

М. Л. Шустрова, А. Д. Байгимиров, И. М. Аминев,
А. В. Красавин

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НАЧАЛЬНЫХ УСЛОВИЙ ТЕЧЕНИЯ НА КОЭФФИЦИЕНТ РАСХОДА СОПЕЛ

Ключевые слова: коэффициент расхода, предвключенный участок, расходомерное сопло, входной конфузор.

В статье приведены результаты аналитического и экспериментального исследования коэффициентов расхода сопел трех различных типоразмеров при наличии предвключенного участка гидродинамической стабилизации и его отсутствии. Показано, что условия во входном сечении сопла имеют существенное влияние на профиль скоростей в выходном его сечении, и, как следствие, на величину коэффициента расхода.

Keywords: discharge coefficient, upstream piping section, flow-measuring nozzle, inlet konfuzor.

This paper contains results of analytic and experimental research of a discharge coefficient of nozzles with preincluded site of hydrodynamic stabilization and without it. It is shown that conditions in the entrance section of a nozzle have essential influences on the velocity profile in its output section, and, as a result, on the discharge coefficient of nozzle.

Введение

Расходомеры переменного перепада давления в течение уже долгого времени занимают одно важнейших место на рынке средств измерения расхода. поскольку они являются основным типом расходомеров для магистральных трубопроводов, что определяет их большую коммерческую значимость. В качестве первичных преобразователей расхода в данном типе приборов используются диафрагмы и сопла.

Точность измерения методом переменного перепада давления зависит от многих факторов, в числе которых корректность определения коэффициента расхода, представляющего собой отношение действительного расхода среды к его теоретическому значению.

Калибровка средств измерения расхода в настоящее время может проводиться как при наличии участка гидродинамической стабилизации, так и без предвключенного участка [1,2], т.е. при отклонении условий калибровки от условий использования сужающего устройства. Так же часто авторы не разделяют данные эксперименты на отдельные категории, а результаты их могут сводиться в единые таблицы. Поэтому анализ влияния начальных условий на метрологические характеристики преобразователей расхода является весьма актуальной задачей.

Аналитический расчет

В основе математической модели, использованной для аналитического исследования коэффициента расхода α сопел, лежат уравнения движения и сохранения импульса в интегральной форме, с использованием замыкающих связей в виде законов относительного соответствия Кутателадзе-Леонтьева [3] и зависимостей для интегральных толщин. Расчеты проведены для каналов с отношением площадей выходного и входного сечения как 0.25, 0.5 и 0.75. Профиль образующей рассматриваемых в данной работе сопел определяется как [4]

$$\bar{r}(X) = \sqrt{m} \cosh \left[\frac{2(X - 0.5\sqrt{m} \operatorname{arccosh}(1/\sqrt{m}))}{\sqrt{m}} \right] \quad (1)$$

а их относительная длина - как

$$\bar{\ell} = 0.5\sqrt{m} \operatorname{arccosh}(1/\sqrt{m}) \quad (2)$$

где $\bar{r}(X) = r_i / r_{ex}$, $X = x_i / 2r_{ex}$, $\bar{\ell} = L_{сопла} / 2r_{ex}$, $m = (r_{вых} / r_{ex})^2$ - модуль сужающего устройства.

Расчет произведен для следующих условий потока во входном сечении сужающего устройства:

- 1) Профиль скоростей равномерный, пограничный слой не сформирован, интегральные толщины раны нулю – данная ситуация характерна для забора среды из больших объемов
- 2) Полностью развитое течение на входе в сопло: пограничный слой занимает все сечение канала, профиль скоростей имеет логарифмический вид. Такое распределение параметров имеет место при течении в соплах, установленных на измерительном трубопроводе. Длина прямого предвключенного участка трубопровода при этом, в соответствии с исследованиями [5], должна составлять не менее 41 калибра.

Результаты расчетов показывают, что характер эволюции степени деформации профиля скоростей во многом зависит как от формы образующей канала и его модуля, так и от режима течения и условий на входе сужающего устройства. Линиями на рис.1 приведены результаты аналитических исследований для турбулентного течения без начального участка при входном $Re=10^5$ в соплах указанной формы, а также в нормальных соплах [6], а на рис.2 – при его наличии.

При течении в конфузорах без участка гидродинамической стабилизации характер изменения коэффициента расхода имеет общие тенденции как для ламинарного [7], так и для турбулентного режима течения. Начинаясь с единицы на входе, в силу равномерности профиля скоростей во входном сечении канала, он уменьшается в результате формирования нарастающего пограничного слоя. Однако значительные значения продольного градиента давления подавляют рост его толщины.

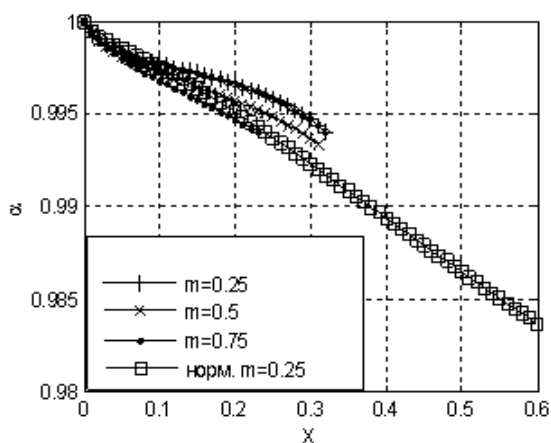


Рис. 1 – Изменение степени равномерности профиля скоростей по длине канала без участка гидродинамической стабилизации

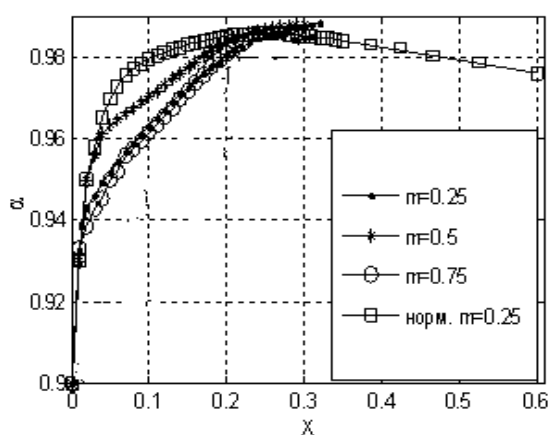


Рис. 2 – Изменение степени равномерности профиля скоростей по длине канала при начальном участке длиной более 40 калибров

Расчеты показывают, что при ламинарном режиме [7] величина α большей степени подвержена влиянию начальных условий, в результате чего значения α в отсутствие начального участка разнятся на 5-30% превышают значения аналогичного показателя при сформированном течении на входе, разброс значений α увеличивается с увеличением модуля устройства. Для турбулентного течения данное расхождение находится в пределах 0,5-4%, также увеличиваясь с ростом модуля устройства и уменьшаясь с увеличением числа Рейнольдса входного потока. Следует отметить, что при Re входного потока более $2 \cdot 10^6$ влияние условий входного потока на коэффициент расхода находится в пределах 0,5%.

При течении в соплах и наличии предвключенного участка, в свою очередь, профиль скоростей на входе сформирован, и величина α определяется его деформацией, и соответственно имеет различные значения для ламинарного и турбулентного режимов. По мере прохождения потока по сужающемуся каналу по действием отрицательного продольного градиента давления пограничный слой становится тоньше, кинематическая структура становится более однородной, а величина α возрастает к выходному сечению. Однако дополнительное удлинение конфузورного канала не приводит к дальнейше-

му повышению коэффициента расхода. На цилиндрических удлиняющих участках влияние продольного градиента давления отсутствует, т.к. он пропорционален кривизне профиля, а, значит, снова нарастает пограничный слой. Профиль скоростей деформируется в большей степени, и значение α уменьшается, как можно видеть на графиках, построенных для нормальных конфузоров.

Экспериментальные исследования

Определение коэффициента расхода сужающих устройств при отсутствии начального участка трубопровода было произведено на первичном государственном эталоне расхода газа ВНИИР [1]. Методика проведения измерений и обработки информации приведены в [2]. В качестве экспериментальных сопел были использованы разработанные в работе [4] сужающие устройства с соотношением площадей выходного и входного сечений как 0.25, 0.5 и 0.75 и диаметром выходного сечения 12.5 мм. Ввиду технической необходимости изготовленные в соответствии с (1) и (2) сопла модулей 0.5 и 0.75 приобрели цилиндрические удлиняющие участки на выходе длиной 0.5 и 0.79 калибра соответственно.

Экспериментальные исследования коэффициента расхода сопел при наличии начального участка гидродинамической стабилизации с длиной, обеспечивающей полностью сформированное течение на входе в сужающее устройство, были проведены на установке ЭУ-2, модифицированной посредством крепления перед соплом участка гидродинамической стабилизации. Результаты проведенных экспериментов приведены на рис.3.

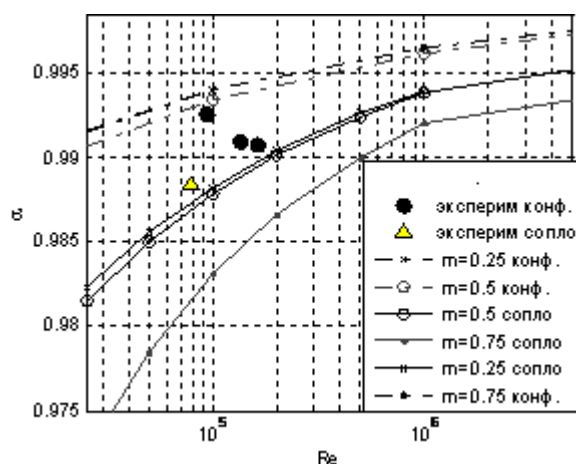


Рис. 3 – Зависимость коэффициента расхода от числа Рейнольдса входного потока: сопло - при наличии начального участка необходимой длины, конфузор – при его отсутствии

Рис 3 наглядно иллюстрирует разницу между значениями коэффициентов расхода при наличии (сплошные линии) и отсутствии (пунктирные линии) начального участка. Сопоставление экспериментальных данных с расчетными значениями коэффициентов расхода показал достаточную близость экспериментальных значений к α , полученным в результате проведения математического эксперимента, в случае совпадения условий для расче-

тов и эксперимента (сопло модуля 0,25) расхождение составило 0.23%. Расхождение теоретических расчетов с экспериментальными данными при течении без начального участка для устройств модулей 0,25 0,5, 0,75 составило 0.137, 0.23 и 0,32%.

В целом тенденция пространственного расположения точек $\alpha(Re, m)$, полученных на ЭУ-2, повторяет эксперимент на первичном государственном эталоне: по мере увеличения модуля α уменьшается, противоположно тенденции, выявленной при расчетах. Объясняется это наличием в конструкции сопел модулей 0.5 и 0.75 цилиндрического участка и потерь на трение в нем.

Как расчетные, так и экспериментальные результаты, полученные в работе, показывают, что значения α при равномерном профиле скоростей на входе конфузора (т.е. при отсутствии начального участка) на 1-4% превышают аналогичные значения для случая полностью сформированного течения во входном сечении измерительного преобразователя. Не учет этого фактора при расчете метрологических характеристик может создать существенный вклад в погрешность определения расхода среды.

Выводы

Результаты проведенных исследований доказывают существенное влияние начальных условий течения в конфузурных каналах на их метрологические характеристики, особенно в области малых и средних расходов, при $Re < 2 \cdot 10^6$. Это связано с различным характером изменения профиля скоростей по длине каналов в зависимости от условий на входе. Указанные факты доказывают необходимость проведения калибровок сужающих устройств в условиях, соответствующих условиям эксплуатации, а также описания условий эксперимента при приведе-

нии величины коэффициента расхода сужающего устройства.

Кроме того, результаты проведенных исследований наглядно демонстрируют влияние цилиндрических участков, стоящих в продолжении конфузурных каналов, на коэффициент расхода: чем больше длина цилиндрического участка, тем более уменьшается α . Это связано с нарастанием пограничного слоя, характерным прямым участкам трубы.

Литература

1. МК 256798-8-03-2009. Методика калибровки эталонных критических сопел при атмосферном давлении на исходной эталонной установке Государственного первичного эталона единиц объемного и массового расхода газа ГЭТ 118-2006. – Казань: ФГУП ВНИИР, 2009. – 22 с
2. Шустрова, М.Л. Калибровка сопел на образцовой установке. //Вестник Казан. технол. ун-та, — 2011. — №19. — С. 225-229.
3. Кутателадзе С.С., Леонтьев А.И. Турбулентный пограничный слой сжимаемого газа. — Новосибирск: Изд. СО АН СССР, 1962. – 180 с.
4. Шустрова, М.Л. Оптимизация профиля расходомерного сопла/М.Л.Шустрова// Метрология. — 2013. — №6 — С.21-31.
5. Ибрагимов М.Х., Субботин В.И., Бобков В.П. и др. Структура турбулентного потока и механизм теплообмена в каналах. — М.:Атомиздат, 1978 – 296 с.
6. ГОСТ 8.586.3-2005 - Государственная система обеспечения единства измерений. Измерение расхода и количества жидкостей и газов с помощью стандартных сужающих устройств. Часть 3. Сопла и сопла Вентури. Технические требования. – М.: Стандартинформ, 2007 – 33с.
7. Фафурин, А.В. Газодинамические характеристики входных конфузоров.// А.В.Фафурин, Р.Р.Тагиров, М.Л.Шустрова //Вестник Казан. технол. ун-та – 2012.- №8.- С. 323-326.

© М. Л. Шустрова - ст. препод. каф. АССОИ КНИТУ, shu.ma@bk.ru; А. Д. Байтмиров – магистрант той же кафедры; И. М. Аминев – магистрант той же кафедры; А. В. Красавин - науч. сотр. НИО-13 ФГУП «ВНИИР».