УДК 622.615

С.Е.ДЕМЬЯНОВ
Аспирант кафедры рудничных стационарных установок

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРУБОПРОВОДНОГО ТРАНСПОРТИРОВАНИЯ ПАСТООБРАЗНЫХ ПУЛЬП

Представлена методика расчета параметров гидравлического транспортирования пастообразных пульп, основанная на расчете высококонцентрированных гидросмесей, который базируется на математической модели Бингама для транспорта таких гидросмесей. В основе методики лежит предположение, согласно которому в объеме высококонцентрированной гидросмеси образуется тело потока с переменным значением концентрации твердых частиц и вязкости. Проведенные в лабораторных и промышленных условиях исследования позволяют использовать модель для расчета гидравлического транспорта высококонцентрированных гидросмесей.

In paper is presented the methodology calculation parameters hydraulic transportation paste-like mixtures, which based on methodology of calculation parameters of hydromixture with high concentration of small particles, based on Bingam's mathematical model of the flow of such mixtures in pipelines. By the base of methodology is apprehension, according to which deformation of mixtures volume with high concentrations of solid particles is taken around by formation the bodies of flow with variable values the concentrations of solid particles and viscosity in cross section of pipe. Results of experimental investigations that were carried out in laboratory conditions and in industry allowed to develop the methodology for pipeline transportation calculation with high concentrated mixtures.

Предприятия, использующие в технологическом процессе гидротранспорт, сталкиваются с рядом проблем, обусловленных низкой эффективностью и высокой энергоемкостью данного процесса. Снизить энергозатраты предлагается путем доведения гидросмеси до консистенции пасты – промежуточного состояния жидкой среды между высококонцентрированной гидросмесью и кегом (пороговое значение концентрации пасты, при котором гидросмесь утрачивает текучесть). Изменение свойств гидросмесей при непрерывном увеличении концентрации твердых частиц со схематическим разделением ее на пороговые зоны можно представить графически (рис.1).

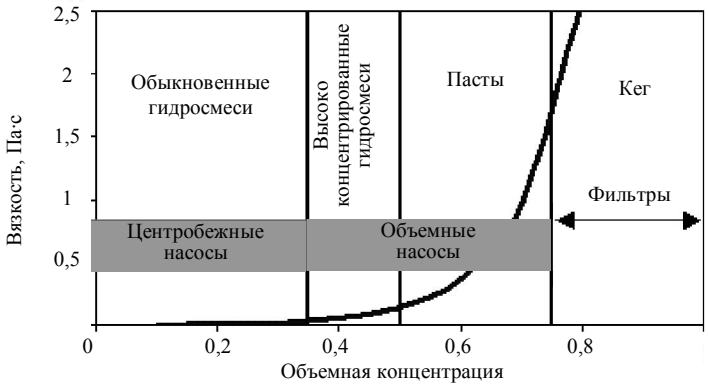


Рис.1. Изменение свойств гидросмесей при непрерывном увеличении концентрации твердых частиц

Точное определение термина «паста» дать затруднительно. Пастообразное состояние гидросмеси скорее качественное, чем количественное определение, так как только визуально можно отличить пастообразную субстанцию от менее вязкой и более текучей.

Вариантом осуществления такого перехода является применение методики расчета, разработанной для вычисления параметров гидравлического транспортирования высококонцентрированных гидросмесей. Она позволит определить режим транспортирования, законы поведения гидросмеси в потоке и настроить оборудование на максимальную эффективность.

Методика основана на реологической модели Бингама, которая описывается соотношением

$$T = \tau + \mu \frac{\partial v}{\partial n}, \qquad (1)$$

где T – касательное напряжение в потоке гидросмеси; τ – начальное напряжение сдвига; μ – вязкость; $\frac{\partial v}{\partial n}$ – градиент скорости деформации среды.

Начальное напряжение сдвига τ и вязкость гидросмеси μ считаются постоянными.

Выражение для расхода вязкопластического потока при постоянном значении вязкости, известное как формула Букингема, имеет вид

$$Q = \frac{\pi \Delta P R^4}{8 l \mu}\left[1 - \frac{4}{3}\frac{r_o}{R} + \frac{1}{3}\left(\frac{r_o}{R}\right)^4\right], \qquad (2)$$

где ΔP – перепад давления на длине l трубопровода; r_o – радиус ядра потока; R – радиус трубопровода.

Анализ течения реальных гидросмесей показывает, что их характер близок к модели (1), но, тем не менее, отличается от нее некоторыми особенностями, определяемыми тем, что величины τ и μ являются переменными, причем $\tau = \tau(p)$, $\mu = \mu(r)$. Отсюда коэффициент вязкости [3]

$$\eta_{эф} = \eta_п k_{стр}, \qquad (3)$$

где $\eta_{эф}$ – вязкость эффективная (вязкость от суммарного эффекта); $\eta_п$ – пластическая вязкость, $k_{стр}$ – коэффициент структуры.

Следовательно, значение коэффициента вязкости зависит от величины структурной вязкости потока, которая будет связана с эффективной вязкостью соотношением

$$\frac{\eta_{эф}}{\eta_{стр}} = k_п, \qquad (4)$$

где $k_п$ – коэффициент относительной пластической вязкости.

Примерный вид графика изменения вязкости гидросмеси от концентрации приведен на рис.2.

Соотношение пластической и структурной вязкости определяется из формул (3) и (4):

$$\eta_п = \eta_{стр}\frac{k_п}{k_{стр}}. \qquad (5)$$

С учетом особенностей проявления вязкопластичных свойств концентрированными мелкофракционными гидросмесями реологическая модель таких смесей жидкостей может быть записана в следующем виде:

$$\tau = \tau_o + \eta_п k_{стр}\frac{dv}{dy} \qquad (6)$$

или через структурную вязкость

$$\tau = \tau_o + \eta_п k_{стр}\frac{dv}{dy}. \qquad (7)$$

Модель (6), (7) отличается от модели (1) тем, что она учитывает как структурные, так и пластические свойства высококонцентрированных мелкофракционных гидросмесей. Можно вывести уравнение движения для потока высококонцентрированных мелкофракционных и для некоторых значений пастообразных гидросмесей.

Зависимость касательных напряжений от величины нормальных составляющих напряжений деформации обусловлена тем, что в матрице девиатора тензора напряжений диагональные составляющие не равны

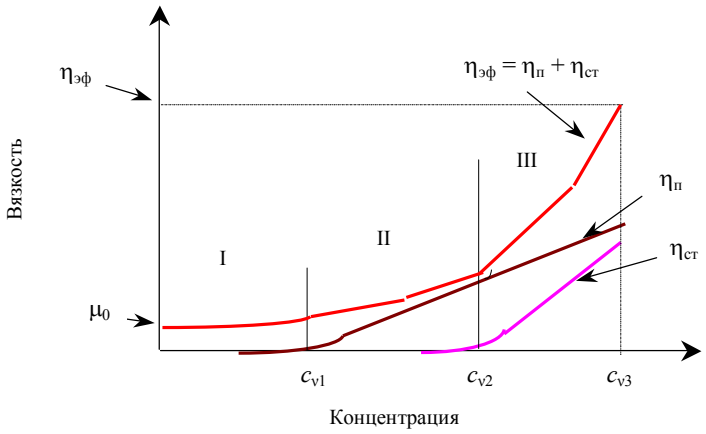


Рис.2. Зависимость составляющих эффективной вязкости от концентрации

I – ньютоновская зона; II – пластическая зона; III – структурная зона

между собой и не равны нулю. Общая математическая модель течения подобной среды в настоящее время не существует.

В отличие от обобщенного закона вязкого трения для ньютоновских жидкостей, согласно исходному в предлагаемой модели реологическому уравнению, касательные напряжения приобретают аддитивный член τ_0 и тогда тензор напряжений примет вид

$$p_{ij} = \begin{cases} \tau_{\text{î}} + \mu\left(\dfrac{\partial v_i}{\partial x_j} + \dfrac{\partial v_j}{\partial x_i}\right) \text{ при } i \neq j, \\ -p + 2\mu\dfrac{\partial v_i}{\partial x_j} \text{ при } i = j, \end{cases}$$

где $\mu = \mu(x, y, z)$ – переменная вязкость; p_{ij} – компоненты тензора деформаций; v_{ij} – компоненты вектора скорости по осям x_{ij}.

Для переменной вязкости в случае течения вязкопластической пастообразной жидкости запишем общее уравнение динамики сплошной среды в напряжениях

$$\frac{\partial p_{ij}}{\partial x_i} + \rho X = \rho\frac{dv_i}{dt},$$

которое в проекциях на ось x имеет вид

$$\rho\frac{dv_x}{dt} = \rho X + \frac{\partial p_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial p_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial p_{zx}}{\partial z},$$

где ρ – плотность среды; X (ниже Y, Z) – проекции ускорений массовых сил.

После некоторых математических преобразований и использования уравнения сплошности (неразрывности)

$$\text{div} = \frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0 \qquad (9)$$

получим уравнения в проекциях на оси x, y, z:

$$\begin{aligned} \rho\frac{dv_x}{dt} &= \rho X - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu\nabla v_x + A_x; \\ \rho\frac{dv_y}{dt} &= \rho Y - \frac{\partial p}{\partial y} + \mu\nabla v_y + A_y; \\ \rho\frac{dv_z}{dt} &= \rho Z - \frac{\partial p}{\partial z} + \mu\nabla v_z + A_z; \end{aligned} \qquad (10)$$

$$A_x = \frac{\partial\tau(p)}{\partial y} + \frac{\partial\tau(p)}{\partial z} + \frac{\partial\mu}{\partial y}\left(\frac{\partial v_x}{\partial y} + \frac{\partial v_y}{\partial x}\right) + \frac{\partial\mu}{\partial z}\left(\frac{\partial v_x}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial x}\right).$$

Аналогично выражаются уравнения для A_y и A_z.

Если $A_x = A_y = A_z = 0$, то уравнения (10) переходят в уравнения Навье – Стокса.

Система уравнений (9)-(10) определяет математическую модель вязкопластического течения с переменными реологическими параметрами. Полученные уравнения пространственной задачи значи-

тельно сложнее, чем система уравнений Навье – Стокса, получивших весьма слабое применение. Необходимо также дополнительно заметить, что система уравнений предлагаемой математической модели принципиально отличается от известной системы уравнений взвесенесущего (турбулентного) потока, которую в настоящее время в общем виде еще не удается замкнуть [1, 2].

В итоге приходим к выражению для расхода потока вязкопластической (пастообразной) гидросмеси с поправкой на напряжения сдвига и вязкость

$$Q = \frac{\pi}{4}\left[\frac{\tau_0 r_0^3}{\eta_{\text{ñò}}} + \frac{\tau r^3}{\eta_{\text{ï}}} + \frac{\tau_0 r_0^3}{\eta_{\text{ï}}}\right].$$

Таким образом, можно сделать следующие выводы.

1.Обоснована эффективная вязкость вязкопластических (пастообразных) гидросмесей, которая учитывает пластические свойства жидкостей и свойства, определяемые трением отдельных частиц при течении потока. На основе зависимости Букингема была предложена математическая модель и проведен ее анализ. Получено итоговое выражение для расхода потока вязкопластической (пастообразной) гидросмеси с поправкой на напряжения сдвига и вязкость.

2. Существующая методика справедлива для начальных значений концентрации твердого пастообразного потока. Дальнейшее совершенствование данной методики позволит охватить весь диапазон концентраций пастообразного потока.

3. Ни одно горное предприятие нашей страны не транспортирует гидросмеси пастообразной консистенции. Поэтому внедрение такого метода транспорта на сегодняшний день актуально и требует комплексного изучения и проведения большого количества экспериментов.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Гориславец В.М.* Исследование реологических свойств концентрированных суспензий при наличии пристенного слоя / М.М.Гориславец, А.К.Дунец // Инженерно-физический журнал. Т.29. 1975. № 2.

2. *Криль СИ.* Метод расчета критических скоростей гидротранспортирования по горизонтальным трубопроводам // Гидравлика и гидротехника. 1985. Вып.41.

3. *Alexandrov V.I.* Some Experimental Studies of High Concentration Slurry Transport / Prace Naukowe Instytutu Geotechniki i Hydrotechniki Politechniki Wroclawskiej, № 71, Wroclaw, 1996.

Научный руководитель д-р т. н. проф. *В.И.Александров*