

УДК 622.648.01 – 9:621.643.29

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

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

***Национальная металлургическая академия Украины*

****Украинский государственный химико-технологический университет*

РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ГИДРОТРАНСПОРТА ПРИ СУЩЕСТВЕННОМ РАЗЛИЧИИ ПЛОТНОСТИ ТРАНСПОРТИРУЕМЫХ ЧАСТИЦ

На підставі аналізу експериментальних даних ряду авторів і відповідних методик розрахунку запропоновано нові залежності для визначення параметрів гідротранспорту, які при суттєвій різниці в густині частинок одного класу крупності забезпечують адекватність їх розбиття на фракції з урахуванням гідравлічної крупності.

Ключові слова: гідротранспорт, критична швидкість, гідравлічний ухил, тонкі класи частинок.

На основе анализа экспериментальных данных ряда авторов и соответствующих методик расчета предложены новые зависимости для определения параметров гидротранспорта, которые при существенном различии по плотности частиц одного класса крупности обеспечивают адекватность их рассортировки на фракции с учетом гидравлической крупности.

Ключевые слова: гидротранспорт, критическая скорость, гидравлический уклон, тонкие классы частиц.

New relations for parameters of hydrotransport based on the analyze of the some author's experimental base and methodics of calculation, providing adequacy fraction sorting of particles, in one time taking into account their hydraulic size with grate differences between density of some particles classes are presented.

Keywords: hydrotransport, critical velocity, hydraulic inclination, thin classes of particles.

Опыт эксплуатации гидротранспортных комплексов Вольногорского горно-металлургического комбината, Иршанского, Центрального и Южного горно-обогатительных комбинатов свидетельствует о том, что существующие методики расчета 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 (табл. 1) [1 – 3]. В результате известны случаи аккумуляции концентрата на дне трубопровода с периодическими срывами образовавшейся постели, 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

© Е. В. Семененко, Н. А. Никифорова, Л. Г. Татарко, 2013

гидротранспортирования и гидравлического уклона соответствует свое слагаемое, пропорциональное массовой доле этого класса в транспортируемом материале. В случае, когда плотности частиц одного класса крупности существенно различаются, 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.

Таблица 1

Гранулометрический состав и плотность материалов в россыпи Восточного участка Малышевского месторождения [1, 2]

Класс крупности, мкм	Содержание материалов в россыпи, %				Массовая доля класса, %
	2700 кг/м ³	2720 кг/м ³	2750 кг/м ³	4590 кг/м ³	
менее 63	0,00	9,00	7,50	1,22	17,72
от 63 до 100	0,75	0,60	1,00	2,81	5,16
от 100 до 160	5,98	0,30	1,30	0,96	8,53
от 160 до 200	16,43	0,10	0,20	0,27	17,00
от 200 до 315	46,31	0,00	0,00	0,05	46,36
от 315 до 400	4,48	0,00	0,00	0,00	4,48
от 400 до 3000	0,75	0,00	0,00	0,00	0,75
Массовая доля материала, %	74,69	10,00	10,00	5,31	

Известные зависимости [5 – 7, 10] позволяют производить расчет параметров гидротранспорта для полидисперсных материалов одной плотности, которая не превышает 2650 кг/м³. где также предложена классификация материалов по фракциям, в рамках которой для определения гидравлических сопротивлений и критических скоростей получены соответствующие формулы, обобщением которых являются универсальные зависимости, рекомендованные для полидисперсных гидросмесей, образованных из материалов различных классов крупности транспортируемого материала:

$$i = i_0(I + A_1SR_1) + cA_2SR_2 \frac{w_0(I - S)^{n_w}}{V} \sqrt{\frac{D}{d_{cp}}} + fA_3SR_3; \quad (1)$$

$$V_{kp} = c_0 \sqrt{gD} \sqrt[3]{\frac{A_2SR_2w_0(I - S)^{n_w}}{\sqrt{gd_{cp}}}} + c_1 \sqrt{fgDA_3SR_3}; \quad (2)$$

$$A_j = \frac{Ar_j(I - SR_j)}{(1 + Ar_jSR_j)}; \quad Ar_1 = \rho_{sj} - I; \quad i_0 = \frac{\lambda V^2}{2gD}; \quad n_w = \lg \left(\frac{v_0 10^{-5}}{d_{cp} w_0} \right); \quad (3)$$

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

где V_{kp} – критическая скорость гидротранспортирования, м/с; c_0 , c_1 – эмпирические константы, 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, доли единицы; 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 (меньше 0,15 мм); R_2 – массовая доля в транспортируемом материале мелких фракций (более 0,15 и меньше 2 мм); R_3 – массовая доля в транспортируемом материале кусковых фракций (больше 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 гидросмеси, м/с; t – температура пульпы, °С; n_w – показатель степени; ν_0 – кинематический коэффициент вязкости несущей жидкости, м²/с.

При обосновании выбранного разбиения частиц транспортируемого материала на тонкие, мелкие и кусковые фракции А.Е. Смолдырев указывает, что [6; 7]:

- частицы тонких фракций образуют с жидкостью стабильные и нестабильные гидросмеси, при транспортировании турбулентными потоками полностью увлекаются жидкостью, взвешиваются и равномерно распределяются по поперечному сечению потока, образуя, таким образом, однородную жидкость с плотностью, большей, чем плотность воды;

- частицы мелких фракций в напорных потоках воды перемещаются с относительно большим пребыванием во взвешенном состоянии, неравномерно распределяются по поперечному сечению потока, концентрируются в нижней трети сечения трубопровода;

- частицы кусковых фракций в напорных потоках жидкости перемещаются по нижней стенке трубы скольжением, перекачиванием или скачкообразно в нижней части потока с относительно малым периодом пребывания во взвешенном состоянии.

Характер перемещения жидкостью твердых частиц каждой фракции 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 (табл. 1), 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 применения формул (1) – (3) показал, что одной из основных причин этих погрешностей является жесткое разбиение транспортируемого материала на тонкие,

мелькие 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, 11, 12]

$$w_0 = \frac{gd^2}{\nu_0} \frac{Ar}{18}. \quad (4)$$

Мелкие фракции соответствуют частицам с диаметром более 0,15 и менее 2 мм, для которых гидравлическая крупность рассчитывается по формуле (3). Кусковые фракции соответствуют частицам с диаметром больше 2 мм, для которых гидравлическая крупность рассчитывается по формуле Реттингера [4, 11, 12]

$$w_0 = 1,634\sqrt{gdAr}. \quad (5)$$

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 следующим условием [4, 11, 12]:

$$Re \leq 1; \quad (6)$$

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

С учетом формул (4) и (7) нетрудно оценить диапазон изменения значений числа Рейнольдса Re для характерных диапазонов изменения диаметра и плотности частиц тонких фракций (рис. 1, 2).

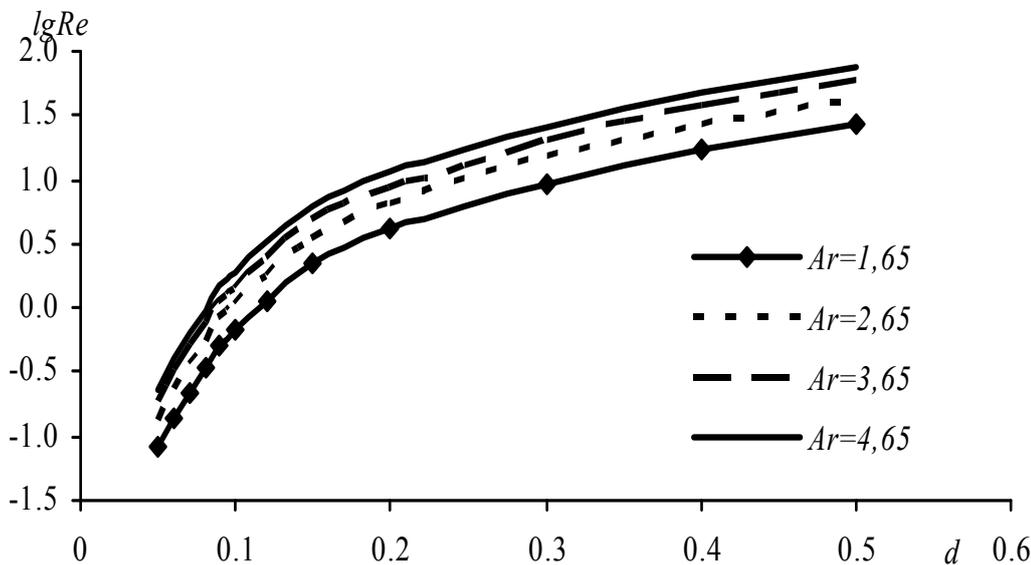


Рис.1. Зависимость логарифма критерия Рейнольдса от диаметра частиц при различных значениях параметра Архимеда

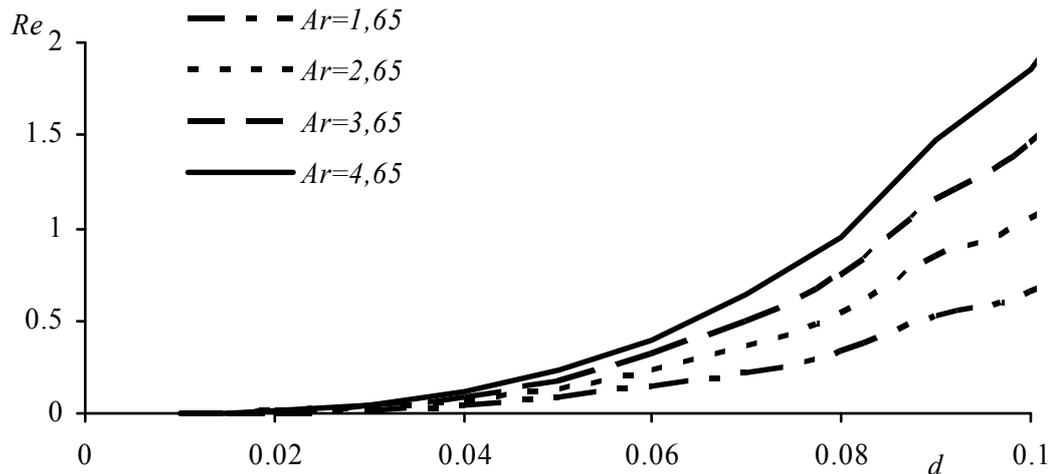


Рис.2. Зависимость значения критерия Рейнольдса от диаметра частиц тонкой фракции при различных значениях параметра Архимеда

Из рис. 1 и 2 видно, что с увеличением плотности частиц тонкой фракции критерий Рейнольдса может превысить единицу, и условие полного увлечения частиц твердого жидкостью, при соблюдении которого гидросмесь может рассматриваться как однородная жидкость, будет нарушено.

Определить граничное значение параметра Архимеда, при котором нарушается условие (6), можно, подставив формулу (4) в неравенство (6) и после несложных преобразований получив ограничения на параметр Архимеда частиц тонких фракций, для которых режим обтекания еще будет стоксовским (рис. 3)

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

$$Ar' = \frac{18v_0^2}{gd^3} . \quad (9)$$

Из рис. 3 видно, что частицы тонких фракций, имеющие относительную плотность более 4, обтекаются в режиме, который уже не позволяет рассматривать их смесь с водой как однородную жидкость более высокой плотности. То есть, 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.

Этот вывод подтверждается результатами других авторов [6 – 9, 13], 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.

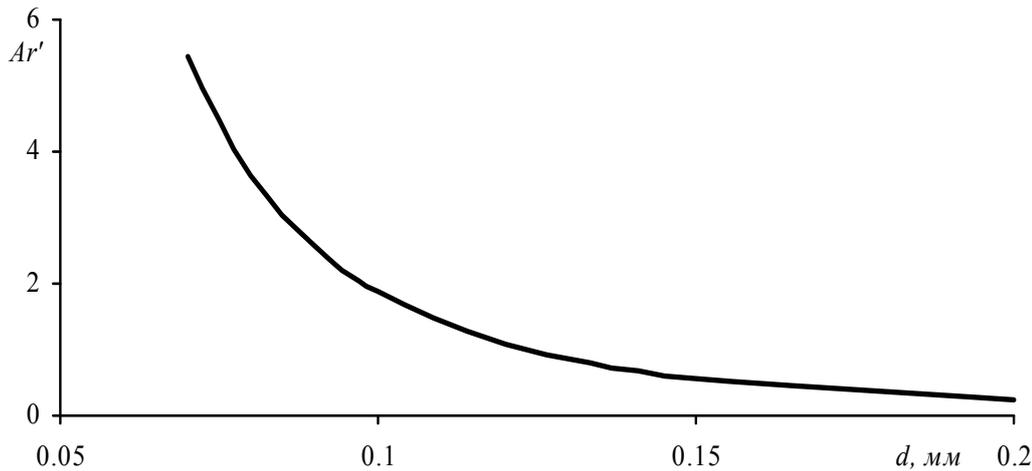


Рис.3. Зависимость граничного значения параметра Архимеда от диаметра частиц тонкой фракции

Выводы. Таким образом, на основе анализа экспериментальных данных ряда авторов, и анализа соответствующих методик расчета, с учетом зависимости (9), предлагается при определении параметров гидротранспорта, разделение на тонкие и мелкие фракции производить не по геометрическому размеру, а по их гидравлической крупности. При этом частицы крупностью менее 0,15 мм, для которых выполняется условие (8), необходимо относить к тонким фракциям, а частицы, для которых это условие нарушается, относить к гидравлически мелким фракциям. За счет этого корректируются массовые доли в транспортируемом материале тонких и мелких фракций, пересчитывается относительная плотность несущей жидкости, а также частиц тонкой и мелкой фракций, уточняется гидравлическая крупность частиц мелких фракций.

Для проверки достоверности расчетов по предлагаемой методике были использованы экспериментальные данные, представленные в табл. 2 [1; 3; 14 – 16].

Таблица 2
Характеристики твердых материалов и труб, для которых получены опытные данные [1]

Материал №	$\bar{\rho}_s$	d_{cp} , м	D , м	W_S , м/с	Источник
1	2,65	0,000330	0,8000	0,0400	[8]
2	2,65	0,000292	0,6140	0,0300	[8]
3	2,65	0,000263	0,2020	0,2700	[9]
4	3,36	0,000338	0,1030	0,0515	[9]
5	2,65	0,000423	0,1030	0,0450	[8]
6	2,65	0,000290	0,0504	0,0310	[16]
7	2,65	0,000930	0,1106	0,1100	[15]

Результаты сопоставления расчетных значений критической скорости и гидравлического уклона с экспериментальными данными представлены на рис. 4,

из которых видно, что среднее относительное отклонение расчетных значений от опытных для гидравлического уклона составляет 8,3%, а для критической скорости – 3,9 %.

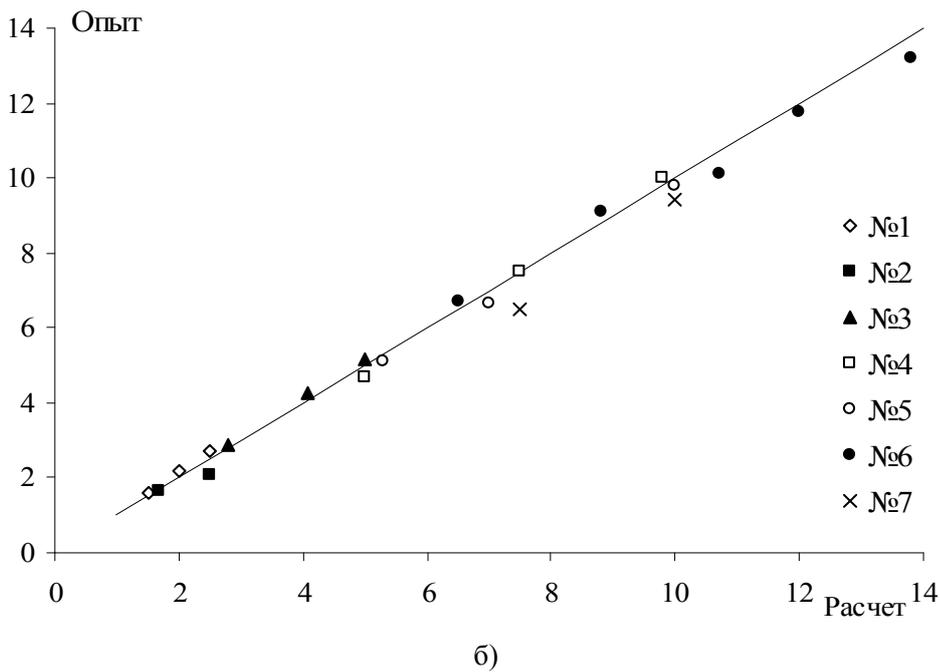
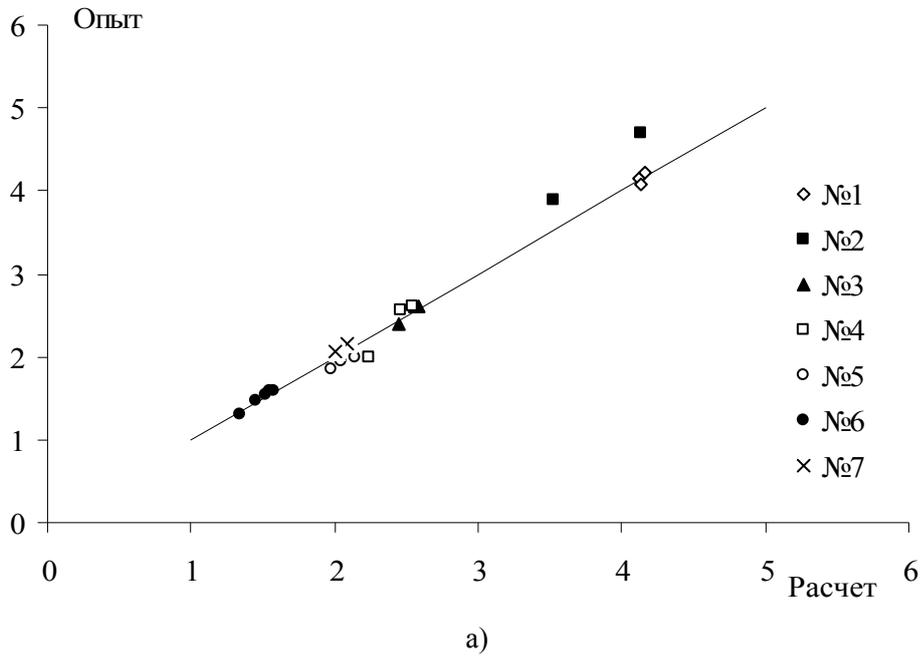


Рис.4. Сопоставление значений, рассчитанных по разработанной методике, с экспериментальными данными в соответствии с табл. 2: а – критическая скорость; б – гидравлический уклон

Сравнение результатов расчетов с экспериментальными данными показывает, что предлагаемая методика адекватно описывает зависимости критической скорости и гидравлического уклона от концентрации пульпы для материалов различного гранулометрического состава с существенной разницей в плотности частиц. При этом разбиение частиц с геометрическим диаметром менее 0,15 мм на основе гидравлической крупности на тонкие и гидравлически мелкие фракции позволяет повысить точность расчетов параметров гидротранспорта.

Библиографические ссылки

1. Семененко Е. В. Научные основы технологий гидромеханизации открытой разработки титан-цирконовых россыпей / Е. В. Семененко. – К., 2011. – 231 с.
2. Баранов Ю. Д. Обоснование параметров и режимов работы систем гидротранспорта горных предприятий / Ю. Д. Баранов, Б. А. Блюсс, Е. В. Семененко, В. Д. Шурыгин. – Днепропетровск, 2006. – 416 с.
3. Силин Н. А. Гидротранспорт угля по трубам и методы его расчета. / Н. А. Силин, Ю. К. Витошкин. – К., 1964 – 88 с.
4. Дмитриев Г. П. Напорные гидротранспортные системы / Г. П. Дмитриев, Л. И. Махарадзе, Т. Ш. Гочиташвили. – М., 1991. – 304 с.
5. Нурок Г. А. Процессы и технологии гидромеханизации открытых горных работ / Г. А. Нурок. – М., 1985. – 583 с.
6. Смолдырев А. Е. Расчет рудничного трубопроводного транспорта / А. Е. Смолдырев. – М., 1961.
7. Смолдырев А. Е. Трубопроводный транспорт. / А. Е. Смолдырев. – М., 1980. – 390 с.
8. 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.
9. Криль С. И. Напорные взвесенесущие потоки. / С. И. Криль. – Киев, 1990. – 160 с.
10. Курганов А. М. Гидравлические расчеты систем водоснабжения и водоотведения. / А. М. Курганов, Н. Ф. Федоров. – Л., 1986. – 440 с.
11. Кизевальтер Б. В. Теоретические основы гравитационных процессов обогащения / Б. В. Кизевальтер. – М., 1979. – 295 с.
12. Шохин В. Н. Гравитационные методы обогащения / В. Н. Шохин, А. Г. Лопатин. – М., 1980. – 400 с.
13. Коберник С. Г. Напорный гидротранспорт хвостов горно-обогатительных комбинатов / С. Г. Коберник, В. И. Войтенко. – К., 1967. – 140 с.
14. Buckingham A. C. Interactions in multidimensional two fluid computations in turbulent flow / A. C. Buckingham, W. J. Siekhaus // AIAA Pap. – 1981. – № 346. – P. 15.
15. Кривенко Ю. Н. Исследование высококонцентрированных потоков, содержащих крупнозернистый материал: дисс. ... канд. техн. наук: 278. – К.: 1968. – 107 с.
16. Силин Н. А. Режимы работы крупных землесосных снарядов и трубопроводов / Н. А. Силин, С. Г. Коберник. – К., 1962. – 215 с.

Надійшла до редколегії 01.11.2013