

*к.т.н., с.н.с. Семененко Е.В.,
(ИГТМ НАН Украины, г. Днепропетровск)
ст. преподаватель Никифорова Н.А.
(НМетАУ, г. Днепропетровск, Украина)*

ОБОСНОВАНИЕ МЕТОДА РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ ГИДРОТРАНСПОРТА В ПРИСУТСТВИИ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИ АКТИВНЫХ ДОБАВОК

Наведено класифікацію існуючих методик розрахунку параметрів гідротранспорту твердих матеріалів за принципом, який визначає критичний режим гідротранспортування. Виявлено параметри, на які може впливати гідродинамічно активний додаток до несучої рідини. Запропоновано метод розрахунку параметрів гідротранспорту в присутності гідродинамічно активних додатків.

Гидротранспортные системы являются обязательным элементом технологий добычи и переработки минерального сырья, без стабильной и надежной работы которых невозможно эффективное функционирование предприятий горной, металлургической и химической отраслей промышленности [1 – 5]. В соответствии с мировыми тенденциями модернизация этого вида транспорта осуществляется в направлении экономии электроэнергии и сокращения потребляемых объемов воды [6]. В этих условиях наиболее эффективным является метод снижения гидравлического сопротивления магистрали за счет введения гидродинамически активных добавок (ГДАД), который с успехом используется для трубопроводных систем, транспортирующих воду [4, 7 – 9]. Однако использование этого метода для взвесенесущих потоков в настоящее время ограничивается случаями малых концентраций пульпы и присутствия в ней лишь тонких частиц [4, 10], что не позволяет использовать эти результаты для условий 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.

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

Для удобства исследования все методики были разделены на группы по принципу, определяющему критический режим гидротранспортирования. Классификация методик по этому принципу приведена в таблице 1. Было выделено четыре группы методик.

Таблица 1 – 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 и 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

Анализ выбранных методик позволил выявить 12 параметров, используемых при расчетах, на которые добавка ГДАД может оказывать влияние. На рисунке 1 показаны доли методик, использующих соответствующий параметр при расчете критической скорости и гидравлического уклона. На этом рисунке 1 – коэффициент гидравлического сопротивления; 2 – гидравлическая крупность частиц; 3 – средневзвешенный диаметр частиц; 4 – коэффициент фиктивного лобового сопротивления; 5 – изменение долей фракций гранулометрического состава в ре-

зультате изменения крупности частиц; 6 – коэффициент неоднородности материала; 7 – коэффициент обобщенного трения материала; 8 – эмпирический коэффициент, учитывающий влияние различных факторов на дополнительные потери напора; 9 – шероховатость трубы; 10 – высота слоя заиления; 11 – средний коэффициент лобового сопротивления; 12 – коэффициент лобового сопротивления частиц.

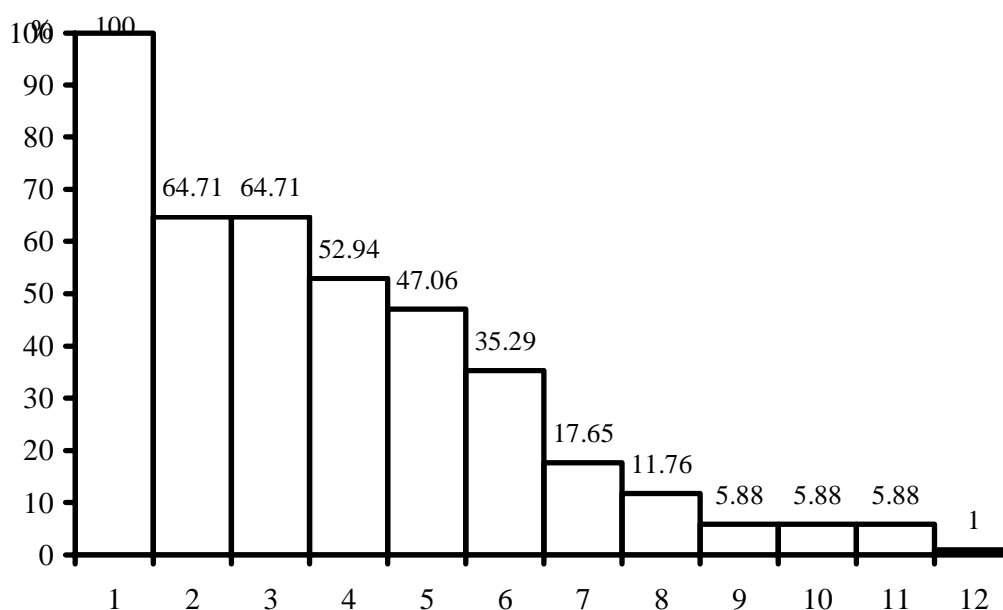


Рисунок 1 – Доля методик, использующих параметры, зависящие от добавок ГДАД, при расчете критической скорости и гидравлического уклона

Не все методики используют и учитывают эти параметры в одинаковой степени. Так как некоторые из указанных параметров дублируют друг друга, то имеет смысл объединить их в группы, которые будем называть факторами, характеризующими влияние ГДАД на параметры гидротранспорта. Можно выделить четыре таких фактора: А – изменение гидравлического сопротивления трения; В – изменение условий обтекания частиц; С – перераспределение долей фракций гранулометрического состава; D – изменение взаимодействия твердого со стенкой трубы. На рисунке 2 показаны доли методик, использующих соответствующий фактор при расчете критической скорости и гидравлического уклона. Из рисунка видно, что факторы А, В и С учитываются практически всеми рассмотренными методиками, а фактор D – меньше, чем четвертью из них.

Влияние присутствия ГДАД на фактор А всесторонне изучалось разными исследователями, однако факторы В, С и D ранее не рассматривались.

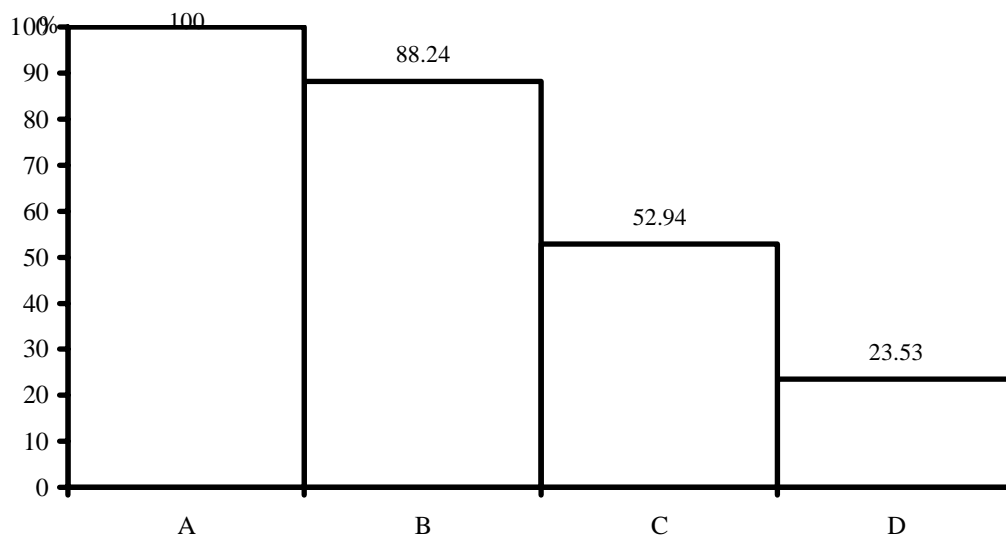


Рисунок 2 – Доля методик, использующих факторы, характеризующие влияние добавок ГДАД, при расчете критической скорости и гидравлического уклона

Таким образом, для разработки методики расчета параметров гидротранспорта, учитывающей влияние присутствия ГДАД, необходимо, прежде всего, исследовать их влияние на условия обтекания частиц, на перераспределение долей фракций гранулометрического состава и на взаимодействие твердого со стенкой трубы. Все эти факторы учитываются дополнительным гидравлическим уклоном, который обусловлен потерями напора на взвешивание и транспортирование жидкостью твердых частиц крупностью от 0.2 до 2 мм.

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

Анализ показывает, что зависимость дополнительного гидравлического уклона от коэффициента гидравлического сопротивления λ предполагается в половине из рассматриваемых методик. В десяти из четырнадцати рассмотренных методик дополнительный гидравлический уклон рассчитывается с учетом гидравлической крупности частиц

транспортируемого материала. При этом методики, не учитывающие влияние гидравлической крупности на дополнительный гидравлический уклон, вообще не рассматривают эту характеристику материала при расчете параметров гидротранспорта. 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.

Учитывая результаты анализа методик, а также замечания некоторых исследователей о характере движения частиц крупностью от 0.2 до 2 мм, основанные на результатах экспериментальных исследований [3 – 5, 10 – 12], 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

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

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 $\frac{1}{\sqrt{\lambda}}$, которая изменяется при использовании ГДАД. Следует также учитывать, что ГДАД может быть флокулянт 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]

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

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

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 частиц, при условии, что ГДАД является для них флокулянт. 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]

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

где i – гидравлический уклон при течении пульпы, м вод. ст./м;
 λ – коэффициент гидравлического сопротивления;
 V – скорость движения воды, м/с;
 g – ускорение свободного падения, м/с²;
 D – диаметр трубопровода, м;
 S_1, S_2 – объемные 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, согласно которому в критическом режиме выполняется условие [1, 5]

$$\frac{i-i_0}{i_0} = K_{kp}, \quad (4)$$

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

$$\sqrt{\lambda_{kp}} V_{kp} = \sqrt[3]{\frac{\frac{Ar(1-S_1)^2 (1+k_\phi \theta)}{(1+ArS_1)}}{K_{kp} - \frac{Ar(1-S_1)S_1}{(1+ArS_1)}} \sqrt[3]{\frac{2C_1 w_0}{\sqrt{gd_{cp}}}} \sqrt{gD}}. \quad (5)$$

Проведенные исследования известных методов расчета трубопроводов, транспортирующих растворы ГДАД, показывают, что зависимость коэффициента гидравлического сопротивления от числа Рейнольдса для этих систем описывается зависимостью [6, 10]

$$\lambda = \frac{m}{Re^n}, \quad (6)$$

где Re – число Рейнольдса;

m, n – функции массовой доли флокулянта в гидросмеси.

С учетом зависимости (6) легко получить формулу для расчета критической скорости в явном виде

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

$$K_1 = \frac{Ar(1 - S_1)S_1}{(1 + ArS_1)}, \quad (8)$$

где ν – кинематический коэффициент вязкости, $\text{м}^2/\text{с}$.

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 проводить аналитические исследования режимов работы гидротранспортных систем и обосновывать эффективные скорости и концентрации пульпы.

Приведена классификация существующих методик расчета параметров гидротранспорта твердых материалов по принципу, определяющему критический режим гидротранспортирования. Выявлены параметры, на которые может оказывать влияние гидродинамически активная добавка к несущей жидкости. Предложен метод расчета параметров гидротранспорта в присутствии гидродинамически активных добавок.

Classification of existing calculation procedures of solid materials hydrotransport parameters by principle, which determines hydrotransportation critical mode of operation, is presented. The parameters, on which hydrodynamically active addition to carrying liquid might make an impact, are disclosed. The method of calculation of hydrotransport parameters in presence of hydrodynamically active additions is offered.

Библиографический список.

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. 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, П.В. Асланов, А.П. Симоненко, Н.В. Быковская, С.А. Фоменко // *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, А.М. Коткина, Л.С. Зарубина. – М.: Недра, 1984. – 614 с.

9. *Теория и прикладные аспекты гидротранспортирования твердых материалов* / Асауленко И.А., Витошкин Ю.К., Карасик В.М., Криль С.И., Очеретько В.Ф. – Киев: Наукова 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, Т.Ш. Гочиташвили, Д.Г. Сулаберидзе, Л.А. Алехин. – М.: Недра, 1984. – 119 с.

12. Медников Е.П. *Турбулентный перенос и осаждение аэрозолей*. – М.: Недра, 1981. – 175 с.