

Газопровод

Расстояние между соседними парами газоперекачивающих станций магистрального газопровода $L = 200$ км. Стальные трубы газопровода, находящиеся на горизонтальной поверхности, имеют внутренний диаметр 1 м. Толщина стенок равна $H = 15$ мм. Прочность стали на разрыв $\sigma = 500$ Н/мм². Запас прочности равен 2. Каким может быть максимальное давление перекачиваемого природного газа в трубах? Какова максимальная «пропускная способность» одной трубы газопровода при температуре +20°C? Считайте, что максимальная допустимая скорость движения газа в трубах 25 м/с. Шероховатость h внутренних стенок трубопровода равна примерно 0,03 мм, и их поверхностная концентрация равна 10^6 , то есть на каждом квадратном метре внутренней поверхности трубы находятся порядка 10^6 шероховатостей (выступов) высотой $h \approx 0,03$ мм и такой же ширины.



Решение:

Для начала оценим максимальное допустимое давление газа в трубах. Участок трубы длиной S не должен сразу разорваться, если давление в нём будет больше максимально допустимого в пять раз. Из этого условия следует:

$$D \times S \times 2P_{\max} = 2SH \times \sigma \quad \rightarrow \quad P_{\max} = \sigma H / (D) \approx 75 \times 10^5 \text{ Па.}$$

Если перекачивается природный газ метан CH_4 , то его критическое давление $46,4 \times 10^5$ Па меньше расчетного максимального давления газа в трубе, а критическая температура 190 К меньше, чем $293\text{К} = 20^\circ\text{C}$. Плотность метана в критическом состоянии равна 162 кг/м³. Для оценки плотности метана при $t=20^\circ\text{C}$ и $P = 75 \times 10^5$ Па будем считать, что его поведение описывается уравнением идеального газа с молярной массой $\mu = 16$ г/моль. В этом предположении плотность метана равна:

$$P_{\max} \mu / (RT) \approx 49 \text{ кг/м}^3.$$

Из условия, что поток газа уже установился, следует, что произведение плотности газа на скорость его движения в трубе на выходе из одной станции равно такому же произведению на входе в другую станцию, то есть:

$$V_1 \times \rho_1 = V_2 \times \rho_2.$$

Очевидно, что максимальная пропускная способность газопровода W , имеющая размерность [кг/с], определяется двумя ограничениями: 1) скоростью течения газа в трубе $V_{\max} = 25$ м/с вблизи принимающей газ станции и 2) максимально допустимым давлением газа в трубе вблизи станции, подающей газ в трубу.

$$W = \rho \times V \times \pi D^2 / 4 \quad \rightarrow \quad V = 4W / (\rho \pi D^2) = 4WRT / (P \mu \pi D^2)$$

Падение давления вдоль трубы на единицу длины трубы, если в ней газ с плотностью ρ движется со скоростью V можно оценить, считая что режим течения газа вблизи шероховатостей турбулентный. При наличии на стенках трубы выступов с концентрацией на единице площади поверхности N на единицу поверхности трубы вдоль направления течения газ действует с силой, равной по порядку величины $N \times h^2 \times \rho V^2 / 2$.

Выберем участок газопровода длиной ΔL . Внутренняя поверхность имеет площадь $\Delta L \times \pi D$. Падение давления на этом участке будет выражаться формулой:

$$[\Delta L \times \pi D \times N \times h^2 \times \rho V^2 / 2] / (\pi D^2 / 4).$$

То есть на единицу длины газопровода приходится падение давления:

$$\Delta P / \Delta L = - 2Nh^2 \rho V^2 / D = - 32Nh^2 \times RT \times (W / \pi)^2 / (\mu PD^5)$$

Отсюда следует уравнение:

$$\Delta P \times P = -32\Delta L N h^2 \times R T \times (W/\pi)^2 / (\mu D^5)$$

Решением этого уравнения является соотношение:

$$P_{(S)}^2 + W^2 \times 64 R T S N h^2 / (\pi^2 \mu D^5) = \text{const} = (P_{\text{max}})^2$$

Здесь S – это расстояние от станции, подающей газ в трубу. Константа найдена из ограничения на давление вблизи подающей станции при $S = 0$.

Нам нужно найти максимальное значение W . Вблизи принимающей станции при $S = L = 200$ км давление газа минимально, а скорость течения газа максимальна и равна 25 м/с.

$$V_{\text{max}} = 25 \text{ м/с} = 4 W R T / (P_{\text{min}} \mu D^2)$$

Преобразуем полученные соотношения:

$$W^2 \times [4 R T / (\mu \pi D^2 V_{\text{max}})]^2 + W^2 \times 64 R T L N h^2 / (\pi^2 \mu D^5) = (P_{\text{max}})^2$$

Отсюда следует:

$$W_{\text{max}} = (\sigma H / D) / \{ [4 R T / (\mu \pi D^2 V_{\text{max}})]^2 + 64 L N R T h^2 / (\pi^2 \mu D^5) \}^{0.5} \approx 486 \text{ кг/с.}$$

Зная эту величину, можно найти плотность газа на входе в принимающую станцию:

$$\rho = 4 \times 486 / \pi / 25 \approx 24,7 \text{ кг/м}^3.$$

То есть давление газа на длине трубы 200 км уменьшилось почти в 2 раза.

Через такую трубу за год перекачивается в пересчете на газ при атмосферном давлении и температуре 0°C объём газа, равный $21,5 \times 10^9 \text{ м}^3$.

Вязкость метана равна примерно $\eta \approx 10^{-5}$ [в СИ]. Число Рейнольдса для потока газа со скоростью 25 м/с при плотности газа $\rho \approx 24,7 \text{ кг/м}^3$ возле шероховатостей с характерным размером $h = 0,3 \times 10^{-4}$ м равно примерно:

$$Re = V \rho h / \eta = 1,8 \times 10^3$$

Это означает, что принятое предположение о турбулентном характере движения газа возле таких шероховатостей/выступов справедливо.

Анализируя полученную формулу для максимальной пропускной способности трубы, следует отметить факторы, от которых зависит эта величина. В первую очередь обратим внимание на то, что первое слагаемое под корнем в знаменателе при выбранных параметрах трубы примерно в 2,5 раза меньше второго. Поэтому можно считать, что W_{max} зависит от толщины стенок, диаметра, длины трубы и параметров шероховатости так:

$$W_{\text{max}} \sim H \times D^{1.5} \times h^{-1} \times N^{-0.5} \times L^{-0.5}.$$

Стоимость трубы, по-видимому, пропорциональна её массе, которая зависит от размеров трубы так:

$$A_1 = \beta_1 \times D H \times L_{\text{полн.}}$$

Коэффициент β_1 – это некая постоянная величина.

Стоимость всех вместе перекачивающих станций магистрального газопровода пропорциональна полной длине газопровода, разделенной на расстояние между соседними станциями, то есть количеству станций, а также стоимости одной станции, которая в свою очередь, по-видимому, пропорциональна W_{max} .

$$A_2 = \beta_2 \times W_{\text{max}} \times L_{\text{полн.}} / L$$

Отношение W_{max} к суммарной стоимости газопровода ϕ можно назвать «эффективностью вложенных средств», эта величина равна:

$$\phi = (W_{\text{max}} / L_{\text{полн.}}) / (\beta_1 \times D H + \beta_2 \times W_{\text{max}} \times L) \sim 1 / (\beta_1 \times h \times N^{0.5} \times D^{-0.5} \times L^{0.5} + \beta_2 \times L^{-1})$$

Полученное выражение будет наибольшим при выполнении условия:

$$\beta_1 \times h \times N^{0.5} \times D^{-0.5} \times L^{0.5} + \beta_2 \times L^{-1} = \text{min.}$$

То есть нужно выбирать вполне определенное расстояние L между соседними газоперекачивающими станциями, а именно:

$$L = (2\beta_2/\beta_1)^{2/3} \times [D/(h^2 N)]^{1/3}$$

В результате получается, что выражение для «эффективности вложенных средств» ϕ пропорционально:

$$\phi \sim [D/(h^2 N)]^{1/3}$$

Из этого можно сделать вывод, что выгодно строить газопроводы из труб большого диаметра с гладкими внутренними стенками, а если газопровод уже построен, то нужно «чистить» его изнутри, добиваясь максимальной гладкости внутренних стенок.

С.Варламов

14 ноября 2010 г.