

## ПОТЕРИ НАПОРА НА ТРЕНИЕ ПРИ НАПОРНОМ ДВИЖЕНИИ СМЕСИ ВОДЫ И ВЗВЕШЕННЫХ НАНОСОВ

**И.Э. Махмудов, Д.Э. Махмудова, М.М. Утемурастов**  
(НИИИВП при ТИИМ)

*In this article, the dependence to determine the pressure loss in the flow with suspended pump. The resulting analytical expression allows to set overall performance pressure pipe for the resulting analytical expression allows to set overall performance pressure pipe for transporting a mixture of water and suspended pump.*

*Получена зависимость для определения величины потери напора при движении потока воды со взвешенными наносами. Полученное аналитическое выражение позволяет установить рабочую характеристику напорного трубопровода при транспортировке смеси воды и взвешенных наносов.*

В настоящее время в республике создалась особо сложная ситуация с машинным водоподъемом при наличии большого количества наносов в бассейнах р. Амударья и Зарафшан. При проектировании насосных станций в условиях подъема воды с большим содержанием наносов предусматривались специальные отстойники, однако большинство из них вследствие плохой эксплуатации и конструктивных недостатков либо вообще не работали, либо к настоящему времени не выполняют свое функциональное назначение.

Опыт эксплуатации ирригационных насосных станций, особенно в бассейне р. Амударья показывает, что из-за содержания в воде большого количества взвешенных наносов осложняется функционирование аванкамеры, водоприемника, а в местах, где имеется сужение или расширение труб, повороты, узлы соединения или распределения и другие элементы, возникают местные сопротивления. Их наличие в напорных трубопроводах насосных станций обуславливает накопление, а в дальнейшем - образование серьезных препятствий для движения воды. Наличие взвешенных наносов существенно влияет на режим работы насосных агрегатов, снижая КПД, увеличивая энергетические затраты на водоподъем и, самое существенное, способствуя возникновению опасности биокоррозионного разрушения напорных водоводов из-за осаждения во внутренней части труб твердых материалов органического происхождения.

Пользуясь основным уравнением установившегося равномерного напорного движения жидкости в кругло-цилиндрической трубе, рассмотрим задачу работы сил трения при движении потока воды с взвешенными наносами. При этом принимаем условие, когда продольное касательное напряжение трения со стороны потока смеси воды и взвешенных наносов к стенкам трубопровода постоянное  $\tau_0 = const$  вдоль смоченного периметра трубы.

Взвешенные частицы в равномерном двухфазном потоке в начальном процессе осаждения испытывают воздействие только силы тяжести и силы сопротивления воды, при этом закономерность изменения сопротивления соответствует квадратичной области сопротивления.

Рассмотрим равновесное движение равномерного напорного потока смеси воды и взвешенных наносов (которая рассматривается как дисперсная смесь ( $dr \ll R_0$ )). Движение происходит в круглой цилиндрической трубе в турбулентном режиме. Гидравлические параметры трубы:  $R_0$  - радиус трубы;  $\omega$  - площадь живого сечения;  $\chi$  - смоченный периметр. Для составления уравнения равномерного движения смеси в потоке напорного трубопровода выделяем два сечения с расстоянием  $L$  между сечениями (рис. 1). В напорном трубопроводе дисперсная смесь двух вязких жидкостей с вязкостью смеси -  $\mu_{см}$ ; плотностью смеси -  $\rho_{см}$ ; движется со средней скоростью -  $V_{см}$ , где  $\mu_{см} = f_1\mu_1 + f_2\mu_2$ ,  $\rho_{см} = \rho_1 + \rho_2$ ,  $\rho_n = \rho_{ni}f_n$ . здесь  $f_n$  и  $\rho_{ni}$  - концентрация и истинные плотности фаз [1].

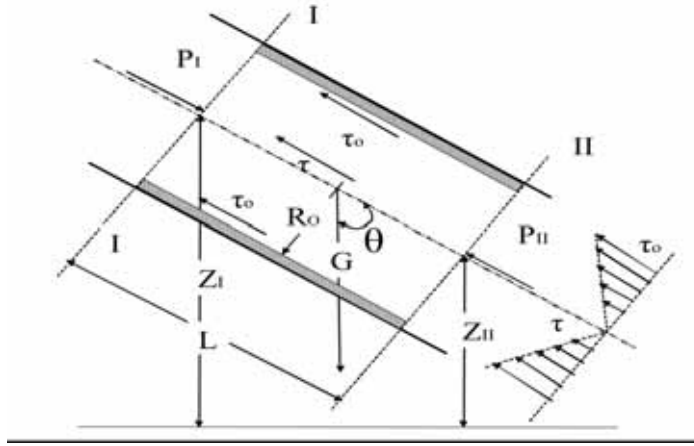


Рис. 1 - Схема для составления уравнения равномерного движения смеси воды и взвешенных наносов.

Касательное напряжение, обусловленное трением смеси состоит из отдельных касательных напряжений составляющих фаз смеси при стенке трубы  $\tau_o = \tau_{o1} + \tau_{o2}$  где  $\tau_{on}$  - касательное напряжение n-й смеси на стенке трубы, которое для ламинарного движения определяется равенством [2] здесь

$$\tau_{on} = f_n \mu_n \left( \frac{\partial V_n}{\partial n} \right)_{r=R_0} \quad (1)$$

где  $n$  - обозначает производную по направлению нормальной к оси симметрии трубы. С учетом (1) выражение касательного напряжения для смеси ламинарного движения можно написать как

$$\tau = f_1 \mu_1 \left( \frac{\partial V_1}{\partial n} \right)_{r=R_0} + f_2 \mu_2 \left( \frac{\partial V_2}{\partial n} \right)_{r=R_0} \quad (2)$$

Теперь рассмотрим равновесное движение смеси между сечениями I-I и II-II. Из рисунка видно, что процесс равновесного движения смеси происходит под действием следующих сил: силы тяжести смеси  $G = (\rho_1 f_1 + \rho_2 f_2) \pi R_o^2 L g$ ; силы гидродинамического давления  $P_I$ ,  $P_{II}$  - действующих на сечения I и II, и тогда равнодействующая этих сил -  $P$  определяется равенством:  $P = (P_I - P_{II}) \omega$ ; силы трения смеси со стенкой трубы:  $T = \tau_o 2\pi R_o L = \tau_o \chi L$ ; а сила трения, выделенная внутри потока объема, определяется равенством  $T = \tau 2\pi r l$ ; а также имеем  $Z_1 - Z_2 = L \cos \theta$ .

Для равномерного движения смеси средние скорости движения воды  $V_1$  и взвешенных частиц  $V_2$ , а также смеси  $V$  постоянны вдоль трубы, тогда можно считать, что:

$$\left[ \alpha_1 \frac{\rho_1 V_1^2}{2} + \alpha_2 \frac{\rho_2 V_2^2}{2} \right]_I = \left[ \alpha_1 \frac{\rho_1 V_1^2}{2} + \alpha_2 \frac{\rho_2 V_2^2}{2} \right]_{II}, \quad (3)$$

где,  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  ( $\alpha_k$  всегда  $>1$ ) - коэффициенты кинетической энергии или (коэффициенты Кориолиса), поправочные коэффициенты, учитывающие неравномерности распределения скоростей движения воды и взвеси, соответственно;  $\rho_1$  и  $\rho_2$  - приведенные плотности воды и наносов, соответственно;  $V_1$  и  $V_2$  - средние скорости движения воды и наносов соответственно.

С принятыми условиями составим уравнения равномерного движения смеси [3]:

$$(P_I - P_{II}) \omega - \tau_o \chi L + \rho_{cm} g \omega L \cos \theta = 0 \quad (4)$$

$$\text{откуда } P_I - P_{II} - \tau_o \frac{\chi L}{\omega} + \rho_{cm} g L \cos \theta = 0 \quad (5)$$

Учитывая равенство  $Z_I - Z_{II} = L \cos \theta$ , будем иметь:

$$P_I - P_{II} - \tau_o \frac{\chi L}{\omega} + \rho_{cm} g (Z_I - Z_{II}) = 0$$

Таким образом, для равномерного движения смеси имеем уравнение:

$$\left( Z_I + \frac{P_I}{\rho_{cm} g} \right) - \left( Z_{II} + \frac{P_{II}}{\rho_{cm} g} \right) = \frac{\tau_o \chi L}{\rho_{cm} g \omega} = h_{\partial l}, \quad (6)$$

где  $\frac{\tau_o \chi L}{\rho_{cm} g \omega} = h_{\partial l}$  тогда для касательного напряжения смеси имеем выражение:

$$\tau_o = \rho_{cm} g \frac{\omega}{\chi} \cdot \frac{h_{\partial l}}{L} \quad (7)$$

т.к.  $\frac{\omega}{\chi} = R$  - гидравлический радиус и  $\frac{h_{\partial l}}{L} = J$  - гидравлический уклон, тогда для круглой трубы с радиусом  $R_0$ ,  $\tau_o = \rho_{cm} g R J$ .

Гидравлический радиус круглой трубы -  $R = \frac{R_0}{2}$ , тогда касательное напряжение для смеси определяется

$$\tau_o = \rho_{cm} g \frac{R_0}{2} J, \tau = \rho_{cm} g \frac{r}{2} J \quad (8)$$

Используя понятие динамической скорости или осредненную местную скорость в рассматриваемой точке потока  $u_*$  как  $\frac{\tau_o}{\rho} = u_*^2$ , записываем выражение [4]:

$$u_* = \sqrt{\frac{\tau_o}{\rho}} = g R J \quad (9)$$

Или

$$u_* = \sqrt{\frac{\mu_1 f_1}{\rho_{li} f_1 + \rho_{2i} f_2} \left( \frac{\partial u_1}{\partial r} \right)_0 + \frac{\mu_2 f_2}{\rho_{li} f_1 + \rho_{2i} f_2} \left( \frac{\partial u_2}{\partial r} \right)_0} \quad (10)$$

Принимаем во внимание, что вдоль стенки трубы действует касательное напряжение,  $\tau_o = \rho g \frac{R_0}{2} J$ , а внутри потока между слоями

$$\tau = \rho g \frac{r}{2} J \quad (11)$$

Тогда касательное напряжение трения между слоями определяется равенством:

$$\tau = \tau_o \cdot \frac{r}{r_0} \quad (12)$$

Таким образом, касательное напряжение при равномерном движении будет линейной функцией от радиуса (12). Из равенства (6) имеем, что

$$h_{\partial l} = \frac{\tau_o L}{\rho_{cm} g R} \quad (13)$$

Из равенств (7), (9) и (13) для динамической скорости имеем равенство:

$$\frac{\tau_0}{\rho} = u_*^2 = \frac{L}{gR} h_{0l} = \frac{gR}{gRL} \cdot \frac{L}{4R} \cdot \frac{V^2}{2g} \lambda = \frac{V^2}{8} \lambda \text{ или } \lambda = \frac{u_*^2}{V^2} 8, \quad (14)$$

где,  $\lambda$ - коэффициент гидравлического трения (коэффициент Дарси) при равномерном движении потери напора по длине можно определить через касательное напряжение смеси. Если поток смеси в трубе ламинарный, то для распределения скорости смеси будем иметь известный результат [4]:

$$\tau_{cm} = \pm \mu_{cm} \frac{dV_{cm}}{dr} \quad (15)$$

Тогда из уравнения для выделенного объема между сечениями I и II получим выражения для средней скорости потока смеси:

$$V_{cm} = \frac{gJ}{4\nu_{cm}} (R_0^2 - r^2) \text{ где } \nu_{cm} = \frac{\mu_{cm}}{\rho_{cm}} \text{ здесь } \mu_{cm} = f_1\mu_1 + f_2\mu_2$$

Расход смеси определяется равенством:

$$Q = \frac{\pi R_0^2}{2} u_{\max} = \frac{\pi gJ}{128\nu_{cm}} d_o^4, \quad (16)$$

где  $u_{\max} = \frac{gJ}{4\nu_{cm}}$ , средняя скорость будет равной  $V_{cm} = \frac{gJ}{8\nu_{cm}} R_0^2$ ; коэффициент гидравлического трения или коэффициент Дарси -  $\lambda$  имеет вид:

$$\lambda = \frac{64}{Re_{cm}}, \quad (17)$$

где  $Re_{cm} = \frac{2R_0 V_{cm}}{\nu_{cm}}$ . Скорости смеси определяются из равенств

$$V_{cm} = \frac{V_1 + \frac{f_2}{f_1} \hat{\rho} V_2}{1 + \hat{\rho} \frac{f_2}{f_1}}, \hat{\rho} = \frac{\rho_{2i}}{\rho_{1i}} \quad (18)$$

Теперь переходим к рассмотрению турбулентного движения смеси, для которой касательное напряжение смеси имеет вид:

$$\tau_{cm} = \rho_{cm} L_T^2 \left( \frac{dV_{cm}}{dr} \right)^2, \quad (19)$$

где  $L_T = \phi \sqrt{\frac{r}{R_0}} (R_0 - r)$ . Теперь переходим к полностью турбулентному потоку смеси в трубе. Тогда, учитывая сильное воздействие инерционной силы, будем иметь следующее уравнение для определения средней скорости смеси в трубе:

$$\rho_{cm} \phi^2 (R_0 - r)^2 \frac{r}{R_0} \left( \frac{dV_{cm}}{dr} \right)^2 = \frac{\rho_{cm} g r J R_0}{2}, \quad (20)$$

где  $\phi$ - коэффициент Кармана,  $\phi = F\phi_0$ , где

$$F = \left( \frac{1 + \frac{f_2}{f_1} \hat{\rho} \frac{V_{20}^2}{V_{10}^2}}{1 + \frac{f_2}{f_1} \hat{\rho} \frac{Q_2^2}{Q_1^2}} \right)^{1/2}, \quad (21)$$

для воды  $\phi_0 = 0,4$  [1]. Переводя в безразмерный вид, будем иметь:

$$\frac{d\hat{V}_{cm}}{d\hat{r}} = \frac{1}{2\phi} \sqrt{\frac{J}{Fr}} \cdot \frac{1}{1-\hat{r}}$$

Интегрируя, получим:

$$\hat{V}_{cm} = \frac{1}{2\phi} \sqrt{\frac{J}{Fr}} \ln(1-\hat{r}) \quad (22)$$

Уравнение для определения границы между двумя потоками с различными характерами движения:

$$1-\hat{r}_* = \exp \left[ \frac{2\phi \operatorname{Re}_{cm}}{16} \sqrt{\frac{J}{Fr}} \right]_0 (1-\hat{r}_*^2), \quad (23)$$

$$\text{где } \operatorname{Re}_{cm} = \frac{2R_0 V_{cm}}{V_{cm}}$$

$$\text{Для горизонтальной трубы } h_z = \frac{d}{dl} \left( Z + \frac{P}{\rho g} \right) = \zeta \frac{V^2}{2g}$$

Потеря напора на трение в горизонтальной трубе при турбулентном движении смеси с мелкими наносами определяется как [5]:

$$h_{mp} = \xi_o \left( \frac{\rho_1 V_1 + \rho_2 V_2}{\rho_1 + \rho_2} \right)^2 \frac{1}{2g} = \xi_o \left[ V_1 + \frac{1-f_1}{f_1} \hat{\rho} V_2 \right]^2 - \left[ 2g \left( 1 + \frac{f_2}{f_1} \hat{\rho} \right) \right]^2 \quad (24)$$

Тогда местные потери напора определяют по выражению:

$$h_m = \zeta_m \cdot \frac{h_{mp}}{\zeta_{mp}} \quad (25)$$

**Выводы:** На основе уравнения установившегося равномерного напорного движения жидкости в кругло-цилиндрической трубе получена зависимость для определения величины потери напора при движении потока воды с взвешенными наносами.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Файзуллаев Д.Ф. Ламинарные движения многофазных сред в трубопроводах. - Т.: Фан, 1966.
2. Хамидов А.А., Худайкулов С.И. Теория струй многофазных вязких жидкостей. - Ташкент: Фан, 2003. - 140 с.
3. Чугаев Р.Р. Гидравлика. - Л.: Энергоиздат, 1982. - С. 223-224.
4. Махмудов И.Э. Исследование причин потерь энергии потока в напорных водоводах систем питьевого водоснабжения // Энергия ва ресурс тежаш муаммолари. - 2008.- №1-2. - С. 143-146.