

Сравнительный анализ коэффициентов истечения критических сопел

Ж. А. ДАЕВ^{1,2}, Н. З. СУЛТАНОВ²

¹Актюбинский университет им. С. Баишева, Актюбе, Казахстан, e-mail: zhand@yandex.ru
²Оренбургский государственный университет, Оренбург, Россия, e-mail: sultanov@mail.osu.ru

Проведён сравнительный и статистический анализ коэффициентов истечения критических сопел с тороидальным патрубком. Проанализированы основные подходы, связанные с определением коэффициентов истечения. Приведены уравнения зависимостей, полученных для описания изменений коэффициентов истечения критических сопел как функций числа Рейнольдса. На примере критических сопел Вентури рассмотрены факторы, влияющие на точность измерения расхода газа.

Ключевые слова: критические сопла, расход газа, коэффициент истечения, расходомеры, преобразователь расхода.

A comparative and statistical analysis of the discharge coefficients rates of critical nozzles with a toroidal branch pipe is carried out. It analyzes the main approaches associated with determining the discharge coefficient. The equations of dependences obtained for describing changes of the discharge coefficients of critical nozzles as functions of the Reynolds number are given. On the example of critical Venturi nozzles, factors affecting the accuracy of measuring gas flow are considered.

Key words: critical nozzles, gas flow, discharge coefficient, flowmeters, flow transducer.

Критические сопла широко применяются в составе эталонов расхода и количества газа, при решении задач, связанных с производством и хранением единицы расхода газа, а также при модернизации и совершенствовании рабочих средств и систем измерения расхода. Согласно работе [1] критические сопла используются в качестве компараторов эталонов расхода газа при сличениях эталонов, в составе поверочных установок для промышленных расходомеров как средства, устанавливающие необходимые значения расхода газа, находят они применение и в составе газорегуляторных установок в виде устройств стабилизации расхода газа. Более двух тысяч критических сопел задействованы в поверочных установках расходомеров газа [2]. В настоящее время всё чаще критические сопла используют при организации точных измерений в области расходоизмерительной техники. Методика измерений и основные нормативные принципы организации измерений критическими соплами установлены нормативными документами [3, 4].

В соответствии с международным стандартом [4] и работами [1, 2, 5] массовый расход, измеряемый с помощью критического расходомера для одномерного изэнтропического потока совершенного газа, определяется по формуле

$$q_{mi} = A_* C_* p_0 / \sqrt{R_M T_0}, \quad (1)$$

где A_* – площадь критического поперечного сечения сопла;

$C_* = \sqrt{\gamma [2/(\gamma+1)]^{(\gamma+1)/(\gamma-1)}}$ – функция критического расхода совершенного газа; γ – коэффициент адиабаты при идеально-газовом состоянии; p_0 – давление газа в изэнтропическом заторможенном потоке; R_M – удельная газовая постоянная; T_0 – температура газа в заторможенном потоке.

Уравнение (1) – это лишь идеальный пример, который не подходит для общих случаев вычисления расхода газа. Для определения действительного расхода газа величину, най-

денную ранее (см. (1)), необходимо умножить на коэффициент истечения сопла:

$$C_d = q_m / q_{mi}, \quad (2)$$

где q_m – действительный расход, измеряемый в реальных условиях.

Коэффициент истечения (2) представляет собой функцию, зависящую от большого количества величин, среди которых геометрические параметры сопла, число Рейнольдса, коэффициенты теплопроводности и вязкости газа, коэффициенты расширения и сжимаемости газа [5]. Другими словами, коэффициент истечения – специфический параметр, определяемый как набор взаимно влияющих величин. Такое количество данных невозможно учесть в формализованной модели процесса измерения расхода газа. Поэтому с изучением и уточнением коэффициента истечения связано огромное количество исследований.

В настоящей работе проведён сравнительный анализ коэффициентов истечения критических сопел и даны практические рекомендации по измерению расхода и количества газа. Авторы опираются на подробный обзор и анализ критических сопел, а также на исследования сферы их применения [6]. Согласно научным статьям, опубликованным в [5, 7], впервые теоретический анализ и вывод уравнений для коэффициента истечения выполнил Стратфорд [7]. Им же был предложен подход для выражения этого коэффициента в виде следующей зависимости:

$$C_d = a - b Re^{-n}, \quad (3)$$

где a , b – постоянные коэффициенты, характеризующие свойства сопла; коэффициенты a , b обусловлены геометрическими размерами сопла и физическими процессами, происходящими при течении среды через него; Re – число Рейнольдса, определяемое в горловине сопла; n – показатель степени (всегда меньше единицы).

Стратфорд получил уравнения нахождения коэффициентов критических сопел для ламинарного и турбулентного типов течения, соответственно:

$$C_d = 0,99844 - 3,0325Re^{-0,5}; \quad (4)$$

$$C_d = 0,99844 - 0,0693Re^{-0,2}. \quad (5)$$

В стандарте [4] уравнение для нахождения коэффициента истечения в виде зависимости (3) рекомендуется использовать при измерениях расхода стандартными критическими соплами Вентури. Указанный стандарт устанавливает чёткие границы эксплуатации сопел таких типов. Для критических сопел Вентури с тороидальным патрубком уравнение для нахождения коэффициента истечения выглядит следующим образом:

$$C_d = 0,9959 - 2,72Re^{-0,5} \text{ при } 2,1 \cdot 10^4 \leq Re \leq 3,2 \cdot 10^7. \quad (6)$$

Для критических сопел Вентури с цилиндрическим патрубком это уравнение можно записать как

$$C_d = 0,9976 - 0,1388Re^{-0,2} \text{ при } 3,5 \cdot 10^5 \leq Re \leq 1,1 \cdot 10^7. \quad (7)$$

Стандарт [4] также регламентирует уравнение для критических сопел Вентури с тороидальным патрубком, у которых обработана поверхность. Коэффициент истечения для таких критических сопел находится по формуле

$$C_d = 0,9985 - 3,412Re^{-0,5} \text{ при } 2,1 \cdot 10^4 \leq Re \leq 1,4 \cdot 10^6. \quad (8)$$

Ещё одним выражением, соответствующим зависимости (3), является уравнение, представленное в работе [8]. Данное уравнение было получено Арнбергом, и его можно применять в диапазоне чисел Рейнольдса $4,0 \cdot 10^4 - 2,5 \cdot 10^6$:

$$C_d = 0,99738 - 3,0358Re^{-0,5}. \quad (9)$$

В работе [9] представлено уравнение для определения коэффициента истечения критических сопел на основании двух независимых исследований – Холла и Героппа:

$$C_d = C_d^{Hall} C_d^{Geropp} = 0,99859 - 3,517Re^{-0,5}. \quad (10)$$

Рассмотренное уравнение (10) используется для ламинарных потоков газа. В этой же работе предложено уравнение Ишибаши, выведенное на основании обработки экспериментальных данных в диапазоне чисел Рейнольдса $5,0 \cdot 10^4 - 2,1 \cdot 10^5$ [9]:

$$C_d = 0,99864 - 3,447Re^{-0,5}. \quad (11)$$

Для чисел Рейнольдса $1,0 \cdot 10^3 \leq Re \leq 1,0 \cdot 10^6$ учёный Вендт получил уравнение для нахождения коэффициента критических сопел Вентури [5]:

$$C_d = 0,9982 - 3,448Re^{-0,5}. \quad (12)$$

В Корейском исследовательском институте эталонов и науки (KRISS) Парком было решено следующее уравнение, носящее его имя [5, 10]:

$$C_d = 0,9995 - 3,6601Re^{-0,5}. \quad (13)$$

Похожее уравнение было получено при компьютерном моделировании [11]:

$$C_d = 0,99575 - 3,7026Re^{-0,5}. \quad (14)$$

Утверждается, что уравнение (14) отличается от уравнения Парка (13) лишь на 0,2 % [11]. Существует и уравнение Хиллбрата для расчёта коэффициента истечения. Его удобно применять для диапазона чисел Рейнольдса $10^5 - 10^7$ [12]:

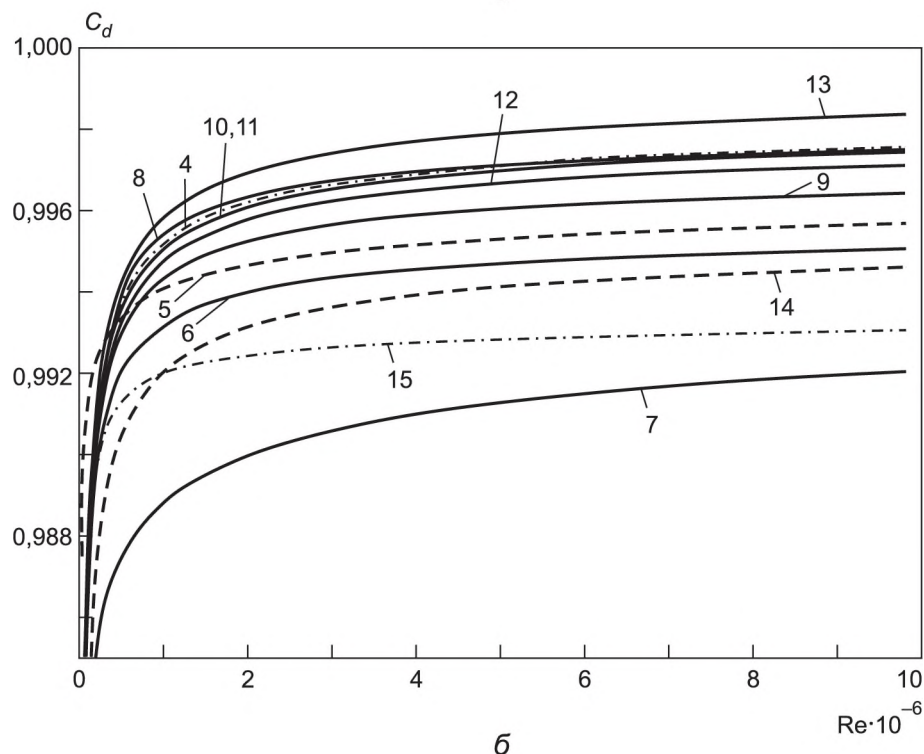
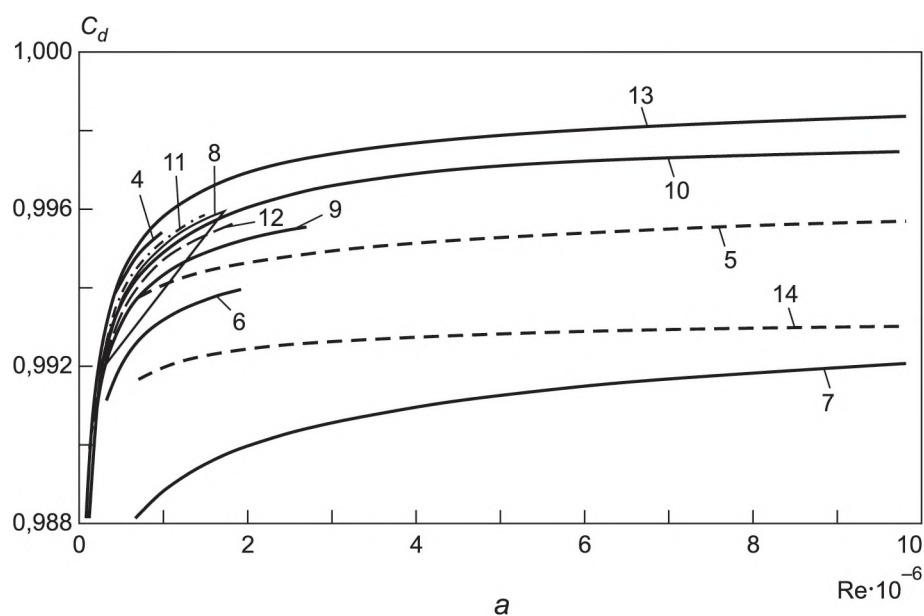
$$C_d = 0,9935 - 1,525Re^{-0,5}. \quad (15)$$

Большое количество работ посвящено уточнению влияния шероховатости поверхности на процесс измерения расхода критическими соплами, что отражается на определении коэффициентов истечения [5, 13, 14, 15].

Сравним коэффициенты истечения, найденные по формулам (4)–(15). Графические зависимости этих коэффициентов от чисел Рейнольдса представлены на рисунке а. Все коэффициенты найдены с учётом диапазонов, в которых они были определены. Исключением являются лишь теоретические зависимости, полученные аналитическим путём, а именно: уравнение, выведенное Ишибаши по работам Холла и Героппа (10), уравнение Парка (13) и уравнение (14). На графиках показан разброс значений коэффициентов, хотя некоторые из них построены для одних и тех же устройств и в одном диапазоне чисел Рейнольдса. Такой разброс можно объяснить условиями проведённых экспериментов и точностью уравнений. Например, уравнения Стратфорда (4), (5) получены с неопределённостью $\pm 0,14$ %, уравнение Арнберга (9) имеет неопределённость, равную $\pm 0,21$ %, неопределённость уравнения Парка (13) соответствует 0,32 %, а уравнение Ишибаши (11) декларирует неопределённость $\pm 0,04$ % [5].

Однако разброс значений коэффициентов истечения (см. рис. 1) наблюдается и для одних и тех же диапазонов чисел Рейнольдса, и для устройств одинаковой конструкции. Так, уравнения (7), (15) построены для примерно одинакового диапазона, но разница между ними составляет более чем одну тысячную коэффициента истечения. В целом же можно отметить, что с ростом числа Рейнольдса значения всех коэффициентов становятся постоянными, а зависимость подобной характеристики приобретает линейный характер в широком диапазоне. Последнее обусловлено структурой зависимостей для коэффициентов истечения, которая представлена в виде формулы (3).

Исследовав действительные диапазоны коэффициентов истечения сопел, построим по уравнениям (4)–(15) графики для всего диапазона чисел Рейнольдса и проведём сравнительный анализ коэффициентов истечения. Зависимости коэффициентов истечения сопел от чисел Рейнольдса на всем диапазоне этих чисел представлены на рисунке б. Из приведённых



Зависимости коэффициентов истечения сопел от чисел Рейнольдса:
 а – действительные значения; б – значения на всем диапазоне чисел Рейнольдса;
 номера кривых соответствуют формулам, по которым они рассчитаны

зависимостей следует, что некоторые уравнения, построенные для ламинарных течений (4), (10) и обусловленные малыми значениями чисел Рейнольдса, совпадают с уравнениями для турбулентных течений (11), (8). Данные уравнения сливаются в одну зависимость (см. рисунок б). Исходя из графиков также можно сделать вывод, что уравнение Хиллбрата близко по значениям к уравнению (7), которое в нормативном документе [4] рекомендовано для сопел с цилиндрическими патрубками.

Статистический анализ рассмотренных зависимостей для коэффициентов истечения критических сопел, представленных в виде уравнений (4)–(15), показал, что все уравнения несмотря на разброс между ними не отличаются друг от друга в пределах относительной погрешности $\pm 0,35\%$. Такое положение подтверждает и анализ, проведенный в работе [5], где утверждается, что уравнения (4), (5), (10), (11), (13), (19) отличаются с относительной погрешностью $\pm 0,3\%$ от уравнения (6).

В настоящей работе авторы расширили сравнительный анализ уравнений коэффициентов истечения уравнениями (7), (8), (9), (12), (14), (15). Это позволило им сделать вывод, что в пределах относительной погрешности, равной $\pm 0,35\%$, большое количество уравнений для коэффициентов истечения критических сопел с тороидальным патрубком имеют схожие результаты. Также выполнен литературный обзор основных исследований, связанных с уточнением зависимостей для коэффициентов истечения критических сопел, начиная с самой первой работы [7]. Проведенный анализ показал, что на точность измерений расхода газа с помощью критических сопел значительное влияние оказывают внешние воздействия, обусловленные шероховатостью и качеством обработки поверхности критических сопел [5, 10, 15]. Необходимо отметить, что в статье [16] описано влияние изменения температуры на результаты измерения расхода. Особенно сильно температурные явления воздействуют на очень маленькие критические сопла. Состав измеряемого газа также играет роль в изменении функции критического расхода. Величина и эффекты от всех перечисленных факторов исследованы и приведены в работе [17].

Таким образом, полученные в разное время уравнения для коэффициентов истечения критических сопел, несмотря на ограничения по диапазону чисел Рейнольдса, можно применять в

широком диапазоне. Это позволит значительно расширить область использования указанных сопел. Выполненный статистический анализ коэффициентов истечения критических сопел позволил утверждать, что практически все уравнения, используемые при организации систем измерения расхода и количества газа для данного типа сопел, отличаются друг от друга лишь в пределах относительной погрешности, равной $\pm 0,35\%$.

Полученные в настоящей работе данные полезны специалистам, выполняющим калибровочные и поверочные работы в области расходомерии и занимающимся эксплуатацией средств и систем измерения расхода и количества газа.

Л и т е р а т у р а

1. Герасимов А. П., Иванов В. П., Красавин В. М., Лахов В. М., Раинчик С. В., Семёнова О. К. Область применения сопел Лаваля в расходомерной технике // Измерительная техника. 2005. № 4. С. 48–52.
2. Герасимов А. П., Иванов В. П., Красавин В. М., Лахов В. М., Раинчик С. В., Семёнова О. К. Свойства потоков газа // Измерительная техника. 2005. № 4. С. 40–44.
3. МИ 1538–86. ГСИ. Критические расходомеры. Методика выполнения измерений массового расхода газа.
4. ISO 9300:2005 (E). Measurement of gas flow by means of critical flow Venturi nozzles.
5. Wang C., Ding H., Zhao Y. Influence of wall roughness on discharge coefficient of sonic nozzles // Flow Measurement and Instrumentation. 2014. V. 35. P. 55–62.
6. Arnberg B. T. Review of critical flowmeters for gas flow measurements // Journal of Basic Engineering. 1962. No. 12. P. 447–457.
7. Stratford B. S. The calculation of the discharge coefficient of profiled choked nozzles and optimum profile for absolute air flow measurement // Journal of the royal aeronautical society. 1964. V. 68. P. 237–245.
8. Arnberg B. T., Britton C. L., Seidl W. F. Discharge coefficient correlations for circular Venturi flow meters at critical (sonic) flow // Journal of Fluids Engineering. 1974. No. 2. P. 111–123.
9. Ishibashi M., Takamoto M. Theoretical discharge coefficient of a critical circular-arc nozzle with laminar boundary layer and its verification by measurements using super-accurate nozzles // Flow Measurement and Instrumentation. 2000. V. 11. P. 305–313.
10. Park K. A. Effects of inlet shapes of critical Venturi nozzles on discharge coefficients. Flomeko // 10th IMEKO TC9 Conference on Flow Measurement. 2000. P. 15–19.
11. Cruz-Maya J. A., Sanchez-Silva F., Quinto-Diez P. A new correlation to determine the discharge coefficient of a critical Venturi nozzle with turbulent boundary layer // Flow Measurement and Instrumentation. 2006. V. 17. P. 258–266.
12. Choi Y. M., Park K. M., Park S. O. Interference effect between sonic nozzles // Flow Measurement and Instrumentation. 1997. V. 8. P. 113–119.
13. Ishibashi M. Discharge coefficient equation for critical-flow toroidal-throat Venturi nozzles covering the boundary-layer transition regime // Flow Measurement and Instrumentation. 2015. V. 44. P. 107–121.
14. Li C. H., Peng X. F., Wang C. Influence of diffuser angle on discharge coefficient of sonic nozzles for flow-rate measurements // Flow Measurement and Instrumentation. 2010. V. 21. P. 531–537.
15. Ding H., Wang C., Zhao Y. Surface roughness effect on flow measurement of real gas in a critical nozzle // Measurement. 2015. V. 68. P. 82–91.
16. Bignell N., Choi Y. M. Thermal effects in small sonic nozzles // Flow Measurement and Instrumentation. 2002. V. 13. P. 17–22.
17. Steward D. G., Watson J. T. R., Vaidya A. M. Improved critical flow factors and representative equations for four calibration gases // Flow Measurement and Instrumentation. 1999. V. 10. P. 27–41.

Дата принятия: 14.04.2018.

