

УДК 656.223

Н. Б. ЧЕРНЕЦКАЯ-БЕЛЕЦКАЯ, доктор технических наук, А. М. ШВОРНИКОВА, кандидат технических наук, Восточноукраинский национальный университет им. В. Даля, г. Луганск (Украина)

РАСЧЕТ ЛАМИНАРНОГО РЕЖИМА ТЕЧЕНИЯ ВОДОУГОЛЬНОГО ТОПЛИВА

Математическое моделирование течения водоугольного топлива в системах промышленного гидротранспорта позволяет прогнозировать еще на стадии приготовления ВУТ основные гидравлические параметры транспортирования, в зависимости от концентрации, granulometрии и свойств исходного сырья, путем описания реальных процессов с помощью математического аппарата.

Для систем промышленного трубопроводного транспорта требуется все более точный расчет параметров течения реологически сложных систем, что дает возможность поиска рациональных конструкторских и технологических решений, направленных на повышение эффективности, уменьшение энергозатрат и повышение экологической безопасности гидротранспортирования.

Содержание исследований. Течение водоугольного топлива в гидротранспортных системах, так же как и любой другой жидкости, описывается уравнениями Навье-Стокса (1), (2) и уравнением неразрывности (3), которые применительно к условиям движения в трубах переходят в уравнения типа уравнений пограничного слоя.

При достижении автомодельного режима течения водоугольного топлива в круглых трубах и с учетом предложенной реологической модели, уравнения Навье-Стокса в цилиндрической системе координат запишутся в виде [1]

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + u_r \frac{\partial u}{\partial r} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \left[\frac{1}{r} \frac{\partial(\tau_{xr}r)}{\partial r} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} \right]; \quad (1)$$

$$u \frac{\partial v}{\partial x} + u_r \frac{\partial v}{\partial r} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} + \frac{1}{\rho} \left[\frac{1}{r} \frac{\partial(\tau_{rr}r)}{\partial r} + \frac{\partial \tau_{rx}}{\partial x} \right]; \quad (2)$$

$$\frac{\partial(ur)}{\partial x} + \frac{\partial(u_r r)}{\partial r} = 0, \quad (3)$$

где x – продольная ось трубы; r – радиус, отсчитываемый от оси трубы; u и u_r – составляющие скорости вдоль оси и по радиусу трубы.

Составляющие дивергента тензора напряжений имеют вид

$$\tau_{rr} = 2Z \frac{\partial u}{\partial r}; \quad \tau_{xx} = 2Z \frac{\partial u}{\partial x}; \quad \tau_{xr} = Z \left(\frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial u_r}{\partial x} \right), \quad (4)$$

где

$$Z = \frac{(\tau_0^{1/n} + (\mu \dot{\epsilon})^{1/m})^n}{A} = \frac{W}{\dot{\epsilon}}. \quad (5)$$

Величина $\dot{\epsilon}$ определяется суммой скоростей деформации в различных направлениях

$$\dot{\epsilon} = \left[2 \left(\frac{\partial u_r}{\partial r} \right)^2 + 2 \left(\frac{u_r}{r} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial u_r}{\partial x} \right)^2 \right]^{1/2}. \quad (6)$$

Применительно к случаю течения неньютоновской жидкости в круглых трубах, оценив соответствующие члены и отбросив члены второго порядка малости, получим

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + u_r \frac{\partial u}{\partial r} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{\rho r} \frac{\partial(\tau_{xr}r)}{\partial r}; \quad (7)$$

$$u \frac{\partial v}{\partial x} + u_r \frac{\partial v}{\partial r} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} + \frac{1}{\rho} \left[\frac{1}{r} \frac{\partial(\tau_{rr}r)}{\partial r} + \frac{\partial \tau_{rx}}{\partial x} \right]; \quad (8)$$

$$\tau_{rr} = 2Z \frac{\partial u_r}{\partial r}; \quad \tau_{xr} = 2Z \frac{\partial u}{\partial r}; \quad (9)$$

$$\dot{\epsilon} = \left| \frac{\partial u}{\partial r} \right|. \quad (10)$$

В случае установившегося по координате x течения нелинейно-вязкопластичной жидкости при ламинарном режиме течения уравнения (7)–(10) принимают вид

$$0 = -\frac{dp}{dx} + \frac{1}{r} \frac{d(\tau_{xr}r)}{dr}; \quad (11)$$

$$0 = -\frac{dp}{dr}; \quad (12)$$

$$\tau_{xr} = \left[\tau_0^{1/n} + \left| \mu \frac{du}{dr} \right|^{1/m} \right]^n. \quad (13)$$

Из выражения (12) следует, что условие постоянства давления в поперечном направлении выполняется.

В случае степенного реологического закона Освальда де Вилля из решения уравнения (13) выражение для распределения скоростей по потоку запишется в виде

$$u = u_{cp} \left(\frac{3n+1}{n+1} \right) \left(1 - \bar{r}^{\frac{n+1}{n}} \right); \quad (14)$$

$$u_{cp} = \frac{nR}{3n+1} \left[\left(-\frac{dp}{dx} \right) \frac{R}{2k} \right]^{1/n}, \quad (15)$$

где u_{cp} – средняя скорость жидкости в трубе; $\bar{r} = r/R$ – относительный радиус трубы.

Связь между перепадом давления и объемным расходом следующая:

$$\Delta p = \left(-\frac{dp}{dx}\right)L = \left[\frac{Q(3n+1)}{\pi n}\right]^n \frac{2kL}{R^{3n+1}}, \quad (16)$$

где L – длина трубопровода.

Эффективный коэффициент гидравлических сопротивлений определяется из выражения

$$\left(-\frac{dp}{dx}\right) = \lambda_{эф} \frac{\rho u_{cp}^2}{4R}, \quad (17)$$

$$\lambda_{эф} = \frac{64}{8 \left(\frac{n}{3n+1}\right)^n \frac{\rho u_{cp}^{2-n} R^n}{k}}. \quad (18)$$

Рассмотрим случай, когда водоугольное топливо подчиняется реологическому закону для вязкопластичной жидкости. Из уравнения (11) распределение скоростей в зоне сдвигового режима

$$u = \frac{u_{cp}}{2} \text{И} \left(\frac{1-\bar{r}^2}{2r_p} - 1 + \bar{r} \right), \quad (19)$$

где $r_p \leq \bar{r} \leq 1$.

Скорость стержневой зоны течения

$$u_p = \frac{u_{cp}}{2} \text{И} \frac{(1-r_p)^2}{2r_p}, \quad (0 \leq \bar{r} \leq r_p). \quad (20)$$

В представленных формулах $\text{И} = \frac{2R\tau_0}{\mu_p u_{cp}}$ – это

число Ильюшина [2], а $r_p = \frac{r_c}{R} = \frac{\tau_0}{\tau_w} = \frac{2\tau_0}{R \left(-\frac{dp}{dx}\right)}$ – без-

размерный радиус стержневой зоны течения.

Тогда средняя скорость течения ВУТ по трубопроводу

$$u_{cp} = \frac{R^2}{8\mu_p} \left(-\frac{dp}{dx}\right) \left(1 - \frac{4}{3}r_p + \frac{1}{3}r_p^4\right). \quad (21)$$

После интегрирования выражения (21) получим выражение для определения перепада давления

$$\Delta p = \Delta p_0 \frac{c}{3} \left(1 + \sqrt{1 - \frac{6}{c\sqrt{2b}}}\right) = \Delta p_0 f(\text{И}), \quad (22)$$

где

$$\Delta p_0 = \frac{2L\tau_0}{R}; \quad c = \sigma + \sqrt{b^3/2}; \quad \sigma = 1 + 6/\text{И};$$

$$b = \sqrt[3]{\sigma^2 + \sqrt{\sigma^4 - 1}} + \sqrt[3]{\sigma^2 + \sqrt{\sigma^2 + 1}}.$$

Получено 23.05.2011

N. B. Chernetskaya-Belestkaya, A. M. Shvornikova. Calculation of Laminar Conditions of Water-Carbon Fuel Flow.

Mathematical modeling of coal-water fuel flow in industrial hydraulic transport systems predicts at further stage of coal-water fuel preparation main hydraulic parameters of transportation, depending on the concentration, particle size and properties of the feedstock, by describing the actual processes by means of mathematical tools.

Эффективный коэффициент гидравлического сопротивления определяется по формуле

$$\lambda_{эф} = \frac{4}{f(\text{И})\text{Re}_{вп}/\text{И}}, \quad (23)$$

где $\text{Re}_{вп} = \frac{\rho u_{cp} R}{\mu_p}$ – число Рейнольдса вязкопла-

стичной жидкости; $f(\text{И})$ – правая часть выражения (22).

Для жидкости, описываемой уравнением Гершеля-Баркли, скорости определяются следующим образом:

в зоне сдвигового течения

$$u = \frac{nR^n}{n+1} \left[\frac{1}{2k} \left(-\frac{dp}{dx}\right) \right]^{\frac{1}{n}} \left[(1-r_p)^{\frac{n+1}{n}} - (\bar{r}-r_p)^{\frac{n+1}{n}} \right], \quad (r_p \leq \bar{r} \leq 1); \quad (24)$$

в стержневой зоне

$$u_p = \frac{n}{n+1} R^n \left[\frac{1}{2k} \left(-\frac{dp}{dx}\right) \right]^{\frac{1}{n}} (1-r_p)^{\frac{n+1}{n}}, \quad (0 \leq \bar{r} \leq r_p). \quad (25)$$

Выражение для средней скорости по сечению трубопровода примет вид [3, 4]

$$u_{cp} = \frac{n}{3n+1} R^n \left[\frac{1}{2k} \left(-\frac{dp}{dx}\right) \right]^{\frac{1}{n}} (1-r_p)^{\frac{n+1}{n}} \left[1 + \frac{2n}{2n+1} r_p + \frac{2n^2}{(n+1)(2n+1)} r_p^2 \right]. \quad (26)$$

Выводы. Приведенные выше соотношения позволяют определить расходно-напорные характеристики трубопроводов при ламинарном режиме течения водоугольного топлива. Этот случай наиболее характерен для транспортирования водоугольного топлива по трубопроводам малого диаметра, при низких скоростях и с концентрацией угля в рабочей суспензии более 60 %.

Список литературы

- 1 Транспортирование водоугольных суспензий: гидродинамика и температурный режим / А. С. Кондратьев [и др.]. – М. : Недра, 1988. – 213 с.
- 2 Электрокинетические свойства гидравлически транспортируемого угля / В. С. Белецкий [и др.] // ХТГ. – 1989. – № 5. – С. 121–124.
- 3 Рациональный выбор оборудования и проектирование промышленных гидротранспортных систем : [монография] / Л. И. Рисухин [и др.]. – Луганск : Изд-во ВНУ им. В. Даля, 2010. – 92 с.
- 4 Шворнікова, Г. М. Математична модель плинну водоугільного палива у промислових гідротранспортних системах / Г. М. Шворнікова // Вісник Східноукраїнського нац. ун-ту ім. В. Даля. – 2010. – № 1(143). – С. 254–259.