с.
6. Карасик В.М., Асауленко И.А., Витошкин Ю.К. Интенсификация гидротранспорта продуктов и отходов обогащения горно-обогатительных комбинатов. – К.: Наукова думка, 1976. – 156 с.
7. Смолдырев А.Е. Гидро- и пневмотранспорт в металлургии. – М.: Металлургия, 1985.–383 с.
8. Дмитриев Г.П., Махарадзе Л.И., Гочиташвили Т.Ш. Напорные гидротранспортные системы. – М.: Недра, 1991. – 304 с.
9. Семененко Е.В. Оценка взвешивающей способности и критических параметров напорных взвесенесущих потоков // «Промышленная гидравлика и пневматика». – 2005. – №1(7). – С. 24-30.
10. Кривенко Ю.Н. Исследование высококонцентрированных потоков, содержащих крупнозернистый

материал: дисс. ... канд. техн. наук. – Киев, 1968. – 107 с.

11. Гончаров В.Н. Движение наносов. – Л.-М: ОНТИ, Главная редакция строительной литературы, 1938. – 312 с.

**УДК 622.271.3**

Асп. А.В. Черняев

(Национальный горный университет)

### **ЭФФЕКТИВНОСТЬ ДОРАБОТКИ НЕРУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ В ГЛУБИНУ НИЖЕ ГРАНИЦЫ ПОДСЧЕТА ЗАПАСОВ**

Для представницького нерудного Болеславчикського родовища гранітів приведено можливі схеми розробки, з приведенням техніко-економічних показників для кожної. Доведено, що є перспективи доробки даного родовища на глибину нижче проектної (відмітка – 150,0 м) без розносу бортів, навіть при двох перекладках пустих порід зберігається необхідна рентабельність підприємства.

### **EFFICIENCY OF COMPLETION NONMETALLIC DEPOSITS BUILDING MATERIALS IN DEPTH BELOW BORDER CALCULATION OF STOCKS**

For representative nonmetallic Boleslavchisky deposits of granite are resulted possible schemes of development, with reduction of technical and economic parameters everyone. It is proved, that there are prospects of completion of the given deposit on depth below design (a mark - 150.0 м) without diversion boards, even at two carrying over dead rocks is kept necessary profitability of the enterprise.

Первые печатные работы, по определению границ карьеров, относятся к 1924 году. Начиная с 1927 года, усиленно велись исследования по определению рациональной глубины карьеров. В те года такие исследования опирались на карьеры Криворожья, которые уже имели глубину 80-100 м. На этом этапе, при ведении горных работ открытым способом, для определения конечной глубины карьера использовался метод основанный на сравнении контурного и экономически целесообразного коэффициента вскрыши.

Из научной литературы известно, что задачи, связанные с определением границ карьера и его предельной глубины, решались многими учеными [1-16]. Ими установлены корреляционные зависимости между длиной и шириной карьерного поля, предельной глубиной отработки и производительностью карьера по горной массе, выполнен анализ объемов открытой разработки в зависимости от конечной глубины карьера, угла падения и мощности залежи полезного ископаемого, для рудных и угольных месторождений установлены зависимости между предельной глубиной карьера, коэффициентом вскрыши, мощностью полезного ископаемого, углами откоса бортов, затратами на производство вскрышных и добычных работ, мощностью наносов, а также с граничным коэффициентом вскрыши и минимально возможной шириной дна карьера; говорится, что одним из важнейших параметров при оп-