

Е.В. Семененко, канд. техн. наук

(Украина, Днепропетровск, ИГТМ НАН Украины),

Н.А. Никифорова

(Украина, Днепропетровск, Национальная металлургическая академия)

ВЛИЯНИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИ АКТИВНЫХ ДОБАВОК НА ПАРАМЕТРЫ ГИДРОТРАНСПОРТА

В настоящее время гидротранспорт является наиболее надежным и эффективным видом транспорта на горнодобывающих и горно-обогатительных предприятиях. Особенно велика его роль при использовании мокрых методов обогащения минерального сырья [1 – 5]. Гидротранспортные системы во многом определяют стабильность технологического процесса и себестоимость концентратов. Приоритетными направлениями повышения эффективности производства и снижения себестоимости продукции горно-обогатительных предприятий являются снижение энергоемкости процесса гидротранспортирования и сокращение объемов потребляемой воды. Для трубопроводных систем, транспортирующих воду, хорошо зарекомендовал себя метод снижения гидравлического сопротивления турбулентных потоков с помощью гидродинамически активных добавок (ГДАД) [4, 6 – 9]. Однако для взвесенесущих потоков этот метод в настоящее время применялся только при малых концентрациях пульпы, содержащей лишь тонкие частицы [4, 10], что не позволяет использовать результаты этих исследований для обоснования режимов работы гидротранспортных систем на открытых горных разработках, при отведении отходов обогащения и освоении техногенных месторождений, где твердый материал содержит частицы крупностью от 0.2 до 2 мм [2 – 4].

Целью статьи является обоснование метода расчета гидравлического уклона и критической скорости для потоков пульпы с частицами крупностью менее 2 мм при введении в несущую жидкость ГДАД в очень малых концентрациях.

Гидродинамически активными являются водорастворимые полимеры, состоящие из линейных молекул, способных вытягиваться в длинные нити. Наиболее изучена гидродинамическая активность полиэтиленоксида (ПЭО) и полиакриламида (ПАА), которые являются карбоцепными полимерами состава $[-CH_2-CH_2-O-]_n$ (ПЭО) и $[-CH_2-CH(CONH_2)-]_n$ (ПАА).

Для выявления в различных методах расчета параметров гидротранспорта тех параметров, на которые могут оказывать влияние добавки ГДАД, были проанализированы наиболее распространенные методики: Войтенко, Мотинова, Коберника – Войтенко, Карасика, Смолдырева, Дмитриева, Силина, Криля, Трайниса, ИГМ НАН Украины, ВНИИГ, МГРИ, ВНИИЖелезобетон, институтов "Проектгидромеханизация", "Механобр", "Днепрогипрошахт", ЛГИ им. Г.В. Плеханова [1].

Все эти методики были разделены на группы по принципу, определяющему критический режим гидротранспортирования. Классификация методик по этому принципу приведена в таблице. Было выделено четыре группы методик.

Классификация методик расчета параметров гидротранспорта по принципу, определяющему критический режим

Группа	Условия определения критической скорости	Методики, относящиеся к группе
1	Аппроксимация результатов экспериментов	Войтенко, Мотинова, Коберника – Войтенко, Карасика, ИГМ НАН Украины
2	Принцип Великанова	ВНИИГ, МГРИ, Смолдырева, Дмитриева, Силина, ВНИИжелезобетон, института "Проектгидромеханизация"
3	Равенство касательных напряжений на стенке трубы критическому значению	Института «Механобр», ЛГИ им. Г.В. Плеханова, Криля
4	Достижение минимума зависимости гидравлического уклона от скорости течения гидросмеси	Трайниса, института «Днепрогипрошахт»

Используемыми при расчетах параметрами, на которые добавка ГДАД может оказывать влияние, оказались коэффициент гидравлического сопротивления; гидравлическая крупность частиц; средневзвешенный диаметр частиц; коэффициент фиктивного лобового сопротивления; изменение доли фракций гранулометрического состава в результате изменения крупности частиц; коэффициент неоднородности материала; коэффициент обобщенного трения материала; эмпирический коэффициент, учитывающий влияние различных факторов на дополнительные потери напора; шероховатость трубы; высота слоя заиления; средний коэффициент лобового сопротивления; коэффициент лобового сопротивления частиц.

Различные методики используют и учитывают эти параметры в разной степени, причем некоторые из этих параметров дублируют друг друга. Поэтому однородные параметры, на которые оказывают влияние ГДАД, были объединены в четыре группы – параметры, характеризующие а) изменение гидравлического сопротивления трения; б) изменение условий обтекания частиц; в) перераспределение долей фракций гранулометрического состава; г) изменение взаимодействия твердого со стенкой трубы. При расчете критической скорости и гидравлического уклона параметры первых трех групп учитываются практически всеми рассмотренными методиками, а параметры четвертой группы – меньше, чем четвертью из них.

Влияние присутствия ГДАД на гидравлическое сопротивление трения изучалось многими исследователями [6], однако остальные параметры с точки зрения влияния на них ГДАД ранее не рассматривались.

Таким образом, при расчете параметров гидротранспорта с учетом присутствия ГДАД необходимо, прежде всего, исследовать влияние ГДАД на условия обтекания частиц, на перераспределение долей фракций гранулометриче-

ского состава и на взаимодействие твердого со стенкой трубы. Все эти факторы могут быть учтены дополнительным гидравлическим уклоном, который обусловлен потерями напора на взвешивание и транспортирование жидкостью твердых частиц крупностью от 0.2 до 2 мм.

В рассмотренных методиках используются различные формулы для определения величины дополнительного гидравлического уклона, однако наиболее часто в них используются коэффициент гидравлического сопротивления; гидравлическая крупность частиц твердого материала; скорость потока пульпы; отношение диаметра частиц к диаметру трубы; отношение диаметра трубы к диаметру частиц.

Зависимость дополнительного гидравлического уклона от коэффициента гидравлического сопротивления I предполагается в половине из рассматриваемых методик. В десяти из четырнадцати рассмотренных методик дополнительный гидравлический уклон рассчитывается с учетом гидравлической крупности частиц транспортируемого материала. Во всех методиках учитывается зависимость дополнительного гидравлического уклона от скорости потока. При этом двенадцать методик используют для описания этой зависимости обратно пропорциональную степенную функцию, а две – прямо пропорциональную. Методики, использующие прямо пропорциональную зависимость дополнительного гидравлического уклона от скорости, априори предполагают пропорциональность между гидравлическими уклонами пульпы и воды. Показатель степени в десяти случаях равен единице, а в остальных близок к этому значению. Только пять из четырнадцати методик при определении дополнительного гидравлического уклона не учитывают соотношение диаметров частиц и трубопровода. При этом четыре из пяти этих методик вообще не учитывают диаметр твердых частиц при расчете параметров гидротранспорта. Девять остальных методик определяют дополнительный гидравлический уклон с учетом этого соотношения, причем шесть из них используют обратно пропорциональную зависимость, а три – прямо пропорциональную.

На основании результатов экспериментальных исследований [3 – 5, 10 – 12], а также анализа методик можно сделать следующий вывод: при транспортировании частиц крупностью от 0.2 до 2 мм величина дополнительного гидравлического уклона прямо пропорциональна отношению гидравлической крупности частиц к эффективной амплитуде вертикальных турбулентных пульсаций.

Как показывают экспериментальные исследования, величина средней амплитуды вертикальных турбулентных пульсаций в круглой трубе выражается через среднюю расходную скорость потока и коэффициент гидравлического сопротивления [11, 12]. С учетом этого необходимая эффективная амплитуда вертикальных турбулентных пульсаций может быть рассчитана по формуле

$$v = K\sqrt{IV}, \quad (1)$$

где v – эффективная амплитуда вертикальных турбулентных пульсаций; K – коэффициент пропорциональности.

Если сопоставить формулу (1) с известными зависимостями для расчета дополнительного гидравлического уклона, то становится очевидным, что в существующих методиках в эмпирические коэффициенты входит переменная величина I , которая существенно изменяется при использовании ГДАД. Следует также учитывать, что ГДАД может быть флокулянтom для тонких твердых частиц в пульпе и в этом случае оказывать существенное влияние на гранулометрический состав транспортируемого материала и соответственно на гидравлическую крупность частиц. Зависимость гидравлической крупности флокулы от концентрации флокулянта в пульпе выражается формулой [9]

$$w = w_0(1 + k_\phi q), \quad (2)$$

где w – гидравлическая крупность флокулы; w_0 – гидравлическая крупность твердых частиц; θ – массовая доля флокулянта в гидросмеси; k_ϕ – эмпирический коэффициент.

При разработке россыпных месторождений материал, подаваемый на обогатительную фабрику, содержит глинистые фракции. При его гидротранспорте происходит взаимодействие агломератов горной массы с водой, в результате чего изменяются свойства и состояние этих агломератов [2]. Наши эксперименты показали, что в растворе катионоактивного ПАА при его массовой доле в несущей среде не более 0,02% происходит ускорение процесса дезинтеграции глинистых агломератов с одновременной флокуляцией тонких частиц глины. В то же время в растворе анионоактивного ПАА дезинтеграция кусков глины происходит в значительно меньшей степени, чем в воде, при гидротранспортировании возможно даже увеличение размеров глинистых агломератов. Это означает, что выбор ГДАД должен осуществляться с учетом заряда частиц транспортируемого материала и заряда полимерных ионов.

Таким образом, ГДАД двояко влияют на дополнительный гидравлический уклон, обусловленный взвешиванием частиц крупностью от 0.2 до 2 мм. С одной стороны, присутствие ГДАД приводит к увеличению гидравлической крупности тонких частиц при условии, что ГДАД является для них флокулянтom. С другой стороны, ГДАД снижают величину коэффициента гидравлического сопротивления и тем самым увеличивают дополнительные гидравлические уклоны.

С учетом этого, а также формул (1) и (2) зависимость для определения гидравлического уклона по методике А.Е. Смолдырева будет иметь вид [1, 3]:

$$i = \frac{IV^2}{2gD} \left(1 + \frac{Ar(1-S_1)}{(1+ArS_1)} S_1 \right) + \sqrt{\frac{D}{d_{cp}}} \frac{Ar(1-S_1)^2}{(1+ArS_1)} \frac{w}{V} \frac{C_1}{\sqrt{I}}, \quad (3)$$

где i – гидравлический уклон при течении пульпы, м вод. ст./м; I – коэффициент гидравлического сопротивления; V – скорость движения воды, м/с; g – ускорение свободного падения, м/с²; D – диаметр трубопровода, м; S_1, S_2 – объ-

емные концентрации соответственно частиц крупностью менее 0.2 мм и частиц крупностью от 0.2 до 2 мм; Ar – параметр Архимеда; d_{cp} – средневзвешенный диаметр частиц мелкой фракции, м; w – скорость стесненного падения частиц, м/с; C_1 – эмпирическая константа.

Формулу для расчета критической скорости в присутствии ГДАД можно получить на основе принципа Великанова [1, 5] с использованием результатов экспериментов Хаскельберга и Карлина [13], согласно которым в критическом режиме выполняется условие

$$\frac{i - i_0}{i_0} = K_{kp}; \quad K_{kp} = 12w^{0.47} \frac{(gD)^{0.7}}{(gd_{cp})^{0.23}} \sqrt{C}, \quad (4)$$

где i_0 – удельные потери напора для воды, м вод. ст./м; K_{kp} – эмпирическая константа.

Подставляя формулу (3) в выражение (4), после несложных преобразований нетрудно показать, что критическая скорость определяется из нелинейного уравнения, решение которого можно получить аналитическим путем, если использовать для описания зависимости коэффициента гидравлического сопротивления от числа Рейнольдса формулу [6, 10]

$$l = \frac{m}{Re^n}; \quad (6)$$

$$V_{kp} = \left(\frac{1 - S_1}{S_1} \right)^{\frac{2}{3(2-n)}} \frac{2^{-n} \sqrt{(1 + k_{\phi} q)^{2/3}}}{m} \left(\frac{2w_0 C_1}{\sqrt{gd_{cp}}} \right)^{\frac{2}{3(2-n)}} \frac{2^{-n} \sqrt{gD^{1+n}}}{n^n}; \quad (7)$$

$$K_1 = 12w^{0.47} \frac{(1 + ArS_1)(gD)^{0.7} \sqrt{C}}{Ar(1 - S_1)S_1(gd_{cp})^{0.23}}, \quad (8)$$

где Re – число Рейнольдса; m , n – функции массовой доли флокулянта в гидросмеси; n – кинематический коэффициент вязкости, м²/с.

Таким образом, используя формулы (3), (6) – (8), можно в широком диапазоне концентраций пульпы определить гидравлический уклон и критическую скорость при транспортировании частиц крупностью до 2 мм в присутствии ГДАД, а затем оценить расходно-напорную характеристику магистрали и требуемый напор насосов. Поскольку зависимости параметров гидротранспорта получены в явном виде, формулы (3), (6) – (8) позволяют производить аналитические исследования режимов работы гидротранспортных систем и обосновывать эффективные скорости и концентрации пульпы. При этом при выборе гид-

родинамически активных добавок необходимо учитывать как свойства частиц транспортируемого материала, так и свойства полимерных молекул или ионов.

Список литературы

1. Обоснование параметров и режимов работы систем гидротранспорта горных предприятий // Ю.Д. Баранов и др. – Д.: «Новая идеология», 2006. – 416 с.
2. Проблемы разработки россыпных месторождений / И.Л. Гуменик. – Д.: Січ, 2001. – 224 с.
3. Смолдырев А.Е. Трубопроводный транспорт. – М.: Недра, 1980. – 390 с.
4. Покровская В.Н. Трубопроводный транспорт в горной промышленности. – М.: Недра, 1985. – 191 с.
5. Дмитриев Г.П., Махарадзе Л.И., Гочиташвили Т.Ш. Напорные гидротранспортные системы. – М.: Недра, 1991. – 304 с.
6. Применение гидродинамически активных добавок полимеров и поверхностно-активных веществ в энергосберегающих технологиях / А.В. Ступин и др. // Прикладна гідромеханіка. – 2001. – Т. 3 (75), № 1. – С. 74 – 81.
7. Криль С.И. Напорные взвесенесущие потоки. – К.: Наук. думка, 1990. – 160 с.
8. Справочник по обогащению углей / Под ред. И.С. Благова. – М.: Недра, 1984. – 614 с.
9. Теория и прикладные аспекты гидротранспортирования твердых материалов / Асауленко И.А. и др. – К.: Наук. думка, 1981. – 364 с.
10. Курганов А.М., Федоров Н.Ф. Справочник по гидравлическим расчетам систем водоснабжения и канализации. – Л.: Стройиздат, 1973. – 408 с.
11. Надежность и долговечность напорных гидротранспортных систем / А.К. Махарадзе и др. – М.: Недра, 1984. – 119 с.
12. Медников Е.П. Турбулентный перенос и осаждение аэрозолей. – М.: Недра, 1981. – 175 с.
13. Коберник С.Г., Войтенко В.И. Напорный гидротранспорт хвостов горно-обогатительных комбинатов. – К.: Наук. думка, 1967. – 140 с.