

Е.В. СЕМЕНЕНКО, д-р техн. наук

(Украина, Днепропетровск, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова НАН Украины)

Е.Ю. МОКРИЦКАЯ

(Украина, Днепропетровск, ООО "АНГЛУРУС")

ОБОСНОВАНИЕ МЕТОДИЧЕСКОГО ПОДХОДА К РАСЧЕТУ ПАРАМЕТРОВ ГИДРОТРАНСПОРТА С УЧЕТОМ КОЛЕБАНИЙ СВОЙСТВ ТРАНСПОРТИРУЕМОГО МАТЕРИАЛА

Гидротранспортные системы получили широкое распространение в технологиях добычи и переработки минерального сырья, особенно при разработке первичных и техногенных россыпных месторождений [1-3]. Это обусловлено широким применением при добыче технологий гидромеханизации, использованием мокрых методов обогащения при последующей переработке и складировании отходов обогащения в виде гидросмеси. Кроме того, технологии напорного гидротранспортирования, в отличие от других видов транспорта, позволяют с высокой надежностью обеспечивать непрерывный грузопоток исходных россыпей и отводимых отходов в условиях периодического перемещения фронта горных и мест складирования. Это обеспечивает надежность работы всего производственного цикла при высоких скоростях продвижения открытых горных работ, однако требует дополнительных мероприятий по сохранению стабильности параметров и режимов работы. В период внедрения технологий напорного гидротранспортирования на горных предприятиях Украины вопрос сохранения стабильности параметров и режимов работы не был актуальным, поскольку места добычи и места складирования находились на минимальном отдалении от обогатительного производства. В этот период основные научные исследования были направлены на установление зависимости параметров гидротранспорта, то есть гидравлического уклона и критической скорости гидротранспортирования, от крупности и плотности частиц, а также неоднородности их гранулометрического состава [4-13]. В дальнейшем основной интерес исследователей был сконцентрирован на определении зависимости параметров гидротранспорта от концентрации гидросмеси, что было обусловлено требованиями повышения производительности существующих установок по твердому материалу [14-20]. До определенного момента, пока расстояния транспортирования песков внутри карьеров и стоимость эксплуатации конвейеров позволяли обеспечивать заданную производительность, необходимость обеспечения стабильных режимов работы гидротранспортных установок не возникала. Одними из основных факторов, обусловивших актуальность этого вопроса, стали изменение экономической ситуации и разрыв хозяйственных связей с предприятиями бывшего СССР. С одной стороны, это повысило стоимость технического обслуживания конвейерного транспорта, существенно подорожали лента, валки, электропривод, с другой – на ГОКах появились более совершенные насосы иностранного производства, позволяющие транспортировать гидросмеси с

большей концентрацией на большие расстояния. В результате на ГОКах стали отказываться от использования внутри карьеров конвейерного транспорта, обеспечивавшего подачу песков на борт карьера к головной пульпонасосной станции (ПНС) гидротранспортного комплекса, и перешли к внедрению переносных ПНС, размещаемых непосредственно в карьере. Теперь каждая головная ПНС должна была периодически перемещаться вслед за фронтом горных работ. Вторым фактором, определяющим актуальность данного исследования, является неравномерность распределения ценных компонентов по сечению и по протяженности месторождения. При конвейерной доставке первичных песков из разных забоев на одну ПНС осуществлялось усреднение материала, а после внедрения внутрикарьерного гидротранспорта эта неравномерность стала ощутимой [1, 3, 14, 19], режимы работы гидротранспортных установок стали более чувствительными к изменению гранулометрического и материального состава россыпи, что в сочетании с увеличившимися расстояниями транспортирования повысило требования к точности расчета их параметров. В таких условиях результаты расчетов, проведенных по осредненным величинам крупности, плотности, а также массовых долей фракций частиц россыпи уже не обеспечивали требуемой точности [3].

Анализ известных методик расчета параметров гидротранспорта показывает, что некоторые авторы пытались разработать методы, учитывающие неоднородность транспортируемого материала [5-20]. Одним из первых был учтен фактор неоднородности гранулометрического состава транспортируемых частиц, что требовалось для обобщения данных лабораторных экспериментов по транспортированию однородных грунтов на случай реальных материалов [4, 8, 10, 17]. Следующим этапом стал учет различия вклада частиц разных фракций в гидравлический уклон и различного их влияния на величину критической скорости [2, 8, 9, 13, 18]. Меньше всего исследовался вопрос влияния различной плотности частиц разных фракций на параметры гидротранспорта. Некоторые авторы, исследовав режимы транспортирования водопесчаных и водоугольных смесей с добавлениями глины, предложили уточняющие формулы к известным методикам, основанные на рассмотрении несущей жидкости как глинистой суспензии [11, 12, 19]. Однако эти результаты неприменимы к гидротранспорту россыпей редкоземельных металлов, поскольку глинистые фракции этих материалов содержат частицы высокой плотности, не образующие стабильную суспензию [1]. Для таких материалов была разработана методика, учитывающая при определении критической скорости и гидравлического уклона плотность и крупность частиц каждой фракции каждого компонента россыпи, что максимально приблизило расчеты параметров и режимов гидротранспортных установок к расчетам систем обогащения минерального сырья [3]. Однако вопросы оценки диапазонов изменения подачи и напора установки в результате колебаний параметров россыпи никем не рассматривались. Сегодня все методики ориентированы на определение стационарного режима работы, параметры которого в реальности являются средними значениями, вокруг которых колеблются истинные значения концентрации и расхода гидросмеси. Оце-

Усреднения та транспортування

нок допустимых или возможных отклонений от этого среднего значения нет, что при эксплуатации гидротранспортных установок в околокритических режимах или при существенных колебаниях параметров транспортируемого материала приводит к недопустимому снижению грузопотока, аварийным остановкам, повышению энергоемкости и водопотребления.

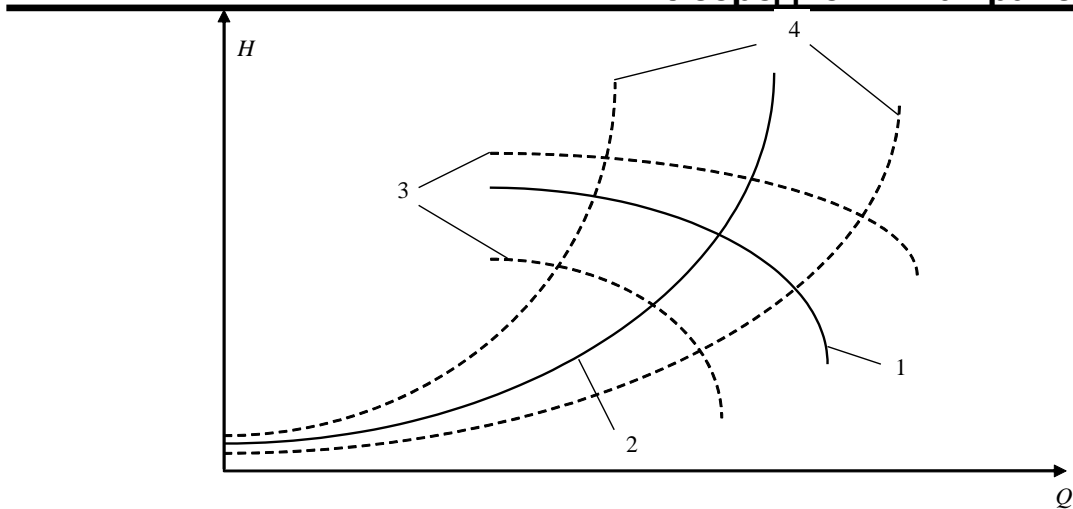
Таким образом, целью настоящего исследования является обоснование метода оценки допустимых параметров и режимов работы гидротранспортных установок при колебаниях свойств транспортируемого материала и определение характеристик россыпи, оказывающих наибольшее влияние.

Колебания свойств транспортируемой россыпи тем или иным образом должны сказаться на величинах критической скорости и гидравлического уклона, а также на коэффициентах пересчета расходно-напорной характеристики насоса с воды на гидросмесь. Это приведет к смещению вверх или вниз от стабильного состояния расходно-напорных характеристик магистрали и насоса, и на расходно-напорной диаграмме вместо рабочей точки системы необходимо рассматривать рабочую область, представляющую собой неправильный четырехугольник, образованный пунктирными линиями 3 и 4 (рисунок).

Рабочая точка системы определяется пересечением двух расходно-напорных характеристик [1, 3, 19]:

$$H_M = k_L i L + \rho_c \Delta Z ; H = (\gamma - \beta Q - \alpha Q^2) \left(1 + \frac{S^{1,2}}{\sqrt{\psi}} \right),$$

где H_M – расходно-напорная характеристика магистрали; i – гидравлический уклон гидросмеси; k_L – коэффициент, учитывающий влияние местных гидравлических сопротивлений; L – длина трубопровода; ρ_c – плотность несущей жидкости; ΔZ – перепад геодезических высот трубопровода; H – напор, развиваемый насосом на гидросмеси; γ, β, α – коэффициенты аппроксимации паспортной расходно-напорной характеристики насоса; Q – подача насоса; ψ – коэффициент транспортабельности частиц твердого материала; S – концентрация гидросмеси.



Рабочая область гидротранспортной установки при колебаниях свойств транспортируемого материала:

- 1 – Расходно-напорная характеристик насоса в стабильном режиме работы;
- 2 – Расходно-напорная характеристик магистрали в стабильном режиме работы;
- 3 – Предельно допустимые расходно-напорные характеристики насоса;
- 4 – Предельно допустимые расходно-напорные характеристики магистрали

В приведенных формулах от свойств транспортируемого материала зависят величины i , ρ_c и ψ . Для решения поставленной задачи было проанализировано около 20 известных в бывшем СССР методик расчета параметров гидротранспорта таких авторов, как Юфин, Трайнис, Смолдырев, Дмитриев, Роер, Дюран, Силин – Коберник, Асауленко, Коберник – Войтенко, Карасик, Нурок – Гришко, Аксенов – Подкорытова, Животовский – Хальсенберг, а также институтов ВНИИжелезобетон и Проектгидромеханизация [2, 4-20]. Анализ зависимостей гидравлического уклона от скорости и концентрации гидросмеси, а также критической скорости от концентрации гидросмеси и свойств транспортируемого материала показывает, что от свойств транспортируемого материала в наибольшей степени зависит величина критической скорости, при этом зависимость гидравлического уклона от этих факторов выражается через отношение фактической скорости к критической

$$i = b_0 \left(1 + \frac{b_1}{k_V^m} \right) i_0; \quad i_0 = \frac{\lambda V^2}{2gD}; \quad k_V = \frac{Fr}{Fr_{kp}}; \quad Fr = \frac{V}{\sqrt{gD}}; \quad Fr_{kp} = \frac{V_{kp}}{\sqrt{gD}},$$

где k_V – параметр гидротранспортирования; b_0 , b_1 – коэффициенты зависимости гидравлического уклона от параметра гидротранспортирования (табл. 1); m – показатель степени в зависимости гидравлического уклона от параметра гидротранспортирования (табл. 1); λ – коэффициент гидравлического сопротивления трения; Fr – фактическое значение критерия Фруда; Fr_{kp} – критическое значение критерия Фруда (табл. 2); V – фактическая среднерасходная скорость потока гидросмеси; V_{kp} – критическая скорость гидротранспортирования;

Усреднення та транспортування

g – ускорение свободного падения; D – внутренний диаметр трубопровода; i_0 – гидравлический уклон при течении несущей жидкости.

Таблица 1

Параметры зависимости гидравлического уклона от режима гидротранспорта			
Авторство методики	Значение m	Формулы для расчета	
		b_0	b_1
Нурок – Гришко	$2+n$	$1 + ArS_c$	$\frac{2}{S^{0,25n}} \left(k(S) \frac{Ar(1-S_c)}{1 + ArS_c} \right)^{0,5(1-n)}$
ВНИИжелезобетон и Проектгидромеханизация	2,8	1	0,003
Трайнис	3	$1 + ArS$	$\frac{1,99}{\psi} \sqrt{\frac{\lambda}{c}} \sqrt{\frac{1 + ArS}{S}}$
Роер	0,0714	$1 + Ar$	$\frac{0,22(1-S)Ar^{0,98}\delta^{0,09}\psi^{0,18}}{g^{-0,09}D^{-0,07}(1+Ar)^{0,93}\Delta^{0,07}}$
Аксенов – Подкорытова	3	1	$0,12\delta^{0,834}$
Юфин	2,35	$1 + ArS$	$(3,5 + 2D + 0,5\sqrt{d})(ArS)^{0,8}$
Дюран	3	1	1
Животовский – Хальсенберг	2,8	1	1
Силин – Коберник	3	$1 + 0,5S$	1
Асауленко	1	$\frac{\lambda - S}{\lambda(1 + ArS)^{-1}}$	1
Коберник – Войтенко	3	$1 + ArSS_0$	$\frac{\lambda_{kp}}{\lambda} \left(\frac{1 + 150\delta}{1 + ArSS_0} (1 + ArS)^{1,5} - 1 \right)$
Карасик	1	$\frac{2\sqrt{S} - 1}{\sqrt{S}}$	$\frac{0,7}{2\sqrt{S} - 1}$
Дмитриев мелкие частицы	3	1	$\frac{2c_1}{\lambda c^3}$
Дмитриев кусковые частицы	2	1	$\frac{2}{\lambda c^2}$
Смолдырев мелкие частицы руды	4	$1 + AS$	$\frac{2c_0}{\lambda c^4}$
Смолдырев мелкие частицы угля	3	1	$\frac{2c_1}{\lambda c^3} g$
Смолдырев кусковые частицы	2	1	$\frac{2}{\lambda c^2}$

Из табл. 1 видно, что величина коэффициента b_0 практически равна безразмерной плотности несущей жидкости, а следовательно, определяется плотностью тонких частиц и их массовой долей. При этом величина коэффициента

Усреднения та транспортування

b_1 зависит от концентрации гидросмеси, плотности частиц, а также в некоторых случаях, диаметров частиц и трубопровода, что может быть объяснено условиями экспериментальных исследований.

Таблица 2

Характеристика зависимости критической скорости от свойств материала

Авторство методики	Показатель степени при				Формула для расчета $F\eta_{кр}$
	ψ	δ	Ar	S	
Нурок – Гришко	0	0	1/2	1/4	$\sqrt{k(S) \frac{Ar(1-S_c)}{1+ArS_c} S^{0,5}}$
ВНИИжелезобетон и Проектгидромеханизация	1/3	0	0	0,36	$48,99S^{0,363}\sqrt[3]{\psi}$
Трайнис	1	0	0	1/2	$\sqrt{\frac{c}{\lambda}\psi} \sqrt{\frac{S}{1+ArS}}$
Роер	0,326	0,163	0,326	0	$\frac{\Delta D^{0,136}}{0,01g^{0,337}} \delta^{0,163} \frac{(Ar\psi)^{0,326}}{Ar+1}$
Аксенов – Подкорытова	2/3	1/6	1/6	1/6	$\frac{1,241}{\sqrt[3]{\lambda}} \sqrt[6]{\delta Ar S} \psi^{2/3}$
Юфин	1/4	1/8	1	1	$\frac{9,8(\rho-0,4)}{\sqrt[24]{g^9 D^7}} \sqrt[4]{\psi^8} \sqrt[8]{\delta}$
Дюран	1/2	1/4	0	1/3	$5,749\sqrt[3]{S} \sqrt{\psi^4} \sqrt{\delta}$
Животовский – Хальсенберг	1/2	0	-1/4	0,357	$5,764 \frac{S^{0,357}}{\sqrt[4]{Ar}} \sqrt{\psi}$
Силин – Коберник	0	0	0	1/3	$3,333\sqrt{\frac{S}{1+0,5S}}$
Асауленко	1	1/2	1	1	$\frac{\lambda Ar S \psi \sqrt{\delta}}{(\lambda - S)(1 + ArS)}$
Коберник – Войтенко	1/4	1/8	1	1	$\frac{15(\rho-0,4)}{\sqrt[24]{g^9 D^7}} \sqrt[4]{\psi^8} \sqrt[8]{\delta} \Delta_0^{0,1}$
Карасик	1/3	1/6	1/2	1/6	$7,56\sqrt[3]{\psi} \sqrt{Ar} \sqrt[6]{S} \sqrt{\delta}$
Дмитриев мелкие частицы	1/3	1/6	1/3	1/3	$c\sqrt[3]{ArS\psi} \sqrt[6]{\delta}$
Дмитриев кусковые частицы	1	0	0	1/2	$0,6c\psi\sqrt{fS}$
Смолдырев мелкие частицы руды	1/2	0	1/4	1/4	$c\sqrt{\psi} \sqrt{\frac{ArS}{1+ArS}}$
Смолдырев мелкие частицы угля	1/3	0	1/3	1/3	$\frac{c}{\sqrt[3]{g}} \sqrt[3]{ArS\psi}$
Смолдырев кусковые частицы	1	0	0	1/2	$0,6c\psi\sqrt{fS}$

Результаты анализа зависимостей критической скорости гидротранспорти-

Усреднения та транспортування

рования показывают, что величина этого параметра в наибольшей степени зависит от следующих безразмерных комплексов (табл. 2):

$$Ar = \frac{\rho_S - \rho_w}{\rho_w}; \quad \psi = \frac{\omega}{\sqrt{gd}}; \quad \delta = \frac{d}{D},$$

где Ar – параметр Архимеда; ρ_S – плотность твердых частиц; ρ_w – плотность воды; ω – гидравлическая крупность твердых частиц; d – средняя крупность твердых частиц; δ – относительный диаметр твердых частиц.

Таким образом, в наибольшей степени свойства транспортируемого материала учитываются выражением для критической скорости гидротранспортирования за счет произведения различных степеней параметров Ar , ψ и δ (табл. 2). Для расчета величины ψ рекомендуется использовать аппроксимацию таблиц В.Н. Гончарова для гидравлической крупности частиц [3, 18], в соответствии с которыми частицы делятся на три фракции (табл. 3).

Таблица 3

Формулы для определения величины ψ для частиц различных фракций

Фракции	Диаметр частиц	Формула для расчета ψ
Тонкие	до 0,15 мм	$\psi = 2778\sqrt{gd^3} Ar$
Мелкие	от 0,15 до 3 мм	$\psi = \left(a\sqrt{d} - \frac{b}{\sqrt{d}} \right) Ar$
Кусковые	более 3 мм	$\psi = 1,67\sqrt{Ar}$

Таким образом, из приведенных обобщений табл. 1-3, а также формул для расчета расходно-напорных характеристик магистрали и центробежных насосов можно сделать следующие выводы относительно параметров и свойств транспортируемого материала, через критическую скорость гидротранспортирования и гидравлический уклон оказывающих наибольшее влияние на рабочую точку системы:

- коэффициент транспортабельности твердых частиц всего транспортируемого материала;
- средневзвешенный параметр Архимеда частиц всего транспортируемого материала;
- относительный диаметр частиц всего транспортируемого материала;
- объемная доля и параметр Архимеда частиц, образующих несущую суспензию.

С учетом этого все изменения свойств россыпи можно учитывать, задавая диапазоны изменения этих параметров с последующим изменением расходно-напорных характеристик магистрали и насоса, и таким образом оценивать параметры рабочей области гидротранспортной установки (рисунок).

Список литературы

1. Обоснование параметров и режимов работы систем гидротранспорта горных предприятий / Ю.Д. Баранов, Б.А. Блюсс, Е.В. Семенов и др. – Днепропетровск: Новая идеология, 2006. – 416 с.
2. Трубопроводный гидротранспорт твердых сыпучих материалов / Л.И. Махарадзе, Т.Ш. Гочиташвили, С.И. Криль и др. – Тбилиси: Мецниереба, 2006. – 350 с.
3. Семенов Е.В. Научные основы технологий гидромеханизации открытой разработки титан-цирконовых россыпей. – К.: Наукова думка, 2011. – 231 с.
4. Временные технические указания по гидравлическому расчету систем напорного гидротранспорта хвостов и концентратов обогатительных фабрик. – Л.: Ротапринт ин-та "Механобр", 1979. – 26 с.
5. Гидротранспорт (вопросы гидравлики) / Н.А. Силин, Ю.К. Витошкин, В.М. Карасик и др. – К.: Наук. думка, 1971. – 158 с.
6. Горюнов С.И. Способ приближенного расчета напорного гидротранспорта несвязных грунтов. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1959. – 43 с.
7. Карасик В.М., Асауленко И.А. Напорный гидротранспорт песчаных материалов. – К.: Наук. думка, 1966. – 106 с.
8. Карасик В.М. Интенсификация гидротранспорта продуктов и отходов обогащения горно-обогатительных комбинатов / В.М. Карасик, И.А. Асауленко, Ю.К. Витошкин. – К.: Наук. думка, 1976. – 156 с.
9. Коберник С.Г., Войтенко В.И. Напорный гидротранспорт хвостов горно-обогатительных комбинатов. – К.: Наук. думка, 1967. – 140 с.
10. Методика расчета гидротранспортных установок для транспорта и намыва хвостов железорудных ГОКов. – К.: НИИСП Госстроя УССР, 1970. – 64 с.
11. Силин Н.А., Коберник С.Г. Режимы работы крупных землесосных снарядов и трубопроводов. – К.: Изд-во АН УССР, 1962. – 215 с.
12. Силин Н.А., Витошкин Ю.К. Гидротранспорт угля по трубам и методы его расчета. – К.: Изд-во АН УССР, 1964. – 88 с.
13. Смолдырев А.Е. Расчет рудничного трубопроводного транспорта. – М.: Госгортехиздат, 1961. – 56 с.
14. Джваршеишвили А.Г. Системы трубного транспорта горно-обогатительных предприятий: 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Недра, 1981. – 384 с.
15. Дмитриев Г.П., Махарадзе Л.И., Гочиташвили Т.Ш. Напорные гидротранспортные системы. – М.: Недра, 1991. – 304 с.
16. Евдокимов П.Д., Сазонов Г.Т. Проектирование и эксплуатация хвостовых хозяйств обогатительных фабрик. – М.: Недра, 1978. – 440 с.
17. ИС 21-26.3-567-81. Система напорного гидротранспорта отходов чугунолитейного производства. Инструкция по гидравлическому расчету. – К.: Минстройматериалов СССР и ИГМ АН УССР, 1982. – 56 с.
18. Криль С.И. Напорные взвесенесущие потоки. – К.: Наук. думка, 1990. – 170 с.
19. Нурук Г.А. Гидромеханизация открытых разработок. – М.: Недра, 1970. – 584 с.
20. Теория и прикладные аспекты гидротранспортирования твердых материалов / И.А. Асауленко, Ю.К. Витошкин, В.М. Карасик и др. – К.: Наук. думка, 1981. – 364 с.

© Семенов Е.В., Мокрицкая Е.Ю., 2012

*Надійшла до редколегії 03.09.2012 р.
Рекомендовано до публікації д.т.н. П.І. Піловим*