

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] (1) а их относительная длина - как (2) где L , d - модуль сужающего устройства. Расчет произведен для следующих условий потока во входном сечении сужающего устройства: 1) Профиль скоростей равномерный, пограничный слой не сформирован, интегральные толщины равны 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 $Re=105$ 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 рассогласование 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 под действием отрицательного продольного градиента давления пограничный слой становится тоньше, кинематическая структура становится более однородной, а величина α возрастает к выходному сечению. Однако дополнительное удлинение конфузорного канала не приводит к дальнейшему 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 показало достаточную близость экспериментальных значений к α , полученным в результате проведения математического эксперимента, в случае совпадения условий для расчетов 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 конфузорных каналах на их метрологические характеристики, особенно в области малых и средних расходов, при $Re \geq 106$. 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 приведении величины коэффициента расхода сужающего устройства. Кроме того, результаты проведенных исследований наглядно демонстрируют влияние цилиндрических участков, стоящих в продолжении конфузорных каналов, на коэффициент расхода: чем больше длина цилиндрического участка, тем более уменьшается α . Это связано с нарастанием пограничного слоя, характерным прямым участком трубы.