

УДК 681.121.842+532.5

Р. С. Гареев, И. А. Быков, В. А. Фафурин,
В. Б. Явкин, И. А. Яценко

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ И РАСЧЕТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТОРЦЕВЫХ ДИАФРАГМ

Ключевые слова: Торцевая диафрагма, коэффициент истечения, эталонная установка, математическое моделирование, модели турбулентности, коэффициент сужения струи, коэффициент гидравлических потерь.

Экспериментальным и расчетным путем получены зависимости коэффициента истечения трех типов торцевых диафрагм в диапазоне чисел Рейнольдса $Re=2,5 \times 10^4 - 4 \times 10^5$ и относительного диаметра диафрагмы $\beta=0,4 - 0,75$. Эксперименты были проведены на эталонной установке ФГУП «ВНИИР». На основе численного решения уравнений для стационарного турбулентного течения несжимаемой жидкости проведены расчеты коэффициента истечения торцевой диафрагмы. Для получения большей точности при расчете с использованием моделей турбулентности $k-\varepsilon$ RNG и $k-\omega$ SST была проведена модификация стандартного набора констант моделей. Проведен анализ уравнения для коэффициента истечения, показано, что определяющее влияние на коэффициент истечения оказывают только коэффициенты сужения струи и гидравлических потерь.

Keywords: End diaphragm, discharge coefficient, reference installation, mathematical modeling, turbulence model, the coefficient of narrowing jet, the coefficient of hydraulic losses.

Experimental and calculated dependences of the coefficient expiration of the three types of end diaphragms were obtained in the range of Reynolds numbers $Re=2,5 \times 10^4 - 4 \times 10^5$ and the relative diameter diaphragm $\beta=0,4 - 0,75$. The experiments were performed on a reference installation of FGUP VNIIR. The discharge coefficient of end diaphragm was calculated on the basis of numerical solutions of equations for stationary turbulent flow of an incompressible fluid.

To achieve greater accuracy in the calculation with the use of models of turbulence $k-\varepsilon$ RNG and $k-\omega$ SST constant modification of a standard set of models was held. The analysis of the equation for the discharge coefficient was held and it is shown that the determining influence on the discharge coefficient have only narrowing jet and hydraulic losses coefficients.

В практике измерения расходов приходится иметь дело с нестандартными применениями приборов переменного перепада давления. К такому случаю относится использование торцевых диафрагм, отличающихся от стандартной диафрагмы отсутствием входного, выходного или входного и выходного трубопроводов. Торцевые диафрагмы могут применяться в условиях ограничений на длины трубопроводов. Их применение имеет определенные преимущества при заборе из большого объема или сбросе в большой объем. Для возможности практического применения этих средств измерений необходимо знать их метрологические характеристики в широком диапазоне режимных и конструктивных параметров.

В отличие от стандартных диафрагм, в которых обязательно присутствие длинного входного участка, необходимого для формирования профиля скорости полностью развитого турбулентного потока и выходного участка, в торцевых диафрагмах отсутствует выходной или входной участок либо оба участка. Будем обозначать в дальнейшем диафрагму без входного участка Д1, без выходного участка Д2, без входного и выходного участков Д3. В литературе сведения об использовании и метрологических характеристиках торцевых диафрагм представлены крайне скудно. Исследования проводились только для диафрагм без входного участка. Согласно данным, представленным в [1] коэффициент расхода торцевых диафрагм близок к 0,6 при

$Re \geq 5,5 \times 10^4$ и относительном диаметре $\beta=0,5 - 0,8$ и не зависит от β . Результаты исследований, представленных в [2] подтверждают эти данные. В [3] приведено эмпирическое уравнение для определения коэффициента истечения диафрагмы без входного участка

$$C = 0,5961 + 0,000521 \left(\frac{Re}{10^6} \right)^{0,7}. \quad (1)$$

Это уравнение гарантирует определение C с неопределенностью не превышающей 1% и справедливо при условии $D \geq 2d$, где D – диаметр трубопровода выходного участка, d – диаметр диафрагмы. Недостатком уравнения является отсутствие зависимости коэффициента истечения от отношения d/D . При установке торцевой диафрагмы должно быть выполнено условие удаленности стесняющих поток поверхностей, которое по данным [1] составляет не менее $10d$ и не менее $8d$ по данным [3]. Отсюда следует, что коэффициент истечения торцевой диафрагмы должен совпадать с коэффициентом истечения стандартной диафрагмы при $\beta \leq 0,125$.

Для диафрагм без выходного участка в [3] предлагается применять эмпирическое уравнение для коэффициента истечения стандартной диафрагмы (см. [5]), увеличивая неопределенность до 1%. В работе [3] нет формулы для расчета коэффициента истечения для Д3.

Получение более точных уравнений, учитывающих изменение геометрических и режимных

параметров в более широких пределах, потребует проведения большого объема дорогостоящих экспериментальных исследований. Однако, с учетом развития в настоящее время программных комплексов по моделированию течений жидкостей и газов, значительный объем работ может быть проведен путем численного моделирования, с последующей проверкой в относительно небольшом по объему экспериментальном исследовании.

В данной работе представлены результаты экспериментального и расчетного исследования коэффициента истечения торцевой диафрагмы с забором из безграничного объема (отсутствует входной трубопровод), полученные в диапазоне изменения числа Рейнольдса $Re=2,5 \times 10^4 - 4 \times 10^5$ и относительного диаметра диафрагмы $\beta=0,4 - 0,75$. Экспериментальное определение коэффициента расхода проводилось на государственной эталонной установке ЭУ-2 Государственного первичного эталона единиц объемного и массового расходов газа ГЭТ 118-2006, с расширенной стандартной неопределенностью при 0,092% (при $k=2$) [6][7].

Результаты экспериментов представлены на рис.1 в виде зависимости коэффициента истечения от числа Рейнольдса. На этом же рисунке нанесены зависимости коэффициента истечения стандартной диафрагмы, полученные расчетом по эмпирическому уравнению [5] при $\beta=0,1$ и $0,75$. С ростом числа Рейнольдса у всех испытанных диафрагм коэффициента 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%. Присутствует расслоение экспериментальных данных по относительному диаметру диафрагмы $\beta=d/D$. Расчетная зависимость коэффициента истечения стандартной диафрагмы, 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 (1) 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 (1) и данных для $\beta=0,6$ возрастает, а при $\beta=0,75$ расхождение формулы (1) с данными эксперимента достигает 1% и более.

Из представленных результатов можно сделать вывод, что эмпирическое уравнения для коэффициента истечения стандартной диафрагмы [5] не пригодно для определения коэффициента истечения торцевой диафрагмы, а уравнение (1) хорошо согласуется с экспериментальными данными при малых β и числах Рейнольдса $Re < 2 \times 10^5$.

Для выяснения возможности применения численных методов к расчету коэффициента истечения торцевой диафрагмы были проведены расчеты, выполненные в осесимметричной постановке.

Геометрия расчетной области была выбрана такой, чтобы передать все конструктивные особенности монтажа диафрагмы (фланцы, крепление, отбор давления). Расчетная сетка содержала 250 000 прямоугольных ячеек, ориентированных вдоль стенок, с выделением пограничных слоев и плавным увеличением размера ячейки к ядру потока. Сгущения сетки в пристеночных областях были такими, что величина $y^+ = u^* y / \nu \leq 1,5$ для 99% пристеночных ячеек, где $u^* = \sqrt{\tau_w / \rho}$, τ_w – напряжения трения на стенке, y – расстояние от центра граничной ячейки до стенки. Это обеспечивало возможность сеточного разрешения ламинарного подслоя. В окрестности угловой точки диафрагмы величина y^+ превышала указанное выше значение и могла достигать 5.

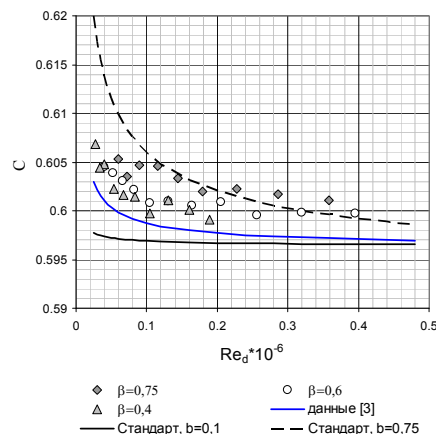


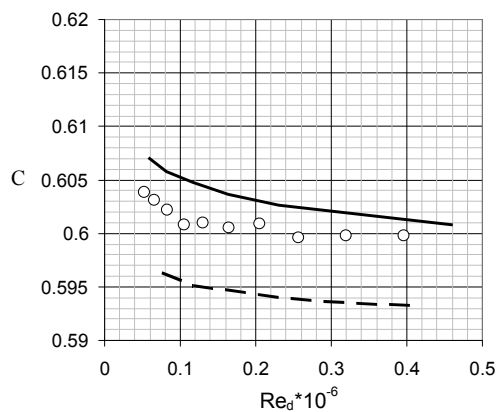
Рис. 1 – Зависимость коэффициента истечения торцевой диафрагмы от числа Рейнольдса

Основной целью расчетов был выбор модели турбулентности и модификация констант модели для получения лучшего согласования с экспериментальными данными. Основываясь на результатах работы [8] для проведения расчетов были выбраны 2 модели турбулентности – $k-\varepsilon$ RNG и $k-\omega$ SST.

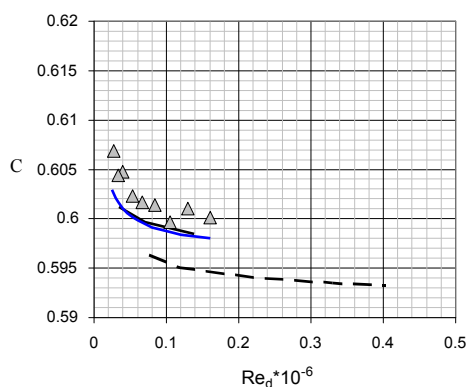
Расчеты, проведенные со стандартным набором констант в модели турбулентности $k-\omega$ SST, показали, что полученная зависимость коэффициента истечения от числа Рейнольдса качественно согласуется с экспериментальными данными, однако имеется значительное постоянное смещение расчетных данных, около 1%, практически одинаковое для всех β (рис.2). Такой же результат был получен и для модели турбулентности $k-\varepsilon$ RNG со стандартным набором констант. Эта модель также дает значительное смещение относительно экспериментальных точек. Устранение смещения было достигнуто корректировкой констант модели турбулентности, как для модели $k-\varepsilon$ RNG, так и для модели $k-\omega$ SST.

Так как смещение, полученное при расчетах приводит к заниженным значениям C , вызванным, в том числе, большей неравномерностью профиля скорости перед диафрагмой, то корректировка была выполнена таким образом, чтобы обеспечить большие значения интенсивности турбулентности вблизи входа в диафрагму, что должно привести к выравниванию профиля скорости. После соответ-

вующего изменения констант в моделях турбулентности постоянное смещение экспериментальных и расчетных данных было сокращено до 0,5%. Из представленных на рис.2 графиков видно, что после модификации констант расчетные и экспериментальные данные согласуются между собой значительно лучше, чем при стандартном наборе констант. Отметим также, что результаты расчетов по модели $k-\omega$ SST с модифицированными константами хорошо согласуются с расчетами по формуле (1).



○ Эксперимент, $b=0,6$
 --- Расчет, $k-\epsilon$ RNG стандартные константы
 — Расчет, $k-\epsilon$ RNG модифицированные константы



△ Эксперимент, $b=0,4$
 --- Расчет, $k-\omega$ SST стандартные константы
 — Расчет, $k-\omega$ SST модифицированные константы
 — Расчет по формуле [3]

Рис. 2 – Результаты расчетов C численным методом

Для оценки влияния типа диафрагмы на коэффициент истечения были проведены численные расчеты течения в диафрагмах трех типов, а также в стандартной диафрагме с использованием модели турбулентности $k\omega$ -SST со стандартным набором констант. По результатам расчетов были построены зависимости коэффициента истечения, C от числа Рейнольдса, представленные на рис.3.

Из результатов расчетов следует, что характер изменения C в зависимости от числа Рейнольдса одинаков для всех типов диафрагм – с ростом Re коэффициент истечения монотонно убывает, но величина C зависит от типа диафрагмы и относитель-

ного диаметра (за исключением ДЗ), при этом, различие может достигать 2%.

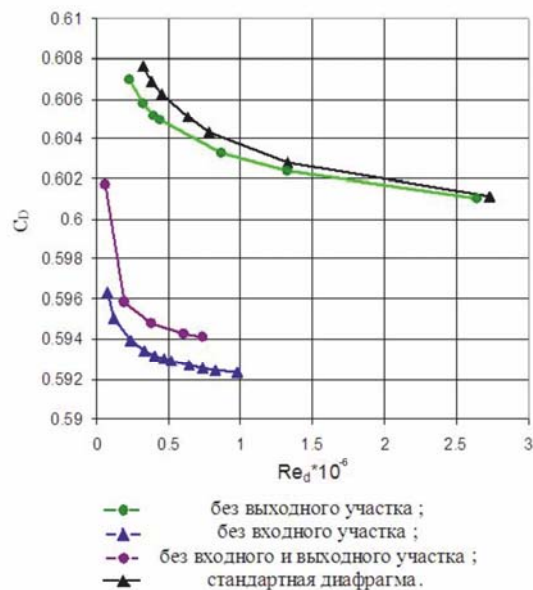


Рис. 3 – Зависимости коэффициента истечения торцевых диафрагм от числа Рейнольдса по результатам численных расчетов

Для объяснения полученных результатов рассмотрим уравнение коэффициента истечения, полученное на основе одномерного подхода [4]

$$C = \frac{\mu \sqrt{1 - \beta^4}}{\sqrt{\alpha_b - \psi_b + \zeta_{ab} - (\alpha_a - \psi_a) \mu^2 \beta^4}}, \quad (2)$$

где μ – коэффициент сужения струи, α – коэффициент Кориолиса, учитывающий неравномерность профиля скорости, ψ – коэффициент отбора давления, учитывающий разность давлений в точке отбора давления и в горле струи, ζ_{ab} – коэффициент гидравлических потерь, индекс a обозначает сечение в невозмущенном потоке перед диафрагмой, индекс b – сечение в горле струи за диафрагмой.

Эта формула получена для стандартной диафрагмы, но справедлива для всех типов диафрагм. Для диафрагм без входного и без выходного участков коэффициенты $\alpha_a=0$, $\psi_a=0$, т.к. сечение a располагается на большом удалении от диафрагмы, где скорость течения пренебрежимо мала. Такой же результат получается и формально, если принять, что поток забирается из бесконечно большого объема, вследствие чего $\beta=0$, т.е. $(\alpha_a - \psi_a) \mu^2 \beta^4 = 0$. Для диафрагмы без выходного участка влияние коэффициентов $\alpha_a=0$, $\psi_a=0$ сильно ослабляется, т.к. произведение $\mu^2 \beta^4 \leq 0,05$ при $\beta \leq 0,6$.

Наиболее сильно влияющим параметром является коэффициент сужения струи, μ . Величина коэффициента сужения определялась по положению «граничной» линии тока, которая для каждой диафрагмы подбиралась, как линия тока наиболее близко подходящая к угловой точке диафрагмы и являлась, тем самым, условной границей струи. На этой линии тока определялось положение минимальной радиальной координаты, по которому рассчитывал-

ся коэффициент сужения струи. Для диафрагмы без выходного участка (Д2) получено наибольшее значение коэффициента сужения струи $\mu=0,677$. У двух других типов диафрагм коэффициенты сужения струи одинаковы, $\mu=0,63$. Большие значения μ для диафрагмы Д2 обусловлены тем, что поток на входе в диафрагму в большей степени ориентирован вдоль оси диафрагмы, в то время как у диафрагм Д1 и Д3 картина линий тока близка к стоку. Таким образом, большая величина коэффициента истечения диафрагмы без выходного участка объясняется большей величиной коэффициента сужения струи.

Однако, несмотря на то, что у диафрагм Д1 и Д3 коэффициент сужения струи одинаков, коэффициент истечения немного различается. Более того, приблизительно такое же различие отмечается и в коэффициентах истечения стандартной диафрагмы и Д2. Для объяснения этих различий рассмотрим влияние коэффициентов α_b , ζ_{ab} , ψ_b .

Сравнение коэффициентов α_b и ψ_b , выполненное на основе результатов расчетов, показало, что различия между этими коэффициентами для разных типов диафрагм достаточно малы и не оказывают заметного влияния на коэффициент истечения. Так, значения α_b изменяются от 1,028 до 1,032, а ψ_b от 0,072 до 0,075, а влияние этих изменений не превышает 0,2%.

Более значительное влияние оказывает коэффициент гидравлических потерь, характеризующий потери полного давления в струе между сечениями a и b . Как отмечается в [1] коэффициент гидравлических потерь определяется потерями в отрывной зоне перед диафрагмой, потерями на трение и потерями при обтекании диафрагмы; при этом отрывная зона за диафрагмой не влияет на потери давления. Из сравнения зависимостей коэффициента истечения различных типов диафрагм, приведенного на рис.3 следует, что большие значения C получаются для диафрагм, у которых отсутствует выходной участок, т.е. отсутствует отрывная зона за диафрагмой. Таким образом, наименьшее значение коэффициента гидравлических потерь соответствует диафрагмам, у которых отсутствует выходной участок, следовательно, влияние отрывной зоны перед диафрагмой пренебрежимо мало, а потери в отрывной зоне за диафрагмой имеют большее значение.

По результатам проведенного исследования могут быть сделаны следующие выводы:

1. Коэффициент истечения торцевой диафрагмы зависит от типа и относительного диаметра диафрагмы (при наличии входного или выходного участков).

2. Наиболее сильное влияние на коэффициент истечения оказывает коэффициент сужения струи.

3. При одинаковых значениях коэффициента сужения струи разные значения коэффициента истечения получается вследствие различия в коэффициентах гидравлических потерь.

Литература

1. П. П. Кремлевский, В кн. Расходомеры и счетчики количества веществ. Справочник: Кн. 1.– 5-е изд. перераб. и доп., Политехника, Санкт-Петербург, 2002, С. 409 с.
2. В. Ф. Рис, Н. А. Широков, В Кн. Коэффициенты расхода торцевых диафрагм при нестесненном входе воздуха, Энергомашиностроение, 10, С. 13–14.
3. 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.
4. ГОСТ 8.586.1-2005 (ИСО 5167-1:2003). Измерение расхода и количества жидкостей и газов с помощью стандартных сужающих устройств. Часть 1. Принцип метода измерений и общие требования.
5. 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.
6. Р. С. Гареев, А. В. Красавин, В. А. Фафурин, В. Б. Явкин, И. А. Яценко, Экспериментальное и расчетное определение коэффициента истечения торцевой диафрагмы, Законодательная и прикладная метрология, 6, С. 13–17, (2012).
7. Красавин В.М., Раинчик С.В., Ившин В.П., Красавин А.В., Быков И.А., Лобарев С.В. Исходная эталонная установка государственного первичного эталона единиц объемного и массового расходов газа ГЭТ 11-2006. Процедура калибровки критических сопел// Вестник Казан. технол. ун-та, №10, с.285-287 (2013).
8. Ганиев Р. И., Николаев Н. А., Сабирзянов А. Н., Фафурин В. А., Явкин В. Б., Выбор сетки и модели турбулентности для расчета коэффициента расхода стандартной диафрагмы, Изв.Вузов. «Авиационная техника», 4, С. 21–24 (2008).

© Р. С. Гареев - зам. нач. отдела разработки методик (методов) измерений, Метрологический центр ООО “СТП”, gageev@oostp.ru; И. А. Быков - науч. сотр. ФГУП «ВНИИР», kzn@outlook.com; В. А. Фафурин - д-р техн. наук, проф., зав. каф. систем автоматизации и управления технологическими процессами КНИТУ; В. Б. Явкин, канд. техн. наук, доц. КНИТУ им. А.Н.Туполева – КАИ (КНИТУ-КАИ); И. А. Яценко - техн. дир., Метрологический центр ООО “СТП”, yacenko@oostp.ru.