

В. А. ЦЕРЕРИН

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЛИЯНИЯ НЕСТАЦИОНАРНОСТИ НА КОЭФФИЦИЕНТ ГАЗОДИНАМИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ

И. А. Чарный [1, 2] рассмотрел решение задачи о неустановившемся течении газа методом линеаризации системы дифференциальных уравнений для одномерного движения. Используя этот метод можно с известным приближением выполнить расчет аккумулирующей способности магистрального газопровода. Однако для определения влияния нестационарности на коэффициент сопротивления решение И. А. Чарного использовать нельзя, т. к. при этом мы связаны следующим соотношением [2]:

$$\frac{C_{f,loc}}{2D} \sim \left(\frac{C_{f,loc}}{2D} \right)_{cp} = b = \text{const.} \quad (1)$$

Это уравнение по замыслу автора уже имеет ограниченные пределы применимости и, кроме того, связано с введением среднего значения гидравлического сопротивления во времени. Однако, если в процессе эксперимента определена величина постоянной b , это уравнение (1) позволяет в пределах среднего найти значение

Следовательно, применение идеи линеаризации по И. А. Чарному все же связано с введением средних величин.

Поэтому возникает мысль, нельзя ли, исходя из общей формулировки задачи о неустановившемся движении, при помощи системы [3]:

$$\rho \omega d\omega = -dp + \frac{\partial p}{\partial z} dz - C_f \frac{\rho \omega^2}{2D} dz; \quad (a)$$

$$G = \rho \omega F = f(\tau); \quad (b) \quad (2)$$

$$\frac{p}{\rho} = \text{const}; \quad (c)$$

отыскать более простой путь оценки влияния нестационарности на коэффициент гидравлического сопротивления по замеренным параметрам в процессе эксплуатации в начале и в конце газопровода или по заданным расчетным параметрам. Как мы увидим дальше, при реализации этой идеи результаты расчетов по созданной методике учета влияния нестационарности на коэффициент гидравли-

ческого сопротивления получаются как в качественном, так и в количественном отношении приемлемыми для практики.

Уравнение (а) системы (2) можно записать в следующем виде:

$$\rho w dw = - dp - C_{fz} \frac{\rho w^2}{2D} dz, \quad (3)$$

где C_{fz} — коэффициент гидравлического сопротивления для нестационарного процесса;

$$C_{fz} = C_f - \frac{\frac{\partial p}{\partial z} \cdot \frac{1}{w}}{\frac{\rho w^2}{2D}},$$

или

$$\frac{C_{fz}}{C_f} = 1 - \frac{\frac{\partial p}{\partial z} \cdot \frac{1}{w}}{C_f \frac{\rho w^2}{2D}}. \quad (4)$$

Здесь C_f — коэффициент сопротивления для стационарного процесса.

Легко показать, что для баротропного процесса течения уравнение неразрывности, после элементарных преобразований, можно записать в виде:

$$-\frac{\partial p}{\partial z} = \alpha^2 \frac{\partial(\rho w)}{\partial z}. \quad (5)$$

Сопоставляя (2в) и (5), выражение (4) можно записать так:

$$\frac{C_{fz}}{C_f} = 1 + \frac{\alpha^2 \frac{\partial G}{\partial z}}{C_f \frac{G w^2}{2D}} = 1 + \frac{2D}{C_f} \frac{1}{M^2} \frac{1}{G} \frac{\partial G}{\partial z}. \quad (6)$$

Принимая во внимание, что

$$dz = w d\tau, \quad (7)$$

будем иметь

$$\frac{C_{fz}}{C_f} = 1 + \frac{2}{C_f} \frac{1}{M^2} \frac{1}{G} \frac{\partial G}{\partial(MH_0)}, \quad (8)$$

где $H_0 = \frac{a\theta}{D}$ — критерий гомохронности;

θ — рассматриваемый период осреднения (зарядки или разрядки).

Для приближенного расчета оценки влияния нестационарности на коэффициент сопротивления заменим текущее значение числа M относительно условия в начале и в конце газопровода средним значением M_{cp} . Это позволит точное значение выражения (8) заменить следующим приближенным:

$$\frac{C_{fz}}{C_f} \approx 1 + \frac{2}{C_f} \frac{1}{M_{cp}^2} \frac{\partial}{\partial(H_0)} \ln G_1. \quad (9)$$

Подставляя (9) в (3) и осредняя во времени, приходим к выражению

$$\overline{\rho w dw} = -dp - \overline{C}_{f, \tau} \frac{\overline{w^2}}{2D} dz, \quad (10)$$

где

$$\overline{C}_{f, \tau} = \frac{1}{\Theta} \int_0^{\Theta} C_{f, \tau} d\tau = \overline{C}_f + \frac{2}{M_{\text{ср}}^3 H_{0,0}} \int_0^1 d(\ln G_1) = \overline{C}_f - \frac{2}{M_{\text{ср}}^3 H_{0,0}} \ln G_1. \quad (11)$$

Здесь $\overline{C}_{f, \tau}$ — коэффициент сопротивления при нестационарном процессе для рассматриваемого периода осреднения;

\overline{C}_f — коэффициент сопротивления, определяемый по известным уравнениям стационарного движения, применительно к периоду осреднения;

$M_{\text{ср}} = \frac{\overline{w}}{a}$ — среднее значение числа Маха;

\overline{w} — средняя скорость газа за период осреднения;

$G_1 = \frac{G}{\overline{G}}$ — безразмерный расход газа, характеризующий данный, рассматриваемый период осреднения (отношение осредненного расхода за рассматриваемый период к среднесуточному расходу).

По выражению (11) может быть подсчитан коэффициент гидравлического сопротивления для периода разрядки или зарядки газопровода, для нестационарного течения.

Для подсчета коэффициента сопротивления при нестационарном течении для суток (т. е. среднесуточного коэффициента сопротивления при нестационарном течении) может быть использовано выражение:

$$\overline{C}_{f, \text{сут}} = \overline{C}_{f, \text{разр}} \frac{\tau_{\text{разр}}}{24} + \overline{C}_{f, \text{зар}} \frac{\tau_{\text{зар}}}{24}, \quad (12)$$

где $\overline{C}_{f, \text{сут}}$ — среднесуточный коэффициент сопротивления при нестационарном течении;

$\overline{C}_{f, \text{разр}}$ — коэффициент сопротивления для периода разрядки, определенный по формуле (11);

$\overline{C}_{f, \text{зар}}$ — коэффициент сопротивления для периода зарядки, определенный по формуле (11);

$\tau_{\text{разр}}$ — продолжительность периода разрядки;

$\tau_{\text{зар}}$ — продолжительность периода зарядки.

Ниже приводится сопоставление расчета влияния нестационарности на коэффициент сопротивления по уравнениям (11) и (12) с результатами опытного исследования, выполненного на газопроводе диаметром $D = 309$ мм, длиной $l = 5424$ м.

Для периода разрядки

$$\bar{p}_0 = 3,622 \text{ ата.}$$

$$\bar{p}_1 = 3,102 \text{ ата.}$$

$$\frac{\bar{p}_0}{\bar{p}_1} = \frac{3,622}{3,102} = 1,163.$$

$$\bar{\omega}_0 = 9,44 \frac{\text{м}}{\text{сек}}.$$

$$\bar{\omega}_1 = 1,163 \cdot 9,44 \cdot 1,163 = 11,0 \frac{\text{м}}{\text{сек}}.$$

$$\bar{\omega} = \frac{9,44 \cdot 11}{2} = 10,22 \frac{\text{м}}{\text{сек}}.$$

$$a = \sqrt{gRT} = \sqrt{9,81 \cdot 41,9 \cdot 284,5} = 342 \frac{\text{м}}{\text{сек}}.$$

$$M_{\text{гр}} = \frac{\bar{\omega}}{a} = \frac{10,22}{342} = 0,03.$$

$$H_{\text{из}} = \frac{a^2}{D} = \frac{342 \cdot 14,5 \cdot 3600}{0,339} = 5,78 \cdot 10^7.$$

$$G_{\text{(разр)}} = \frac{\bar{G}_{\text{(разр)}}}{G_{\text{сут}}} = \frac{9205}{7149} = 1,29.$$

$$\ln G_{\text{(разр)}} = \ln 1,29 = 2,303 \cdot 0,111 = 0,256.$$

$$\frac{\bar{C}_{f, \tau}}{\bar{C}_f} = 1 - \frac{2}{C_f M_{\text{гр}}^3} - \frac{1}{H_{\text{из}}} \ln G_1.$$

$$\frac{\bar{C}_{f, \tau}}{\bar{C}_f} = 1 - \frac{2 \cdot 0,256}{0,0184 \cdot 0,03^3} - \frac{1}{5,78 \cdot 10^7} = 1 - 0,0178 = 0,9822.$$

$$\bar{C}_{f, \tau \text{(разр)}} = 0,0184 \cdot 0,9822 = 0,01808 \approx 0,0181.$$

В то время, как опыт дает:

$$\bar{C}_{f, \tau \text{(опт)}} = 0,0173.$$

Расхождение $4,2 \approx 4\%$.

Для периода зарядки

$$\bar{p}_0 = 3,465 \text{ ата.}$$

$$\bar{p}_1 = 3,279 \text{ ата.}$$

$$\frac{\bar{p}_0}{\bar{p}_1} = \frac{3,465}{3,279} = 1,056.$$

$$\bar{\omega}_0 = 4,26 \frac{\text{м}}{\text{сек}}.$$

$$\bar{\omega}_1 = 4,26 \cdot 1,056 = 4,5 \frac{\text{м}}{\text{сек}}$$

$$\omega = \frac{4,5 + 4,26}{2} = 4,38 \frac{\text{м}}{\text{сек}}$$

$$a = \sqrt{9,81 \cdot 41,9 \cdot 284,5} = 342 \frac{\text{м}}{\text{сек}}$$

$$M_{\text{ср}} = \frac{\bar{\omega}}{a} = \frac{4,38}{342} = 0,01283.$$

$$H_{0\Theta} = \frac{342 \cdot 9,5 \cdot 3600}{0,309} = 3,78 \cdot 10^7.$$

$$G_{1(\text{зар})} = \frac{G_{\text{зар}}}{G_{\text{сут}}} = \frac{3944}{7149} = 0,552.$$

$$\ln G_{1(\text{зар})} = \ln 0,552 = -0,595.$$

$$\frac{\bar{C}_{f, \tau}}{\bar{C}_f} = 1 - \frac{2}{C_f M_{\text{ср}}^2} \cdot \frac{1}{H_{0\Theta}} \ln G_1.$$

$$\frac{\bar{C}_{f, \tau}}{C_f} = 1 + \frac{2 \cdot 0,595}{0,0227 \cdot 0,01283^2} \cdot \frac{1}{3,78 \cdot 10^7} = 1 + 0,659 = 1,659.$$

$$\bar{C}_{f, \tau(\text{зар})} = 0,0227 \cdot 1,659 = 0,03765.$$

В то время, как опыт дает:

$$\bar{C}_{f, (\text{оп})} = 0,03376.$$

Расхождение $10,5 \approx 10 \%$.

Для периода суток

Определим среднесуточный коэффициент сопротивления по предлагаемой методике.

$$\bar{C}_{f(\text{сут})} = \bar{C}_{f, \tau(\text{разр})} \frac{\tau_{(\text{разр})}}{24} + \bar{C}_{f, \tau(\text{зар})} \frac{\tau_{(\text{зар})}}{24} = 0,01808 \frac{14,5}{24} + 0,03765 \frac{9,5}{24} = 0,0109 + 0,0149 = 0,0258.$$

Из опыта:

$$\bar{C}_{f(\text{сут оп})} = 0,0214.$$

Расхождение $\approx 17 \%$.

Расхождение теории и опыта

Среднее по периодам разрядки и зарядки 7 %.

Среднее по периодам разрядки, зарядки и суток 10 %.

То есть, среднее по периодам зарядки, разрядки и суток расхождение составляет 10 % и находится, примерно, в пределах точности опытного исследования.

ВЫВОДЫ

Предложена приближенная методика расчетной оценки влияния нестационарности на коэффициент гидравлического сопротивления магистральных газопроводов на основе полученных уравнений (11) и (12). Сопоставление предложенной методики с опытными данными суточных испытаний опытного участка привело к удовлетворительным результатам. Интересно отметить, что в качественном отношении предложенная методика в полной мере соответствует ранее высказанным [3, 4] физическим соображениям о влиянии нестационарности на коэффициент сопротивления в период зарядки и разрядки газопровода. Методика отличается предельной простотой, поэтому следует ожидать, что она найдет широкое применение, как при проектировании, так и при эксплуатации магистральных газопроводов, когда нестационарность, в силу особенностей суточного графика, ярко выражена.

ЛИТЕРАТУРА

1. И. А. Чарный. Неустановившееся движение реальной жидкости в трубах. Госуд. издательство технико-теоретической литературы, 1951.
 2. И. А. Чарный. Основы газовой динамики. Госуд. научно-техн. издательство нефтяной и горнотопливной литературы. М., 1961.
 3. В. А. Церерин. Влияние нестационарности течения газа на коэффициент сопротивления магистральных газопроводов. Кандидатская диссертация. Куйбышевский политехнический институт, 1961.
 4. Л. И. Кудряшев, В. А. Церерин. Опытное определение влияния нестационарности течения газа на коэффициент гидравлического сопротивления «Нефть и газ», № 11, 1962.
 5. Л. И. Кудряшев, В. А. Церерин. К качественной оценке влияния нестационарности на газодинамическое сопротивление магистральных газопроводов. «Нефть и газ», № 6, 1963.
 6. Е. Е. Кочин, И. А. Кибель, Н. В. Розе. Гидромеханика, часть II, 1963.
-