

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

ТРАНСФОРМАЦИЯ ЗНАЧЕНИЙ КОЭФФИЦИЕНТОВ ИСТЕЧЕНИЯ РАСХОДОМЕРНЫХ СОПЕЛ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ТУРБУЛИЗАЦИИ ПОТОКОВ КОНТРОЛИРУЕМЫХ СРЕД

Ключевые слова: турбулентность, коэффициент истечения, расходомерные сопла.

В статье представлены результаты исследования влияния различной степени турбулизации потоков контролируемых сред на метрологические характеристики расходомерных сопел. Установлено, в частности, что изменение параметра Tu в процессе работы расходомера от 0 до 10% может привести к дополнительной погрешности в измерении расхода порядка 10%.

Keywords: turbulence, discharge coefficient, flow nozzles.

The results of studies of the effect of varying degrees of turbulence flow-controlled media on the metrological characteristics of the flow nozzles. Established, in particular, that the change in the parameter Tu in the process flowmeter from 0 to 10% could bring in an additional error in the measurement of flow rate of about 10%.

Расходомеры переменного перепада давления в настоящее время являются популярными и хорошо изученными средствами измерения расхода жидких и газообразных сред [1,2]. Однако, наряду с достоинствами 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 неизомеричность и турбулизация потока, шероховатость стенок канала, геометрия сужающего устройства и т.п. [3].

В связи с вышесказанным, 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 рассматривается влияние фактора турбулизации потоков контролируемых сред на коэффициент истечения сужающего устройства.

Согласно положениям теории пограничного слоя коэффициент истечения расходомерного сопла может быть представлена выражением [4]

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

где δ^*/r_0 - толщина вытеснения пограничного слоя в горловине сопла, чувствительная к изменению кинематической структуры потока и к изменениям локального коэффициента трения.

Последние достижения в области исследования пристенных турбулентных течений [5] показывают, что на величины локальных коэффициентов трения в пограничных слоях, а следовательно на коэффициенты истечения расходомерных сопел (согласно (1)) существенное влияние оказывает изменение степени турбулизации во внешнем по отношению к пограничному слою потоке.

Учет влияния данного возмущающего воздействия на величину коэффициента истечения

расходомерного сопла может быть осуществлен путем введения в выражение для закона трения соответствующей корректировочной функции ψ_ε .

Согласно [4]:

$$\tau_w - \tau_\delta = \rho \left(l \frac{\partial W_x}{\partial y} \right)^2, \quad (2)$$

а выражение для относительного коэффициента трения при изотермическом обтекании непроницаемой поверхности может быть представлена в следующем виде:

$$\psi_\varepsilon = \left(\frac{1 - \omega_1}{1 - \omega_{1,0}} \cdot \frac{\ln \zeta_{1,0}}{\int_{\zeta_1}^1 \frac{\sqrt{\bar{\tau}_w - \bar{\tau}_\delta}}{\bar{\tau}_0} \cdot \frac{d\zeta}{\zeta}} \right)^2 \quad (3)$$

$$\text{Здесь} \quad \bar{\tau}_\Sigma = \frac{\tau_\Sigma}{\tau_w}; \quad \bar{\tau}_\delta = \frac{\tau_\delta}{\tau_w};$$

$$\tau_w = \frac{C_f}{2} \rho_0 w_0^2; \quad \chi = 0,4; \quad l = \chi y \sqrt{\bar{\tau}_0}; \quad \zeta = \frac{y}{\delta};$$

$$\omega = \frac{W_x}{W_0}; \quad \omega_1, \omega_{1,0}, \zeta_1, \zeta_{1,0} - \text{относительные}$$

скорость и толщина ламинарного подслоя в рассматриваемых 1 и стандартных условиях 0; C_f - локальный коэффициент трения.

Использование зависимости (3) предполагает наличие известных функциональных связей, определяющих воздействие турбулентности потока за внешней границей пограничного слоя на распределение скоростей по его толщине, на толщину ламинарного подслоя и на профиль касательных напряжений.

В практике параметрических методов исследования турбулентного пограничного слоя утвердилось направление, связанное с аппроксимацией поля касательных напряжений. При этом используются два вида

аппроксимационных зависимостей. Первый (в форме кубической параболы) применяется в случае замедленных во времени и пространстве потоков, второй (в форме степенного) – для ускоренных потоков.

Граничные условия в общем случае при анизотропной турбулентности во внешнем потоке можно представить так:

$$\begin{aligned} \zeta_1 = 0, \bar{\tau}_\Sigma = 1, \frac{\partial \bar{\tau}_\Sigma}{\partial \zeta} &= \left(\frac{\partial \bar{\tau}_\Sigma}{\partial \zeta} \right)_w = \bar{\tau}'_w; \\ \zeta_1 = 1, \bar{\tau}_\Sigma = \bar{\tau}_\delta, \left(\frac{\partial \bar{\tau}_\Sigma}{\partial \zeta} \right)_\delta &= \bar{\tau}'_\delta. \end{aligned} \quad (4)$$

Аппроксимационный полином (для случая замедленных потоков) согласно [6] имеет вид:

$$\bar{\tau}_\Sigma = a + b\zeta + c\zeta^2 + d\zeta^3 \quad (5)$$

Определив из условий (4) коэффициенты полинома, получаем:

$$\bar{\tau}_\Sigma = 1 + (\bar{\tau}_\delta \cdot 3 - 3 - \bar{\tau}'_\delta)\zeta^2 + (2 - 2\bar{\tau}_\delta + \bar{\tau}'_\delta) \quad (6)$$

При анизотропной турбулентности во внешнем потоке $\bar{\tau}'_\delta = 0$. Тогда выражение (5) упрощается и принимает следующий вид:

$$\bar{\tau}_\Sigma = 1 - 3\zeta^2 + 2\zeta^3 + 3\bar{\tau}_\delta\zeta^2 \left(1 - \frac{2}{3}\zeta \right) \quad (7)$$

Выражение (7) для распределение касательных напряжений по толщине пограничного слоя, учитывающее влияние турбулентности, отличается от выражения (5), которое указанного влияния не учитывает, присутствием дополнительного члена в первой части:

$$\Delta \bar{\tau} = \bar{\tau}_\Sigma - \bar{\tau}_0 = 3\bar{\tau}_\delta\zeta^2 \left(1 - \frac{2}{3}\zeta \right), \quad (8)$$

$$\bar{\tau}_0 = 1 - 3\zeta^2 + 2\zeta^3 \quad (9)$$

Т.к. величина ζ относительна и изменяется в пределах от нуля до единицы, то правая часть выражения (8) остается всегда положительной. Это говорит о том, что касательные напряжения в турбулентном потоке с повышением уравнения турбулентности возрастает. Профиль касательных напряжений при этом становится более заполненным.

В работе [7] на основе анализа обширного экспериментального материала установлено, что параметр Tu , характеризующий уровень турбулентности в потоке, связан с относительной величиной касательных напряжений на внешней границе пограничного слоя $\bar{\tau}_\delta$ следующим приближенным состоянием:

$$\bar{\tau}_\delta = 4Tu, \quad (10)$$

$$Tu = \frac{\sqrt{\bar{W}_x'^2}}{W_0} \quad (11)$$

На рис.1 представлены результаты расчета отклонения величин касательных напряжений обусловленного влиянием различных уровней турбулентности внешнего потока. Анализ графика позволяет сделать вывод, что при уровне внешней

турбулентности менее 20% ее влияние на величины касательных напряжений и коэффициентов трения проявляется весьма слабо; отклонение указанных параметров находится, очевидно, в пределах точности их экспериментального определения.

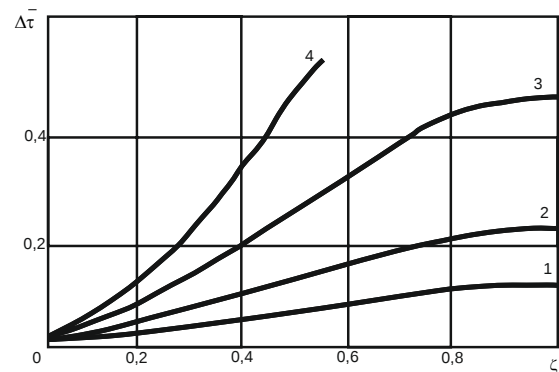


Рис. 1 - Влияние турбулентности внешнего потока на профиль касательных напряжений в пограничном слое: 1) $Tu - 0,031$; 2) $- 0,0625$; 3) $- 0,125$; 4) $- 0,2$

Их сказанного следует, что и на величину коэффициента расхода сужающего устройства изменение уровня турбулентности в указанных пределах (т.е. $Tu < 2\%$) существенного влияния не оказывает.

Относительная толщина ламинарного подслоя ζ_1 и скорость на его внешней границе ω_1 , необходимые для вычисления значения функции определяется в данном случае [8] по следующим формулам:

$$\zeta_1 = \eta_1 \left[\text{Re}^{**} \frac{\delta}{\delta^{**}} \sqrt{\left[\frac{C_f}{2} \Psi_\varepsilon (1 - \bar{\tau}_\delta) \right]^{-1}} \right]^{-1}, \quad (12)$$

$$\omega_1 = \text{Re}^{**} \frac{\delta}{\delta^{**}} \frac{C_f}{2} \Psi_\varepsilon \zeta_1 (1 - \bar{\tau}_\delta) \quad (13)$$

Что же касается параметра η_1 (называемого критерием устойчивости ламинарного подслоя), который входит в (12), то его в функции турбулентности внешнего потока в настоящее время определить не представляется возможным. Однако, результаты работ [5], [7] и [9] показывают, что в диапазоне Tu от 0 до 0,08 величина этого критерия остается практически неизменной, равной значению, которое он имеет при стандартных условиях обтекания.

Но при более высоких уровнях турбулентности зависимость $\eta_1 = f(Tu)$ начинает проявляться весьма ощутимо: при уровне $Tu = 24\%$ критерий η_1 , достигает уже 86 единиц.

На рис.2 представлен график зависимости коэффициента трения и параметра η_1 от турбулентности внешнего потока. График зависимости от уровня турбулентности происходит весьма интенсивности в диапазоне $0 < Tu < 0,1$. При Tu

около 0,1 (10%) интенсивность изменения C_f заметно ослабевает, и значение коэффициента трения приближается к некоторому предельному стабилизированному значению. Возмущения, поступающие в пограничный слой со стороны внешнего турбулентного ядра, приводит к заметному изменению параметров на границе ламинарного подслоя.

Используя алгоритмы расчета приведенные в работах [10,11], а также систему уравнений (11) – (13) рассчитывается относительная величина коэффициента трения, необходимая для определения величин коэффициента расхода.

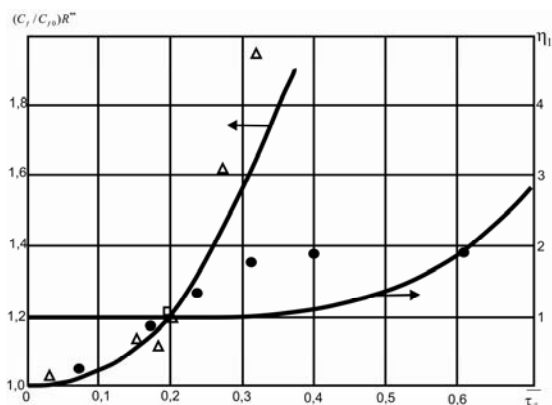


Рис. 2 - Зависимость коэффициента трения и величины η_1 от параметра турбулентности внешнего потока. 1) (C_f / C_{f0}) ; 2) η_1 . Точки – опыты работ [5], [7]

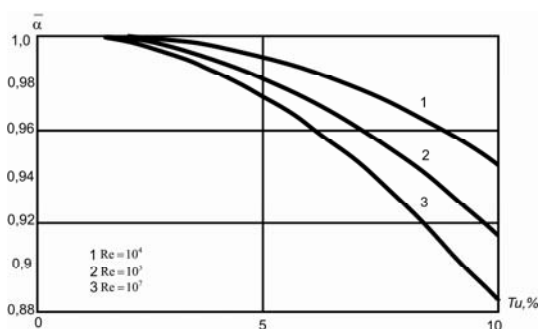


Рис. 3 - Влияние изменения уровня турбулентности потока на входе в расходомерное сопло на величину его коэффициента расхода

На графике рис. 3 показано влияние изменения уровня турбулентности потока на входе в расходомерное сопло на величину его

коэффициента расхода для трех различных значений критерия Re . График показывает, что изменение параметра Tu в процессе работы расходомера от 0 до 10% приводит к изменению величины коэффициента расхода до 10% при $Re=10^7$ и до 4% при $Re=10^4$.

Приведенные данные указывают на необходимость либо снижать тем или иным путем уровень турбулентности потока, поступающего с преобразователя расхода, не менее чем до двух процентов, либо, если это невозможно, стремиться к тому, что бы значения параметра при градуировке расходомера и в условиях его эксплуатации поддерживались примерно одинаковыми.

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. ГОСТ 8.586.1-2005 Измерение расхода и количества жидкостей и газов с помощью стандартных сужающих устройств. М.: Стандартинформ 2006.
4. Фафурин А.В. и др. Современные методы и средства измерений расхода газа / А.В.Фафурин. - М.: ВНИИКИ издательство «Стандартов», 1977. - 71 с.
5. Пристенное турбулентное течение. «Труды XVII Сибирского теплофизического семинара» / под ред. С.С. Кутателадзе. Новосибирск, 1975. – 250 с.
6. Фафурин А.В. Влияние турбулентности внешнего потока на закон трения в пограничном слое / А.В. Фафурин. ИВУЗ, «Авиационная техника». - 1978. - № 1. - С. 81 -85.
7. Денч М.В. Техническая газодинамика / М.В. Денч. - М: «Энергия», 1974. – 260 с..
8. Леонтьев А.И. и др. Нестационарный турбулентный пограничный слой в начальном участке трубы / А.И. Леонтьев. «ИФЖ». – 1973. - № 3, т. XXV. – С. 389-402.
9. Кутаталадзе С.С., Леонтьев А.Н. Турбулентный пограничный слой сжимаемого газа / С.С. Кутаталадзе. - Новосибирск: изд-во СО АН СССР, 1962. - 180 с.
10. Кузьмин В.В. и др. Турбулентный пограничный слой в начальном участке трубы с шероховатыми стенками / В.В. Кузьмин. «ПМТФ». - № 5. - 1981. – С. 109 – 116.
11. Фафурин А.В. Влияние турбулентности внешнего потока на закон трения в пограничном слое / А.В. Фафурин. ИВУЗ, «Авиационная техника». - 1978. -№ 1.-С. 81-85.