

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

ВЛИЯНИЕ ГЕОМЕТРИИ ПРОТОЧНОЙ ЧАСТИ РАСХОДОМЕРНОГО СОПЛА НА ВЕЛИЧИНУ КОЭФФИЦИЕНТА ИСТЕЧЕНИЯ

Ключевые слова: продольный градиент давления, коэффициент истечения, расходомерные сопла.

В данной статье, на основании анализа особенностей течения в проточной части расходомерного сопла, дается количественная оценка влияния фактора продольного градиента давления на величину коэффициента истечения.

Keywords: longitudinal pressure gradient, discharge coefficient, flow nozzles.

In this paper, by analyzing features of the flow in the flow tube flowmeter nozzle, a quantitative assessment of the impact factor of longitudinal pressure gradient on the value of coefficient of discharge.

Расходомеры, принцип работы которых основан на методе переменного перепада давления в настоящее время являются весьма 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 [4].

Поэтому 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 геометрии проточной части расходомерного сопла на коэффициент истечения сужающего устройства.

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, чувствительная к изменению кинематической структуры потока и к изменениям локального коэффициента трения.

Величина коэффициента истечения расходомерного сужающего устройства, определяемая формулой (1), является переменной, зависящей не только от параметров потока во входном сечении и не только от внешних возмущающих воздействий, но и от геометрической формы проточной части преобразователя расхода.

Сужение потока при прохождении через расходомерное сопло сопровождается увеличением средней скорости и обуславливает продольный отрицательный градиент статического давления.

Эффект продольного градиента, характеризуемый параметром λ , зависит от геометрии проточной части, а его влияние на коэффициент трения (и через него на кинематические и интегральные параметры пограничного слоя в контрольном сечении преобразователя) может быть учтено введением в расчетную схему функции ψ_λ :

$$\psi_\lambda = \left(\frac{\lambda|1-\omega|}{\sqrt{C_{f0}/2} \cdot F} \right)^2, \quad (2)$$

$$\text{где } F = \int_{\zeta_1}^1 \sqrt{\frac{\bar{\tau}}{\bar{\tau}_0}} \cdot \frac{d\zeta}{\zeta} \quad (3)$$

Подставив в (3) выражение для распределения касательных напряжений в ускоренных потоках, получаем:

$$F = \ln \left| \frac{(\sqrt{3}-\sqrt{1+S})(\sqrt{1+2\zeta_1}+\sqrt{1+S\zeta_1})}{(\sqrt{3/2S}-\sqrt{1+S})(\sqrt{3/2(1+2\zeta_1)}+\sqrt{1+S\zeta_1})} \right| + \sqrt{\frac{S}{2}} \ln \left| \frac{(\sqrt{3/2S}+\sqrt{1+S})(\sqrt{3/2(1+2\zeta_1)}-\sqrt{1+S\zeta_1})}{(\sqrt{3/2S}-\sqrt{1+S})(\sqrt{3/2(1+2\zeta_1)}+\sqrt{1+S\zeta_1})} \right| \quad (4)$$

$$\text{где } S = 2 + \frac{\lambda_0}{\psi_\lambda};$$

$$\lambda_0 = -\frac{1}{2} \cdot \frac{2}{C_f} \cdot \frac{\delta}{r_0} \cdot \frac{\bar{r}_0}{W_0} \cdot \frac{dW_0}{dX} \quad (5)$$

λ_0 - параметр продольного градиента давления;

$$\frac{dW_0}{dX} = \frac{4H}{Re_0^2} \frac{dRe^{**}}{dX} + \frac{4Re^{**}}{Re_0^2} \frac{dH}{dX} - \frac{2W_0}{r_0} \frac{d\bar{r}_0}{dX} \quad (6)$$

$\frac{dW_0}{dX}$ - изменение скорости в центральной части сопла по ходу движения потока.

Зависимость для параметров на внешней границе ламинарного подслоя ω_1 и ζ_1 с учетом (5) могут быть представлены в следующем виде:

$$\omega_1 = Re^{**} \frac{\delta}{\delta^{**}} \frac{C_{f0}}{\psi_\lambda} \zeta_1 \left(1 + \frac{\lambda_0}{\psi_\lambda} \frac{\zeta_1}{2} \right), \quad (7)$$

$$\zeta_1 = \eta_1 \left(\operatorname{Re}^{**} \frac{\delta}{\delta^{**}} \sqrt{\frac{C_{f0}}{2} \psi_\lambda \left(1 + \frac{\lambda_0}{\psi_\lambda} \frac{\zeta_1}{2} \right)^{-1}} \right)^{-1} \quad (8)$$

Входящая в (7) и (8) относительная толщина потери импульса при известном профиле скорости определяется выражением:

$$\frac{\delta^{**}}{\delta} = \int_0^1 \omega(1-\omega) \left(1 - \zeta \frac{\delta}{r_0} \right) d\zeta, \quad (9)$$

а профиль скоростей:

$$\omega_i = 1 - \sqrt{\frac{C_{f0}}{2} \frac{\sqrt{\psi_\lambda}}{\chi}} D_i, \quad (10)$$

$$D_i = \ln \left| \frac{(\sqrt{3} - \sqrt{1-S}) (\sqrt{1+2\zeta_i} + \sqrt{1+S\zeta_i})}{(\sqrt{3} + \sqrt{1+S}) (\sqrt{1+2\zeta_i} - \sqrt{1+S\zeta_i})} \right| + \sqrt{\frac{S}{2}} \ln \left| \frac{(\sqrt{3/2S} + \sqrt{1+S}) (\sqrt{3/2(1+2\zeta_i)} - \sqrt{1+S\zeta_i})}{(\sqrt{3/2S} - \sqrt{1+S}) (\sqrt{3/2(1+2\zeta_i)} + \sqrt{1+S\zeta_i})} \right| \quad (11)$$

И, наконец, относительная толщина пограничного слоя δ/r_0 , необходимая для определения λ_0 по (5), может быть вычислена по формуле:

$$\delta/r_0 = \frac{l_1}{2l_2} - \sqrt{\left(\frac{l_1}{2l_2} \right)^2 - \frac{\delta^{**}}{l_2 r_0}}, \quad (12)$$

где

$$l_1 = \frac{1}{\chi} \sqrt{\frac{C_{f0}}{2}} \left[\frac{1}{2} \sqrt{\frac{S_0}{2}} \left(\frac{2\psi_\lambda}{S_0} - 1 \right) \times \times \ln \left| \frac{(\sqrt{3/2} S_0 + \sqrt{\psi_\lambda + S_0}) (\sqrt{S_0} - \sqrt{2\psi_\lambda})}{(\sqrt{3/2} S_0 - \sqrt{\psi_\lambda + S_0}) (\sqrt{S_0} + \sqrt{2\psi_\lambda})} \right| \right] +, \quad (13)$$

$$+ \frac{1}{2} \cdot 3(\psi_\lambda + S_0) - \frac{1}{2} \sqrt{\psi_\lambda}$$

$$l_2 = \frac{\cos \alpha}{\chi} \sqrt{\frac{C_{f0}}{2}} \times \left[\frac{1}{4} \left(\frac{\psi_\lambda^2}{S_0^2} - \frac{\psi_\lambda}{S_0} + \frac{1}{4} \right) \times \times \frac{3\sqrt{3}(\psi_\lambda + S_0) - \sqrt{\psi_\lambda}}{(1 - 2\psi_\lambda/S_0)} - \frac{1}{8} \sqrt{\frac{S_0}{2}} \left(\frac{\psi_\lambda^2}{S_0^2} + \frac{\psi_\lambda}{S_0} - \frac{3}{4} \right) \times \times \ln \left| \frac{(\sqrt{3/2} S_0 + \sqrt{\psi_\lambda + S_0}) (\sqrt{S_0} + \sqrt{2\psi_\lambda})}{(\sqrt{3/2} S_0 - \sqrt{\psi_\lambda + S_0}) (\sqrt{S_0} + \sqrt{2\psi_\lambda})} \right| \right];$$

$$S_0 = 2\psi_\lambda + \lambda_0 + \psi_\lambda \frac{\delta}{r_0}.$$

Определив значения функции ψ_λ можно вычислить действительное значение локального коэффициента трения C_f в горловине сужающего устройства, имеющего заданную геометрическую форму, а затем из выражения (1) с использованием выражений для δ^{**}/δ и δ/r_0 из [6] определяется величина коэффициента истечения данного преобразователя, характерного для конкретного режима течения контролируемой среды.

На графике рис. 1 показана зависимость величины ψ_λ от параметра λ , характеризующего воздействие формы проточной части преобразователя расхода на контролируемый поток. Эта зависимость представлена для трех различных значений критерия Re величина коэффициента трения в горловине получается различной. Это обстоятельство неизбежно приведет к флуктуации величины коэффициента истечения преобразователя при нестабильном режиме его работы, и его учет может быть причиной появления дополнительных погрешностей измерения.

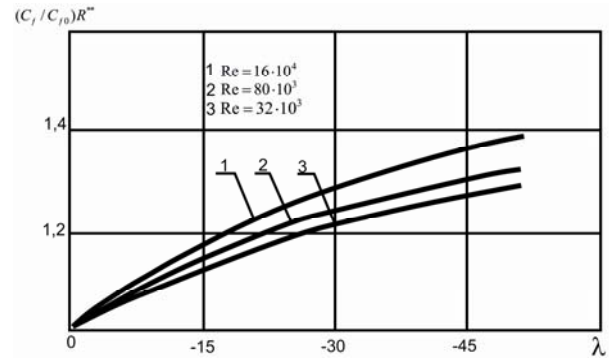


Рис. 1 - Зависимость относительного коэффициента трения от параметра продольного градиента давления

Сказанное иллюстрируется на рис. 2, где представлена зависимость величин коэффициентов истечения расходомерных сопел от параметра продольного градиента при трех различных значениях Re . В то же время, с уды по графику, влияние режима течения (критерия Re) на коэффициент истечения конкретного сопла (при фиксированном λ) проявляется весьма незначительно и составляет в диапазоне Re от $32 \cdot 10^3$ до $16 \cdot 10^4$ не более 0,2 %.

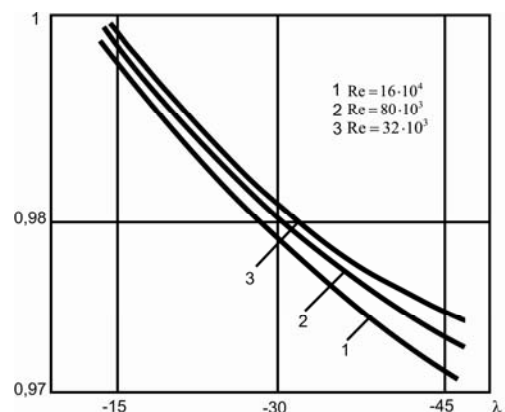


Рис. 2 - Зависимость величин коэффициентов истечения расходомерных сопел от параметра продольного градиента давления при различных значениях Re

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.: Стандартинформ 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. Фафурин А.В. Интегральные характеристики турбулентного пограничного слоя при наличии продольного градиента давления / А.В. Фафурин; «Труды КАИ». – Казань. – С. 51-60.
7. Фафурин А.В. Влияние турбулентности внешнего потока на закон трения в пограничном слое / А.В. Фафурин. ИВУЗ, «Авиационная техника». - 1978. - № 1. – С. 81 -85.

© 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.