

А. А. Гайнуллина, Р. Р. Галямов, В. В. Кузьмин,
А. В. Чупаев

ВЛИЯНИЕ ШЕРОХОВАТОСТИ РАБОЧЕЙ ПОВЕРХНОСТИ РАСХОДОМЕРНОГО СОПЛА НА ВЕЛИЧИНУ КОЭФФИЦИЕНТА ИСТЕЧЕНИЯ

Ключевые слова: шероховатость, коэффициент истечения, расходомерные сопла.

Проведен анализ влияния шероховатости рабочей поверхности расходомерного сопла на величину его коэффициента истечения. Исследование, построенное на основе современных представлений теории пограничного слоя и методе относительного соответствия, позволило установить степень влияния указанного возмущающего фактора на статическую характеристику сужающего устройства и получить соответствующую поправочную функцию.

Keywords: Roughness, discharge coefficient, flow nozzles.

Analysis of impact of the roughness of the surface of the nozzle flowmeter on the value of its coefficient of discharge. The study built on the basis of modern theory of the boundary layer and on the compliance of the method, allowing the degree of influence of this disturbing factor on the static characteristics of primary device and obtain the corresponding correction function.

Расходомеры переменного перепада давления в настоящее время продолжают оставаться популярными средствами измерения расхода жидких и газообразных сред [1,2]. Однако, наряду с большим количеством достоинств они обладают рядом недостатков, одним из которых является чувствительность статических характеристик их первичных преобразователей (сопел, диафрагм и напорных трубок) к трансформации кинематической структуры контролируемых потоков, происходящей под воздействием различных возмущений, таких как неизотермичность и турбулизация потока [3], шероховатость стенок канала, геометрия сужающего устройства и т.п. [4].

Установление и учет влияния каждого из перечисленных возмущающих воздействий на коэффициент истечения сужающего устройства в отдельности или в совокупности представляет значительный практический интерес.

В данной работе рассмотрено влияние шероховатости рабочей поверхности расходомерного сопла на его коэффициент истечения.

Согласно положениям теории пограничного слоя коэффициент истечения расходомерного сопла может быть представлена выражением [5]

$$\alpha = 1 - 2\left(\delta^*/r_0\right), \quad (1)$$

где δ^*/r_0 - толщина вытеснения пограничного слоя в горловине сопла, отнесенная к местному значению радиуса.

Параметр δ^*/r_0 может быть представлен как произведение $\delta^*/\delta^* \delta^*/r_0$, где δ^*/r_0 - относительная толщина пограничного слоя.

Изменение состояния поверхности проточной части расходомерного сопла, которое проявляется в увеличении ее шероховатости в процессе эксплуатации, вызывает деформацию кинематической структуры потока в контролируемом сечении, изменение местного

значения коэффициента трения $C_f/2$ и параметра δ^*/r_0 , входящих в выражение (1). Это, естественно, влечет за собой изменение величины коэффициента истечения α , и оказывает влияние на результат измерения расхода по методу переменного перепада давления.

Расчет коэффициента трения с учетом воздействия на поток шероховатости стенок канала можно произвести по алгоритму, предложенному в работе [6]:

$$\frac{1}{H} = 1 - \frac{\sqrt{C_{f0}/2}}{\chi} \left(1 + \frac{2}{1 + \sqrt{1 - \frac{2\chi}{\sqrt{C_{f0}/2}} \frac{Re^{**} H}{Re + 4 Re^{**} H}}} \right),$$

$$\frac{\delta}{r_0} = 2 \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2\chi}{\sqrt{C_{f0}/2}} \frac{Re^{**} H}{Re + 4 Re^{**} H}} \right),$$

$$\frac{\delta^*}{\delta} = \frac{1}{\chi} \sqrt{C_{f0}/2} \left(1 - \frac{1}{4} \frac{\delta}{r_0} \right),$$

$$\zeta_{1,0} = \frac{11,6}{\sqrt{C_{f0}/2} Re^{**} H \frac{\delta}{\delta^*}}, \quad (2)$$

$$\frac{C_{f0}}{2} = \left(\frac{\chi}{11,6 - \ln \zeta_{1,0}} \right)^2, \quad \left| \frac{C_{f0j} - C_{f0j-1}}{C_{f0j}} \right| \leq \varepsilon;$$

$$k = \frac{k_a}{r_0} \cdot \frac{r_0}{\delta},$$

$$H = \left\{ 1 - \frac{\sqrt{C_{f0}/2}}{\chi} \left(1 + 2 \left[1 + \sqrt{1 - 2\chi \sqrt{C_{f0}/2} \frac{Re^{**} H}{Re + 4 Re^{**} H}} \right]^{-1} \right) \right\}^{-1},$$

$$\frac{\delta^*}{\delta} = \frac{1}{\chi} \sqrt{C_{f0}/2} \left(1 - \frac{1}{4} \frac{\delta}{r_0} \right), \quad \zeta_1 = \frac{\eta_1}{\sqrt{C_{f0}/2} Re^{**} H \frac{\delta}{\delta^*}},$$

$$\eta_1 = 8 + 3,6 \left(\frac{\zeta_1 - k}{\zeta_1} \right)^{5/3}, \quad (3)$$

$$k \geq \zeta_1, \eta_1 = 8,$$

$$\frac{C_f}{2} = \left(\frac{\chi}{\chi \eta_1 - \ln \zeta_1} \right)^2, \left| \frac{C_{fj} - C_{fj-1}}{C_{fj}} \right| \leq \varepsilon.$$

Численную реализацию произведенного алгоритма удобно производить следующим образом: задается значением локального коэффициента трения $C_{f0}/2$, характерного для «стандартных» условий обтекания, в нулевом приближении, вычислив его по формуле:

$$C_{f0}/2 = 0,0128 Re^{*-0,25} \quad (4)$$

Затем по (2) определяем величины $H, \delta/r_0, \delta^*/\delta, \zeta_{1,0}$ и $C_{f0}/2$ в первом приближении. Процесс итерации повторяем до выполнения условия:

$$\left| \frac{C_{f0j} - C_{f0j-1}}{C_{f0j}} \right| \leq \varepsilon.$$

По (2) в той же последовательности вычисляется коэффициент трения C_f , характерный для течения в канале, поверхность которого имеет вполне определенную, заданную параметром k шероховатость. Нулевое приближенное значение C_f может быть вычислено также по формуле (4).

Вычисляется функция $\psi_{ш} = \left(\frac{C_f}{C_{f0}} \right)_{Re^{**}}$,

учитывающая влияние шероховатости на величину локального коэффициента трения в контрольном сечении расходомерного сопла.

Далее, для определения действительного значения коэффициента истечения определяется параметр $\delta^*/r_0 = \delta^*/\delta * \delta/r_0$, входящий в уравнение

(1). И затем определяется коэффициент α .

На графиках рис. 1, 2 показана зависимость коэффициента истечения сопла от изменения параметра шероховатости k для трех различных значений критерия Re ($10^4, 10^5, 10^7$). Коэффициент истечения представлен в виде отношения его к «стандартной» величине α_0 , т.е. к коэффициенту истечения для случая гидравлически гладкого режима обтекания стенок сопла при прочих одинаковых условиях.

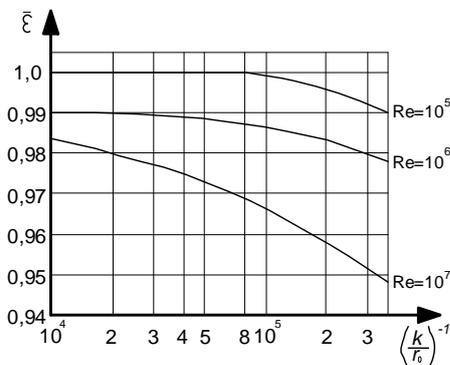


Рис. 1 - Зависимость коэффициента истечения сопла от шероховатости проточной части ($7 * 10^{-5} \div 10^{-4}$)

График на рис.1 свидетельствует о том, что даже весьма незначительное изменение шероховатости (от $k=7 * 10^{-5}$ до $k=10^{-4}$) при числах $Re > 10^5$ приводит к ощутимым изменениям величины коэффициента истечения. При значении параметра $k=3 * 10^{-4}$ и $Re=10^6$ отклонение от стандартного аналога может составить 2,0%, а при $Re=10^7$ такой же уровень шероховатости поверхности проточной части сопла приводит к отклонению величины α на 5%. На такие же величины изменится и погрешность в измерении расхода, если не учитывать при определении α указанного воздействия. На другом графике рис. 2 показано влияние на величину α шероховатости, изменяющейся в более широких пределах. Предельное значение параметра $k=2 * 10^{-2}$, принятое при расчетах, соответствует состоянию поверхности новых цельнотянутых стальных труб. Как видно, из графика, изменение параметра k от 0 (гидравлически гладкий режим) до $2 * 10^{-2}$ при $Re=10^7$ приводит к изменению величины коэффициента истечения на 15%, при $Re=10^6$ на 5,5%, а при $Re=10^4$ на 2,5%.

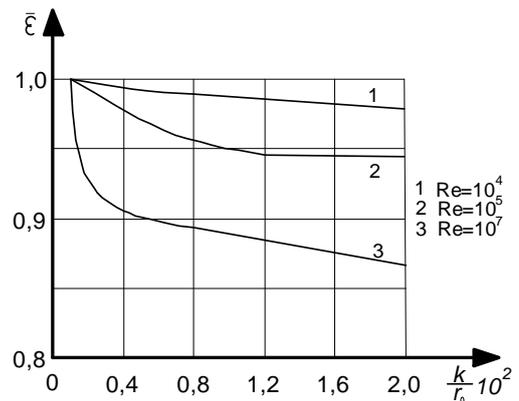


Рис. 2 - Относительное изменение коэффициента истечения расходомерного сопла под влиянием изменяющейся относительной шероховатости его рабочей поверхности

При проектировании и эксплуатации образцовых средств измерения с этим фактом, очевидно нельзя не считаться.

Литература

1. Фафурин В.А. и др. Анализ параметров численных методов при расчете метрологических характеристик расходомеров на базе стандартной диафрагмы / В.А. Фафурин, В.В. Фелелов, И.А. Яценко // Вестник Казан. технол. ун-та - 2011., №23.-С.136-141.
2. Ившин В.П. Расчет расхода газожидкостной смеси в горизонтальном трубопроводе / В.П. Ившин, М.Ю.

- Перухин// Вестник Казан. технол. ун-та -2011.-Т.14, №18.-С.164-168.
3. Кузьмин В.В. и др. Трансформация значений коэффициентов истечения расходомерных сопел под воздействием турбулизации потоков контролируемых сред /В.В. Кузьмин, А.А. Гайнуллина, Р.Р. Галямов, Р.К. Нургалиев, А.В. Чупаев// Вестник Казан. технол. ун-та - 2013., №1.-С.76-79.
 4. ГОСТ 8.586.1-2005 Измерение расхода и количества жидкостей и газов с помощью стандартных сужающих устройств. М.: Стандартиформ 2006.
 5. Фафурин А.В. и др. Современные методы и средства измерений расхода газа / А.В.Фафурин. - М.: ВНИИКИ издательство «Стандартов», 1977. - 71 с.
 6. Кузьмин В.В. и др. Турбулентный пограничный слой в начальном участке трубы с шероховатыми стенками / В.В. Кузьмин. «ПМТФ». - № 5. - 1981. – С. 109 – 116.

© **А. А. Гайнуллина** - асс. каф. САУТП КНИТУ, alinagainullina@rambler.ru; **Р.Р. Галямов** - ст. препод. той же кафедры; **В. В. Кузьмин** – канд. техн. наук, доц. той же кафедры; **А. В. Чупаев** – канд. техн. наук, доц. той же кафедры.