

Введение В практике измерения расходов жидкостей и газов с помощью сужающих устройств (СУ) возможны методы измерения, не предусмотренные в стандарте, например, использование торцевых диафрагм и сопел, отличающихся от стандартных СУ отсутствием входного, выходного или входного и выходного трубопроводов. Торцевые СУ могут применяться в условиях ограниченной длины измерительных трубопроводов (ИТ). Их применение имеет определенные преимущества (см. [1]), такие, как отсутствие входного участка, который по ГОСТ 8.586 [2, 3] должен иметь большую длину (порядка 40 калибров) и малую шероховатость. Отсутствие входного участка снимает необходимость в поправке коэффициента истечения на шероховатость и снижает требования к концентричности установки СУ. Исходные данные Для практического применения торцевых СУ необходимо знать их метрологические характеристики в широком диапазоне изменения числа Рейнольдса и относительного диаметра, однако информации о влиянии конструктивных и режимных параметров на метрологические характеристики торцевых СУ в настоящее время недостаточно, особенно мало было уделено внимания изучению торцевых сопел. В двух публикациях за последние 10 лет приведены близкие результаты по коэффициенту истечения торцевых сопел. В [1] отмечено, что коэффициент истечения торцевого сопла при $Re > 5,5 \cdot 10^4$ изменяется в пределах $0,99 \leq C \leq 0,992$, а в [4] предлагается принимать $C = 0,99$ при $Re > 10^5$ с неопределенностью 1%. Наибольшее применение из всех торцевых СУ получили диафрагмы без входного участка, однако сопло, по сравнению с диафрагмой, обладает более стабильными характеристиками, имеет меньшие потери давления и в меньшей степени реагирует на турбулентные пульсации потока, но неопределенность коэффициента истечения сопла больше, чем диафрагмы. Цель работы Провести анализ применимости существующих зависимостей для расчета коэффициента истечения стандартных сужающих устройств при расчете коэффициента истечения торцевых сужающих устройств для различных чисел Рейнольдса. Экспериментальная часть Для торцевых диафрагм в работе [4] для определения коэффициента истечения получено эмпирическое уравнение, которое является предельным случаем уравнения для стандартной диафрагмы при относительном диаметре $\beta \rightarrow 0$. В [5], на основе экспериментальных данных, показано, что $C = 0,595 - 0,6$. В данной работе представлены результаты экспериментальных исследований коэффициента истечения торцевых сопел и диафрагм без входного участка, полученные в диапазоне $Re = 2,5 \cdot 10^5 - 4 \cdot 10^5$. Эксперименты проводились с торцевыми соплами ИСА 1932 с относительными диаметрами $\beta = d/D = 0,6$ и $0,75$, где d - диаметр СУ, $D = 200$ мм - диаметр выходного трубопровода, и торцевыми диафрагмами с относительными диаметрами $\beta = 0,4, 0,6$ и $0,75$. Экспериментальное исследование проводилось государственной эталонной установке Эу-2 Государственного первичного эталона массового и объемного расходов газа ГЭТ-118, с расширенной стандартной

неопределенностью определения массового и объемного расходов 0,093% [5].

Схема экспериментальной установки приведена на рис.1. Исследуемые торцевые сопла и диафрагмы с угловым отбором давления через кольцевую камеру (позиция 1, рис.2) монтировались на трубопроводе 2, диаметром 200 мм и длиной $l=2$ м. Трубопровод подключался к ресиверу 3 большого объема, на выходе которого был установлен набор критических сопел 4, определявших величину эталонного расхода [6]. Воздушный поток в проточной части стенда создавался вакуумным насосом 5, обеспечивавшим требуемое для сверхкритического истечения разрежение за критическими соплами. Подвод воздуха к торцевому соплу соответствовал втеканию, из большого объема, что обеспечивалось отсутствием препятствий, нарушающих движение воздуха на расстояниях не менее $20d$ перед СУ по направлению оси и не менее $10d$ перпендикулярно оси [4].

Рис. 1 - Схема экспериментального стенда для измерения коэффициента истечения торцевых сопел: 1 - сопло с угловым отбором давления; 2 - трубопровод $\varnothing 200$ мм; 3 - ресивер; 4 - набор критических сопел; 5 - вакуумный насос; 6 - преобразователь разности давлений «Yokogawa» EJA 110A (предел допускаемой основной приведенной погрешности измерений перепада давлений не превышает $\pm 0,15$ %); 7 - измеритель влажности и температуры ИВТМ-7М (диапазон измерения температуры от -20°C до 60°C , абсолютная погрешность $0,1^{\circ}\text{C}$, приведенная погрешность 0,5 %; диапазон измерения относительной влажности от 2 до 98 %, абсолютная погрешность 1 %, приведенная погрешность 2 %) При проведении экспериментов набором калиброванных критических сопел задавался эталонный расход газа, измерялись перепад давления на СУ, давление, температура и влажность в окружающей среде. Коэффициент истечения определялся по формуле (1): , (1) где q_m - эталонный расход, Δp - перепад давления на СУ, β - плотность потока, e - коэффициент расширения. В уравнении (1) отсутствует зависимость коэффициента истечения от b , так как вход потока в СУ происходил из большого объема, следовательно, относительный диаметр СУ по входу $b_{вх} \approx 0$.

Неопределенность коэффициента истечения в соответствии с [2] вычислялась, как неопределенность результата измерений величины, определенной косвенным методом и связанной с измеряемыми величинами функциональной зависимостью (1) , (2) где j_i , u_i - коэффициент влияния и неопределенность параметра x_i , входящего в уравнение (1). Коэффициенты влияния согласно [2] рассчитывались по формуле (3): . (3) Были определены коэффициенты влияния перепада давления ($j_C, \Delta P = -1/2$), плотности, с учетом влияния влажности воздуха, диаметра диафрагмы ($j_C, d = 2$), коэффициента расширения среды ($j_C, e = 1$). Расчеты неопределенности измерений показали, что в основном диапазоне измерений (от 180 до 3500 Па) инструментальная погрешность не превышает 0,61%. В соответствии с ГОСТ 8.586.5 неопределенность измерений состоит из случайной и инструментальной составляющих и определяется по формуле (4): ,

(4) где, $u_{фсл}$, $u_{фсл}$ - случайная и инструментальная составляющие неопределенности измерений. Проведенные оценки и обработка результатов измерений показали, что случайная составляющая для различных диапазонов перепада давления изменяется от 0,02% (при больших перепадах) до 0,1% (при перепадах около 120 Па). Эти значения составляют менее 1/3 от величины инструментальной погрешности преобразователя перепада и ими можно пренебречь. Результаты и их обсуждение

Результаты экспериментальных исследований сопел представлены на рис.2 в виде зависимостей коэффициента истечения от числа Рейнольдса, полученных для двух значений относительного диаметра, $\beta = 0,6$ и $0,75$. С ростом Re коэффициент истечения возрастает, однако темп возрастания уменьшается и при больших Re зависимость $C(Re)$ становится более полой. Коэффициент истечения зависит от относительного диаметра b , определенного по диаметру выходного трубопровода, но эта зависимость существенно меньше, чем зависимость коэффициента истечения стандартного сопла ИСА 1932. При $Re\ 4,5 \cdot 10^5$ различие в коэффициенте истечения торцевого сопла при изменении b от 0,6 до 0,75 составляет 0,5%, а стандартного сопла - 4%. В диапазоне чисел Рейнольдса $5 \cdot 10^4 - 5 \cdot 10^5$ изменение коэффициента истечения торцевого сопла существенно больше, чем стандартного. Отсюда следует, что для торцевого сопла непригодны эмпирические зависимости коэффициента истечения, полученные для стандартного сопла. Рис. 2 - Зависимость коэффициента истечения торцевой диафрагмы от числа Рейнольдса; эксперимент: $b=0,75$, $b=0,6$; линия - расчет

Результаты исследования торцевых диафрагм представлены на рис.3. На этом же рисунке нанесены зависимости коэффициента истечения стандартной диафрагмы, полученные расчетом по уравнению [3] при $\beta=0,1$ и $\beta=0,75$, а также зависимости для коэффициента истечения торцевой диафрагмы без входного участка, рассчитанные по эмпирическому уравнению, полученному в [4]. С ростом числа Рейнольдса у всех испытанных диафрагм коэффициент истечения монотонно уменьшается. По характеру зависимости от числа Рейнольдса полученные результаты качественно соответствуют зависимостям коэффициента истечения стандартных диафрагм, однако количественное расхождение достаточно велико и в некоторых случаях превышает 1,5%. При числе Рейнольдса $Re \geq 3 \cdot 10^5$ коэффициент истечения торцевой диафрагмы без входного участка стремится к постоянному значению $C=0,6$. Небольшое расслоение экспериментальных данных по относительному диаметру диафрагмы $\beta=d/D$ уменьшается с ростом числа Рейнольдса. Рис. 3 - Зависимость коэффициента истечения торцевой диафрагмы от числа Рейнольдса. Эксперимент: $b=0,75$, $b=0,6$, $b=0,4$; расчеты: стандартная диафрагма $b=0,1$, стандартная диафрагма $b=0,75$, уравнение [4]

Расчетная зависимость коэффициента истечения стандартной диафрагмы [7], полученная при $\beta=0,1$, дает заниженные на 1 - 1,5% по сравнению с экспериментом значения C при $Re \geq 2 \cdot 10^5$ и на 0,9 - 1% при $Re \geq 3 \cdot 10^5$; расчет,

выполненный для $\beta=0,75$, наоборот, дает завышенные значения C при малых числах Re и неплохо согласуется с экспериментальными для диафрагм с $\beta=0,6$ и $0,75$ при $Re > 1 \cdot 10^5$. Уравнение [4] хорошо согласуется (в пределах 0,5%) с результатами экспериментов для $\beta=0,4$, а также для $\beta=0,6$ при $Re > 10^5$. С ростом числа Рейнольдса расхождение формулы [4] и экспериментальных данных для $\beta=0,6$ возрастает, а при $\beta=0,75$ расхождение формулы [4] с экспериментом достигает 1% и более. Выводы Исходя из представленных результатов экспериментального исследования, можно сделать вывод, что зависимости коэффициента истечения торцевых СУ от числа Рейнольдса и относительного диаметра существенно отличаются от аналогичных зависимостей для стандартных СУ, а эмпирические уравнения для расчета коэффициента истечения стандартных СУ не пригодны для торцевых СУ