

Киричко С.Н., Семененко Е.В., докт. техн. наук (ИГТМ НАН Украины), Татарко Л.Г. (УГХТУ)

**МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ РАСЧЕТОВ ПАРАМЕТРОВ  
И РЕЖИМОВ РАБОТЫ ГИДРОТРАНСПОРТНЫХ КОМПЛЕКСОВ,  
ПЕРЕКАЧИВАЮЩИХ ВЫСОКОКОНЦЕНТРИРОВАННЫЕ УГОЛЬНЫЕ СУСПЕНЗИИ**

*Пропонуються методи розрахунку параметрів і режимів роботи комплексів гідротранспорту для технології накопичення відходів збагачення, згущених до концентрації пасту, на підприємствах Донбасу з урахуванням гідравлічних і реологічних характеристик.*

*Предлагаются методы расчета параметров и режимов работы комплексов гидротранспорта для технологии накопления отходов обогащения, сгущенных до концентрации пасты, на предприятиях Донбасса с учетом гидравлических и реологических характеристик.*

*Suggested the parameter calculation methods and work regimes of the hydrotransport complexes for the technology of the waste concentration saving, densed up to the pasta concentration at the enterprises of the Donetsk region with the account of hydraulic and rheological characteristics.*

*КС: гидротранспортные комплексы, режимы работы, расчет параметров, угольные суспензии, гидравлические характеристики, реологические характеристики, методы расчетов.*

**Проблема и ее связь с научными и практическими задачами.** Донбасс – крупный промышленный регион, в котором сосредоточены предприятия угольной, металлургической, химической и машиностроительной отраслей промышленности, расположенный на пересечении водных путей, железнодорожных и автомобильных магистралей, направленных к месторождениям каменных углей и железной руды. Углеобогащительные предприятия, шахты, металлургические заводы, коксохимические комбинаты и тепловые электростанции являются крупнейшими потребителями воды – основного экологического ресурса планеты, а также основными источниками жидких и твердых отходов обогащения и переработки угля в регионе. Дальнейшее развитие региона во многом определяется промышленным потенциалом этих предприятий.

С начала XXI столетия в деятельности угольных предприятий Донбасса развивается новое направление – разработка техногенных месторождений, которыми по факту являются их хранилища отходов обогащения углей. Химический состав жидкой фазы и гранулометрический состав твердой фазы отходов углеобогащения, а также тот факт, что концентрация транспортируемых суспензий многие годы не превышала 5 % по массе, обусловили значительные объемы шламо- и илонакопителей. Ввиду солидных сроков эксплуатации существующих хранилищ, вполне естественно предположить, что основная часть техногенных россыпей представляет собой суспензии с массовыми концентрациями не менее 60 % [1–3]. То есть разработка таких месторождений невозможна без применения или технологий гидромеханизации в виде земснарядов, или технологий гидротранспортирования пастовых пульп. С учетом существующей высоты дамб хранилищ второй подход является более перспективным, поскольку позволяет существенно сократить потребление такими технологиями технической воды, необходимой для надежной работы земснарядов, а также обеспечивает доступ не только к верхним слоям россыпи, но и к более глубоким, которые характеризуются высоким содержанием ценных компонентов.

Некоторые отечественные и зарубежные фирмы, например, «Хаймек» (Украина), «СЕТКО» (США), «Инжиниринг доберсек ГмбХ» (Германия) и «Варман» (Австралия), уже разработали и внедряют технологии, позволяющие сгущать жидкие отходы обогащения до

---

концентрации пасты, при которой у большей части суспензий проявляются вязкопластические свойства. Все эти технологии характеризуются повышением энергоемкости процесса гидротранспортирования суспензии при снижении величины грузопотока [4, 5].

**Изложение основного материала.** Известно, что внедрение пастового сгущения отходов на большинстве предприятий Канады, Америки и Африки было обусловлено не экономическими причинами, а необходимостью повышения общей безопасности сооружений и решения вопросов экологии, при которых эффективность процессов транспортирования пульпы не рассматривалась. Кроме того, при гидротранспорте суспензий, сгущенных до состояния пасты, велика вероятность возникновения таких рисков, как

- опасность запрессовки оборудования отходами в результате его неработоспособности или отключения электроэнергии;
- опасность запрессовки отходами пульповода, который при забивке пастой практически невозможно опорожнить с помощью центробежных насосов;
- снижение прочностных свойств намывных дамб по сравнению с существующими намывными дамбами в связи с попаданием пасты на пляжи;
- высокая стоимость капитальных затрат на строительство и оборудование комплекса сгущения и гидротранспорта пасты.

Таким образом, доля затрат на транспортирование гидросмесей, сгущенных до концентрации пасты, при внедрении рассматриваемых технологий является доминирующей в эксплуатационных затратах. Поэтому широкое применение технологий гидротранспорта суспензий, сгущенных до концентрации пасты, сдерживается отсутствием научно обоснованных методов расчета параметров и режимов гидротранспорта суспензий при таких концентрациях. Это делает актуальной разработку научно обоснованных методов расчета параметров и режимов гидротранспорта суспензий, сгущенных до концентрации пасты, поскольку окончательное решение о применении данных технологий может приниматься только после проведения соответствующих исследований транспортируемого материала, оценки технологических и эксплуатационных рисков и экологических последствий внедрения.

Анализ реологических кривых известных видов вязкопластических сред позволил оценить возможный вид реологической характеристики суспензий, содержащих отходы углеобогащения, после сгущения их до концентрации пасты [2, 4 – 9].

$$\tau_w = \tau_0 + \eta \dot{\gamma}, \quad (1)$$

где  $\tau_w$  – напряжение сдвига;  $\tau_0$  – начальное напряжение сдвига (табл. 1);  $\eta$  – эффективная вязкость суспензии (табл. 1);  $\dot{\gamma}$  – скорость деформации.

Использование уравнения (1) позволяет разработать для некоторых случаев методики и алгоритмы расчета параметров гидротранспорта, а также поверочного и проектировочного расчетов параметров и режимов работы гидротранспортных комплексов, транспортирующих угольные суспензии, сгущенные до концентрации пасты.

При расчете параметров гидротранспорта целью расчета является определение величины критической скорости, гидравлического уклона или критического диаметра трубопровода для выбранного материала, заданного диаметра трубопровода при регламентированном расходе суспензии или грузопотоке в зависимости от концентрации суспензии.

В этом случае с учетом формулы (1) зависимость между гидравлическим уклоном и объемным расходом суспензии описывается уравнением Букингама [9]. Точное решение этого уравнения при расчетах практически не используется, большая часть исследователей предпочитает решать упрощенное уравнение Букингама [6, 7].

Как показывают результаты исследований, единственное реальное решение полного уравнения после приведения его к безразмерному виду может быть получено численно в следующем универсальном виде [9]:

$$i = \frac{\tau_0}{\lambda} + \frac{Q}{\mu}; \quad \lambda = \frac{\rho_0 g D}{4k_\tau}; \quad \mu = \frac{\rho_0 g \pi D^4}{k_\eta 32\eta}, \quad (2)$$

**Примечание.** В числителе указан средневзвешенный диаметр части, а в знаменателе – максимальный.

где  $i$  – гидравлический уклон;  $k_\tau, k_\eta$  – коэффициенты аппроксимации;  $D$  – диаметр трубопровода;  $Q$  – объемный расход суспензии;  $\rho_0$  – плотность жидкой фазы суспензии;  $g$  – ускорение свободного падения;  $\lambda$  – модуль начального напряжения сдвига;  $\mu$  – модуль расхода магистрали гидротранспортного комплекса [8, 9].

Таблица 1

**Реологические характеристики высококонцентрированных угольных суспензий [2, 9]**

Основа суспензии	Массовая концентрация суспензии, %	$\tau_{0\cdot}$ , Па	$\eta$ , Па·с
Антрацитовые шламы	62,0	10,91	0,195
	64,0	20,37	0,431
	66,0	25,33	0,710
Обогащенный антрацит	65,7	1,04	0,618
	68,7	2,36	0,929
	70,0	19,40	0,890
Угли марки Д	62,0	21,93	0,646
Угли марки Г	62,0	16,49	0,578
Угли марки Ж	62,0	9,71	0,441
Угли марки К	62,0	6,28	0,386
Угли марки ОС	62,0	1,10	0,356
Угли марки Т	62,0	0,75	0,308
Угли марки ПА	62,0	0,10	0,285
Угли марки А	62,0	0,57	0,250
Угли марки Ж	63,7	6,61	0,458
Угли марки Д	62,0	4,46	0,398
Угли марки Г	62,0	1,91	0,329
Уголь марки Г 0,075 мм/3 мм	60,0	0,93	0,276
	65,0	3,51	0,420
Уголь марки Г 0,052 мм/0,3 мм	60,0	1,86	0,352
	62,0	0,64	0,389
	65,0	5,63	0,429
Уголь марки Г 0,055 мм/0,3 мм	60,0	2,27	0,424
	62,0	2,64	0,413
	65,0	8,60	0,423
Уголь марки Г 0,037 мм/0,2 мм	60,0	4,55	0,459
	62,0	5,14	0,465
	65,0	8,40	0,603
Уголь марки Г 0,060 мм/0,3 мм	60,0	4,47	0,594
	62,0	5,58	0,647
	65,0	15,08	0,728

Зависимость (2) справедлива при расходе суспензии, превышающем критический [9]:

$$Q_{kp} = 0,0383Q_*; \quad Q_* = \frac{\pi D^3 \tau_0}{8\eta},$$

где  $Q_*$  – характеристическая подача магистрали.

Проектировочный расчет проводится с целью определения показателей назначения

насосов (подачи пульпы и суммарного напора насосов), необходимых для обеспечения регламентированных параметров и режимов работы гидротранспортного комплекса:

$$D = \frac{2}{B} \sqrt[3]{\frac{\eta Q_p}{\tau_0}}; \quad i = \frac{2A}{\rho_0 g} \sqrt[3]{\frac{\tau_0^4}{\eta Q_p}};$$

$$H = \frac{2A}{\rho_0 g} \sqrt[3]{\frac{\tau_0^4}{\eta Q_p}} kL + \Delta Z; \quad N = \rho \left(1 + \frac{i_z}{ki}\right) \frac{2A}{\eta_H} \sqrt[3]{\frac{\tau_0^4 Q_p^2}{\eta}} kL;$$

$$i_z = \frac{\Delta Z}{L}; \quad B = \sqrt[3]{\frac{k_v \pi}{2,97 \sigma}}; \quad A = B \left[ k_\tau + \frac{k_\eta}{B^3} \right],$$

где  $k_v$  – коэффициент запаса по критической скорости;  $Q_p$  – регламентированный расход суспензии;  $\sigma$  – коэффициент запаса по диаметру трубы;  $\Delta Z$  – разница геодезических высот магистрали;  $k$  – коэффициент, учитывающий местные гидравлические сопротивления;  $L$  – длина магистрали;  $i_z$  – геодезический уклон магистрали;  $\eta_H$  – среднее для рабочей области выбранного насоса значение коэффициента полезного действия.

При выборе величины  $B$ , которая учитывает запасы надежности по диаметру трубы и по критической скорости, необходимо учитывать, что зависимость параметра  $A$  от этой величины имеет минимум в окрестности значения 1,7 (рис. 1), координаты которого вычисляются по формулам

$$B_{\min} = \sqrt[3]{2 \frac{k_\eta}{k_\tau}}; \quad A_{\min} = \frac{3}{2} \sqrt[3]{2 k_\tau^2 k_\eta},$$

где  $B_{\min}$  – значение величины  $B$ , при которой зависимость  $A(B)$  достигает минимума;  $A_{\min}$  – минимум зависимости  $A(B)$ .

Проверочный расчет выполняется с целью определения технологических показателей гидротранспортного комплекса при выбранном насосном оборудовании, расходно-напорная характеристика которого в рабочей области аппроксимирована линейной функцией [10, 11]

$$H_p = \chi(\gamma - \beta Q),$$

где  $H_p$  – напор насоса при перекачивании суспензии;  $\chi$  – коэффициент пересчета расходно-напорной характеристики насоса с воды на суспензию;  $\gamma$  – фиктивный напор насоса при нулевой подаче, коэффициенты аппроксимации паспортной расходно-напорной характеристики насоса [10];  $\beta$  – коэффициент снижения напора, коэффициенты аппроксимации паспортной расходно-напорной характеристики насоса [10];  $Q$  – подача насоса при перекачивании суспензии.

Таким образом, гидротранспортная установка в зависимости от концентрации суспензии будет обеспечивать следующий объемный расход:

$$Q = MG(1 - \theta); \quad (3)$$

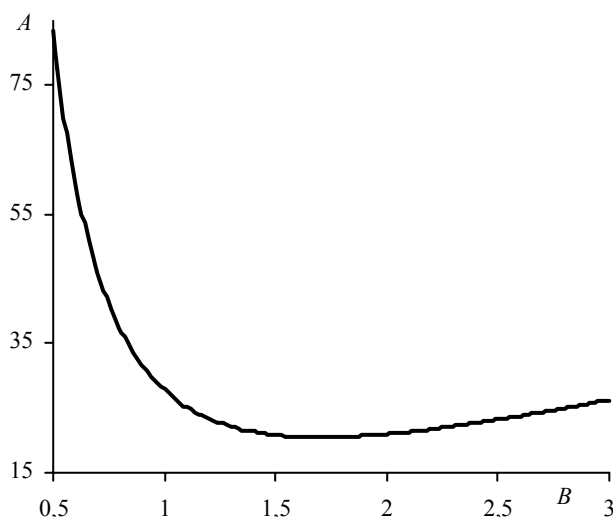


Рис. 1. Зависимость  $A$  от величины  $B$

$$M = \frac{\mu}{1 + \tilde{\beta}\mu}; \quad G = \tilde{\gamma} - \frac{\rho}{k} i_z; \quad \theta = \frac{\tau_0}{\lambda G}; \quad ; \quad \tilde{\gamma} = \frac{\gamma\chi}{kL}; \quad \tilde{\beta} = \frac{\chi\beta}{kL},$$

где  $M$  – модуль расхода гидротранспортного комплекса;  $\tilde{\beta}$  – уточненный коэффициент снижения напора, коэффициенты аппроксимации паспортной расходно-напорной характеристики насоса;  $G$  – коэффициент расхода гидротранспортного комплекса;  $\tilde{\gamma}$  – уточненный фиктивный напор насоса при нулевой подаче, коэффициенты аппроксимации паспортной расходно-напорной характеристики насоса;  $\theta$  – коэффициент, учитывающий влияние на подачу пульпы начального напряжения сдвига;  $\rho$  – относительная плотность суспензии.

Учитывая особенности хранилищ отходов углеобогащения, которые в условиях Донбасса могут возвышаться относительно геодезической отметки обогатительного производства на 30 – 40 метров, для предотвращения аварий в результате гидравлических ударов при внезапной остановке насосов нужно определять объемный расход при обратном течении пульпы:

$$Q_0 = \frac{\rho}{k} i_z \mu - \frac{k_\tau}{k_\eta} Q^*, \quad (4)$$

где  $Q_0$  – расход суспензии в направлении к насосу при внезапной остановке гидротранспортного комплекса.

Из формулы (4) видно, что обратного тока суспензии при остановке гидротранспортного комплекса не будет, если выполняется следующее условие:

$$i_z < i_F; \quad i_F = \frac{k\tau_0}{\rho\lambda}, \quad (5)$$

где  $i_F$  – критический геодезический уклон, при котором обратное течение суспензии при внезапной остановке гидротранспортного комплекса будет сдерживаться за счет начального напряжения сдвига.

Кроме обратного течения суспензии, необходимо учитывать, что уравнение (1) справедливо для установившегося и равномерного режима течения вязкопластической среды при развитом течении, когда начальное напряжение  $\tau_0$  имеет наименьшее значение за счет деструкции внутренней структуры потока. В начальный момент до начала движения структурные связи в объеме вязкопластической жидкости достаточно велики и зависят от времени состояния покоя, предшествующего возникновению движения. Для случая начала движения, если время остановки не превышает 360 часов, можно записать [9, 12]

$$\tau' = n\tau_0; \quad n = 0,8496T^{0,102}, \quad (6)$$

где  $\tau'$  – статическое напряжение покоя при отсутствии движения пульпы;  $n$  – коэффициент превышения статического напряжения покоя над начальным напряжением при развитом движении, который может принимать значения от 3 до 7;  $T$  – период времени между остановкой и последующим запуском [2, 9].

Очевидно, что надежность работы гидротранспортной установки, добывающей отходы углеобогащения в виде пастообразной пульпы, будет обеспечена, если напор насосов, обеспечивающих номинальную подачу, будет достаточным для преодоления статического напряжения покоя в пределах своей рабочей области

$$Q' > Q_l, \quad (7)$$

где  $Q'$  – подача, которую способны обеспечить выбранные насосы при запуске данной установки;  $Q_l$  – подача насоса на левой границе рабочей области.

С учетом (5) и (6) решение (3) может быть записано в виде

$$Q' = MG(1 - \theta n). \quad (8)$$

При этом после несложных преобразований условие (7) может быть преобразовано в ограничение для величины коэффициента  $n$ :

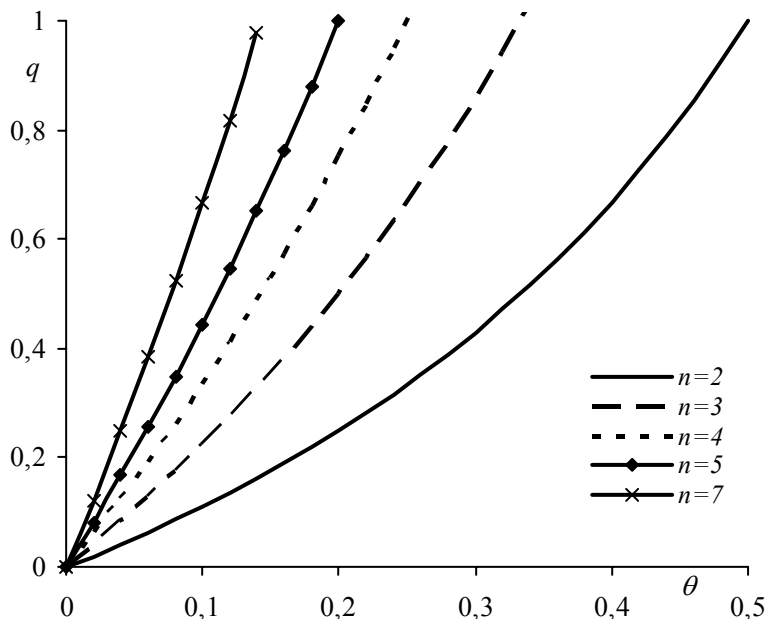


Рис. 2. Зависимость  $q$  от величины  $\theta$  при различных значениях  $n$

С использованием выражения (9) при известных величинах  $Q_l$  и  $Q$  можно оценить допустимые значения  $\theta$  и  $n$  и сделать вывод о надежности транспортирования суспензии с такими реологическими характеристиками данным гидротранспортным комплексом (рис. 3 и рис. 4):

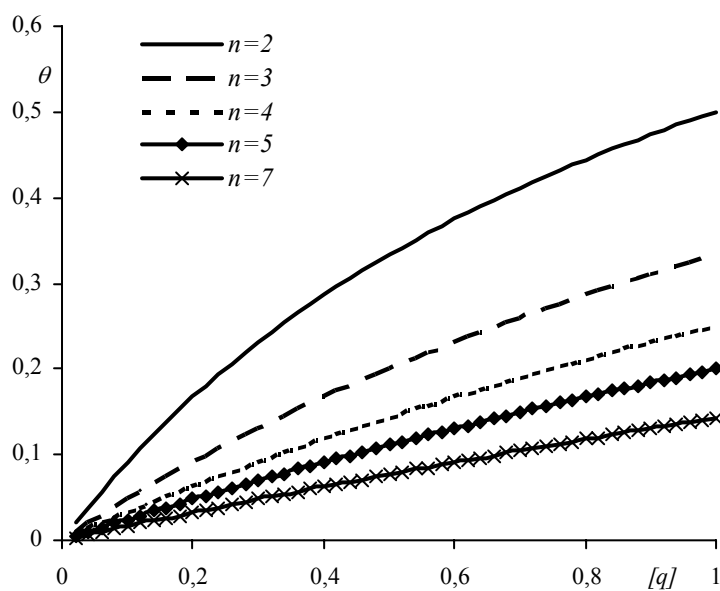


Рис. 3. Зависимость предельного значения  $\theta$  от величины  $[q]$  при различных  $n$

определение реологических параметров транспортируемых сред, что позволяет максимально

$$n < \frac{k h_l - i_l}{\rho i_F}; \quad i_l = \frac{Q_l}{\mu} + \frac{\rho}{k} i_z;$$

$$h_l = \tilde{\gamma} - \tilde{\beta} Q_l,$$

где  $i_l$  – гидравлический уклон магистрали при течении жидкости с подачей  $Q_l$ ;  $h_l$  – погонный напор насоса на левой границе рабочей области [13].

Ожидаемое относительное снижение подачи при повторном запуске по сравнению с номинальным режимом может быть легко вычислено при помощи формул (3) и (8) (рис. 2):

$$q = \frac{\theta}{1-\theta} (n-1); \quad q = \frac{Q-Q'}{Q}, \quad (9)$$

где  $q$  – относительное снижение подачи при повторном запуске по сравнению с номинальным режимом.

$$\theta \leq \frac{1}{1 + \frac{n-1}{[q]}}$$

$$n \leq 1 + [q] \frac{1-\theta}{\theta};$$

$$[q] = \frac{Q-Q_l}{Q},$$

где  $[q]$  – максимально допустимое относительное снижение подачи при повторном запуске по сравнению с номинальным режимом.

**Выводы.** Разработанное методическое обеспечение расчетов параметров и режимов работы гидротранспортных комплексов, перекачивающих высококонцентрированные угольные суспензии, ориентировано на экспериментальное

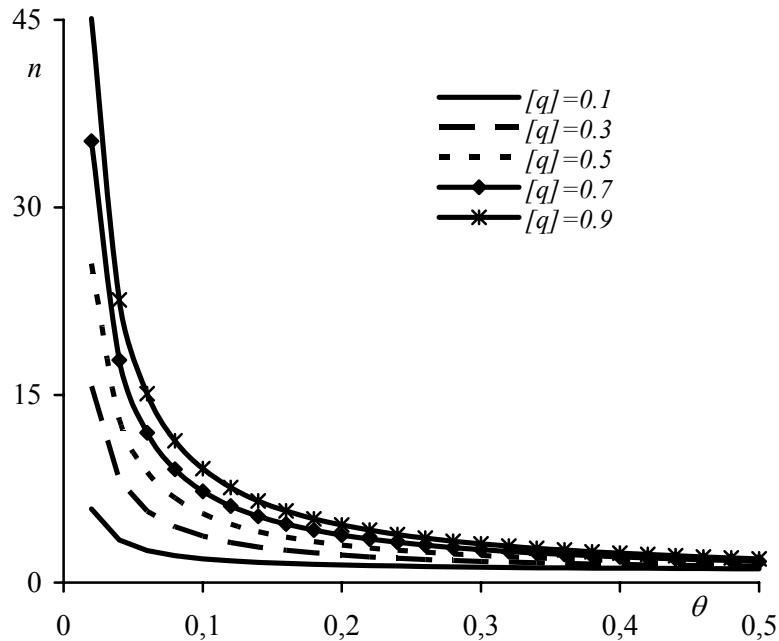


Рис. 4. Зависимость предельного значения  $n$  от величины  $\theta$  при различных  $[q]$

адаптировать его к условиям техногенных месторождений Донбасса и обеспечивать надежность использования рассматриваемой технологии для разработки техногенных месторождений отходов углеобогащения.

#### Литература

1. Світлий Ю.Г. Гідравлічний транспорт / Ю.Г. Світлий, В.С. Білецький. – Донецьк: Східний видавничий дім, 2009. – 436 с.
2. Круть О.А. Водовугільне паливо / О.А.Круть. – К.: Наукова думка, 2002. – 172 с.
3. Світлий Ю.Г. Гідравлічний транспорт твердих матеріалів / Ю.Г. Світлий, О.А. Круть. – Донецьк: Східний видавничий дім, 2010. – 268 с.
4. Александров В.И. Методы снижения энергозатрат при гидравлическом транспортировании смесей высокой концентрации / В.И.Александров. – Санкт-Петербург: СПГГИ (ТУ), 2000. – 117 с.
5. Александров В.И. Определение потерь напора при гидротранспорте сгущенных пульп хвостов обогащения руд / В.И. Александров, В.И. Кибирев // Гидротехника. – 2011. – № 4(25).– С. 94 – 96.
6. Яхно О.М. Гідравліка неньютонівських рідин: навч. посібник / О.М. Яхно, І.В. Желяк – К.: Вища школа, 1995. – 199 с.
7. Уилкинсон У.Л. Неньютоновские жидкости / У.Л. Уилкинсон – М.: Мир, 1964. – 155 с.
8. Урьев Н.Б. Высококонцентрированные дисперсные системы / Н.Б. Урьев. – М., 1980. – 320 с.
9. Круть А.А. Развитие физико-технических основ технологий приготовления и гидротранспортирования водоугольных суспензий высокой концентрации: дис. на соискание ученой степени докт. техн. наук: 05.15.09 / Круть Александр Анатольевич. – Днепропетровск, 2011. – 278 с.
10. Звягильский Е.Л. Совершенствование режимов работы гидротранспортных установок технологий углеобогащения / Е.Л. Звягильский, Б.А. Блюсс, Е.И. Назимко, Е.В. Семененко. – Севастополь: Вебер, 2002. – 247 с.
11. Курганов А.М. Справочник по гидравлическим расчетам систем водоснабжения и канализации / А.М. Курганов, Н.Ф. Федоров. – Л.: Стройиздат, 1973. – 408 с.
12. Авксентьев С.Ю. Определение рациональных режимов гидротранспорта пастообразных хвостов обогащения медно-цинковых руд: дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук: 05.05.06 // Горные машины / С.Ю.Авксентьев. – Санкт-Петербург: СПГГИ(ТУ), 2009. – 121 с.
13. Блюсс Б.А. Параметры оценки эффективности работы гидротранспортных комплексов / Б.А. Блюсс, Е.В. Семененко // Геотехническая механика. Разработка месторождений твердых полезных ископаемых. – Днепропетровск, 1997. – Вып. 2. – С. 113 – 118.

*Статья рекомендована к публикации  
докт. техн. наук Блюссом Б.А.*