

*Е.В. Семененко, канд. техн. наук, Н.А. Шмелев
(Украина, Днепрпетровск, ИГТМ НАН Украины)*

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ ГИДРОТРАНСПОРТА ИСХОДНЫХ И ТЕХНОГЕННЫХ РОССЫПЕЙ

Напорный гидротранспорт широко используется на горно-обогатительных комбинатах (ГОК) Украины для доставки исходных россыпей и отведения отходов обогащения. В последнее время в связи с началом переработки лежалых отходов этот вид транспорта используется для доставки техногенных россыпей на повторное обогащение, что связано с транспортированием материалов разнородных по плотностному составу [1 – 3]. Существующим гидротранспортным установкам ГОКов присущи большие объемы потребления электроэнергии и технической воды, поэтому оптимизация их параметров и режимов работы считается наиболее эффективным путем снижения себестоимости переработки минерального сырья и повышения экологической безопасности технологии. Однако реализация этой стратегии предусматривает повышение концентрации перекачиваемых пульп, повышение точности и надежности используемых методов расчета критических скоростей и диаметров, а также гидравлических уклонов – тех параметров гидротранспорта, которые определяют энергоемкость и удельное водопотребление [1, 4 – 6].

Для расчета этих параметров при проектировании гидротранспортных установок железорудных ГОКов СССР использовалось несколько методик расчета [4 – 9]. Все они предусматривают расчет параметров гидротранспорта по средневзвешенной плотности транспортируемого материала, а полидисперсность частиц учитывают различным способом. Поскольку, нормативные документы СССР для данных установок, ограничивали массовую концентрацию пульповых потоков 5%, такие методические упрощения не приводили к существенным ошибкам. Однако, использование этого подхода для более высоких концентраций при гидротранспортировании материалов плотности отдельных фракций которых отличаются в 1.5 или 2 раза, не исследовано и не обосновано, что сдерживает развитие ГОКов Украины.

Цель статьи – разработка методики расчета критических скоростей, гидравлических уклонов и критических диаметров трубопровода при напорном гидротранспорте с учетом полидисперсности и разноплотности частиц транспортируемого материала.

Результаты исследования. Методика должна обеспечивать расчет параметров гидротранспорта полидисперсных материалов, у которых классы крупности имеют разную плотность, со средней плотностью менее 3360 кг/м^3 и средневзвешенной крупностью менее 5 мм. При расчетах по данной методике транспортируемый материал рассматривается как смесь разнородных по плотности и средней крупности твердых компонентов. Каждому компоненту соответствует свой гранулометрический состав и своя средняя плотность частиц.

Для определения гидравлической крупности частиц каждого класса крупности рассчитывают вспомогательные величины, необходимые для дальнейших расчетов [4 – 12]

$$d_j = \frac{d_j^{(1)} + d_j^{(2)}}{2}; \quad Ar_i = \bar{\rho}_s^i - 1; \quad d_s^i = \sum_{j=1}^m \frac{p_{ij}}{100} d_j; \quad \nu_w = \frac{1.007 \cdot 10^{-6}}{0.5631 + 0.0194T + 0.0001T^2};$$

$$Re_s^i = \frac{w_s^i d_i}{\nu_w}; \quad f_p^i = 1 + \text{sign} \left[\lg \left(\frac{Re_s^i}{7.586} \right) \right] th \left[0.967 \left| \lg \left(\frac{Re_s^i}{7.586} \right) \right|^{0.6} \right],$$

где Ar_i – параметр Архимеда частиц i -го компонента транспортируемого материала; d_s^i – средневзвешенный диаметр частиц i -го компонента транспортируемого материала, мм; ν_w – кинематический коэффициент вязкости воды, $\text{м}^2/\text{с}$; T – температура гидросмеси, град; $d_j^{(1)}$ – минимальный диаметр частиц j -го класса крупности, мм; $d_j^{(2)}$ – максимальный диаметр частиц j -го класса крупности, мм; m – количество классов крупности в транспортируемом материале; $\bar{\rho}_s^i$ – средняя плотность частиц i -го компонента транспортируемого материала, $\text{т}/\text{м}^3$; θ_i – массовая доля i -го компонента в транспортируемом материале, %; n – количество компонентов в транспортируемом материале; p_{ij} – массовая доля частиц j -го класса крупности в i -м компоненте транспортируемого материала, %; Re_s^i – число Рейнольдса для частицы i -го компонента транспортируемого материала; sign – функция знака; th – функция гиперболического тангенса; w_s^i – гидравлическая крупность частиц i -го компонента транспортируемого материала, $\text{м}/\text{с}$.

Затем определяют осредненные параметры транспортируемого материала [1, 11, 12]

$$\bar{\rho}_s = \sum_{i=1}^n \theta_i \bar{\rho}_s^i; \quad Re_s = \sum_{i=1}^n \theta_i Re_s^i; \quad n_{0.01} = \sum_{i=1}^n \theta_i n_{0.01}^i; \quad n_{0.1} = \sum_{i=1}^n \theta_i n_{0.1}^i;$$

$$C_m = \sum_{i=1}^n \theta_i C_m^i; \quad d_s = \sum_{i=1}^n \theta_i d_s^i; \quad Ar = \sum_{i=1}^n \theta_i Ar_i; \quad A_0 = 0.521 \lg^{1.65} Re_s;$$

$$C_m^i = 0.3(2 - n_{0.1}^i); \quad A_1 = 1.316 \left(\frac{d_s}{D} \right)^{\frac{n_s}{2}} \sqrt{Ar}; \quad n_s = 0.76 - 0.16 th(2.821 \lg^2 Re_s),$$

где $\bar{\rho}_s$ – плотность транспортируемого материала, $\text{т}/\text{м}^3$; Re_s – число Рейнольдса для частицы транспортируемого материала; $n_{0.01}$ – доля частиц крупностью менее 0.01 мм в транспортируемом материале, д. ед.; $n_{0.1}$ – доля частиц круп-

ностью более 0.1 мм в транспортируемом материале, д. ед.; C_m – максимально возможная концентрация пульпы, д. ед.; d_s – средневзвешенный диаметр частиц транспортируемого материала, мм; Ar – параметр Архимеда частиц транспортируемого материала; $n_{0.1}^i$ – доля частиц крупностью более 0.1 мм в i -м компоненте транспортируемого материала, д. ед.; C_m^i – максимально возможная концентрация пульпы, д. ед. [7].

Исходными данными для расчета критической скорости гидротранспортирования являются: гранулометрический и плотностной составы транспортируемого материала; температура гидросмеси; внутренний диаметр трубопровода; диапазон изменения массовой концентрации пульпы. Расчет критической скорости гидротранспортирования производится после выполнения предварительных расчетов осредненные параметры транспортируемого материала и выполняется в два этапа.

На первом этапе рассчитывается объемная концентрация гидросмеси, а также величины, зависящие от нее. Расчеты для каждого значения массовой концентрации из выбранного диапазона ведутся по формулам [1, 11, 12]

$$C = \sum_{i=1}^n \theta_i C_i; \quad S = \sum_{i=1}^n \theta_i S_i; \quad \psi_{kp} = \sum_{i=1}^n \theta_i \psi_{kp}^i; \quad R_s = \sum_{i=1}^n \theta_i S_i \bar{\rho}_s^i;$$

$$C_i = \frac{C_g}{C_g + (1 - C_g) \bar{\rho}_s^i}; \quad S_i = C_i \left[1 - 0.45 f_p^i \left(1 - \frac{C_i}{C_m^i} \right)^{2.16} \right]; \quad \varphi = \frac{A_0 th(11.41 \psi_{kp}^{0.86})}{1 + A_0 th(11.41 \psi_{kp}^{0.86})};$$

$$\psi_{kp}^i = \frac{S_i}{1 - S_i}; \quad \sigma = \sqrt{1 + 0.527 \cos(90 S_*)}; \quad S_* = \frac{n_{0.01}}{1 - (1 - n_{0.01}) C} C;$$

$$\Phi = \sigma C (1 - C) \sqrt{\frac{th(2.38 \psi_{kp}^{0.433})}{1 + A_0 th(11.41 \psi_{kp}^{0.86})}} \sqrt{\frac{1 + \psi_{kp}}{C^2 + R_s (1 + \psi_{kp}) (1 - C)^2 \psi_{kp}^2}}.$$

На втором этапе для каждого значения C_g определяют величину критической скорости гидротранспортирования, путем решения нелинейного уравнения [1, 11, 12]

$$u_{kp} = \frac{Fr_{kp}}{1 - S} \sqrt{gD}; \quad \frac{Fr_{kp}}{A_1 \Phi} = \ln(A_2 Fr_{kp}); \quad A_2 = \frac{\sqrt{gD}^{3/2}}{10v_w},$$

где u_{kp} – критическая скорость пульпы, м/с.

Расчет гидравлического уклона производится после определения критических скоростей гидротранспортирования. Исходными данными для расчета гидравлического уклона являются: результаты расчетов осредненные параметры транспортируемого материала и критической скорости гидротранспортиро-

вания; длина трубопровода (L); угол наклона трубопровода к горизонту (φ); диапазон изменения параметра гидротранспортирования (k_0 и k_*). Определение гидравлического уклона осуществляется по следующему алгоритму. Для каждого значения массовой концентрации рассчитывают рабочий диапазон изменения скорости жидкости $k_0(1-S)u_{kp} \leq u_w \leq k_*(1-S)u_{kp}$, который затем разбивают на требуемое количество расчетных точек, каждой из которых соответствует свое значение u_w из выбранного диапазона.

Для каждого значения u_w в зависимости от угла наклона трубопровода к горизонту рассчитывается величина гидравлического уклона по следующим формулам. Если трубопровод горизонтальный [1, 11, 12],

$$i = \wp i_w; \quad i_w = \lambda_w \frac{u_w^2}{2gD}; \quad \lambda_w = \frac{0.308}{\lg^2\left(\frac{\text{Re}_w}{10}\right)}; \quad \text{Re}_w = \frac{u_w D}{\nu_w};$$

$$\wp = \left[\frac{1-S}{(1-C)^2} + \frac{R_s}{(1-S)^2} \left(\frac{S}{C}\right)^2 \right] \left[\left(1 - th \left[5.33 \left(1 - Fr_{kp} \frac{\sqrt{gD}}{u_w} \right) \right] \right) \varphi \right],$$

если трубопровод вертикальный,

$$i' = \wp' i_w \pm i_g; \quad \wp' = \frac{1}{(1-C)^2} \frac{1}{1+C \left[1 + \frac{w_s}{u_w} (1-C)^{n_c} \right]} + R_s \left[1 + \frac{w_s}{u_w} (1-C)^{n_c} \right]^2;$$

$$n_c = 4.1 - 2.1 \text{sign} \left[\lg \left(\frac{\text{Re}_s}{5.012} \right) \right] th \left[\frac{1}{2} \left| \lg \left(\frac{\text{Re}_s}{5.012} \right) \right|^{4/3} \right]; \quad i_g = \frac{1 + \bar{\rho}_s C \left[1 - \frac{w_s}{u_w} (1-C)^n \right]}{1 + C \left[1 - \frac{w_s}{u_w} (1-C)^n \right]};$$

и если трубопровод наклонен к горизонту под некоторым углом,

$$i_\varphi = \wp_\varphi i_w \pm i_g \sin \varphi; \quad \wp_\varphi = \wp \cos \varphi + \wp'(1 - \cos \varphi),$$

где i – гидравлический уклон при течении пульпы по горизонтальному трубопроводу, м вод. ст./м; i_w – гидравлический уклон при течении воды по горизонтальному трубопроводу, м вод. ст./м; i' – гидравлический уклон при течении пульпы по вертикальному трубопроводу, м вод. ст./м; i_g – дополнительный гидравлический уклон при течении пульпы по негоризонтальному трубопроводу, обусловленный особенностью движения частиц транспортируемого мате-

риала, м вод. ст./м; i_φ – гидравлический уклон при течении пульпы по наклонному трубопроводу, м вод. ст./м; φ – угол наклона трубопровода к горизонту, рад.

При этом знак «+» принимается для восходящих трубопроводов, а знак «-» – для нисходящих.

Результаты этого расчета позволяют построить расходно-напорную характеристику предполагаемой магистрали, оценить характеристики требуемого насоса, или же определить рабочую точку установки [7 – 9], если расходно-напорная характеристика насоса известна.

Величина критического диаметра трубопровода определяется в зависимости от заданной производительности установки по твердой фазе и массовой концентрации пульпы. Исходными данными для расчета критического диаметра трубопровода являются результаты расчетов осредненные параметры транспортируемого материала; требуемая подача установки по твердому материалу; регламентированные значения параметра гидротранспортирования из диапазона $1 \leq k \leq 1.1$. Для каждого регламентированного значения k и значения массовой концентрации критический диаметр трубопровода определяется из решения нелинейного уравнения

$$B_0 D_{kp}^{\frac{5-n_s}{2}} = \ln \left(\frac{B_1}{D_{kp}} \right); \quad B_0 = \frac{3.04}{\pi k \sqrt{Ar}} \frac{1-S}{S\Phi} \frac{G_T}{\sqrt{g d_s^{n_s} \bar{\rho}_s}}; \quad B_1 = \frac{0.4}{\pi k} \frac{1-S}{S} \frac{G_T}{\bar{\rho}_s v_w},$$

где G_T – требуемая подача установки по твердому материалу, т/ч; k – регламентированный параметр гидротранспортирования [1, 2, 4 – 9].

Для оценки влияния фактора многоплотности транспортируемого материала на параметры гидротранспорта было проведено сравнение результатов расчетов критической скорости и гидравлических уклонов техногенных россыпей Центрального горно-обогатительного комбината (ЦГОК) (см. табл. 1) по предлагаемой методике с результатами расчетов по методике, которая рекомендована для данных условий [8, 9]:

$$J = \lambda \frac{V^2}{2gD} \eta; \quad V_{kp} = 15 \sqrt[3]{D} \cdot \sqrt[4]{w} \cdot \left(\frac{0,6 + 0,4(\rho_T - 1) \frac{C}{\rho_T}}{1 + \frac{1-C}{C} \rho_T} \right) \frac{\rho_T}{C} \cdot \left(\frac{3d_{10}}{d_{90}} \right)^{0.1};$$

$$\eta = 1 + \frac{(\rho_T - 1)P}{\left(1 + \frac{1-C}{C} \rho_T\right)^2} + \left[\frac{1 + 150 \frac{d_{cp}}{D}}{\left(1 + \frac{1-C}{C} \rho_T\right)^{1,5}} \left(\frac{\rho_T}{C}\right)^{1,5} - \frac{(\rho_T - 1)P}{\left(1 + \frac{1-C}{C} \rho_T\right)^2} - 1 \right] \left(\frac{V_{kp}}{V} \right)^3;$$

$$\lambda = \frac{1}{3,24(\lg \text{Re} - 1)^2}; \quad \text{Re} = \frac{VD}{\nu},$$

где J – гидравлический уклон при движении пульпы со скоростью, большей критического значения, м. вод. ст./м; P – содержания фракции $d < 0,1$ мм по весу в составе пробы, в долях единицы; V – средняя по сечению скорость пульпы, м/с; λ – коэффициент гидравлического сопротивления трения; ν – коэффициент кинематической вязкости чистой воды; C – массовая концентрация пульпы, доли единицы; ρ_T – плотность транспортируемого материала, т/м³; w – гидравлическая крупность транспортируемого материала, м/с; d_{10} и d_{90} – диаметры частиц, соответствующие 10 и 90% содержания фракций по кривой гранулометрического состава; $V_{кр}$ – критическая скорость гидротранспортирования.

По обеим методикам были рассчитаны величины критических скоростей гидротранспортирования и гидравлических уклонов, после чего были вычислены относительные разности для соответствующих величин (см. рис. 1 – 3). Из рис. 1 – 3, видно, что расчет параметров гидротранспорта по средневзвешенной плотности приводит к существенно заниженным значениям критических скоростей и гидравлических уклонов. Во всех случаях величины параметров гидротранспорта, полученные по предлагаемой методике, оказывались выше, чем рассчитанные по осредненным показателям.

Таблица 1

Характеристика техногенных россыпей ЦКОГа

Класс крупности, мм		Доля фракции с плотностью, т/м ³					Массовая доля, %
		5.000	4.413	3.825	3.355	2.650	
Более	Менее						
0.000	0.044	9.24/14.22	0.11/0.17	0.07/0.11	0.09/0.14	8.53/13.14	18.04/27.78
0.044	0.070	3.69/5.68	0.66/1.02	1.10/1.69	0.58/0.89	4.64/7.14	10.66/16.42
0.070	0.160	1.97/2.17	0.99/1.09	4.23/4.67	3.43/3.78	6.79/7.49	17.40/19.20
0.160	0.250	0.79/0.92	0.55/0.63	5.59/6.45	3.93/4.53	8.03/9.27	18.90/21.80
0.250	0.500	0.17/0.09	0.06/0.03	6.67/3.55	7.20/3.83	4.70/2.50	18.80/10.00
0.500	1.000	0.00/0.00	0.00/0.00	4.20/1.17	6.26/1.74	3.93/1.09	14.40/4.00
1.000	5.000	0.00/0.00	0.00/0.00	0.55/0.24	0.81/0.36	0.45/0.20	1.80/0.80
Сумма, %		15.85/23.08	2.37/2.94	22.42/17.88	22.30/15.27	37.07/40.83	100.00

Примечание. В числителе данные для исходного материала, а в знаменателе – для предварительно обогащенного.

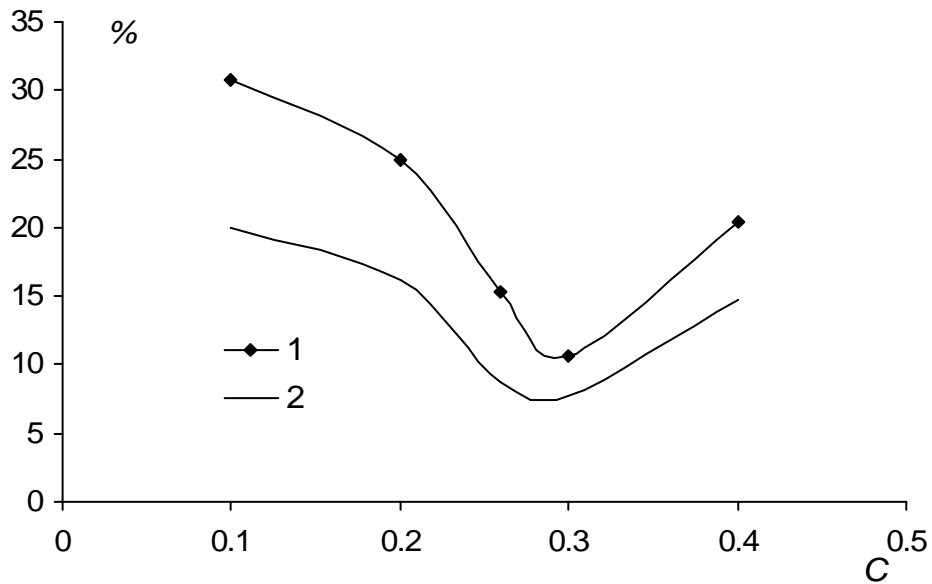


Рис. 1. Зависимость относительной разности критических скоростей гидротранспортирования рассчитанных по разным методикам от массовой концентрации пульпы для рассматриваемых материалов: 1 – исходный материал; 2 – предварительно обогащенный материал

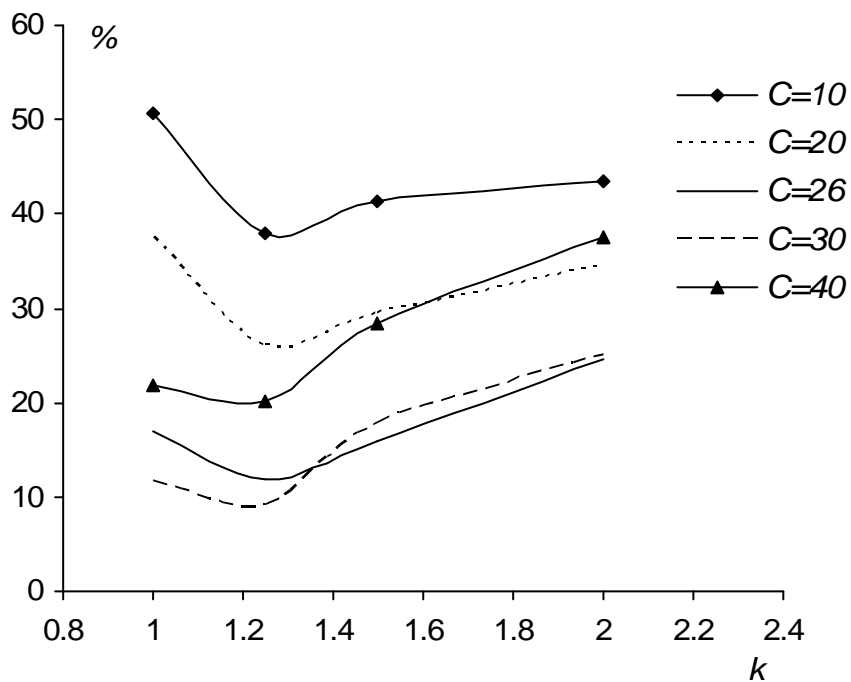


Рис. 2. Зависимость относительной разности гидравлических уклонов рассчитанных по разным методикам от параметра гидротранспортирования и концентрации пульпы для предварительно обогащенного материала

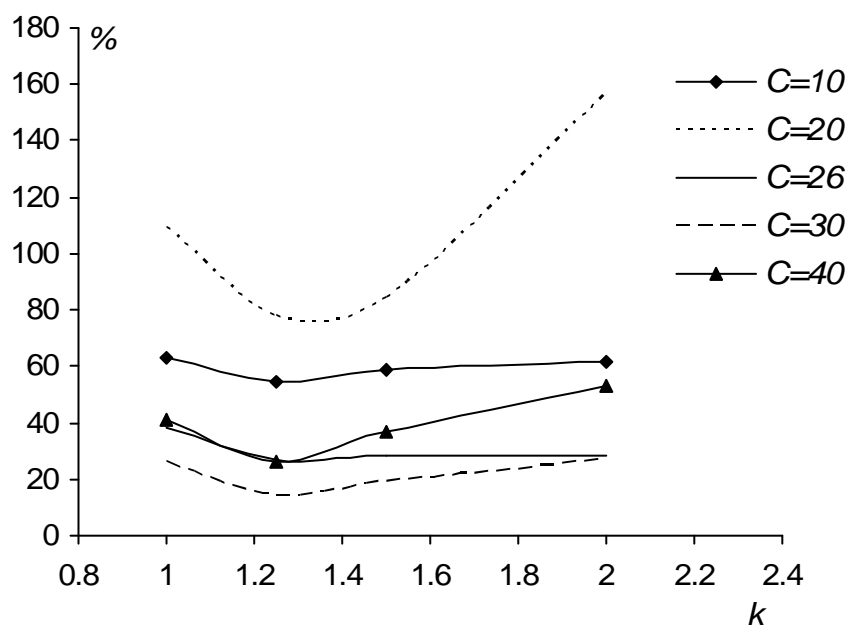


Рис. 3. Зависимость относительной разности гидравлических уклонов рассчитанных по разным методикам от параметра гидротранспортирования и концентрации пульпы для исходного материала

Выводы. Расчет критических скоростей и гидравлических уклонов при гидротранспорте отходов обогащения железорудных ГОКов, техногенных и первичных россыпей по осредненным плотностям и диаметрам частиц справедлив при массовых концентрациях пульпы менее 5%. Использование этого метода позволяет оптимизировать параметры и режимы работы установок и добиться снижения энергоемкости и удельных расходов воды, которые обеспечиваются при больших концентрациях, не представляется возможным, из-за существенного увеличения ошибки, обусловленной использованием средневзвешенных величин.

Список литературы

1. Обоснование параметров и режимов работы систем гидротранспорта горных предприятий // Ю.Д. Баранов, Б.А. Блюсс, Е.В. Семененко, В.Д. Шурыгин – Д.: «Новая идеология», 2006. – 416 с.
2. Проблемы разработки россыпных месторождений / И.Л. Гуменик, А.М. Сокил, Е.В. Семененко, В.Д. Шурыгин. – Днепропетровск: Січ, 2001. – 224 с.
3. Совершенствование режимов работы гидротранспортных установок технологий углеобогащения / Е.Л. Звягильский, Б.А. Блюсс, Е.И. Назимко, Е.В. Семененко. – Севастополь: Вебер, 2002. – 247 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. Силин Н.А., Витошкин Ю.К. Гидротранспорт угля по трубам. – Киев: Изд-во АН УССР. – 1964. – 86 с.
7. Криль С.И. Напорные взвесенесущие потоки. – К.: Наук. думка, 1990. – 160 с.
8. ИС 21-26.3-567-81. Система напорного гидротранспорта отходов чугунолитейного производства. – К.: Минстройматериалов СССР, 1982. – 56 с.

9. РСН 275–75. Временные указания по технологии возведения намывных хвостохранилищ горнообогатительных комбинатов. – Киев: Госстрой УССР, 1975. – 180 с.
10. Гончаров В.Н. Движение наносов. – Л.;М.: ОНТИ, Главная редакция строительной литературы, 1938. – 312 с.
11. Криль С.И., Семененко Е.В. Расчет параметров гидротранспорта песков россыпных и техногенных месторождений // Научно – технический и производственный журнал «Металлургическая и горнорудная промышленность». – №5. – 2006. – С. 77 – 80.
12. Семененко Е.В., Криль С.И. Метод расчета параметров гидротранспорта отходов и продуктов обогащения // Научно-технический сборник «Обогащение полезных ископаемых». – Днепропетровск, 2006. Вып. № 25 (66) – 26 (67). – С. 176 – 183.