УДК 621.648.8

Е.Ю.МЕРЯШЕВА
Горно-электромеханический факультет,
группа ГМ-97-2, ассистент профессора

ПОТЕРИ ДАВЛЕНИЯ ПРИ ГИДРОТРАНСПОРТЕ ПУЛЬП С УЧЕТОМ МЕЖФАЗОВОГО СКОЛЬЖЕНИЯ

Приведены результаты анализа методов расчета параметров гидравлического транспортирования полидисперсных гидросмесей, содержащих частицы различных размеров, что предопределяет значительные трудности при выборе критической скорости потока и определении соответствующих потерь напора. В значительной степени параметры гидравлического транспортирования пульп зависят от величины относительной скорости течения твердой и жидкой составляющих фаз. Одним из методов расчета является графоаналитический, основанный на использовании результатов экспериментальных исследований процесса и теоретических закономерностей. Предлагается для расчета потерь напора при гидравлическом транспортировании разнородных материалов использовать номограммы Молеруса – Веллмана, полученные экспериментально для относительной скорости течения двухфазных полидисперсных гидросмесей.

In paper are presents the results of the analysis of the calculation methods of parameters pipeline transport of polydispertion mixtures with solid particles of different sizes that defines difficulties at the choice of the critical velocity of flow and pressure drop. Generally the parameters of hydrotransport are dependent from value of the relative velocity of flow solid and liquid composing phases. One of the methods of calculation is graph-analytic and based on using of experimental results and theoretical regularities. In paper is suggested for calculation of pressure drop at the hydraulic transportation of size differ solid materials to use charts of Molerus-Wellmann obtained experimentally for the relative flow velocity of polydispertion mixtures.

Межфазовая скорость и коэффициент скольжения. Перемещение твердых частиц в потоке гидросмеси в зависимости от средней скорости течения, крупности частиц, их плотности и концентрации в объеме смеси может иметь три формы: волочение по дну трубопровода; скачкообразное перемещение; перемещение во взвешенном состоянии потоком вмещающей жидкости. Первая форма движения наблюдается для частиц грубодисперсных диаметром в несколько миллиметров. Вторая форма движения для математического описания является наиболее сложной. Впервые на этот вид перемещения твердых частиц обратил внимание Багнольд, а затем Даниел и Дюран.

Основой для составления различных моделей течения являются диффузионная модель В.М.Маккавеева и гравитационная М.А.Великанова. На базе этих моделей разработан ряд полуэмпирических зависимостей средней скорости потока, потерь напора и других характеристик, полученных при исследовании конкретных видов гидросмесей с заданными физико-механическими характеристиками.

Важным элементом механизма течения гидросмесей является различие скоростей перемещения твердых частиц и жидкой фазы и соответственно значений плотности гидросмеси по длине трубопровода и в его поперечном сечении. Так, на выходе из трубопровода плотность смеси, включающей однородные твердые частицы,

$$\rho_t = \frac{\rho_w Q_w + \rho_s Q_s}{Q_h} = \frac{\rho_w F_w \upsilon_w + \rho_s F_s \upsilon_s}{F_w \upsilon_w + F_s \upsilon_s}, \quad (1)$$

где $Q_h = Q_w + Q_s$ – объемный расход гидросмеси; Q_w и Q_s – расход жидкой и твердой фаз соответственно; υ_w и υ_s – средняя скорость твердой и жидкой фаз; F_w и F_s – пло-

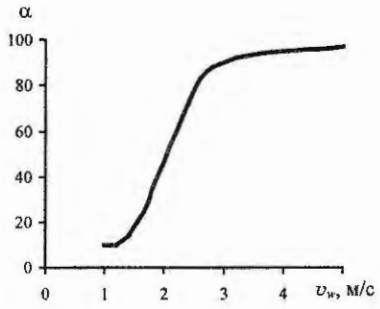


Рис.1. Коэффициент скольжения α
в функции средней скорости жидкой фазы v_w

щадь сечения, занимаемая жидкой и твердой фазами гидросмеси; ρ_w и ρ_s – плотность жидкой и твердой фаз соответственно.

В случае полифракционных частиц, перемещающихся в потоке пульпы с различными скоростями и по различным траекториям (волочение, скачкообразно, в потоке жидкой фазы и т.д.), формула (1) примет вид

$$\rho_t = \frac{\rho_w F_w v_w + \rho_s \sum v_{si} F_{si}}{F_w v_w + \sum F_{si} v_{si}}, \qquad (2)$$

где F_{si} – эффективная площадь потока, занимаемая частицами i-й фракции твердого материала, перемещающихся со скоростью v_{si}.

Если принять равными скорости жидкой и твердой фаз, то из формулы (1) для среднего сечения трубопровода получим

$$\rho_c = \frac{\rho_w F_w + \rho_s F_s}{F_w + F_s}.$$

Плотность гидросмеси ρ_c в произвольном сечении трубопровода при равенстве средних скоростей твердой и жидкой фаз можно назвать статической плотностью, являющейся средней плотностью двухфазного потока

$$\rho_m = \frac{m_m}{V_h} = \frac{m_w + m_s}{V_w + V_s} = \frac{\rho_w V_w + \rho_s V_s}{V_w + V_s} = \frac{\rho_w V_w + \rho_s V_s}{F_w + F_s} = \rho_c,$$

где V_h, V_w и V_s – объем гидросмеси, жидкой и твердой фаз соответственно; m_m, m_w и m_s – масса гидросмеси и составляющих ее компонентов.

Плотность, определяемая зависимостью (2), называется кинематической или транспортной плотностью гидросмеси. По аналогии с определением плотности можно выразить соответствующие значения концентрации:

$$c_{vt} = \frac{v_s F_s}{v_s F_s + v_w F_w}, \; c_{vc} = \frac{F_s}{F_s + F_w},$$

где c_{vt} и c_{vc} – кинематическая и статическая объемные концентрации соответственно.

При известных значениях кинематической и статической концентрации можно произвести оценку межфазового скольжения, за меру которого примем коэффициент скольжения

$$\alpha = \frac{c_t}{c_c} = \frac{v_s}{v_h}, \qquad (3)$$

где v_s – средняя скорость твердой фазы по длине трубопровода; v_h – средняя скорость потока,

$$v_h = \frac{Q_h}{F} = v_{vc}(1 - c_v) + v_s c_v;$$

v_{vc} – средняя скорость твердых частиц в сечении трубопровода; c_v – объемная концентрация твердых частиц в потоке гидросмеси.

От значения концентрации согласно формуле зависят и значения скорости. Обычно при расчетах средней скорости гидросмеси используется концентрация твердых частиц в сечении трубопровода c_c, статическая вместо концентрации кинематической. Различие концентраций зависит от коэффициента скольжения α, значение которого определяется формулой (3). Коэффициент скольжения изменяется в пределах $0 < \alpha < 1$. Сам коэффициент скольжения не дает информации о скорости движения жидкой и твердой фаз потока, а характеризует лишь относительную скорость движения. Если скорость твердой фазы равна скорости жидкости ($v_s = v_w = v_h$), то $\alpha = 1$, с другой стороны, если все твердые частицы выпадают из потока жидкости и образуют на дне трубопровода неподвижный осадок ($v_s = 0$), то $\alpha = 0$. Этот диапазон изменения коэффициента скольжения подтверждается исследованиями В.Виденрота (рис.1).

Изменение коэффициента скольжения в таком широком диапазоне при изменении средней скорости жидкой фазы подтверждает вывод о значительной сложности механизма течения гидросмесей с грубодисперсными частицами твердого материала.

В работах, посвященных скольжению твердой и жидкой фаз потока, рассматривается разность межфазовой скорости

$$v_{ws} = v_w - v_s,\ v_\Delta = v_w - v_h,$$

где v_{ws} – разность между скоростями жидкой и твердой фаз; v_Δ – разность средних скоростей гидросмеси и твердой фазы.

Потери давления и межфазовое скольжение. Мелкодисперсные твердые частицы в смеси с несущей жидкостью образуют жидкую среду, плотность которой по сечению трубопровода постоянна и в которой твердая и жидкая фазы перемещаются с одинаковой скоростью. Такие гидросмеси можно отнести к вязким жидкостям с плотностью большей, чем плотность жидкой фазы. Удельные потери давления в этом случае определяются уравнением Дарси – Вейсбаха, в котором коэффициент гидравлических сопротивлений λ_h можно определить по формуле Колебрука – Вайта:

$$\sqrt{\frac{1}{\lambda_h}} = -2\log\left[\frac{2{,}51}{\mathrm{Re}\sqrt{\lambda_h}} + \frac{k}{3{,}71D}\right],$$

где Re – число Рейнольдса; k – абсолютная шероховатость внутренней поверхности трубопровода; D – диаметр трубопровода.

Удельные потери напора при течении гидросмеси всегда превосходят величину удельных потерь напора при течении чистой жидкости, причем с увеличением крупности частиц добавочные удельные потери возрастают. В общем виде удельные потери напора при течении гидросмесей мелкодисперсных выражаются суммой

$$I_h = I_w + \Delta I_h,$$

где I_w – потери напора при течении воды; ΔI_h – потери напора на перемещение частиц твердого материала.

От величины межфазового скольжения непосредственно зависят дополнительные потери напора на транспортирование гидросмесей. Фактором, определяющим динамику взвесенесущего потока и характеризующим жидкую и твердую фазы является число Фруда соответственно

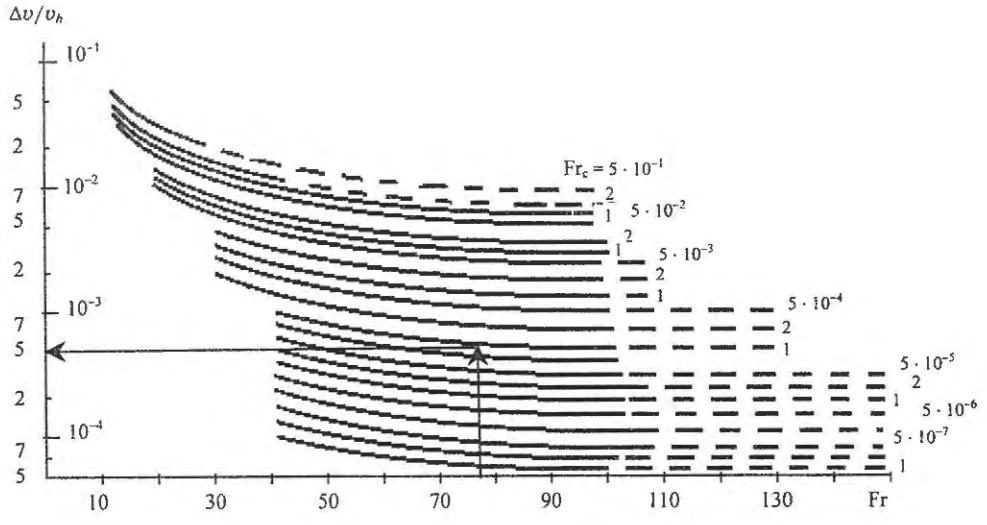


Рис.2. Номограмма Молеруса – Веллмана для определения относительной скорости течения гидросмеси

$$Fr^2 = \frac{W_o^2}{\left(\frac{\rho_s}{\rho_w} - 1\right)gD}, \quad Fr_c = \frac{v_h}{\sqrt{\left(\frac{\rho_s}{\rho_w} - 1\right)gD}},$$

где W_o – гидравлическая крупность твердых частиц; g – ускорение свободного падения.

Зависимость относительной скорости твердой фазы в функции числа Фруда устанавливается по номограмме Молеруса – Веллмана (рис.2).

Выводы

1. Твердые частицы в потоке гидросмеси перемещаются со скоростью меньшей, чем скорость жидкости. Разность между скоростью жидкой и твердой фаз потока определяет величину относительного скольжения.

2. Кинематические и динамические параметры гидравлического транспорта полифракционных гидросмесей в значительной степени определяются величиной коэффициента скольжения жидкой и твердой фаз потока.

3. Дополнительные потери давления на транспортирование твердой фазы, определяются величиной относительной скорости твердого материала и могут быть установлены с помощью номограммы в функции числа Фруда для жидкой и твердой фаз потока.

Научный руководитель д.т.н. доц. *В.И.Александров*