

## РАСЧЕТ ДЛИНЫ ИМПУЛЬСНОЙ ТРУБКИ ПРИ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ИЗМЕРЕНИЯХ ДАВЛЕНИЯ

Целью данной статьи является определение необходимой длины импульсной трубки, соединяющей датчик давления с точкой отбора давления при измерениях в средах с высокой температурой, например, перегретого водяного пара. Датчики давления КОРУНД-ДИ-001 имеют верхнюю границу диапазона рабочих температур +80°C. До этой температуры сохраняются метрологические характеристики датчика и погрешность измерения, включающая основную и дополнительную составляющую, не превышает значения, указанного в паспорте на изделие.

Однако на практике нередко возникают ситуации, когда необходимо измерять давление при температурах выше +100°C и даже до +300°C. При этих условиях датчик не только выйдет за пределы допустимой погрешности, но и может произойти разрушение чувствительного элемента датчика. Использование высокотемпературных датчиков не всегда возможно из-за их высокой стоимости и малой распространённости. Выходом из положения является использование так называемых импульсных трубок, представляющих собой металлическую трубку малого диаметра (4-8 мм) с внутренним отверстием диаметром 1-3 мм. На боковой поверхности трубки, одним концом подключенной к источнику давления, а другим – к датчику, происходит рассеивание тепла, так что температура среды, поступающей к датчику оказывается ниже верхней границы диапазона рабочих температур датчика.

Расчет необходимой длины трубки при некоторых допущениях можно свести к известной в теории теплотехники задаче расчета теплопроводности стержня с постоянным сечением [1]. Будем считать, что в силу малого внутреннего диаметра трубки она является однородным стержнем, а также, что задача является стационарной во времени, так как течение среды внутри трубки отсутствует.

На одном конце трубки поддерживается постоянная температура  $T_0$ . Теплота с боковой поверхности трубки отводится в окружающую среду с неизменной температурой  $T_1$ . Если длина трубки  $L$  значительно превышает её диаметр, то можно пренебречь теплоотдачей с торца трубки (где подключен датчик). Тогда задача становится одномерной, то есть температура меняется только по длине трубки и остается постоянной по сечению, В этом случае распределение температуры  $T(x)$  по длине трубки описывается выражением

$$\frac{T(x) - T_1}{T_0 - T_1} = \frac{e^{m(L-x)} + e^{-m(L-x)}}{e^{mL} + e^{-mL}} \quad 0 \leq x \leq L \quad (1)$$

здесь  $m = \sqrt{4 \alpha / \lambda \cdot D}$

$\lambda$  – коэффициент теплопроводности материала трубки, Вт/м·град;

$\alpha$  – коэффициент теплоотдачи с боковой поверхности трубки, Вт/м<sup>2</sup>·град;

$D$  – диаметр трубки, м.

Для трубки конечной длины ( $L = x$ ) выражение (1) упрощается:

$$\frac{T(L) - T_1}{T_0 - T_1} = 2 / (e^{mL} + 1/e^{mL}) \quad (2)$$

Из выражения (2) можно получить искомое значение длины  $L$ , решая (2) как квадратное уравнение относительно  $Y = e^{mL}$  :

$$Y = (1 \pm \sqrt{1 - Z^2})/Z, \quad (3)$$

$$\text{В уравнении (3) обозначено } Z = \frac{T(x) - T_1}{T_0 - T_1}$$

Уравнение (3) имеет два корня, однако один из них ( $Y_2 < 1$ ) следует отбросить, так как при логарифмировании он даст отрицательное значение длины  $L$ . Окончательно длина трубки будет определяться выражением:

$$L = \ln(Y) / m \quad (4)$$

Для расчета длины трубки остается определить множитель  $m = \sqrt{4 \alpha / \lambda \cdot D}$ . Коэффициент теплопроводности  $\lambda$  определяется по справочным данным для конкретного материала трубки. Коэффициент теплоотдачи  $\alpha$  определяется как сумма коэффициентов конвективной и лучистой теплоотдачи:

$$\alpha = \alpha_k + \alpha_l \quad (5)$$

Коэффициент конвективной теплоотдачи  $\alpha_k$  зависит от скорости потока воздуха, обдувающего трубку, диаметра трубки и теплофизических характеристик воздуха. В общем случае выражение для определения коэффициента теплоотдачи на наружной поверхности при поперечном обдувании потоком воздуха и ламинарном режиме движения воздуха [2]:

$$\alpha_k = 0.43 \cdot \beta \cdot \text{Re}^{0.5} \cdot \lambda_v / D \quad (6)$$

здесь  $\lambda_v$  – коэффициент теплопроводности воздуха;  
 $\beta$  – поправочный коэффициент, учитывающий направление воздушного потока к оси трубки;

$\text{Re}$  – число Рейнольдса:

$$\text{Re} = V \cdot \beta_2 \cdot D / \nu_v$$

$V$  – скорость потока воздуха;

$\beta_2$  – поправочный коэффициент;

$\nu_v$  – кинематическая вязкость воздуха.

Поскольку датчики чаще всего располагаются в закрытом помещении, движение воздуха в котором отсутствует или очень мало, можно положить  $V = 0$ , и соответственно,  $\text{Re} = 0$  и  $\alpha_k = 0$ .

Коэффициент лучистой теплоотдачи  $\alpha_l$  зависит от температуры воздуха и температуры поверхности трубки, а также от степени черноты её поверхности [2]:

$$\alpha_l = \varepsilon_{\text{п}} \cdot C_0 \cdot (((T_{\text{п}} + 273)/100)^4 - (T_1 + 273)/100^4) / (T_0 - T_1) \quad (7)$$

здесь  $C_0$  – коэффициент излучения абсолютно черного тела,  $C_0 = 5.67 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{град}^4$ ;

$\varepsilon_{\text{п}}$  – коэффициент, учитывающий степень черноты поверхности трубки: для окисленной стальной трубки  $\varepsilon_{\text{п}} \approx 0.9$ , для медных трубок или трубок из нержавеющей стали  $\varepsilon_{\text{п}} \approx 0.6$ .

В выражении (7) присутствует температура поверхности трубки  $T_n$ . Эта величина является переменной по длине трубки и изменяется от  $T_0$  до  $T(L)$ . Для упрощения расчетов мы будем использовать среднюю температуру:  $T_{cp} = (T_0 + T(L))/2$ .

Таким образом, получены все необходимые соотношения для определения длины импульсной трубки. Приведем пример расчета для температуры измеряемой среды  $T_0 = + 200^\circ\text{C}$  при температуре окружающего воздуха  $T_1 = + 20^\circ\text{C}$ . В качестве материала трубки используем медь с  $\lambda = 380 \text{ Вт/ м}\cdot\text{град}$ . Диаметр трубки  $D = 6 \text{ мм}$ . Желаемая температура на входе датчика –  $T(L) = + 40^\circ\text{C}$ .

Коэффициент теплоотдачи  $\alpha = \alpha_n$  (по формуле (7)):

$$\text{при } T_{cp} = (200+40)/2 = 120^\circ\text{C} \quad \alpha = 0.6 \cdot 5.67 \cdot ((3.93)^4 - (2.93)^4) / 180 = 3.11 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{град};$$

Параметр  $m$  (по формуле (1)):

$$m = \sqrt{4 \cdot 3.11 / 380 \cdot 0.006} = 2.33 \text{ м}^{-1}$$

Параметр  $Z$ :

$$Z = (40 - 20) / (200 - 20) = 0.11$$

Параметр  $Y$  ( по формуле (3)):

$$Y = (1 + \sqrt{1 - (0.11)^2}) / 0.11 = 18.12$$

Необходимая длина трубки  $L$  (по формуле (4)):

$$L = \ln(18.12) / 2.33 = 2.90 / 2.33 = 1.24 \text{ м}$$

В таблице 1 приведены результаты расчета длины трубок в метрах для температур  $T_0$  от  $+100^\circ\text{C}$  до  $+300^\circ\text{C}$ , изготовленных из меди с  $\lambda = 380 \text{ Вт/ м}\cdot\text{град}$  и нержавеющей стали с  $\lambda = 26 \text{ Вт/ м}\cdot\text{град}$ . Диаметр трубок – 6 мм, Температура на входе в датчик –  $T(L) = + 40^\circ\text{C}$ , температура окружающего воздуха  $T_1 = + 20^\circ\text{C}$ .

Табл.1

$T_0$	$+ 100^\circ$	$+200^\circ$	$+300^\circ$	$+400^\circ$	$+500^\circ$
Медь	0.88	1.24	1.43	1.56	1.66
Нерж. сталь	0.23	0.32	0.37	0.41	0.43

Из полученных результатов расчетов следует, что использование трубок из нержавеющей стали гораздо эффективнее, чем медных трубок. Коэффициент теплопроводности  $\lambda$  для разных марок сталей изменяется в широких пределах - от 55 для малоуглеродистых сталей до 16 для некоторых марок хромоникелевых сталей. Из результатов также следует, что увеличение длины трубок выше определенного предела (0.35м для стали, 1.4 для меди) нецелесообразно, так как с ростом температуры  $T_0$  возрастает также энергия излучения с боковой поверхности трубки.

Как было указано выше, расчеты проведены без учета обдувающего потока воздуха. Наличие вентилятора позволяет значительно увеличить значение коэффициента теплоотдачи. Например, для трубопроводов, находящихся на открытом воздухе, как указано в [2],  $\alpha_k$  может превосходить  $\alpha_n$  в несколько раз, соответственно, уменьшается и длина трубки.

Увеличение диаметра трубки, например, с 6 до 8 мм приведет к увеличению длины в  $\sqrt{8/6} = 1.15$  раза. Соответственно, уменьшение диаметра с 6 до 4 мм сократит длину на 22%.

Приведенные выражения и расчеты не могут претендовать на строгость изложения и высокую точность вычислений в силу введенных допущений, однако позволяют практически оценить возможные затраты при проведении измерений.

Литература

1. Тепло и массообмен. Теплотехнический эксперимент. Справочник . – М., Энергоиздат, 1982.
2. Расчет потерь неизолрованными трубопроводами при надземной прокладке.

