

УДК 622.753:622.648.24

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ ТРУБОПРОВОДНОГО ГИДРОТРАНСПОРТА РАЗНОПЛОТНОСТНЫХ ПОЛИДИСПЕРСНЫХ МАТЕРИАЛОВ

С. И. КРИЛЬ*, Е. В. СЕМЕНЕНКО**

* Институт гидромеханики НАН Украины, Киев

** Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова НАН Украины, Днепропетровск

Получено 23.02.2009

Предлагается методика расчета критических скоростей и гидравлических уклонов при сверхкритических режимах течения гидросмеси в круглых трубах, впервые учитывающая влияние гранулометрического и плотностного состава транспортируемого материала, диаметра трубопровода и концентрации гидросмеси. Критической считается скорость гидросмеси в режиме, являющимся граничным между режимами движения без заилиения и с заилиением нижней стенки трубы. В основу определения гидравлического уклона положено обобщенное уравнение Бернулли для напорного потока гидросмеси, учитывающее эффективную плотность гидросмеси.

Пропонується методика розрахунку критичних швидкостей і гідравлічних ухилів при надкритичних режимах течії гідросуміші в круглих трубах, яка вперше враховує вплив гранулометричного і густинного складу матеріалу, що транспортується, діаметра трубопроводу і концентрації гідросуміші. Критичною вважається швидкість гідросуміші в режимі, який є граничним між режимами руху без замулення і з замуленням нижньої стінки труби. В основу визначення гідравлічного ухилу покладено узагальнене рівняння Бернулі для напірного потоку гідросуміші, яке враховує ефективну густину гідросуміші.

The procedure of calculation of critical velocity and hydraulic gradient during slurry supercritical 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 slurry concentration, is offered. Slurry velocity at regime that was interfacial between flow regime without silting and with silting of pipe low wall was regarded as critical. At the heart of hydraulic gradient determination was Bernoulli generalized equation for enforced flow that takes into account slurry effective density.

ВВЕДЕНИЕ

Большинство материалов, перемещаемых гидротранспортными комплексами горных предприятий, являются не только полидисперсными, но и разноплотностными [1, 2]. Однако на сегодняшний момент не известны методики расчета критической скорости гидротранспортирования и гидравлических уклонов для таких материалов. Большая часть зависимостей предназначена для монодисперсных или полидисперсных материалов одной плотности [3–8]. Такие формулы могут быть применены для расчета гидротранспорта отходов обогащения или для расчета режимов работы при гидромеханизации работ на карьерах. Однако использование этих зависимостей для расчета параметров гидротранспорта россыпей от мест добычи к месту переработки или режимов работы внутрифабричных гидротранспортных установок приводит к существенным погрешностям, поскольку плотности руды и породы могут различаться в несколько раз [9].

В Украине наибольшее распространение получили две научные концепции описания процесса гидротранспортирования: московской научной

школы профессора А. Е. Смолдырева [7, 8] и киевской научной школы Института гидромеханики НАН Украины [3–6].

Первая концепция рассматривает особенности движения частиц различной гидравлической крупности и соответствующие им зависимости для критических скоростей и гидравлических сопротивлений. При этом параметры гидротранспортирования для смеси частиц предлагается определять на основе принципа суперпозиции соответствующих величин [7, 8].

Вторая концепция основана на использовании при построении уравнений течения гетерогенных сред вероятностного осреднения с применением аппарата обобщенных функций [3]. При этом для определения гидравлических сопротивлений используется уравнение Бернулли для потока гидросмеси, а критические скорости определяются из условия равенства касательных напряжений на нижней стенке трубы при течении гидросмеси и интенсивности силы трения твердых частиц об эту стенку.

Однако ни одна из этих концепций не учитывает различие плотностей транспортируемых частиц.

Цель данной статьи – разработка методики ра-

счета критических скоростей и гидравлических уклонов в круглых трубах при транспортировании разноплотностных полидисперсных материалов.

Для расчета гидравлических сопротивлений при течении гидросмеси в сверхкритических режимах воспользуемся уравнением Бернулли для потока гидросмеси [3] в виде

$$\rho_* \frac{u^2}{2} + p + \rho_p g z + \Delta E_{TP} = \text{const}; \quad (1)$$

$$\rho_* = \rho_w \frac{(1 - C_p)^3}{(1 - C)^2} \beta_w + \rho_s \frac{C_p^3}{C^2} \beta_s;$$

$$C_p = \frac{Q_s}{Q};$$

$$\rho_p = \rho_w (1 - C_p) + \rho_s C_p,$$

где ρ_* – эффективная плотность гидросмеси; u – средняя по сечению скорость гидросмеси; C_p и C – средние по площади поперечного сечения трубы расходная и истинная объемные концентрации твердой фазы; ρ_p – расходная плотность смеси; β_w, β_s – коэффициенты Кориолиса для жидкой и твердой фаз [3]; Q_s, Q – объемные расходы твердой фазы и смеси; ρ_s, ρ_w – плотность твердых частиц и несущей жидкости; p – давление; g – ускорение силы тяжести; ΔE_{TP} – потеря удельной (на единицу объема) энергии на тракте; z – высота расположения оси потока относительно плоскости сравнения.

При равномерном течении гидросмеси в горизонтальной круглой цилиндрической трубе диаметром D , рассмотрев уравнение Бернулли (1) для двух произвольных поперечных сечений потока, можем записать

$$i = \frac{\rho \lambda}{(1 - C_p)^2} i_w; \quad (2)$$

$$i_w = \lambda_w \frac{u_w^2}{2gD}; \quad \lambda = \frac{\lambda_{cm}}{\lambda_w} \beta_{cp}; \quad u_w = \frac{Q_w}{F};$$

$$\bar{\rho} = \frac{(1 - C_p)^3}{(1 - C)^2} + \bar{\rho}_s \left(\frac{C_p}{C} \right)^2; \quad \bar{\rho}_s = \frac{\rho_s}{\rho_w};$$

$$\lambda_w = \frac{1}{(1, 8lgRe_w - b_D)^2}; \quad Re_w = \frac{u_w D}{\nu_w};$$

$$Re_s = \frac{wd}{\nu_w}; \quad C_p = \frac{\psi}{1 + \psi}; \quad \psi = \frac{G_s}{\rho_s Q_w};$$

$$C_{max} = 0.3(2 - n_{0.1});$$

$$C \left[1 - 0.45 f_p \left(1 - \frac{C}{C_{max}} \right)^{2.16} \left(\frac{u_{kp}}{u_w} \right)^{1.66} \right] = C_p; \quad (3)$$

$$f_p = 1 +$$

$$+ \text{sign} \left[\lg \left(\frac{Re_s}{7.586} \right) \right] \text{tg} \left[0.967 \left| \lg \left(\frac{Re_s}{7.586} \right) \right|^{0.6} \right],$$

где Re_w – число Рейнольдса для потока воды; D – внутренний диаметр трубопровода; ν_w – кинематическая вязкость воды; F – площадь поперечного сечения потока; Q_w – объемный расход жидкой фазы; b_D – параметр, характеризующий степень шероховатости внутренней поверхности данной трубы и определяемый на основе данных гидравлических испытаний труб [4–6]; i_w – удельные потери напора на трение в соответствующем потоке чистой (без твердых частиц) жидкости; λ – отношение коэффициента гидравлического сопротивления при движении смеси к аналогичному коэффициенту при движении чистой жидкости; u_w – средняя по расходу скорость движения жидкости; ρ – безразмерная эффективная плотность смеси; u_{kp} – критическая скорость гидротранспортирования; $\bar{\rho}_s$ – безразмерная плотность частиц твердой фазы; β_{cp} – среднее значение коэффициента Кориолиса; G_s – массовый расход твердого материала; ψ – 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].

Таким образом, единственным параметром в (2), который нужно определить на основе опытных данных, является λ . Параметр λ учитывает влияние асимметрии скоростного поля потока гидросмеси на величину гидравлического уклона и определяется на основе данных измерения гидравлических сопротивлений.

Для расчетов использованы данные измерений критических скоростей и соответствующих им гидравлических сопротивлений при гидротранспорте различных твердых материалов в горизонтальных трубах разных диаметров (см. табл. 1) [4–6, 10].

Представив λ в виде $\lambda = \lambda_{kp} \varphi$, можно определить эмпирическую зависимость величин λ_{kp} и φ от соотношения критической и рабочей скоростей потока и числа Re_s , а также параметр

$$\psi_{kp} = \frac{G_s}{\rho_s Q_w^{kp}},$$

где Q_w^{kp} – объемный расход воды в критическом режиме.

Значения λ_{kp} и φ определялись по формулам,

Табл 1. Характеристики твердых материалов и труб, для которых заимствованы опытные данные

Частицы	$\bar{\rho}_s$	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]

вытекающим из (2):

$$\lambda_{kp} = \frac{i_{kp}(1 - C_p^{kp})^2}{i_w \bar{\rho}_{kp}};$$

$$\varphi = \frac{i_w^{kp} i \rho_{kp}}{i_{kp} i_w \rho} \left(\frac{1 - C_p}{1 - C_p^{kp}} \right)^2;$$

$$\bar{\rho}_{kp} = \frac{(1 - C_p^{kp})^3}{(1 - C_{kp})^2} + \bar{\rho}_s C_p^{kp} \left(\frac{C_p^{kp}}{C_{kp}} \right)^2; \quad (4)$$

$$C_p^{kp} = \frac{\psi_{kp}}{1 + \psi_{kp}},$$

где i_{kp} , i_w^{kp} , ρ_{kp} и C_p^{kp} – значения величин i , i_w , ρ_{kp} и C_p в критическом режиме.

Для отыскания вида функций λ_{kp} и φ были обработаны экспериментальные данные, представленные в табл. 1. В результате обработки экспериментальных данных в диапазоне скоростей $u_w^{kp} \leq u_w \leq 3u_w^{kp}$ получены следующие расчетные зависимости:

$$\lambda_{kp} = 1 + 0.52(\lg \text{Re}_s)^{1.65} \text{tg} (11.41\psi_{kp}^{0.86}); \quad (5)$$

$$\varphi = 1 - 0.468 \left(1 - \frac{u_w^{kp}}{u_w} \right)^{0.59}. \quad (6)$$

Таким образом, выражение (2) с учетом (5) и (6) позволяет определить удельные потери напора на трение в прямой горизонтальной трубе в сверхкритических режимах.

Критическая скорость гидротранспортирования определялась из условия равенства касательных напряжений на нижней стенке трубы и напряжений силы трения скольжения твердого материала о дно трубы [3]. При этом гидравлический уклон в критическом режиме течения можно выразить следующим образом:

$$i_{kp} = (\bar{\rho}_s - 1)K_{kp}. \quad (7)$$

Для определения K_{kp} использовались те же экспериментальные данные, что и для величин λ_{kp} и φ . В результате обработки опытных данных получена следующая зависимость для определения K_{kp} , справедливая для $d/D \leq 0.004$:

$$K_{kp} = 2.166 \left(\frac{d}{D} \right)^{0.6} \text{tg} (2.38\psi_{kp}^{0.433}). \quad (8)$$

Подставляя зависимость (8) в (7), получаем с учетом (2) уравнение критического режима гидротранспортирования:

$$\frac{\lambda_{kp} \bar{\rho}_{kp}}{(1 - C_p^{kp})^2} \lambda_w^{kp} \frac{(u_w^{kp})^2}{2gD} = (\bar{\rho}_s - 1)K_{kp}. \quad (9)$$

Входящие в уравнение (9) параметры λ_{kp} и ρ_{kp} определяются по формулам (5) и (4) соответственно, а параметр K_{kp} – по формуле (8).

Для заданных условий гидротранспортирования уравнение (9) решается относительно u_w^{kp} численным или графическим методами, после чего критическую скорость движения гидросмеси можно определить по формуле

$$u_{kp} = \frac{u_w^{kp}}{(1 - C_p^{kp})}.$$

Результаты сопоставления расчетных значений $100i_{kp}$ и u_w^{kp} , полученных по предлагаемой методике, с экспериментальными данными (см. табл. 1), показаны на рис. 1, из которого видно, что среднее относительное отклонение расчетных значений от опытных для i_{kp} составляет 8.3%, а для u_w^{kp} – 3.9%.

При определении потерь напора для потоков пульпы в вертикальном или наклонном трубопроводе использовать формулу (2) без дополнительных преобразований недопустимо. Согласно (1), удельные потери напора при гидротранспортировании в вертикальной трубе составляют

$$i_* = i' \pm \frac{\rho_p}{\rho_w}, \quad (10)$$

где i' – удельные потери напора на трение в вертикальной трубе. Знак “+” относится к восходящему потоку гидросмеси, а знак “-” – к нисходящему потоку.

Поток гидросмеси в вертикальной трубе, в отличие от потока гидросмеси в горизонтальной трубе, является осесимметричным, то есть параметр λ , входящий в (2), равняется единице, и тогда

$$i' = \frac{\bar{\rho}}{(1 - C_p)^2} i_w. \quad (11)$$

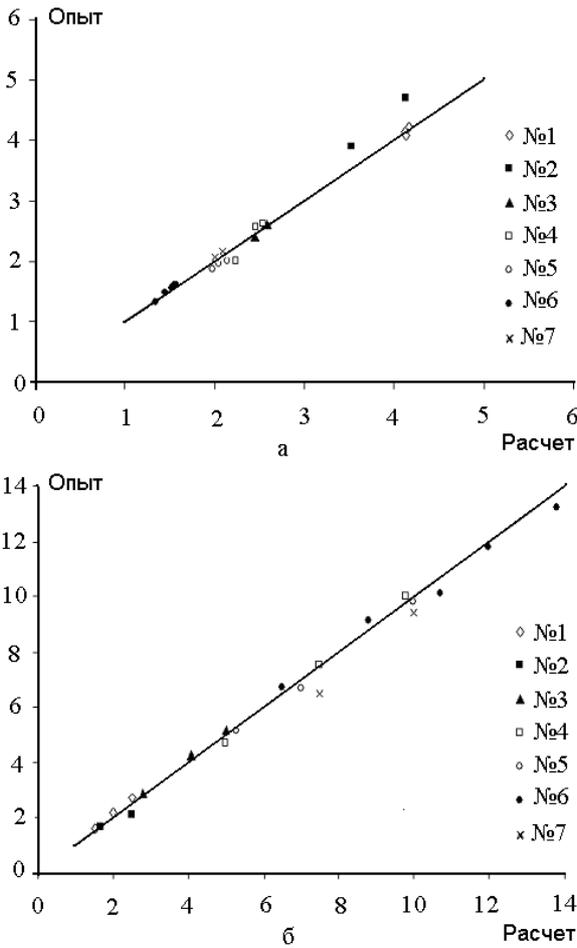


Рис. 1. Сопоставление результатов расчетов величин u_w^{kp} и $100i_{kp}$ по разработанной методике с результатами экспериментов (А - u_w^{kp} ; Б - $100i_{kp}$)

Обычно вертикальный участок трубы сочленен с горизонтальным участком так, что на этих участках массовые расходы твердого материала и жидкости не меняются. В этом случае объемная концентрация C , связанная с величинами ψ и u_w , не будет равна C_p , и с ростом u_w будет уменьшаться, поскольку в восходящем потоке гидросмеси твердые частицы отстают от жидкости.

Выразив разность средних скоростей жидкости и твердых частиц через групповую гидравлическую крупность твердых частиц [3]

$$u_w - \tilde{u}_s = w_s(1 - C)^n, \quad \tilde{u}_s = \frac{C_p}{C(1 - C_p)}u_w,$$

$$n = 4.1 -$$

$$-2.1 \operatorname{sign} \left[\lg \left(\frac{\operatorname{Re}_s}{5.012} \right) \right] \operatorname{tg} \left[\frac{1}{2} \left| \lg \left(\frac{\operatorname{Re}_s}{5.012} \right) \right|^{4/3} \right],$$

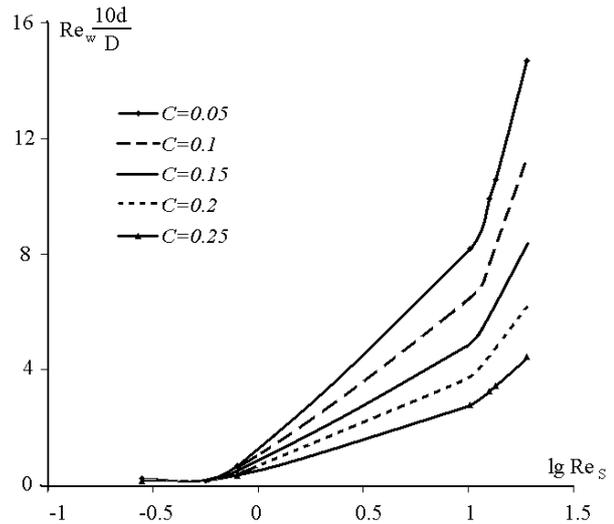


Рис. 2. Зависимость допустимой величины $\operatorname{Re}_w \frac{10d}{D}$ от параметра $\lg \operatorname{Re}_s$ для различных значений концентрации C

получаем уравнение для определения концентрации C в виде

$$C \left[1 - \frac{w_s(1 - C)^n}{u_w} \right] = \psi. \quad (12)$$

Из (12) следует, что в вертикальном восходящем потоке $C \rightarrow \psi$ в двух случаях: при $w_s \rightarrow 0$ и при $u_w \rightarrow \infty$. Таким образом, если выполняется условие (см. рис. 2)

$$\operatorname{Re}_w \geq \operatorname{Re}_s \frac{D}{10d} (1 - C)^n,$$

то в формуле (12) вторым слагаемым в квадратных скобках можно пренебречь и считать, что $C = \psi$. Тогда формулы для расчета величин ρ , i' и ρ_p с учетом (11) и (12) можно преобразовать к следующему виду:

$$\bar{\rho} = \frac{(1 - C_p)^3}{(1 - \psi)^2} + \bar{\rho}_s \frac{C_p^3}{\psi^2};$$

$$i' = \frac{1 + \bar{\rho}_s \psi (1 - \psi)^2}{(1 + \psi)(1 - \psi)^2} i_w; \quad \frac{\rho_p}{\rho_w} = \frac{1 + \bar{\rho}_s \psi}{1 + \psi}.$$

В результате подстановки полученных выражений в (10) будем иметь

$$i_* = \frac{1 + \bar{\rho}_s \psi (1 - \psi)^2}{(1 + \psi)(1 - \psi)^2} i_w \pm \frac{1 + \bar{\rho}_s \psi}{1 + \psi}. \quad (13)$$

При течении гидросмеси в наклонном трубопроводе потери напора i_φ можно определить по формуле [3]

$$i_\varphi = i'' \pm \frac{1 + \bar{\rho}_s \psi}{1 + \psi} \sin \varphi, \quad (14)$$

где i'' – удельные потери напора на трение в наклонном трубопроводе; $\sin \varphi$ – синус угла наклона трубы к горизонту.

Для определения величины i'' , входящей в (14), воспользуемся выражением, полученным в результате экспериментальных исследований гидротранспорта в наклонных трубах [6]:

$$i'' = i' + (i - i') \cos \varphi, \quad (15)$$

где i – удельные потери напора в горизонтальной трубе, сочлененной с наклонной трубой.

С учетом выражений (11), (13) и (15) формулу (14) можно записать так:

$$i_\varphi = Ai_w \pm \frac{1 + \bar{\rho}_s \psi}{1 + \psi} \sin \varphi, \quad (16)$$

$$A = \frac{\bar{\rho} \lambda \cos \varphi}{(1 - C_p)^2} + \frac{1 + \bar{\rho}_s \psi (1 - \psi)^2}{(1 + \psi)(1 - \psi)^2} (1 - \cos \varphi).$$

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

Чтобы распространить эту методику на случай многокомпонентного твердого материала (смеси твердых материалов), необходимо выразить параметры ρ , d , ψ_{kp} , C_{kp} и другие, входящие в соответствующие формулы (2) – (9), через характеристики этого материала.

Пусть смесь разнородных по плотности и средней крупности твердых материалов представляет собой совокупность n различных твердых материалов, каждый из которых характеризуется своими плотностью ρ_s^i , средним диаметром частиц d_i , гранулометрическим составом и массовой долей θ_i в смеси твердых материалов ($i = 1, 2 \dots n$).

В этом случае указанные выше характеристики будут рассчитываться по формулам

$$\rho_s = \sum_{i=1}^n \theta_i \rho_s^i; \quad d = \sum_{i=1}^n \theta_i d_i;$$

$$\psi_{kp}^i = \frac{G_s}{\rho_w Q_w^{kp}} \frac{\theta_i}{\bar{\rho}_s^i};$$

$$\psi_{kp} = \frac{G_s}{\rho_w Q_w^{kp}} \sum_{i=1}^n \frac{\theta_i}{\bar{\rho}_s^i}; \quad C_{kp} = \sum_{i=1}^n C_{kp}^i;$$

$$\text{Re}_s = \sum_{i=1}^n \theta_i \text{Re}_s^i; \quad \text{Re}_s^i = \frac{w_s^i d_i}{\nu_w};$$

$$C_{kp}^i \left[1 - 0.45 f_p^i \left(1 - \frac{C_{kp}^i}{0.3(2 - n_{0.1}^i)} \right)^{2.16} \right] =$$

Табл. 2. Гранулометрический состав россыпи

Класс крупности, мкм	Массовая доля класса в материале, %			
	песок	суглинок	глина	минерал
+0-63	0	90	75	23
-63+100	1	6	10	53
-100+160	8	3	13	18
-160+200	22	1	2	5
-200+315	62	0	0	1
-315+400	6	0	0	0
-400+3000	1	0	0	0

$$= \frac{\psi_{kp}^i}{1 + \psi_{kp}^i};$$

$$f_p^i = 1 + \text{sign} \left[\lg \left(\frac{\text{Re}_s^i}{7.586} \right) \right] \text{tg} \left[0.967 \left| \lg \left(\frac{\text{Re}_s^i}{7.586} \right) \right|^{0.6} \right];$$

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

$$C_{max} = 0.3 \sum_{i=1}^n \theta_i (2 - n_{0.1}^i),$$

где $n_{0.1}^i$ – доля частиц диаметром менее 0.1 мм в гранулометрическом составе i -ого компонента твердого материала.

В качестве примера приведем расчет по разработанной методике параметров гидротранспорта россыпи Восточного участка Малышевского месторождения (см. табл. 2) в шлифованном трубопроводе с внутренним диаметром 0.606 м при массовом расходе россыпи 1200 т/ч. Средний диаметр материалов россыпи d_s , массовая доля θ_i , гидравлические крупности w_s , относительные плотности ρ_s , числа Рейнольдса Re_s и концентрации C_{max} приведены в табл. 3. Гидравлическая крупность определялась в соответствии с рекомендациями В.Н. Гончарова [11], а кинематическая вязкость воды $\nu = 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$. Значения всех расчетных параметров, а также величин

$$i_{kp} = \frac{\lambda_{kp} \bar{\rho}_{kp}}{(1 - C_p^{kp})^2} \lambda_w^{kp} \frac{(w_w^{kp})^2}{2gD},$$

$$i'_{kp} = (\bar{\rho}_s - 1) K_{kp}$$

определяли для значений $w_w^{kp} = 2, 3$ и 4 м/с (см. табл. 4 и рис. 3).

Из рис. 3 видно, что точке пересечения этих графиков соответствуют искомые значения $w_w^{kp} = 3.8$ м/с, $i_{kp} = 0.023$.

Табл 3. Характеристики россыпи

Материал	d_s , мм	w_s , см/с	ρ_s	θ_s
Песок	0.249	2.575	2.70	0.75
Суглинок	0.039	0.103	2.72	0.10
Глина	0.052	0.196	2.75	0.10
Минерал	0.085	0.494	4.59	0.05

Табл 4. Значения расчетных величин

u_w^{kp} , м/с	ψ_{kp}	C_{kp}	λ_{kp}	ρ_{kp}	K_{kp}
2	0.209	0.194	1.277	1.255	0.015
3	0.139	0.144	1.270	1.170	0.136
4	0.105	0.115	1.258	1.127	0.013

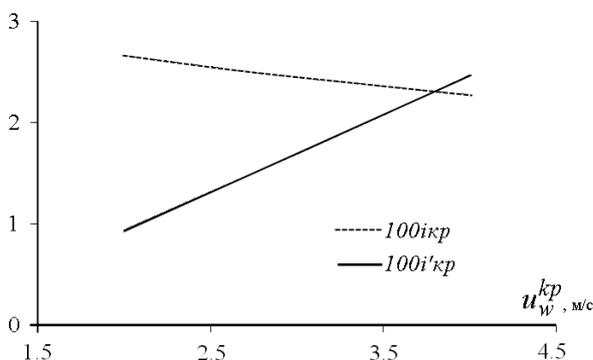


Рис. 3. К определению параметров гидротранспорта без учета влияния мельчайших твердых частиц

При расчете параметров i_{kp} и u_w^{kp} для россыпи Восточного участка Малышевского месторождения не учитывалось влияние на значения этих параметров мельчайших твердых частиц диаметром менее 10 мкм, поскольку в представленном гранулометрическом составе россыпи не указана доля пылевидных частиц крупностью ≤ 10 мкм.

При наличии в гранулометрическом составе мельчайших фракций с объемной долей S_* вместо формулы (7) нужно использовать формулу [3]

$$i_{kp} = \sigma(S_*)(\bar{\rho}_{s,cp} - 1)K_{kp},$$

в которой параметр σ учитывает влияние пылевидных фракций на величину i_{kp} .

Согласно [3], имеем

$$\sigma(S_*) = 0.655 + 0.345 \cos(90S_*),$$

$$S_* = \frac{n_{0.01}C}{1 - (1 - n_{0.01})C}. \quad (17)$$

Формула (17) справедлива для значений $S_* \leq 0.035$. В интервале $0.035 < S_* \leq 0.1$ величина σ

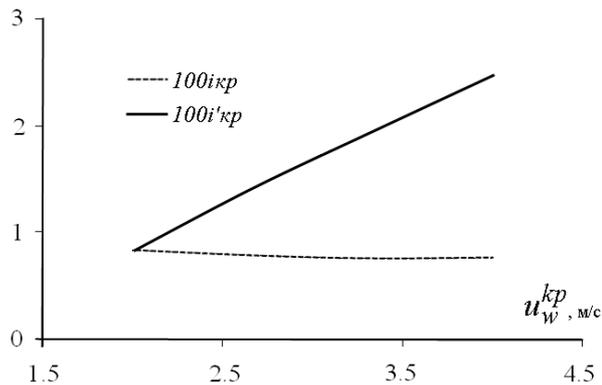


Рис. 4. К определению параметров гидротранспорта с учетом влияния мельчайших твердых частиц

Табл 5. Значения расчетных величин

u_w^{kp} , м/с	C_{kp}	S_*	σ	$100i_{kp}$
2	0.194	0.055	0.31	0.825
3	0.144	0.039	0.31	0.756
4	0.115	0.031	0.33	0.749

постоянна и равна 0.31. Значения расчетных величин представлены в табл. 5.

Доля пылевидных фракций в общем гранулометрическом составе смеси твердых материалов, представленном в табл. 2, была определена путем линейной интерполяции и составила $n_{0.01}=0.245$. График зависимости $100i_{kp}$ от u_w^{kp} показан пунктирной линией на рис. 4.

Точке пересечения этой линии с кривой $100i'_{kp}$ соответствует критическая скорость $u_w^{kp} = 2$ м/с. Удельные потери напора при этой скорости $i_{kp}=0,01$. Как видим, учет параметра σ существенно, более, чем в 2 раза, уменьшает расчетное значение удельных потерь напора и почти в 2 раза уменьшает критическую скорость.

ВЫВОДЫ

В статье впервые предлагается методика расчета гидравлического уклона и критической скорости при гидротранспортировании полидисперсных материалов с различными плотностями фракций. Данная методика построена на фундаментальных положениях гидромеханики гетерогенных сред и учитывает асимметрию в распределении концентрации и скорости пульпы по поперечному сечению потока, различие в скоростях фаз для каждого типа частиц, влияние тонкодисперсных фракций транспортируемого материала на

величину критической скорости и гидравлического уклона. Методика ориентирована на расчет трубопроводных систем горно-обогатительных комбинатов, для которых характерно наличие в магистральной как горизонтальных, так и вертикальных и наклонных участков трубопроводов. Диапазон применения методики позволяет использовать ее для условий всех существующих на Украине россыпных месторождений рудных и нерудных полезных ископаемых, а также техногенных месторождений Криворожского и Донецкого бассейнов.

1. Звягильский Е. Л., Блюсс Б. А., Назимко Е. И., Семенов Е. В. Совершенствование режимов работы гидротранспортных установок технологий углеобогащения.– Севастополь: Вебер, 2002.– 247 с.
2. Гуменик И. Л., Сокил А. М., Семенов Е. В., Шурыгин В. Д. Проблемы разработки россыпных месторождений.– 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 горно-обогатительных 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.: Наук. 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. Семенов 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.– М.–Л.: ОНТИ, Главная редакция строительной литературы, 1938.– 312 с.