Записки Ленинградского ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции и ордена Трудового Красного Знамени горного института им.Г.В.Плеханова, 1983, т.97

УДК 622.417.2

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ НАПОРНЫХ ТРУБОК ПРИ ИЗМЕРЕНИИ РАСХОДА СЖАТОГО ВОЗДУХА НА ГОРНЫХ ПРЕДПРИЯТИЯХ

О.В.КАБАНОВ, В.В.КЛАССЕН

При исследовании режимов работы рудничных пневматических сетей целесообразно измерять параметры сжатого воздуха: расход, давление, температуру - одновременно в различных точках пневмосети, совмещая измерения с записью параметров в течение определенного промежутка времени. Поскольку измерения производят на действующих установках, монтаж аппаратуры должен производиться без долговременного отключения участков сети; первичные датчики должны быть доступны для периодического осмотра при проведении испытаний и обеспечивать хорошую точность и надежность в работе.

Анализ известных способов измерений расхода [I, 2] показал, что для данных условий наиболее применимы расходомеры переменного перепада давлений и преобразователи расхода с помощью напорных устройств. Однако по условиям изготовления и монтажа наиболее предпочтительны напорные трубки. Поэтому при исследовании рудничных пневматических сетей на рудниках Талнахского рудного узла в качестве первичного датчика использовалась дифференциальная напорная трубка, изготовленная в соответствии с рекомендациями, изложенными в работе [I].

Поскольку сведения, содержащие рекомендации по использованию дифференциальных напорных трубок (рис.I) для измерения расхода сжатого воздуха ограничены, были проведены промышленные испытания с целью определения параметров устройства и точности измерения при его применении на промышленных рудничных воздухопроводах. Испытания проводились на прямом участке трубопровода с внутренним диаметром D = 5I0 мм: результаты измерений, полученные с помощью напорной трубки, сравнивались с показаниями нормальной диафрагмы, рассчитанной по рекомендациям [3].

Напорная трубка и диафрагма были установлены на прямом участке трубопровода. Расстояние от ближайшего сопротивления (колена) до напорной трубки составило 22 м, от диафрагмы до ближайшего сопротивления (колена) 20,I м. Перепад давлений на трубке измерялся колокольным дифманометром ДКО со шкалой измерений 0-98I Па, на диафрагме - мембранным дифманометром ДМ со шкалой 0-I5696 Па. Выходные сигналы дифманометров записывались непрерывно на диаграммы вторичных приборов ДС (класс точности I) со временем пробега шкалы кареткой 6 с. Измерение давлений производилось мано-

метром МЭД (шкала 0-98I кПа) с вторичным прибором ДС. Температура измерялась медным термометром сопротивления ТСМ в комплекте с самопишущим мостом МС класса I. Расход воздуха, измеряемый с помощью дифференциальной напорной трубки, [I]

$$G_т = k_v k_т k_{сж} \frac{\pi D^2}{4} \sqrt{2\rho \Delta p_т}, \qquad (I)$$

где $G_т$ – массовый расход, кг/с; k_v – коэффициент скорости, $k_v = v_{ср}/v$; $v_{ср}$ – средняя скорость потока; v – скорость потока в месте установки трубки; $k_т$ – конструктивный коэффициент трубки; $k_{сж}$ – коэффициент сжимаемости воздуха; D – внутренний диаметр трубопровода, м; ρ – плотность воздуха, кг/м^3; $\Delta p_т$ – перепад давлений на трубке, Па.

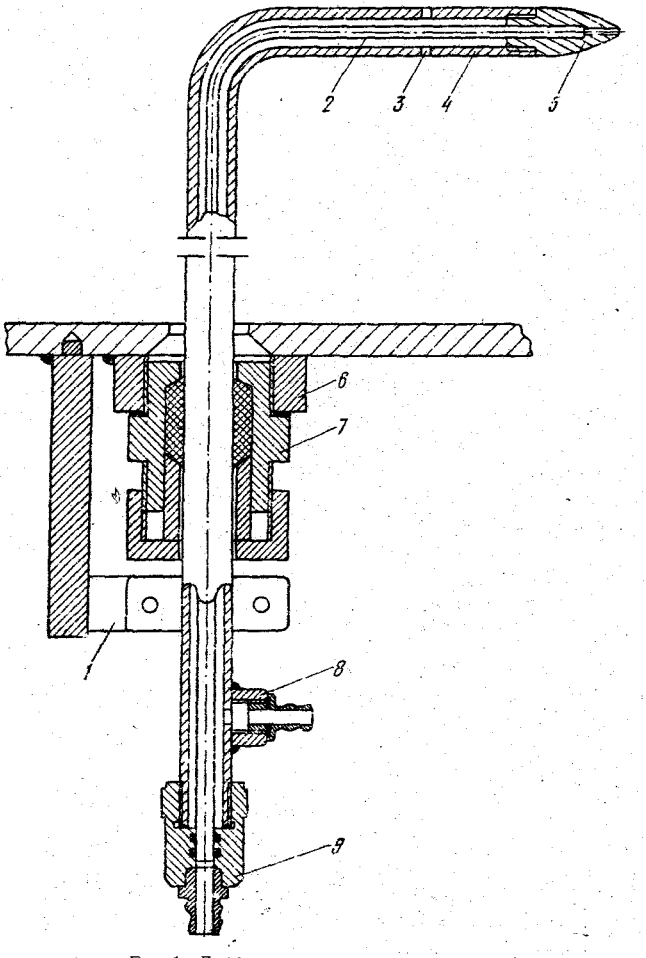


Рис.1. Дифференциальная напорная трубка
1 – фиксатор; 2 – внутренняя трубка (наружный диаметр 6 мм); 3 – отверстия для отбора статического давления; 4 – наружная трубка (наружный диаметр 14 мм); 5 – полуэллипсоидный наконечник (диаметр приемного отверстия 3 мм); 6 – бобышка для крепления устройства; 7 – сальник; 8 и 9 – штуцеры для отбора статического и полного давления соответственно

Расход воздуха через нормальную диафрагму [3]

$$G_д = \alpha m \varepsilon \frac{\pi D^2}{4} \sqrt{2\rho \Delta p_д}, \qquad (2)$$

где α – коэффициент расхода; m – квадрат отношения диаметров расточки диафрагмы к диаметру трубопровода; ε – поправочный множитель на изменение плотности среды; $\Delta p_д$ – перепад давлений на диафрагме, Па.

В установившемся режиме $G_д = G_т$, поэтому

$$k_v k_т = \frac{\varepsilon}{k_{сж}} \alpha m \sqrt{\frac{\Delta p_д}{\Delta p_т}}. \qquad (3)$$

При расчете нормальной диафрагмы за исходные величины приняты расход $G = 21{,}0875$ кг/с, давление $p = 0{,}7$ МПа, диаметр трубопровода $D = 0{,}61$ м, средняя скорость воздуха в трубопроводе $v = 8{,}59$ м/с, плотность воздуха в рабочих условиях $\rho = 8{,}4$ кг/м^3. В этом случае $\varepsilon = 0{,}99$, $k_{сж} = 1$, $m\alpha = 0{,}2035$,

$$k_v k_т = 0{,}2015 \sqrt{\Delta p_д / \Delta p_т} . \qquad (4)$$

Результаты обработки экспериментальных данных (рис.2) показали, что для рудничных воздухопроводов при скоростях 6–9 м/с и давлениях 0,65–0,85 МПа произведение $k_v k_т = 1$ при отношении $c/R = 0{,}26$.

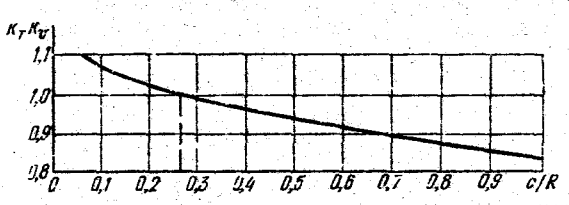


Рис.2. Экспериментальная зависимость $k_v k_т$ от места установки напорной трубки
c – расстояние от внутренней стенки трубы до оси напорной трубки; R – радиус трубы

Для определения влияния угла установки трубки по отношению к продольной оси трубопровода были измерены перепады давлений при установке трубки в центре трубопровода и изменении угла между осями трубки и трубопровода от 0 до 30°. При этом одновременно записывался перепад давлений на диафрагме. Результаты проделанных экспериментов показывают, что изменение угла установки трубки в диапазоне от –15° до +15° практически не влияет на ее показания. При увеличении угла от 15° до 60° перепад давлений на трубке уменьшается до нуля. В диапазоне 60–90° наблюдался отрицательный перепад до 25 Па, что объясняется действием кинетического напора на отверстия 3 (см. рис.1). При угле 180° перепад увеличивался до –10 Па, что указывает на действие эжекции. Считая, что среднеквадратические погрешности отдельных величин, входящих в формулу (4), невелики и независимы друг от друга, относительную среднеквадратическую погрешность величины $k_v k_т$ можно определить по формуле

$$\sigma_{k_v k_т} = \left(\sigma_\varepsilon^2 + \sigma_{k_{сж}}^2 + \sigma_{\alpha m}^2 + \frac{1}{4}\sigma_{\Delta p_д}^2 + \frac{1}{4}\sigma_{\Delta p_т}^2 \right)^{\frac{1}{2}}, \qquad (5)$$

где σ_ε, $\sigma_{k_{сж}}$, $\sigma_{\alpha m}$, $\sigma_{\Delta p_д}$, $\sigma_{\Delta p_т}$ – среднеквадратические погрешности величин, указанных в индексах.

Согласно исследованиям [2], для $\Delta p_0 / p \le 0{,}04$ $\sigma_\varepsilon = 0$ и $\sigma_{k_{сж}} = 0{,}35$ %. При расчете диафрагмы получили $\sigma_{\alpha m} = 0{,}27$ %.

Погрешность измерения перепада давлений [2]

$$\sigma_{\Delta p} = \frac{S_{\Delta p}}{2} \frac{\Delta p_{max}}{\Delta p}, \qquad (6)$$

где $S_{\Delta p}$ – класс точности измерительного комплекта, состоящего из первичного и вторичного приборов; Δp_{max} – предельное значение шкалы прибора; Δp – измеряемый перепад давлений.

В данном случае для трубки $S_{\Delta p} = 1{,}6$ %; $\Delta p_{max} = 981$ Па, $\Delta p_т = 294{,}3$ Па, $\sigma_{\Delta p_т} = 2{,}66$ %; для диафрагмы $S_{\Delta p} = 1{,}6$ %, $\Delta p_{max} = 15696$ Па; $\Delta p_д = 5886$ Па, $\sigma_{\Delta p_д} = 2$ %. Подставив полученные значения погрешностей в формулу (5), получим $\sigma_{k_v k_т} = 1{,}72$ %.

Погрешность измерения расхода с использованием напорной трубки

$$\sigma_{G_т} = \left(\sigma^2_{k_v k_т} + (2\sigma_д)^2 + \frac{1}{4}\sigma^2_{k_{сж}} + \frac{1}{4}\sigma_\rho + \frac{1}{4}\sigma_{p_{ст}} + \frac{1}{4}\sigma_\Delta + \frac{1}{4}\sigma_\theta\right)^{\frac{1}{2}}, \qquad (7)$$

где $\sigma_д$, σ_ρ, $\sigma_{p_{ст}}$ и σ_θ – среднеквадратические погрешности измерений соответственно диаметра трубопровода, плотности, давления и температуры.

При перепаде давлений на напорной трубке $\Delta p_т = 2943$ Па, $\Delta p_{max} = 981$ Па, давлении $p_{ст} = 0{,}6867$ МПа и $p_{max} = 0{,}981$ МПа погрешность $\sigma_{G_т} = 2{,}46$ %. Температура воздуха при всех измерениях практически оставалась постоянной, а давление и перепад давлений на трубке изменялись в широких пределах. Принимая значение $\sigma_{G_т} = 2{,}46$ % за основную погрешность, определим дополнительную за счет изменения параметров воздуха

$$\sigma^2_{1G_т} - \sigma^2_{G_т} = \frac{1}{4}\left(\sigma^2_{1p_{ст}} - \sigma^2_{p_{ст}}\right) + \frac{1}{4}\left(\sigma^2_{1\Delta p_т} - \sigma^2_{\Delta p_т}\right)$$

или

$$\sigma^2_{1G_т} - \sigma^2_{G_т} = \frac{S^2_p}{16}\left[\left(\frac{p_{1max}}{p_{1ст}}\right)^2 - \left(\frac{p_{max}}{p_{ст}}\right)^2\right] + \frac{S^2_{\Delta p_т}}{16}\left[\left(\frac{\Delta p_{1max}}{\Delta p_{1т}}\right)^2 - \left(\frac{\Delta p_{max}}{\Delta p}\right)^2\right].$$

Результаты расчетов дополнительной погрешности при $p_{1max} = 0{,}981$ следующие:

$\Delta p_{1т}$, Па	Δp_{1max}	$p_{1\,ст}$, МПа	$\sigma_{1G_т}$, %
29,43	618,03	0,726	8,65
294,3	618,03	0,687	2,23
1765,8	3924	0,726	2,25

Выводы

1. Дифференциальная напорная трубка в комплекте с дифманометром и вторичным прибором класса точности 1 обеспечивает точность измерения расхода сжатого воздуха до 2,5 % и может быть применена при исследовании статики и динамики воздухопроводных сетей.

2. Преимущество дифференциальной напорной трубки заключается в простоте изготовления и монтажа.

3. При малых перепадах давлений точность показаний определяется в основном точностью вторичных приборов и пределами их измерительных диапазонов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гафанович М.Д. Измерение расхода газа в промышленности. М., Энергия, 1975.

2. Кремлевский П.П. Расходомеры и счетчики количества. Л., Машиностроение, 1975.

3. Правила 28-64 измерения расходов жидкостей, газов и паров стандартными диафрагмами и соплами. М., Изд-во стандартов, 1968.