

Р. С. Гареев, А. Н. Сабирзянов, В. А. Фафурин,  
В. В. Феллов, В. Б. Явкин

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ИСТЕЧЕНИЯ ТОРЦЕВЫХ СУЖАЮЩИХ УСТРОЙСТВ

*Ключевые слова:* торцевое СУ, диафрагма, сопло, коэффициент истечения, эталонная установка, математическое моделирование; модели турбулентности.

*Представлены результаты экспериментального исследования зависимости коэффициента истечения торцевых сужающих устройств (СУ) – диафрагм и сопел, в диапазоне чисел Рейнольдса  $Re=2,5 \times 10^4 - 4 \times 10^5$  и относительного диаметра  $\beta=0,4 - 0,75$ . Эксперименты были проведены на государственной эталонной установке Эу-2 Государственного первичного эталона массового и объемного расходов газа ГЭТ-118 ФГУП ВНИИР. Показано, что зависимости коэффициента истечения, применяемые для расчета стандартных СУ дают большую погрешность при расчете торцевых СУ.*

*Keywords:* front pressure differential device, orifice plate, nozzle, discharge coefficient, reference plant, mathematic modeling; turbulence model.

*An experimental study of the dependence of the discharge coefficient front pressure differential devices – orifice plate and nozzle in the range of Reynolds number  $Re=2,5 \times 10^4 - 4 \times 10^5$  and beta ratio  $\beta=0,4 - 0,75$ . Experiments were carried out on the state of the reference facility Eu-2 State primary standard of mass and volume flow GET-118 FGUP VNIIR. It is shown that the dependence of the coefficient discharge used to calculate the standard pressure differential devices give less accuracy when calculating the front pressure differential devices.*

### 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 концентрации 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  $Re > 5,5 \times 10^4$  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 неопреде-

ленность 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  $C=0,595 - 0,6$ .

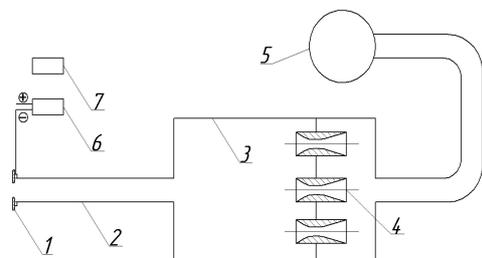
В данной работе представлены результаты экспериментальных исследований коэффициента истечения торцевых сопел и диафрагм без входного участка, полученные в диапазоне  $Re=2,5 \times 10^5 - 4 \cdot 10^5$ .

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 Ø200 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 ±0,15 %); 7 – измеритель влажности и температуры ИВТМ-7М (диапазон измерения температуры от -20°C до 60°C, абсолютная погрешность 0,1°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):

$$C = \frac{q_m}{\frac{\pi d^2}{4} \varepsilon \sqrt{2 \rho \Delta p}}, \quad (1)$$

где  $q_m$  – эталонный расход,  $\Delta p$  – перепад давления на СУ,  $\beta$  – плотность потока,  $\varepsilon$  – коэффициент расширения.

В уравнении (1) отсутствует зависимость коэффициента истечения от  $\beta$ , так как вход потока в СУ происходил из большого объема, следовательно, относительный диаметр СУ по входу  $\beta_{вх} \rightarrow 0$ .

Неопределенность коэффициента истечения в соответствии с [2] вычислялась, как неопределенность результата измерений величины, определенной косвенным методом и связанной с измеряемыми величинами функциональной зависимостью (1)

$$u'_i = \sqrt{\sum_{i=1}^n (\vartheta_i u'_i)^2}, \quad (2)$$

где  $\vartheta_i$ ,  $u'_i$  – коэффициент влияния и неопределенность параметра  $x_i$ , входящего в уравнение (1). Коэффициенты влияния согласно [2] рассчитывались по формуле (3):

$$\vartheta_i = \left( \frac{\partial C}{\partial x_i} \right) \cdot \left( x_i / C \right). \quad (3)$$

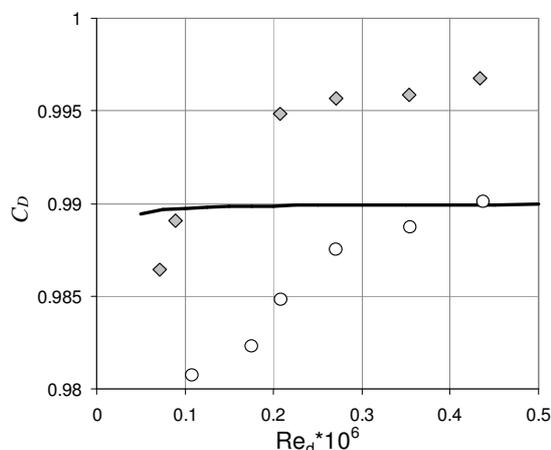
Были определены коэффициенты влияния перепада давления ( $\vartheta_{C,\Delta p} = -1/2$ ), плотности, с учетом влияния влажности воздуха, диаметра диафрагмы ( $\vartheta_{C,d} = 2$ ), коэффициента расширения среды ( $\vartheta_{C,\varepsilon} = 1$ ). Расчеты неопределенности измерений показали, что 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):

$$u'_C = \sqrt{u'^2_{сл} + u'^2_{ин}}, \quad (4)$$

где,  $u'_{сл}$ ,  $u'_{ин}$  – 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

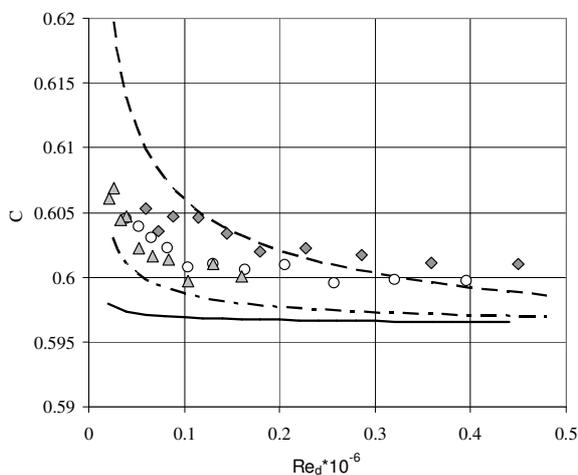
Результаты экспериментальных исследований сопел представлены на рис.2 в виде зависимостей коэффициента истечения от числа Рейнольдса, полученных для двух значений относительного диаметра,  $\beta = 0,6$  и  $0,75$ . С ростом  $Re$  коэффициент истечения возрастает, однако темп возрастания уменьшается и при больших  $Re$  зависимость  $C(Re)$  становится более пологой. Коэффициент истечения зависит от относительного диаметра  $\beta$ , определенного по диаметру выходного трубопровода, но эта зависимость существенно меньше, чем зависимость коэффициента истечения стандартного сопла ИСА 1932. При  $Re 4,5 \times 10^5$  различие в коэффициенте истечения торцевого сопла при изменении  $\beta$  от 0,6 до 0,75 составляет 0,5%, а стандартного сопла – 4%. В диапазоне чисел Рейнольдса  $5 \times 10^4 - 5 \times 10^5$  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:  $\diamond \beta=0,75$ ,  $\circ \beta=0,6$ ; 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  $Re \geq 3 \times 10^5$  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:  $\diamond \beta=0,75$ ,  $\circ \beta=0,6$ ,  $\triangle \beta=0,4$ ; расчеты: — стандартная диафрагма  $\beta=0,1$ , - - - стандартная диафрагма  $\beta=0,75$ , — · — 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  $Re < 2 \times 10^5$  и на 0,9 – 1% при  $Re \geq 2 \times 10^5$ ; 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  $Re > 1 \times 10^5$ . Уравнение [4] хорошо согласуется (в пределах 0,5%) с результатами экспериментов для  $\beta=0,4$ , а также для  $\beta=0,6$  при  $Re < 2 \times 10^5$ . 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

## Литература

1. Кремлевский П.П. Расходомеры и счетчики количества веществ: Справочник: Кн. 1. – 5-е изд. перераб. и доп. – СПб.: Политехника, 2002. – 409 с.
2. ГОСТ 8.586.3–2005 (ИСО 5167-3:2003). Измерение расхода и количества жидкостей и газов с помощью стандартных сужающих устройств. – Часть 3. Сопла и сопла Вентури. Технические требования.
3. ГОСТ 8.586.2–2005 (ИСО 5167-2:2003). Измерение расхода и количества жидкостей и газов с помощью стандартных сужающих устройств. – Часть 2. Диафрагмы. Технические требования.
4. ISO Technical Report. ISO/TR 15377:2007(E). Measurement of fluid flow by means of pressure-differential devices – Guidelines for the specification of orifice plates, nozzles and Venturi tubes beyond the scope of ISO 5167.
5. Рис В. Ф. , Широков Н. А. Коэффициенты расхода торцевых диафрагм при нестесненном входе воздуха. // Энергомашиностроение № 10, 1984 г., С. 13–14.
6. Паспорт государственного первичного эталона единиц объемного и массового расходов газа. Государственный научно-метрологический центр ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт расходомерии». 2005 г.
7. Горчев А.И. Анализ течения в измерительном трубопроводе со стандартной диафрагмой методами вычислительной гидродинамики / С.А. Ермолаев, Р.С. Гареев, А.И. Горчев // Вестник Казан. технол. ун-та – 2011. - №23. – С.142-145

© Р. С. Гареев – асп. каф. систем автоматизации и управления технологическими процессами КНИТУ, gageyev\_rs@mail.ru; А. Н. Сабирзянов – канд. техн. наук, доц. каф. специальных двигателей КНИТУ-КАИ им. А.Н. Туполева, sabirzan@kstu-kai.ru; В. А. Фафурин – д-р техн. наук, проф., зав. каф. систем автоматизации и управления технологическими процессами КНИТУ, fafurin\_va@kstu.ru; В. В. Фефелов – асп. той же кафедры; В. Б. Явкин канд. техн. наук, доц. каф. авиационных двигателей и энергетических установок КНИТУ-КАИ им. А.Н. Туполева, adeu@adeu.kstu-kai.ru.